



Atık Malzeme Olarak Uçucu Kül ve Andezit Tozu İçeren PVA Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin Basınç Dayanımının Tahmininde Yanıt Yüzey Metodolojisinin Kullanılması

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 10.07.2023

Kabul/Accepted: 18.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

Utilization of Response Surface Methodology for Predicting the Compressive Strength of PVA Fiber-Reinforced Cementitious Composites Containing Fly Ash and Andesite Powder as Waste Materials

Şükrü ÖZKAN^{*}, Hakan CEYLAN

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Isparta, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Bu çalışmada çimento esaslı kompozit üretiminde kullanılan atık andezit tozu (AAT) ikamesinin kompozit malzemenin dayanım değerlerine etkisi araştırılmış ve edilen veriler yanıt yüzey yöntemi (YYM) metoduyla modellenerek deneysel veriler ile uyumu incelenmiştir. Çimento esaslı karışımların üretilmesinde AAT, çimento ile ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 olmak üzere 6 farklı oranda ikame edilmiştir. Ayrıca basınç dayanımı üzerine kür süresinin etkisi 90 gün sonunda incelenmiştir. Çimento ve AAT ikame oranları YYM için ana girdi verilerini oluştururken 90 günlük basınç dayanımı değerleri yanıt verilerini oluşturmuştur. YYM ile yapılan basınç dayanımı tahmininden elde edilen veriler ile laboratuvar koşullarında elde edilen deneysel veriler kıyaslandığında aralarındaki uyumun %95'lik bir belirleme katsayısı ile iyi derecede olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca karışımlarda kullanılan %5 ikame oranı, diğer ikame oranları arasında daha yüksek dayanım değerleri elde edilmesini sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Andezit, Atık, Basınç dayanımı, Çimento esaslı kompozit, Yanıt yüzey metodu.

Abstract

In this study, the effect of waste andesite dust (WAD) substitution used in cementitious composite production on the strength values of composite material was investigated and the data were modeled by surface response methodology (RSM) and their compatibility with experimental data was analyzed. In the production of cementitious mixtures, WAD was substituted with cement at six different ratios as 5%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30% by weight. In addition, the effect of curing times on compressive strength was investigated at the age of 90-days. While the cement and WAD replacement rates constituted the main input data for the RSM, the 90-days compressive strength values constituted the output data. When the data obtained from the compressive strength estimation conducted by RSM and the experimental data obtained under laboratory conditions were compared, it was determined that the compatibility between them was good with a 95% coefficient of determination. In addition, the 5% substitution rate used in the mixtures provided higher strength values among other substitution rates.

Keywords Andesite; Waste, Compressive strength, Cementitious composite, Response surface methodology

1. Giriş

Hızlı ekonomik büyüme, nüfus artışı ve değişen iklim şartları; kaynak kıtlığı ile ilgili sorunların büyümesine yol açmaktadır. Bu nedenle, ulusların kendi aralarında yaptıkları kapsamlı küresel işbirliği çalışmaları, düşük karbonlu sürdürülebilir kalkınmayı desteklemek amacıyla gelişerek devam etmektedir. Ancak inşaat sektörünün kirletici bir sektör olarak dâhil olmadığı bir çalışma, karbon emisyonunu azaltma stratejilerini amacına ulaştırmada yetersiz bırakacaktır (Yazdani et al. 2021). Küresel çapta karbon emisyonunun artışında inşaat sektörünün payı oldukça fazladır (Yazdani et al. 2021). Bu

pay, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerdeki yapı malzemelerine olan benzeri görülmemiş talep karşısında her geçen gün daha da artmaktadır (Ghafourian et al. 2021). Çimento talebi inşaat sektörünün durumuyla doğrudan ilişkili olup, yatırımlar arttıkça çimento talebi de artmaktadır. Başta çimento olmak üzere yapı malzemelerinin üretimi ve tüketimi önemli miktarda karbondioksit (CO₂) yaymaktadır (Mirmozaffari et al. 2020). Küresel ölçekte ise insanların neden olduğu tüm CO₂ emisyonlarının %8'i (yaklaşık 2.2 milyar ton) çimento üretiminden kaynaklanmaktadır. Betonla ilişkilendirilen CO₂ emisyonlarının da %60-80'i çimento

üretiminden gelmektedir (Ariöz et al. 2012). Bu nedenle sera gazı emisyonlarını önemli ölçüde azaltmak için inşaat sektöründeki çevreye zararlı etkisi bilinen geleneksel malzeme üretimi yerine geri dönüştürülmüş (Adesina et al. 2021, Alyousef et al. 2021, Gao et al. 2022, Signorini et al. 2022, Valente et al. 2022) veya doğal kaynaklardan elde edilmiş (Davraz et al. 2018, Prošek et al. 2020, Danish et al. 2021, Quedou et al. 2021, Thapa et al. 2021) malzemelerin kullanıldığı çevre dostu üretim süreçlerini tercih etmek fayda sağlayacaktır (Shahmansouri et al. 2022). İnşaat sektöründen kaynaklı küresel ısınmanın etkilerini azaltma üzerine yapılan çalışma sayısı dikkate alındığında bu alanda çevreci ve sürdürülebilir malzemelerin kullanımına ilişkin yapılan araştırmaların sayısının daha az olduğu söylenebilir.

CaCO₃'ten CO₂ türetilmesi yoluyla CaO oluşumu olarak adlandırılan kalsinasyon süreci, çimento üretiminden kaynaklı CO₂ emisyonunun yaklaşık yarısını oluştururken diğer yarısını üretim süreci boyunca kullanılan enerjiden kaynaklı dolaylı emisyonlar oluşturmaktadır (Yang et al. 2013, Ávalos-Rendón et al. 2018). Portland çimentosunun yapı endüstrisinde en fazla kullanılan bağlayıcı olmasında, dünya üzerinde her yıl yaklaşık 4 milyar ton Portland çimentosu üretilmesi etkili olmaktadır (Pacheco-Torgal et al. 2012). Önümüzdeki 40 yıl için yapılan tahminlere göre bu miktarın 6 milyar tonu bulacağı tahmin edilmektedir (Samimi et al. 2017). Bütün bu tüketim miktarları göz önüne alındığında, nitelikli alternatif hammadde kullanımıyla çimento kompozisyonu içinde bulunan klinker oranının düşürülmesinin, çevresel sorunların bir miktar azaltılmasına ve inşaat sektörünün daha sürdürülebilir duruma getirilmesine yardımcı olması beklenmektedir. Portland çimentosu klinkerinin oranının azaltılmasında; uçucu kül (Deng et al. 2022), silis dumanı (SF) (Ghavami et al. 2021), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBS) (Amani et al. 2021), pirinç kabuğu külü (Zhang et al. 2020) gibi puzolanik özelliğe sahip tamamlayıcı malzemeler kullanılarak betondan kaynaklı CO₂'yi ve malzeme maliyetini azaltmak mümkün olabilmektedir. Andezit tozu daha önceki yapılan çalışmalarda puzolanik özellik gösteren bir atık malzeme olduğu belirlenmiştir (Davraz et al. 2018). Puzolanik özellikteki mineral katkıları, reolojik özelliklerde iyileşmeye ve dayanım gelişmesine katkıda bulunmakla birlikte çimento esaslı malzemelerin servis ömrü boyunca maruz kalacağı dış etkenlere karşı dayanıklı olmasını da desteklemektedir (Quedou et al. 2021). Davraz vd., AAT'nin beton üretiminde bağlayıcı bir malzeme olarak kullanılabilirliğini dolayısıyla inşaat endüstrisi için değerlendirilebilecek bir atık malzeme özelliği taşıdığını

belirtmiştir (Davraz et al. 2018). Bu sayede AAT'nin atık olarak değerlendirilebilmesi ile malzeme üretim maliyeti yönünden tasarruf sağlanabileceği gibi ekolojik, temiz ve atıkların bertaraf edildiği bir çevreye de katkı sağlanabilecektir. AAT'nin çeşitli malzeme türlerinde kullanımı üzerine literatür araştırması yapıldığında AAT'nin çimento (Hamidi et al. 2013), geleneksel beton (Sogancioglu et al. 2013; Labbaci et al. 2017; Davraz et al. 2018; Kawabata et al. 2019), geopolimer kompozit (Çelikten 2021) üretimi gibi çeşitli malzeme türlerinde kullanıldığı ve bu çalışmaların genellikle malzemelerin mekanik özellikleri üzerine yoğunlaştığı görülmüştür. Literatürde AAT üzerine yapılan çalışmalardan da anlaşılacağı üzere, AAT'nin çimento esaslı kompozit üretiminde kullanımına ilişkin herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. AAT'nin çimento esaslı kompozitlerin üretimi için geri kazanılma imkânı ve AAT ikameli çimento esaslı kompozitlerin çeşitli özelliklerinin araştırılması hala çalışma bekleyen konular arasındadır.

