

Derin karıştırma kolonu dayanımının yanıt yüzey yöntemi esaslı modellenmesi ve karşılaştırmalı analitik ve metasezgisel optimizasyonu

Response surface methodology-based modeling and comparative analytical and metaheuristic optimization of deep mixing column strength

Murat Olgun^{1,*}, Mustafa Abdalwahid Noori Noori^{2,*}, Ekrem Burak Toka^{3,*},
Alican Şenkaya^{4,*}

^{1,2,3,4} Konya Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya Türkiye

Öz

Bu çalışmada, düşük plastisiteli killi zeminde oluşturulan laboratuvar ölçekli derin karıştırma kolonlarının (DKK) 28 günlük serbest basınç dayanımı (UCS), yanıt yüzey yöntemi (YYY) esaslı I-optimal yaklaşımla modellenmiş ve analitik/metasezgisel optimizasyon yöntemleriyle optimize edilmiştir. Laboratuvar ölçekli DKK'lerde çimento (%5–%20), silis dumanı (%0–%15), akışkanlaştırıcı katkı (%0–%5), su/bağlayıcı oranı (0.9–2.5) ve su muhtevası (%25–%33) etkileri 21 karışımla incelenmiştir. Karotların 28 günlük UCS değerleri 123.8–5037.7 kPa aralığında bulunmuş, varyans analizi (ANOVA) ile en etkili parametrelerin sırasıyla su/bağlayıcı oranı, çimento oranı ve silis dumanı oranı olduğu belirlenmiştir. Belirleme katsayısı (R^2) = 0.945 olan regresyon modeli üzerinde Lagrange çarpanları 5089.7 kPa, parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve arılar algoritması ise 5154.2 kPa optimum UCS öngörmüş; optimum karışımla üretilen DKK'den alınan karotlardan ortalama 5218 kPa UCS ölçülerek tahminlerle %1.24–%2.52 aralığında uyum sağlanmıştır. Çalışma; DKK için I-optimal tasarımı, analitik/metasezgisel optimizasyonu ve laboratuvar ölçekli DKK boyutlarında doğrulamayı birleştirerek literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Arılar algoritması, Derin karıştırma, Optimizasyon, Parçacık sürü optimizasyonu, Yanıt yüzey yöntemi

1 Giriş

Artan nüfus, hızlı kentleşme ve sanayi yatırımlarının yoğunlaşması, yapılaşma için uygun nitelikteki zeminlerin giderek azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, mühendislik özellikleri yetersiz olan alüvyal siltler, yumuşak ve orta plastisiteli killer ile yüksek su muhtevalli zeminlerden oluşan alanların yapılaşmaya açılmasını zorunlu kılmaktadır. Söz konusu zeminlerde düşük taşıma gücü ve aşırı oturmalar gibi problemler yaygın olarak görülmekte olup, bu problemlerin giderilmesi amacıyla zemin iyileştirme yöntemleri büyük ölçekli projelerde önemli bir rol

Abstract

In this study, the 28-day unconfined compressive strength (UCS) of laboratory-scale deep mixing columns (DMCs) produced in low-plasticity clay soil was modeled using a response surface methodology (RSM)-based I-optimal approach and optimized via analytical/metaheuristic optimization methods. The effects of cement (5–20%), silica fume (0–15%), superplasticizer (0–5%), water/binder ratio (0.9–2.5), and water content (25–33%) on laboratory-scale DMCs were investigated through 21 mixtures. The 28-day UCS values of the cores ranged from 123.8 to 5037.7 kPa; the water/binder ratio, cement content, and silica fume content were identified by analysis of variance (ANOVA) as the most influential parameters, in descending order of influence. On the regression model with the coefficient of determination (R^2) = 0.945, the Lagrange multipliers method predicted an optimum UCS of 5089.7 kPa, while particle swarm optimization (PSO) and the bees algorithm both predicted 5154.2 kPa; cores extracted from the DMC produced with the optimum mixture yielded an average UCS of 5218 kPa, in agreement with the predictions within a 1.24–2.52% margin. By combining I-optimal design, an analytical/metaheuristic optimization, and validation at laboratory-scale DMC dimensions, the study presents an original contribution to the literature.