Tasarım kodlarının çoğunda basınç dayanımı başta olmak üzere diğer mekanik özelliklerin laboratuvarda araştırılması zaman ve maliyet gerektirmektedir. Şimdiye kadar birçok çalışmada beton özellikleri ile ilgili tahmin yöntemleri geliştirmeye odaklanılmasına rağmen her beton türü için bu yöntemleri kullanmak her zaman doğru sonuçlar vermemektedir. Regresyona dayalı tahmin yöntemlerinin kullanılması mevcut yöntemlerin esasını oluşturmaktadır. Daha güvenilir ve daha doğru sonuçlar elde etmek için yanıt yüzey metodu (YYM) gibi yöntemlerin kullanılması ile mühendislik dâhil birçok alanda umut verici gelişmeler kaydedilebilmektedir (Zeyad et al. 2020, Abdulkadir et al. 2021, Adamu et al. 2021, Ray et al. 2021). YYM, az sayıda testle bağımsız ve bağımlı yanıtlar arasındaki matematiksel bağlantıyı incelemek için kullanılan güçlü bir sayısal parametre aracıdır. Bir veya daha fazla yanıtın birçok bağımsız değişkenden etkilendiği durumlarda bu yöntem yararlıdır (Abdulkadir et al. 2021, Kalivaradhan et al. 2022). Birçok araştırmacı beton özelliklerini modellemekte kapsamlı olarak farklı yöntemleri kullansa da her beton türü için optimum bir yöntemin varlığından söz etmek doğru olmaz. Sonuç olarak malzeme özelliklerini tahmin etmede daha yenilikçi ve verimli tekniklerin geliştirilmesi çabaları, bilim dünyasının geleceğinde var olmayı sürdürecektir.

AAT ikameli çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımını tahmin etmek ve bu sonuçları laboratuvar ortamında elde edilen gerçek verilerle karşılaştırmak bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır. Bu amaç doğrultusunda basınç dayanımlarını yüksek doğrulukla

tahmin etmek için bir yanıt yüzey yöntemi modeli geliştirilmiştir. Deneysel çalışmalar yapılarak elde edilen veriler, model geliştirmekte kullanılmıştır. Üretilen farklı AAT ikame oranlarına ve farklı ağırlıktaki bileşen oranlarına sahip çimento esaslı kompozit karışımların basınç dayanımı testleri 90 günlük kür süresi sonunda gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, altı farklı karışım için üretilen numunelerin deneysel çalışmalar sonucu elde edilen basınç dayanımı değerlerine ait bir veri seti tabanı oluşturulmuştur. Ayrıca parametrik ve duyarlık analizleri, basınç dayanımlarını tahmin etmekte kullanılan farklı girdi değişkenlerinin etkinliğini sağlamak amacıyla yapılmıştır. Bu çalışmanın bulguları, inşaat sektöründe CO₂ emisyonunun azaltılmasına yardımcı olabilecek, geleneksel betona alternatif olarak çevre dostu bir betonun türünün geliştirilmesine katkıda bulunabilecektir.

Son zamanlarda, YYM modelleme tekniği, sorunları gerçekçi bir şekilde değerlendirme ve çözme aracı olarak araştırmacılar arasında giderek daha popüler hale gelmiştir. YYM, matematiksel ve istatistiksel yaklaşımı kullanan bir deney tasarımı yöntemidir. Bağımsız değişkenler olarak adlandırılan girdi parametreleri arasındaki etkileşimin yanıt (bağımlı değişken) olarak adlandırılan sonuç parametresi üzerindeki etkisinin tasarlanmasını ve ardından belirlenmesini gerektirir (Mohammed et al. 2011). Çimento esaslı karışım özelliklerinin modellenmesi ve optimizasyonu için YYM kullanımı yeni değildir. Lye vd. (Lye et al.), karbon fiber donatılı polimer (KFDP) katkılı Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerin (ECC) bağ davranışını modellemek ve optimize etmek için YYM'yi kullanmıştır. Çalışmada, bu modellere dayalı olarak, KFDP güçlendirmenin en iyi çözümünün %2 PVA fiber ve 5 kat KFDP kullanmak olduğu tespit edilmiştir. Alyamac vd. (Alyamac et al. 2017) çalışmalarında YYM kullanarak maksimum miktarda mermer tozu içeren eko-verimli, çevre dostu ve işlenebilir kendiliğinden yerleşen bir beton geliştirmeyi amaçlamışlar. Bu doğrultuda, mümkün olan maksimum miktarda mermer tozu ile eko-verimli bir kendiliğinden yerleşen karışım tasarımı elde etmek için çok amaçlı bir optimizasyon tekniği kullanmışlardır. Sonuç olarak, su-çimento oranı 0.55'ten düşük ve mermer tozu-çimento oranı 0.6'ya kadar olan eko-verimli bir kendiliğinden yerleşen beton elde edilmiştir. Zhou vd. (Zhou et al. 2022) desülfürizasyon-alçı esaslı çimento esaslı kompozit malzemeler üzerinde yaptıkları çalışmalarında YYM'nun Box-Behnken tasarımına dayanarak, çeşitli değişkenlerin etkilerini ve değişkenler arasındaki etkileşimleri bu kompozitlerin mekanik özellikleri ve su direnci üzerindeki etkileşimleri değerlendirmek için regresyon modelleri

oluşturmuşlardır. Sonuçlar, desülfürizasyon- alçı bazlı çimento esaslı kompozit malzemelerin mukavemetinin ve su direncinin, tek faktörlerin yanı sıra faktör çiftlerinin etkileşimlerinden etkilendiğini göstermiştir. Adamu vd. (Adamu et al. 2021) plastik atıkların (PA) ve grafen nanoplateletlerin (GNP) yüksek hacimli uçucu kül (YHUK) betonunun özellikleri üzerindeki etkisi araştırdıkları çalışmalarında, YYM'yi deney, modelleme ve optimizasyon tasarlamak için kullanmışlardır. Çalışmada geliştirilen modellerin, yüksek düzeyde korelasyon ile anlamlı olduğu bulunmuştur. Ayrıca, optimize edilmiş karışım, kaba agreganın %15.3'ü PA kullanılarak, çimentonun %6.07'si YHUK kullanılarak ve GNP'nin %0.22 oranında eklenmesiyle elde edilmiş ve deneysel olarak %5'ten daha az hatayla doğrulanmıştır.

2. Materyal ve metod

2.1 Materyal

Çalışma kapsamında Isparta (Türkiye) Göltaş Çimento Fabrikası tarafından üretilen ve TS EN 197-1 (TS EN 197-1 2012) standart gereklerine uygun olan CEM I 42.5R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun özgül ağırlığı 3.06 g/cm³, Blaine özgül yüzey alanı 3250 cm²/g'dır. Çimentoya ait kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 1'de sunulmuştur. ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C-sınıflarına ayrılırlar (ASTM C618-19 2019). Bu çalışmada kullanılmak üzere F-sınıfı uçucu kül, Sugözü (Adana ili Türkiye) Termik santralinden temin edilmiştir. Sugözü uçucu külünün özgül ağırlığı 2.31 g/cm³, Blaine özgül yüzeyi ise 2900 cm²/g'dır. Numunelerin üretimde agrega olarak ortalama tane büyüklüğü 200 µm, özgül ağırlığı 2.60 g/cm³ ve su emme kapasitesi % 0.3 olan ince kuvars kumu kullanılmıştır. Uçucu küle, kuvars kumuna ve AAT ait kimyasal özellikler Çizelge 2'de verilmiştir.

AAT, Türkiye'deki Isparta ilinin andezit işleme tesislerinden temin edilerek deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Andezit taş blokların kesim ve diğer işlemleri sırasında çok fazla atık oluşmaktadır. Andezit taşı kesilirken su ile kesim işlemi yapıldığı için oluşan atıklar çamur şeklinde havuzlarda toplanmaktadır. Güneş ve hava koşullarının etkisiyle bu atıklar zamanla suyunu kaybetmekte ve iş makineleri yardımıyla kazılarak üretim alanı dışında depolanmaktadır (Şekil 1). Üretim sürecinin devam etmesiyle giderek artan bu atıklar toz halinde olduğu için çeşitli şekillerde çevreye zarar vermeye birlikte zamanla miktarın artmasıyla büyüyen atık kütleleri görüntü kirliliğine de sebebiyet vermektedir. Bu atıkların çevreye zarar vermeden üretime kazandırılması atık yönetim bakımından büyük önem taşımaktadır.

Çizelge 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan Portland çimentosunun özellikleri

Portland çimentosunun kimyasal kompozisyonu		TS EN 197-1	Portland çimentosu fiziksel özellikleri		TS EN 197-1
Bileşenler	(%)				
CaO	63.65		Hacim genişmesi (mm)	0.3	<10
SiO ₂	20.21		İncelik (90 µ, %)	0.10	
Al ₂ O ₃	4.11		İncelik (200 µ, %)	1.10	
Fe ₂ O ₃	3.44		Blaine yüzey alanı (cm ² /g)	3340	>160
MgO	1.61	<5	Priz başlangıç süresi (dk.)	144	>60
SO ₃	2.75	<3.5	Priz bitiş süresi (dk.)	240	<600
Cl ⁻	0.004	<0.10			
K ₂ O	0.48		Özgül ağırlık (g/cm ³)	3.06	
Na ₂ O	0.12				
Serbest CaO	0.25				
Kızdırma kaybı	3.13	<5			
Çözünmeyen kalıntı	0.50	<5			
Portland çimentosu mekanik özellikleri (MPa)					TS EN 197-1
7 günlük eğilme dayanımı (MPa)		5.8	7 günlük basınç dayanımı (MPa)		39.3
28 günlük eğilme dayanımı (MPa)		7.2	28 günlük basınç dayanımı (MPa)		50.6
					>42.5

Çizelge 2. Uçucu kül, kuvars kumu ve AAT'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri

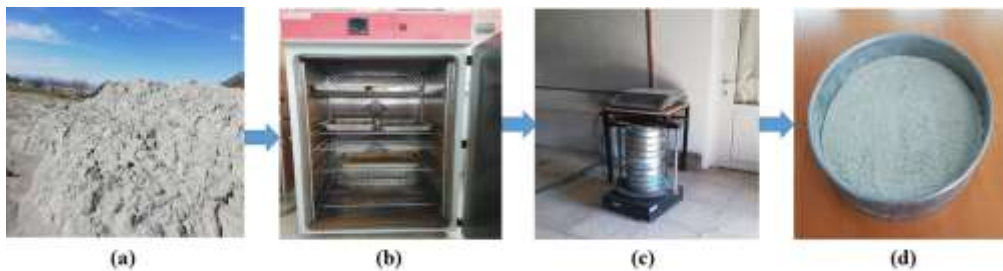
Kimyasal kompozisyon (%)	Uçucu kül	Kuvars kumu	AAT	TS EN 450-1
CaO	1.16	0.02	4.52	
SiO ₂	61.72	99.79	56.33	
Al ₂ O ₃	20.13	0.06	18.20	
Fe ₂ O ₃	7.46	0.02	5.61	
MgO	1.80	0.01	1.61	≤4.0
SO ₃	0.22	-	0.16	≤3.0
K ₂ O	1.88	0.01	6.51	
Na ₂ O (Alkalies)	2.57	0.02	4.69	
Serbest CaO	0.071	-	-	≤1.0
Cl ⁻	0.015	-	-	≤0.10
Kızdırma kaybı	2.99	0.07	2.37	≤5.0
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	89.31	99.87	85.07	≥70
28 günlük aktivite indeksi (%)	81.9		76.5	≥75
İncelik, ≥45µm (%)	16.4		14.03	≤40

Bu amaçla çalışmada üretim tesislerinden temin edilen AAT, nemini kaybetmesi için 105 °C etüvde 24 saat boyunca kurutulmuştur. Kabaca yabancı maddelerden arıtılmış AAT, daha sonra elek boyutu 75 µm olan elekten

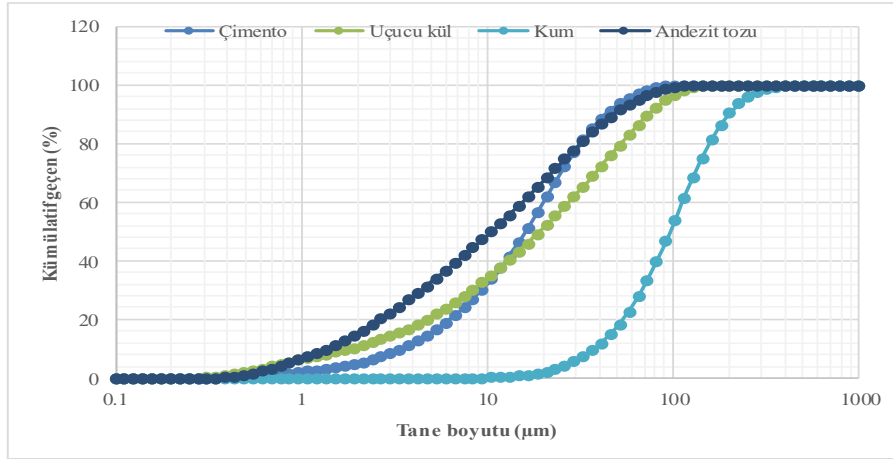
BS EN 933-1:201(BS EN 933-1:2012. 2012) standardına göre elenmiştir. 75 µm boyutlu elekten geçen malzemeler karışımlarda çimento ile belirlenen oranlarda ikame edilerek kullanılmıştır. AAT'nin çimento esaslı malzemelerde ikame malzemesi olarak kullanımı için yapılan işlemleri gösteren süreç Şekil 2'de gösterilmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin üretimde kullanılan toz bileşenlerin boyut dağılımını belirlemek için elek analizi yapılmıştır. Analiz sonucu oluşan dağılım eğrileri Şekil 3'de sunulmuştur.



Şekil 1. Üretim süreci sonunda atık olarak ortaya çıkan AAT'nin doğada oluşturduğu durum



Şekil 2. AAT'nin çimento esaslı kompozit üretimine kazandırılması süreci, (a) Doğada zamanla oluşan atık kütle, (b) Nemli durumdaki AAT'nin etüvde kurutulması, (c) AAT'nin elekler yardımıyla elenmesi, (d) 75 µm elekten geçen AAT'nin deneysel çalışmalara hazır hale gelmiş hali



Şekil 3. Çimento esaslı kompozit üretiminde kullanılan toz bileşenlerin tane boyut dağılımları



Şekil 4. Çalışmada kullanılan PVA lifleri

Çalışmada ECC'ler için özel olarak geliştirilen PVA lifleri kullanılmıştır. Bu liflerin özelliği, yüzeyinin ağırlıkça %1.2 oranında özel bir hidrofobik (su itici) yağ ile kaplı olmasıdır. Çalışmada kullanılan PVA lifine ait fiziksel, mekanik ve geometrik özellikler ile ilgili veriler Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Çalışmada kullanılan liflere ait fiziksel, mekanik ve geometrik bazı özellikler

Lif türü	Çekme dayanımı (MPa)	Çap (µm)	Uzunluk (mm)	Elastik modül (GPa)	Uzama (%)	Özgül ağırlık (g/cm ³)
PVA	1620	39	8	42.8	6.0	1.3

2.1 Numunelerin hazırlanması ve karıştırma işlemi

Çalışma kapsamında PVA lif miktarı sabit olmak üzere (Hacimce %2) yapılan deneme karışımları neticesinde en uygun oranlar; su/toplam bağlayıcı malzeme(S/BM) oranı 0.26 ve uçucu kül/çimento oranları 1.20 ve kum/bağlayıcı madde (K/BM) oranı 0.36 olarak hesaplanmıştır. Üretilen referans ve çimento esaslı karışımlarda kullanılan PVA lif miktarı, mikro-mekanik tabanlı tasarım sonucu geliştirilen ve literatürde M45 olarak bilinen (Li 2002) karışım tasarımına uygun olarak ağırlıkça 26 kg/m³ (hacimce %2) olarak belirlenmiştir.

Çalışmada AAT, çimentonun ikamesi olarak ağırlıkça %5, 10, 15, 20, 25 ve 30 oranlarında kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Hazırlanan AAT ikameli karışımların bir sonraki bölümde anlatıldığı üzere 90 günlük basınç dayanımlarının test edilebilmesi için her bir karışım için altı adet 50 mm³'lük küp numuneler hazırlanmıştır. AAT ikameli çimento esaslı kompozitlerin üretilmesi için hazırlanan karışım oranları Çizelge 4'de sunulmuştur.

20 litre kapasiteli planet tipi mikserde toz karışım bileşenleri (çimento, uçucu kül ve kuvars kumu) düşük devirde yaklaşık 3 dakika kuru olarak karıştırılmıştır. Aynı bir kaptaki su ve SA karıştırılarak SA'nın reaksiyon süresi başlatılmıştır. Daha sonra bu sıvı karışım kuru karışıma eklenerek yaklaşık 9 dakikalık bir karıştırma işlemi uygulanmıştır. SA'nın harçları belirlenen hedef yayılma seviyesine getirdiği görüldükten sonra PVA lifler karışıma dâhil edilmiştir. Homojen bir lif dağılımı elde edebilmek amacıyla uygulanan bu ortalama 12 dakikalık karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra hazırlanan harç karışımlar plastik kalıplara yerleştirilmiştir. Yüzeyleri düzeltilen numunelerin nem kaybı yaşamaması için üzeri polietilen levhalarla kapatılmış ve 24 saat boyunca oda sıcaklığında muhafaza edilmiştir. Daha sonra, sertleşen harç

numuneler kalıplardan çıkarıldıktan sonra 23 °C ± 2 °C'de 90 gün boyunca kirece doygun suda kürlenmiştir. Tüm çimento esaslı karışımlarda akışkanlaştırıcı miktarını ayarlamak suretiyle işlenebilirlik özelliği iyileştirilmeye çalışılmıştır. Bunun için lifsiz karışımlar için 40 ± 5 cm, lifli karışımlar için 20 ± 5 cm olan hedef yayılma miktarı elde edilinceye kadar akışkanlaştırıcı karışımlara hassas bir şekilde ilave edilmeye devam edilmiştir.

2.3 Deneysel çalışma yöntemleri

2.3.1 Basınç dayanımı

Üretilen çimento esaslı kompozit örneklerin basınç dayanımı deneyleri 2000 kN kapasiteli U test (UTC-4231) basınç test cihazında 2.4 kN/s yükleme hızı alınarak, ASTM C109 (ASTM C109 / C109M-20b 2020) standardına göre 50x50x50 mm'lik küp örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4. AAT ikemeli çimento esaslı malzeme karışım miktarları (Ağırlıkça, kg/m³)

Karışım Kodu	Su/BM ¹			Çimento	AAT	UK	Kum	Su	PVA fiber	SA ²
	(Çimento + UK ³ +AAT)	Kum/BM (Çimento + UK+AAT)	UK/Çimento							
AAT0 (Ref.)	0.26	0.36	1.20	571	-	685	455	331	26	4.90
AAT5	0.26	0.36	1.26	540	28	682	455	331	26	4.95
AAT10	0.26	0.36	1.33	509	51	679	453	329	26	4.95
AAT15	0.26	0.36	1.41	479	85	677	451	328	26	4.95
AAT20	0.26	0.36	1.50	449	112	674	449	327	26	4.95
AAT25	0.26	0.36	1.60	420	140	671	448	326	26	4.95
AAT30	0.26	0.36	1.71	390	167	669	446	324	26	4.95

¹BM: Bağlayıcı malzeme, ²SA: Süperakışkanlaştırıcı, ³UK: Uçucu kül

2.3.2 YYM modelinin geliştirilmesi

Yanıt yüzeyi yöntemi, parametreler ve yanıtlar arasındaki ilişkiyi belirlemek için etkin bir araç olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Bundan başka, geliştirilen model, bireysel parametrelerin etkilerini ve parametrelerin her bir yanıt değişkeni üzerindeki etkileşimini değerlendirmek için ayrıca kullanılabilir. YYM analizi, deneysel serilerin tasarlanması ve deneysel sonuçların yanıtlar şeklinde elde edilmesi, ardından sayısal yanıt yüzey modelinin oluşturulması ve doğruluğunun onaylanması ve son olarak yanıtları tatmin etmek için değişkenlerin optimize edilmesinden oluşur (Alyamac *et al.* 2017). Bu çalışmada, yanıt değişkeni için ikinci dereceden bir model oluşturmak için deneysel verileri içeren bir YYM modeli kullanılmıştır. YYM'nin, yanıt değişkeni için modeli tahmin etme verimliliği, az sayıda deneysel veri noktasıyla sağlam bir model oluşturma, faktörler arasındaki etkileşim derecesini değerlendirme ve optimal yanıt bulma gibi çeşitli avantajları vardır (R. H.Myers 2016).

Bu çalışmada, Design-Expert Stat-Ease-12 yazılımı, çimento esaslı kompozitler için deneysel tasarım, istatistiksel analiz, matematiksel modelleme ve süreç değişkenlerinin optimizasyonunda kullanılmıştır. Çizelge 5'te görüldüğü üzere iki farklı giriş parametresi olarak

çimento ve AAT oranları, yanıt yüzey yönteminin optimizasyonu için başlangıçta belirlenmiştir. Bu değişkenlerin seçilmesinin nedeni, Çimento ve AAT oranının çimento esaslı kompozitlerin dayanımı üzerinde en etkili parametreler olmasıdır. Ayrıca, giriş faktörleri olan çimento ve AAT miktarları ile tepki (90 günlük basınç dayanımı) arasındaki ilişki ve etkileşim tek yönlü varyans analizi (One-way analysis of variance-ANOVA) kullanılarak elde edilmiştir.

Çizelge 5. Yanıt yüzey yönteminin optimizasyonunda kullanılan giriş parametreleri ve seviyeleri

Parametreler	Sembol	Birim	Seviyeler ve kodları		
			-1	0	1
Çimento	A	Kg/m ³	0	390	571
AAT	B	Kg/m ³	0	83.5	167

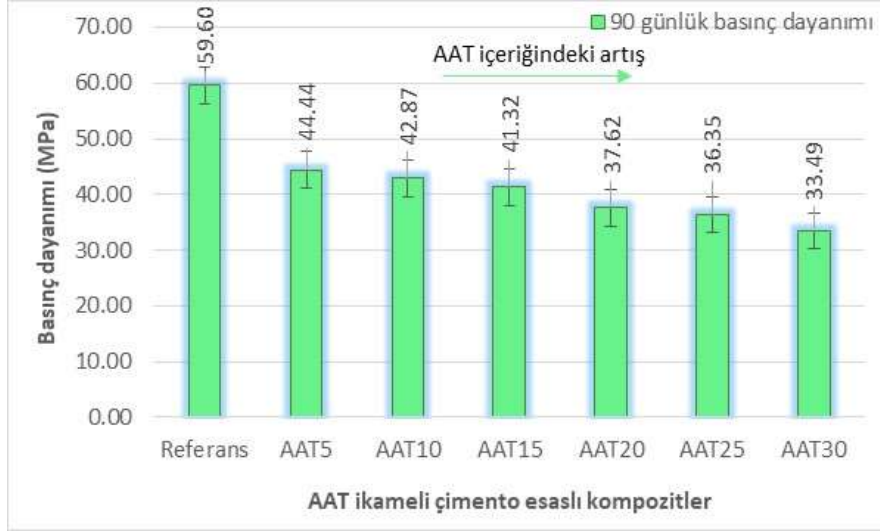
3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Laboratuvar sonuçları

Şekil 5'de çimento ağırlığının ağırlıkça %5, 10, 15, 20, 25 ve 30 oranlarında azaltılıp AAT ile ikamesi ile elde edilen çimento esaslı kompozit karışımlarının referans örneklerle beraber 90 günlük basınç dayanımı sonuçları gösterilmiştir. Karışımlardaki AAT ikame oranı arttıkça basınç dayanımı değerlerinin azaldığı deneysel çalışmalar

sonucunda elde edilen verilerden anlaşılmaktadır. Basınç dayanımı deneyi sonucunda elde edilen AAT ikameli çimento esaslı karışımların basınç dayanımı değerlerinin 90 günlük kür süresi sonunda referans örnekten daha düşük olduğu görülmüştür. 90 günlük örneklerde, AAT5, AAT10, AAT15, AAT20, AAT25 ve AAT30 örnekleri için referans örneğe göre basınç dayanımı değişimleri

sırasıyla %25.44, %28.07, %30.67, %36.89, %39.01 ve %43.81 olarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerden optimum AAT ikame oranının %5 olduğu görülmektedir. Karışımlarda kullanılan uygun ikame oranını %5 olarak kabul ettiğimizde ve karışımları bu oranları dikkate alarak hazırladığımızda 1 m³ karışımda çimentodan yaklaşık olarak 31 kg tasarruf edebileceğimizi hesaplamış oluruz.



Şekil 5. AAT ikameli çimento esaslı kompozitlerin 90 günlük basınç dayanımları

90 günlük örnekler için basınç dayanımı değerleri; kür süresinin ilerlemesi, hidratlanmamış çimento bileşiklerinin sürekli hidrasyonunun ve bağlayıcı reaksiyonlarından kaynaklı ikincil C-S-H oluşumunun etkisiyle 33.49-44.44 MPa arasında değişiklik göstermiştir (Shannag *et al.* 1995; Mindess 2003). Andezit tozu ikame oranının artması ile düşük dayanım elde edilmesi, andezit tozunun puzolanik özelliğinin olmasına rağmen aktif CaO içeriğinin Portland çimentosu ve uçucu küle göre oldukça düşük olması ve bu nedenle bağlayıcılık özelliğinin yetersiz kalması ile ilişkilendirmiştir (Özkan and Ceylan 2022)(Bkz. Çizelge 1 ve Çizelge 2). Ayrıca, 90 günlük basınç dayanımları üzerine, çimento esaslı karışımlarda yüksek miktarda bulunan uçucu külün puzolanik reaksiyonunun olumlu etkisi olmaktadır. Uçucu kül yüksek bir puzolanik aktiviteye sahiptir. Bu nedenle çimentonun hidrasyon işlemi sırasında Ca(OH)₂ ile kolayca reaksiyona girerek çimento özelliği taşıyan bileşiklere dönüşebilmektedir. Sonuç olarak, uçucu kül ile Portland çimentosu karıştırılarak uzun süreli dayanım olumlu yönde etkilenmektedir (Kocak *et al.* 2014).

3.2 YYM ile istatistiksel modelleme

Modelleme aşamasında kuadratik (ikinci dereceden) modelleme kullanılarak deney tasarım planındaki

verilere uygun modelleme yapılmıştır. Kodlanmış faktörler açısından denklem, her bir faktörün belirli seviyeleri için yanıt hakkında tahminlerde bulunmak için kullanılabilir. Varsayılan olarak, faktörlerin yüksek düzeyleri +1 ve düşük düzeyler -1 olarak kodlanır. Kodlanmış denklem, faktör katsayılarını karşılaştırarak faktörlerin göreceli etkisini belirlemek için kullanılır. Kodlanmış faktörler bakımından elde edilen nihai model, Denklem 1'de verilmiştir.

$$BD = 39.09 + 14.02 * A - 0.3059 * B + 0.7945 * AB + 5.03 * A^2 + 1.32 * B^2 \quad (1)$$

Burada; BD: Basınç dayanımı (MPa), A: çimento miktarı (kg/m³), B: AAT miktarı (kg/m³)'dür.

3.2.1 Çimento ve AAT dozajı girdilerine karşı basınç dayanımı tepkisi

Faktörler arasındaki etkileşim ve her parametrenin yanıt üzerindeki etkisi ANOVA kullanılarak analiz edilmiştir. Merkezi kompozit dizaynı-Yanıt yüzey yöntemine (MKD-YYM) dayanan bu çalışmada, bağımsız değişkenlerin (çimento ve AAT dozajı) basınç dayanımı yanıt değişkenine etkileri araştırılmış ve AAT ikameli çimento esaslı karışımlarının basınç dayanımının optimizasyonu ve tahmini gerçekleştirilmiştir. YYM yazılımı ile regresyon

analizinden sonra, AAT ikameli çimento esaslı karışımların 90 günlük basınç dayanımlarını tahmin etmek için uygun bir ikinci dereceden polinom modeli üretilmiştir. Bu çalışma için, ekstra terimlerin anlamlı olduğu ve yazılım tarafından diğer adların kullanılmadığı en yüksek mertebeden polinom temel alınarak model seçilmiştir. Tepki yüzeyi ikinci dereceden basınç dayanımı modeli için ANOVA sonuçları Çizelge 6'da gösterilmiştir.

Çizelge 6. AAT ikameli karışımların basınç dayanımı (yanıt) için ANOVA değerleri

Kaynak	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Ortalama kareler	F-değeri	p-değeri	
Model	1755.05	5	351.01	25.86	<0,0001	Anlamlı
A-Çimento	1572.35	1	1572.35	115.83	<0,0001	
B-AAT	0.7486	1	0.7486	0.0551	0.8211	
AB	2.52	1	2.52	0.1860	0.6792	
A ²	176.28	1	176.28	12.99	0.0087	
B ²	12.19	1	12.19	0.8982	0.3748	
Artık değer	95.02	7	13.57			
Uyum eksikliği	81.19	3	27.06	7.83	0.0377	Anlamlı
Hata	13.83	4	3.46			
Toplam	1850.07	12				

AAT ikameli çimento esaslı karışımların basınç dayanımı tepkisi, <0.0001'den küçük anlamlı bir p değeri ve 25.86 olarak daha yüksek bir F değeri sergilemiştir. Model için p-değerinin < 0.05'ten küçük olması modelin veya model terimlerinin anlamlı olduğunu, 0.10'dan büyük değerler ise model terimlerinin anlamlı olmadığını göstermektedir. Bu durumda A ve A², önemli model terimleridir. Modelin anlamlılığını değerlendirmek için %95 güven aralığı kullanılmıştır. Basınç dayanımı modeli göz önüne alındığında, A (çimento) ve A² anlamlı model terimleridir. A'nın anlamlı olması, bağımsız değişkenin ikinci dereceden etkisinin yanıtları etkilediğini göstermektedir. B, AB ve B² anlamlılık göstermeyen terimler olsa da ANOVA ile elde edilen model terimlerinin hiyerarşisini korumak için modelde tutulurlar. B değişkenleri istatistik olarak anlamlı olmayabilir ancak modelin yanıt çıktısını etkileyen deneysel bir değişkendir. Bu nedenle, istatistiksel olarak önemsiz olsa bile, güçlü bir teorik gerekçeye sahip olan B değişkeninin modelde tutulması teşvik edilir. 25.86 Model F değeri, modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir F değerinin meydana gelme olasılığı sadece % 0.01'dir. Veri girişi veya veri toplanması esnasında oluşan sistem dışı hatalara istatistiksel gürültü denir. İki temel istatistiksel gürültü şekli vardır: hatalar ve artıklar. İstatistiksel bir hata, kesin tutarın doğru cevap olduğu varsayılan

beklenen değerden farklı olan kısmıdır. Bir kalıntı, beklenen sonucun daha geçici bir tahmininin sonucudur. İstatistiksel gürültünün ardındaki genel fikir, belirli bir veri kümesinin zorunlu olarak kesin olmaması ve aynı bilgilerin tekrar toplanması veya hesaplanması durumunda kopyalanamamasıdır (İnt. Kyn.1). Uyum eksikliğinin F-değerinin 7.83 olması modelin anlamlı olduğunu ifade eder. Gürültü nedeniyle bu kadar büyük bir F-değeri eksikliğinin meydana gelme olasılığı sadece% 3.77'dir. Çizelge 7, model doğrulama parametrelerini sunmaktadır. Çizelgeden de görüldüğü üzere model, %94.86'lık çok iyi seviyede belirleme katsayısı (R²) değerine sahiptir. Bu değer, modelin verilere ileri düzeyde uyum sağladığını göstermektedir. Benzer şekilde, modelin uyması için ayarlanan R² ile tahmin edilen R² arasında 0,2'lik bir fark gereklidir. Dolayısıyla, tahmin edilen R² =0.6762, ayarlanmış R² =0.9120'ye yakın değildir; yani fark 0.2'den fazladır. Bu durum, model ve/veya veriler ile ilgili büyük bir blok etkisinin veya olası bir sorunun göstergesi olabilir. Yeterli hassasiyet değeri ise, sinyal-gürültü oranını ölçer. 4'ten büyük bir oran olması arzu edilir. 15.842 oranı, yeterli bir sinyali göstermektedir. Bu, modellerin yanıtları tahmin etmek için yüksek derecede hassasiyete sahip olduğunu gösterir. Varyasyon değerinin düşük olması (%8.57) ise deneysel sonuçların güvenilirliği ve yüksek hassasiyetini göstermektedir. Ayrıca, model için standart sapma değeri (3.68), elde edilen ortalama değerlerden (43.00) oldukça küçüktür bu da varyans analizinin uygunluğunu ve yeterliliğini göstermektedir. Üretilen modelin ortalama ile standart sapması ne kadar küçükse, test verilerine olan varyansı o kadar düşük olur, bu da deney sonuçlarının model için daha az belirsizlik üreteceği anlamına gelmektedir. Yukarıdaki analize dayanarak üretilen modelin, karışımların basınç dayanımı tepkisinin modellenmesi, optimizasyonu ve tahmini için uygun ve etkili olduğu sonucuna varılabilir.

Çizelge 7. Model doğrulama parametreleri

İstatistiksel analiz	Yanıt değeri	Yorum
	Basınç dayanımı (MPa)	
Standart sapma	3.68	İstatistiksel değerlendirme için sonuçlar uygundur
Ortalama	43.00	
Korelasyon katsayısı (R ²)	0.9486	
Düzeltilmiş R ²	0.9120	
Tahmini R ²	0.6762	
Yeterli hassasiyet	15.8418	
Varyans katsayısı (%)	8.57	

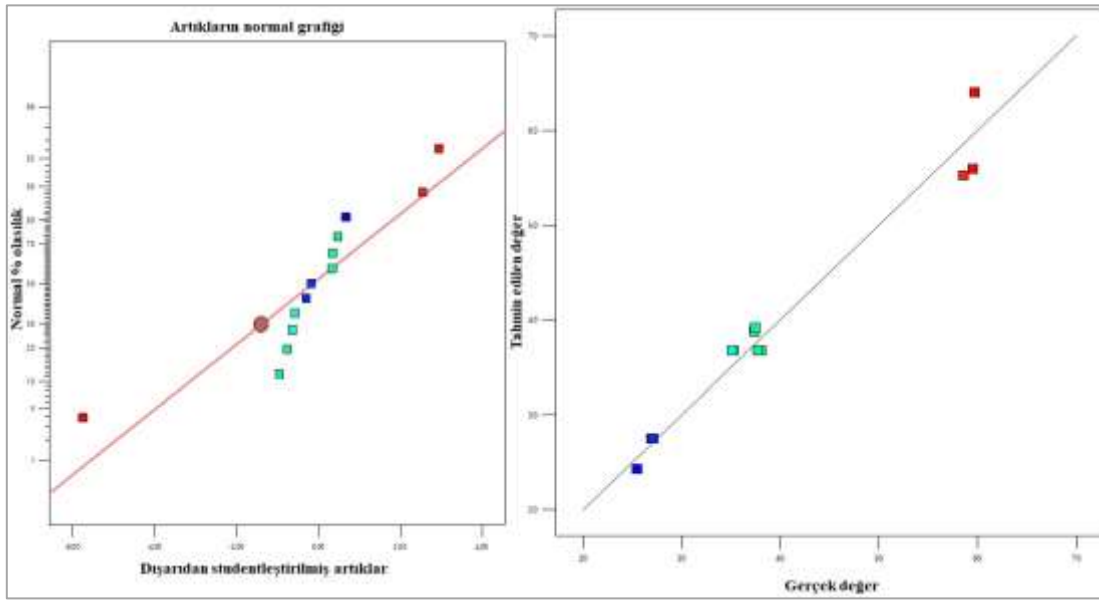
3.2.2 Yanıtlar için tahmini ve gerçek tanı grafikleri

Şekil 6 (a), 90 günlük basınç dayanımı modülünün olasılık grafiğini göstermektedir. Şekilden, veriler eşitlik çizgisi üzerine geldiği için regresyon modellerinin etkinliğini ortaya koyan, artık noktalar ile düz bir çizgi arasında yakın bir uyum gözlemlenmiştir. Şekil 6 (b), modelin uygunluğunu ve doğruluğunu değerlendirmek için kullanılan tahmini ve gerçek laboratuvar bulgularını göstermektedir. 45° çizgisi etrafındaki veri noktalarının simetrik dağılımına göre, rijitlik modülünün gerçek

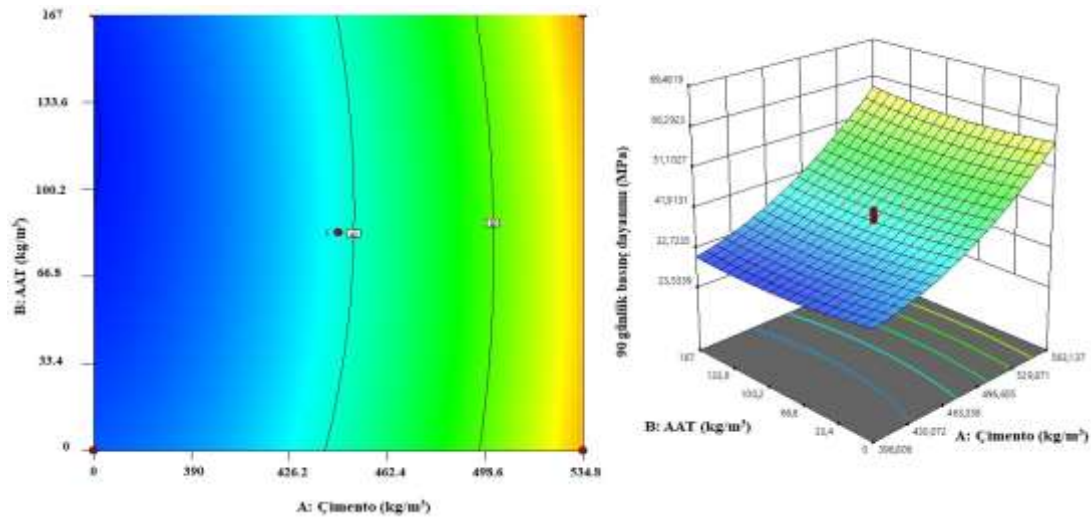
laboratuvar verileriyle eşleşme oranı yüksek olduğundan model tarafından doğru bir şekilde tahmin edilmiştir.

3.2.3 Sinerjik değişkenlerin basınç dayanımı yanıtı üzerindeki etkisi

Faktörler ve yanıtlar arasındaki etkileşimi göstermek ve girdi değişkenlerinin çıktı yanıtı üzerindeki etkisini açıklamak için MKD-YYM'den 2B ve 3B yanıt grafiği konturları oluşturulmuştur. Her model için faktörler (Çimento ve AAT oranı) X ve Y eksenlerine, tepki (90 günlük basınç dayanımı) Z eksenine çizilmiştir.



Şekil 6. Basınç dayanımı model yeterliliği için tanı grafikleri



Şekil 7. (a) AAT ve çimento miktarının 90 günlük basınç dayanımı üzerindeki uyarıcı etkisini gösteren 2-D YYM yüzeyi ve (b) 3-D YYM yüzeyi

Şekil 7 (a ve b), modelin 2B ve 3B yanıt grafiği konturunu göstermektedir ve girdi değişkenleri arasında büyük bir sinerjik etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Model kontur çizgileri, çimento oranı ile AAT oranı arasında

önemli bir etkileşim gösteren yarı eliptik formda bulunmuştur. Kontur grafiğinin rengi, maviden kırmızıya, daha düşükten yükseğe ve daha iyi etkileşim değeri anlamına gelen yanıt değerlerini yansıtmaktadır (Yaro et

al. 2022). Diğer bir ifadeyle grafiklerdeki maviden kırmızıya olan renk değişimi, daha önemli ve anlamlı bir yanıt değeri belirtmektedir (Yaro et al. 2021).

Yanıt yüzeyi çizimi, çimento dozajının AAT dozajına kıyasla 90 günlük basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur; çünkü 90 günlük basınç dayanımı değeri, AAT dozajı arttıkça azalırken, çimento dozajı ile marjinal olarak artmaktadır. Ayrıca, yanıt yüzeyi grafiğinde, en yüksek basınç dayanımı değerine sahip optimal çıktı alanı kırmızımsı-sarı bölge olarak belirtilmiştir. Yanıt yüzeyi grafiğinin canlı mavi bölgesi, basınç dayanımı değeri üzerinde minimum etkiye sahip bir alanı belirtirken, optimum basınç dayanımı bölgesinin yaklaşık 0-50 kg/m³ AAT dozajında ve 515-530 kg/m³ çimento dozajında olduğu gözlenmiştir. Basınç dayanımı değeri, çimento girdi değişken seviyelerinde daha yüksekti. Çimento esaslı karışımlarda daha az miktarlardaki ve silisli yapıya sahip andezit dozajının çimento ile ikamesinin bir sonucu olan daha yüksek çimento içeriğinin, karışımda daha fazla çimento reaktifinin (C₃S, C₂S ve C₃A) bulunması sağlamış olmakta ve dolayısıyla daha fazla çimento hidrasyon ürününün (örn.C-S-H, CH) tetiklenmesi ile dayanım gelişimi desteklenmektedir (Çelikten ve Canbaz 2021). Genel olarak tepki yüzeyi grafiği, Şekil 7'de görüldüğü gibi AAT ikameli çimento esaslı karışımların basınç dayanımı değerinin çimento dozajına kıyasla AAT dozajı değişimlerine daha duyarlı olduğunu göstermiştir. AAT dozajı 0-167 kg/m³ arasında olduğundan, basınç dayanımı değerleri önemli ölçüde azalmıştır. Bununla birlikte, daha düşük AAT dozajlarında, çimento dozajı, karışımların dayanımı üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olmuştur. AAT ikame oranının artması ile düşük dayanım elde edilmesi, AAT'nin puzolanik özelliğinin olmasına rağmen aktif CaO içeriğinin Portland çimentosu ve uçucu küle göre oldukça düşük olması ve bu nedenle bağlayıcılık özelliğinin yetersiz kalması ile ilişkilendirilmiştir (Bkz.Çizelge 1) (Özkan ve Ceylan 2022).

Çok amaçlı optimizasyonda, oluşturulan modelin girdi değerleri olan optimum AAT dozajı ve çimento dozajı, ortaya çıkan tahmin performansını doğrulamak için değerlendirilmeye tabi tutulmuştur. 0 (alt) ile 1 (ideal senaryo) arasındaki sınırlarla istenilirlik olarak adlandırılan ölçeksiz bir değer (d_i), tahmin edilen reaksiyonu analiz ederek ve modelin alt ve üst sınırlarıyla karşılaştırılarak hesaplanır (Mohammed et al. 2018). Değişkenler ve yanıt davranışı için istenen hedefi belirtmek için her rampada bir nokta vardır. Önerilen optimal oranlar üç kez test edilmiş ve ortalama deney

bulguları kullanılmıştır. En uygun tahmin değerleri ile laboratuvar değerleri, hata oranını (hatanın yüzdesini) tahmin etmek için karşılaştırılmıştır. Model tahmin edilebilirliği, Denklem (2)'de gösterildiği gibi mutlak bağlı yüzde hatası (MBYH) kullanılarak değerlendirilmiş ve incelenmiştir.

$$\text{Mutlak Bağlı Yüzde Hatası (\%)} = \left| \frac{\text{deneysel değer} - \text{modele ait değer}}{\text{deneysel değer}} \right| * 100 \quad (2)$$

90 günlük basınç dayanımı için, Çizelge 8, optimizasyonun istenen amaçlarını ve sınırlarını gösterirken, Şekil 8, bağımsız faktörlerin optimal değerlerini ve maksimum tahmin edilebilir tepkileri göstermektedir. Bir başka optimizasyon doğrulama göstergesi olan Şekil 9 ise, 0.536 seviyesine sahip modelin 3 boyutlu istenilirliğini gösterirken, model tarafından optimum çimento ve AAT dozajının sırasıyla 523.53 kg/m³ ve 167 kg/m³ olduğu tahmin edilmiştir. 90 günlük basınç dayanımına ilişkin deneysel ve optimizasyon verileri arasındaki fark birbirine yakın olarak bulunmuştur (%4.04).

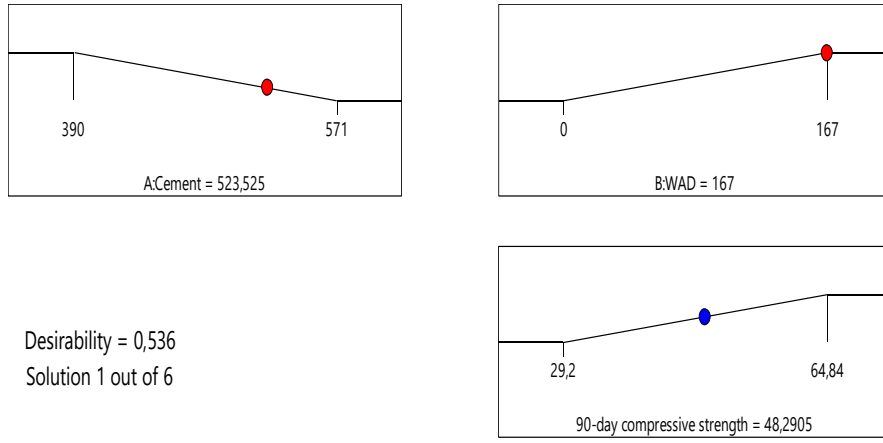
Çizelge 8. 90 günlük basınç dayanımı yanıt optimizasyon kısıtlamaları

Faktörler/Yanıtlar	Alt ve üst limitler	Hedef	Optimizasyon sonuçları	İstenilirlik
Çimento dozajı (kg/m ³)	390-571	Azalt	523.52	0.536 (%53.6)
AAT dozajı (kg/m ³)	0-167	Artır	167.00	
Basınç dayanımı (MPa) (Model)	29.2-64.84	Artır	48.29	
Basınç dayanımı (MPa) (Deneysel)			46.34	
Değişim (%)			4.04	

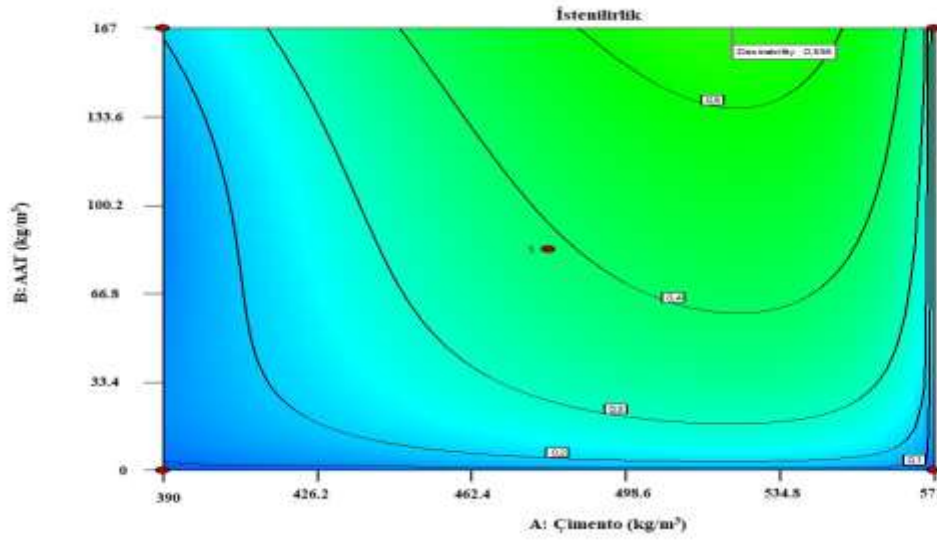
4. Sonuçlar

Bu çalışma, basınç dayanımı tahmininde YJM'yi kullanarak AAT ikameli çimento esaslı kompozitler için çok amaçlı optimizasyonu gerçekleştirmek amacıyla yapılmıştır. Yapılan istatistiksel ve deneysel çalışmalar neticesinde, aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

Yanıt yüzeyi modellerini ve çok amaçlı optimizasyonu gerçekleştirmek için YJM'de çimento ve AAT tozu ikame oranları olmak üzere iki bağımsız değişken girdi faktörleri olarak kabul edilmiştir. Çimento esaslı kompozit numunelerin sertleşmiş özelliği olan 90 günlük basınç dayanımı tek bir yanıt olarak modellenmiş ve optimize edilmiştir.



Şekil 8. 90 günlük basınç dayanımı yanıt optimizasyonu için sayısal rampa



Şekil 9. 90 günlük basınç dayanımı yanıt optimizasyonu için istenilirlik konturu

Yanıtların deneysel sonuçlarından olan bağımsız değişkenler (Çimento: A, AAT: B) arasındaki etkileşim düzeyine bağlı olarak, ikinci dereceden model, basınç dayanımını tahmin etmek için daha uygun bulunmuştur.

Yanıt modelleri, %95 güven aralığında (%5 anlamlılık düzeyi) ANOVA analizine tabi tutulmuş ve dikkate alınan yanıt için yaklaşık %95'lik bir belirleme katsayısı (R^2) ile yüksek düzeyde anlamlılık sergilemiştir.

Model çizimleri (2B kontur ve 3B yanıt yüzeyi diyagramları), değişkenlerin varyasyonlarının ve bunların etkileşimlerinin yanıtlar üzerindeki etkisini görsel olarak göstermiştir. AAT ikame seviyelerindeki bir artışın, yanıt değerlerinde bir azalmaya yol açtığı, çimento ikame seviyelerinde ise bunun tersi bir durum olduğu gözlemlenmiştir.

Çok amaçlı optimizasyon, herhangi bir yanıtta ödün vermeden istenen basınç dayanımı özellikleri elde edebilen değişkenlerin optimal seviyelerini (Çimento:

523.53 kg/m³, AAT: 167 kg/m³) vermiştir. Modeller, yanıtların deneysel ve tahmin edilen değerleri arasında %5'ten daha az hata ile deneysel olarak doğrulanmıştır.

Sertleşmiş durumda çimento miktarındaki artış, 515-530 kg/m³ arasındaki seviyelerde basınç mukavemeti artışı üzerine daha fazla etki yapmaktadır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Şükrü Özkan: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deney, Yazma – orijinal taslak Görseleştirme, Yazma – orijinal taslak, Finans sağlama
Hakan Ceylan: Araştırma, Fikir Sahibi, Doğrulama, Metodoloji, Finans sağlama

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dâhil edilmiştir.

Teşekkür

Yazarlar, AAT temininden dolayı İstem andezit fonolit doğaltaş işleme fabrikasına teşekkür eder.

Kaynaklar

- Abdulkadir, I., Mohammed, B. S., Liew, M. S., Wahab, M. M. A., 2021. Modelling and optimization of the mechanical properties of engineered cementitious composite containing crumb rubber pretreated with graphene oxide using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, **310**, 125259. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125259>
- Adamu, M., Trabanpruek, P., Jongvivatsakul, P., Likitlersuang, S., Iwanami, M., 2021. Mechanical performance and optimization of high-volume fly ash concrete containing plastic wastes and graphene nanoplatelets using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, **308**, 125085. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125085>
- Adesina, A., Das, S., 2021. Sustainable utilization of recycled asphalt as aggregates in engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, **283**, 122727. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122727>
- Alyamac, K. E., Ghafari, E., Ince, R., 2017. Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. *Journal of Cleaner Production*, **144**, 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.156>
- Alyousef, R., Ahmad, W., Ahmad, A., Aslam, F., Joyklad, P., Alabduljabbar, H., 2021. Potential use of recycled plastic and rubber aggregate in cementitious materials for sustainable construction: A review. *Journal of Cleaner Production*, **329**, 129736. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129736>
- Amani, A., Ramezani-pour, A. M., Palassi, M., 2021. Investigation on the sustainable use of electric arc furnace slag aggregates in eco-friendly alkali-activated low fineness slag concrete as a green construction composite. *Journal of Cleaner Production*, **307**, 127257. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127257>
- Ariöz, Ö., Yildirim, K., 2012. Türkiye’de çimento sektöründeki belirsizlikler ve Türk çimento sektörünün SWOT analizi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, **32**, 173-190.
- ASTM C109 / C109M-20b, 2020. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens). West Conshohocken, Philadelphia, 1-12. https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-21
- ASTM C618-19, 2019. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, Philadelphia, 1-5. <https://doi.org/10.1520/C0618-19>
- Ávalos-Rendón, T. L., Chelala, E. A. P., Mendoza Escobedo, C. J., Figueroa, I. A., Lara, V. H., Palacios-Romero, L. M., 2018. Synthesis of belite cements at low temperature from silica fume and natural commercial zeolite. *Materials Science and Engineering: B*, **229**, 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.12.020>
- BS EN 933-1:2012., 2012. *Tests for geometrical properties of aggregates - Determination of particle size distribution. Sieving method*. United States, 1-22. <https://doi.org/10.3403/30241873>
- Çelikten, S., Canbaz, M., 2021. Atık Andezit Ve Mermer Tozunun Çimento Harçlarının Dayanım Özelliklerine Etkisi. *dergipark.org.tr*, **29**, 43–48. <https://doi.org/10.31796/ogummf.709810>
- Çelikten, S., 2021. Mechanical and microstructural properties of waste andesite dust-based geopolymer mortars. *Advanced Powder Technology*, **32**, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.10.011>
- Danish, A., Mosaberpanah, M. A., Salim, M. U., Fediuk, R., Rashid, M. F., Waqas, R. M., 2021. Reusing marble and granite dust as cement replacement in cementitious composites: A review on sustainability benefits and critical challenges. *Journal of Building Engineering*, **44**, 102600. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102600>
- Davraz, M., Ceylan, H., Topçu, İ. B., Uygunoğlu, T., 2018. Pozzolanic effect of andesite waste powder on mechanical properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, **165**, 494–503. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.043>
- Deng, Y., Yan, C., Zhang, J., Yin, L., Liu, S., Yan, Y., 2022. Preparation and mechanical characterization of engineered cementitious composites with high-volume fly ash and waste glass powder. *Journal of Cleaner Production*, **333**, 130222. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130222>
- Gao, D., Lv, M., Pang, Y., Tang, J., Zhang, Y., 2022. Property analysis and mixture design of high ductility cementitious composites with totally recycled fine aggregate based on target strength and strain capacity. *Journal of Cleaner Production*, 130492. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130492>
- Ghafourian, K., Kabirifar, K., Mahdiyar, A., Yazdani, M., Ismail, S., Tam, V. W. Y., 2021. A synthesis of express analytic hierarchy process (EAHP) and partial least squares-structural equations modeling (PLS-SEM) for sustainable construction and demolition waste management assessment: The case of Malaysia. *Recycling*, **6**(4), 73.

- <https://doi.org/10.3390/recycling6040073>
- Ghavami, S., Naseri, H., Jahanbakhsh, H., Moghadas Nejad, F., 2021. The impacts of nano-SiO₂ and silica fume on cement kiln dust treated soil as a sustainable cement-free stabilizer. *Construction and Building Materials*, **285**, 122918. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.12298>
- Hamidi, M., Kacimi, L., Cyr, M., Clastres, P., 2013. Evaluation and improvement of pozzolanic activity of andesite for its use in eco-efficient cement. *Construction and Building Materials*, **47**, 1268–1277. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.013>
- Kaliyavaradhan, S. K., Li, L., Ling, T. C., 2022. Response surface methodology for the optimization of CO₂ uptake using waste concrete powder. *Construction and Building Materials*, **340**, 127758. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127758>
- Kawabata, Y., Dunant, C., Yamada, K., Scrivener, K., 2019. Impact of temperature on expansive behavior of concrete with a highly reactive andesite due to the alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research*, **125**, 105888. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105888>
- Kocak, Y., Nas, S., 2014. The effect of using fly ash on the strength and hydration characteristics of blended cements. *Construction and Building Materials*, **73**, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.048>
- Labbaci, Y., Labbaci, B., Abdelaziz, Y., Mekkaoui, A., Alouani, A., 2017. The use of the volcanic powders as supplementary cementitious materials for environmental-friendly durable concrete. *Construction and Building Materials*, **133**, 468–481. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.088>
- Li, V., 2002. Interface Tailoring for Strain-hardening PVA-ECC. *ACI Materials Journal*, **99**, 463-472. <https://doi.org/10.14359/12325>
- Lye, H., Bashar, M.S., Liew, M., Wahab, M.M.A., 2020. Bond behaviour of CFRP-strengthened ECC using Response Surface Methodology (RSM). *Case Studies in Construction materials*, **12**, e00327. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00327>
- Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. 2003. Concrete. Hoboken: Prentice Hall. 2nd ed., 1-644.
- Mirmozaffari, M., Yazdani, M., Boskabadi, A., Dolatsara, H. A., Kabirifar, K., Golilarz, 2020. A novel machine learning approach combined with optimization models for eco-efficiency evaluation. *Applied Sciences (Switzerland)*, **10(5)**, 1-31. <https://doi.org/10.3390/app10155210>
- Mohammed, B. S., Azmi, N. J., Abdullahi, M., 2011. Evaluation of rubbercrete based on ultrasonic pulse velocity and rebound hammer tests. *Construction and Building Materials*, **25**, 1388–1397. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.004>
- Mohammed, B. S., Khed, V. C., Nuruddin, M. F., 2018. Rubbercrete mixture optimization using response surface methodology. *Journal of Cleaner Production*, **171**, 1605–1621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.102>
- Myers, R. H., Montgomery, D. C. and Anderson-Cook, M., 2016. Response surface methodology process and product optimization using designed experiments. John Wiley & Sons, Ltd, New York, 1-856.
- Özkan, Ş., Ceylan, H., 2022. 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*, **58**, 104959. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104959>
- Pacheco-Torgal, F., Abdollahnejad, Z., Camões, A. F., Jamshidi, M., Ding, Y., 2012. Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cement or an unproven issue? *Construction and Building Materials*, **30**, 400–405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.017>
- Prošek, Z., Nežerka, V., Tesárek, P., 2020. Enhancing cementitious pastes with waste marble sludge. *Construction and Building Materials*, **255**, 119372. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119372>
- Quedou, P. G., Wirquin, E., Bokhoree, C., 2021. Sustainable concrete: Potency of sugarcane bagasse ash as a cementitious material in the construction industry. *Case Studies in Construction Materials*, **14**, e00545. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00545>
- Ray, S., Haque, M., Ahmed, T., Nahin, T. T., 2023. Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) in predicting the compressive and splitting tensile strength of concrete prepared with glass waste and tin (Sn) can fiber. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, **35(3)**, 185-199. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.006>
- Samimi, K., Kamali-Bernard, S., Akbar Maghsoudi, A., Maghsoudi, M., Siad, H., 2017. Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*, **151**, 292–311. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.071>
- Shahmansouri, A. A., Yazdani, M., Hosseini, M., Akbarzadeh Bengar, H., Farrokh Ghatte, H., 2022. The prediction analysis of compressive strength and electrical resistivity of environmentally friendly concrete incorporating natural zeolite using artificial neural network. *Construction and Building Materials*, **317**, 125876.

- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125876>
- Shannag, M. J., Yeginobali, A., 1995. Properties of pastes, mortars and concretes containing natural pozzolan. *Cement and Concrete Research*, **25**, 647–657. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00053-F](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00053-F)
- Signorini, C., Nobili, A., 2022. Durability of fibre-reinforced cementitious composites (FRCC) including recycled synthetic fibres and rubber aggregates. *Applications in Engineering Science*, **9**, 100077. <https://doi.org/10.1016/j.apples.2021.100077>
- Sogancioglu, M., Yel, E., Yilmaz-Keskin, U. S., 2013. Utilization of andesite processing wastewater treatment sludge as admixture in concrete mix. *Construction and Building Materials*, **46**, 150–155. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.035>
- Thapa, V., Waldmann, D., 2021. Binary blended cement pastes and concrete using gravel wash mud (GWM) powders. *Construction and Building Materials*, **302**, 124225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124225>
- TS EN 197-1, 2012. Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Ankara, 1-40.
- Valente, M., Sambucci, M., Chougan, M., Ghaffar, S. H., 2022. Reducing the emission of climate-altering substances in cementitious materials: A comparison between alkali-activated materials and Portland cement-based composites incorporating recycled tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, **333**, 130013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130013>
- Yang, K. H., Song, J. K., Song, K. II, 2013. Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete. *Journal of Cleaner Production*, **39**, 265–272. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.001>
- Yaro, N. S. A., Napiyah, M. Bin, Sutanto, M. H., Usman, A., Saeed, S. M., 2021. Modeling and optimization of mixing parameters using response surface methodology and characterization of palm oil clinker fine modified bitumen. *Construction and Building Materials*, **298**, 123849. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123849>
- Yaro, N. S. A., Sutanto, M. H., Habib, N. Z., Napiyah, M., Usman, A., Muhammad, A., 2022. Comparison of Response Surface Methodology and Artificial Neural Network approach in predicting the performance and properties of palm oil clinker fine modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, **324**, 126618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126618>
- Yazdani, M., Kabirifar, K., Fathollahi-Fard, A. M., Mojtahedi, M., 2021a. Production scheduling of off-site prefabricated construction components considering sequence dependent due dates. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16285-0>
- Yazdani, M., Kabirifar, K., Frimpong, B. E., Shariati, M., Mirmozaffari, M., Boskabadi, A., 2021b. Improving construction and demolition waste collection service in an urban area using a simheuristic approach: A case study in Sydney, Australia. *Journal of Cleaner Production*, **280**, 124138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124138>
- Zeyad, A. M., Khan, A. H., Tayeh, B. A., 2020. Durability and strength characteristics of high-strength concrete incorporated with volcanic pumice powder and polypropylene fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, **9**, 806–818. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.021>
- Zhang, Z., Yang, F., Liu, J. C., Wang, S., 2020. Eco-friendly high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) with substitution of fly ash by rice husk ash. *Cement and Concrete Research*, **137**, 106200. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106200>
- Zhou, Y., Xie, L., Kong, D., Peng, D., Zheng, T., 2022. Research on optimizing performance of desulfurization-gypsum-based composite cementitious materials based on response surface method. *Construction and Building Materials*, **341**, 127874. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127874>

İnternet kaynakları

- 1-Verimadenciliği, http://www.stat.gen.tr/index.php?istek=sinif&dersid=is_t01&konuid=ver01&max=1, (06.07.2023)