Keywords: The bees algorithm, Deep mixing, Optimization, Particle swarm optimization, Response surface methodology

üstlenmektedir [1]. Zemin iyileştirme yöntemlerinden olan derin karıştırma yöntemi (DKY), zayıf zeminlerin yerinde mekanik olarak çimentolu veya mineral katkıli bağlayıcılar ile karıştırılması esasına dayanan ve günümüzde dünya genelinde yaygın şekilde uygulanan etkili bir zemin iyileştirme tekniğidir. Bu yöntemle DKK, doğal zemine kıyasla daha yüksek mukavemet, daha düşük sıkışabilirlik ve daha düşük geçirimsizlik özellikleri sergileyerek temel sistemlerinin performansını önemli ölçüde iyileştirmektedir [2, 3].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ebtoka@ktun.edu.tr (E. B. Toka)

Geliş / Received: 24.04.2026. Kabul / Accepted: 16.06.2026 Yayınlanma / Published: 14.07.2026

doi: 10.28948/ngumuh.1937382

DKK'lerin mekanik performansı temel olarak UCS ile değerlendirilebilir. UCS bağlayıcı içeriği, su/bağlayıcı oranı, zemin su muhtevası, zemin su muhtevası/bağlayıcı oranı, zemin plastisitesi, kür süresi ve karıştırma sırasında oluşan homojenizasyon derecesi gibi birden çok bağımsız fakat birbiriyle etkileşimli parametreden eş zamanlı olarak etkilenmektedir. Horpibulsuk vd. [4] ile Horpibulsuk vd. [5], zemin su muhtevası/bağlayıcı oranını çimento ile iyileştirilmiş yumuşak killerin laboratuvar tasarımında "birincil parametre" olarak tanımlamış ve farklı kür sürelerinde, farklı zemin su muhtevası/çimento ve uçucu kül oranlarında geçerli olan genelleştirilmiş bir dayanım eşitliği önermiş; laboratuvarında 28 günlük UCS'nin 1500 kPa altında olduğu durumlarda saha/laboratuvar dayanım oranının yaklaşık 0.6 olabildiğini tespit etmiştir. Lee vd. [6], deniz kili-çimento karışımlarında dayanım ve rijitlik özelliklerinin karışım parametrelerine duyarlı olduğunu göstermiş, Lorenzo ve Bergado [7] ile Lorenzo ve Bergado [8] ise Bangkok kili için optimum karıştırma su muhtevasının likit limit civarında olması durumunda kullanılan çimento içeriğinin azaltılabileceğini belirlemiştir. Yu vd. [9] Singapur deniz kili üzerinde su/bağlayıcı oranının dayanım gelişimine etkisini sistematik olarak incelemiş, Wang vd. [10] farklı çimento içerikleri için optimum su/bağlayıcı oranının ampirik bir modelle tahmin edilebildiğini ortaya koymuştur. Liu vd. [11], klasik su/bağlayıcı oranına kil oranı/su oranını ekleyerek farklı tane dağılımlarına genelleştirilebilir bir birleşik dayanım karakterizasyonu önermiştir. Geniş kapsamlı bir veri tabanı analizine dayanarak Soltani vd. [12], yapay olarak çimentolanmış ince taneli zeminlerin UCS değerini incelemek amacıyla deneysel verilere dayalı boyutsal bir tahmin yaklaşımı geliştirmiş; çimento içeriği, kür süresi, su muhtevası, kuru yoğunluk ve zeminin özgül yüzey alanı gibi parametrelerin dayanım gelişiminde birlikte etkili olduğunu göstermiştir.

Çimento esaslı zemin iyileştirme uygulamalarında maliyet, sürdürülebilirlik ve mikroyapısal performans bakımından takviye bağlayıcıların ve mineral katkıların kullanımı giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve nano silika gibi silis veya alümina bakımından zengin malzemeler, uygun oranlarda kullanıldığında hidrasyon ve puzolanik reaksiyonları etkileyerek çimentolu zemin matrisinde ilave bağlayıcı ürünlerin oluşumunu, boşluk yapısının yoğunlaşmasını ve dayanım gelişimini destekleyebilmektedir. Silis dumanı; yüksek özgül yüzey alanı, oldukça ince tane boyutu ve yüksek amorf SiO_2 içeriği sayesinde çimento-kil matrisinde puzolanik reaksiyon yoluyla kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jeli üretimini hızlandırmakta, kapiler boşluk yapısını rafine etmekte ve mikro dolgu etkisi ile matris yoğunluğunu artırmaktadır. Goodarzi vd. [13] şişen kil zeminlerde çimento ile silis dumanının birlikte kullanımıyla dayanımda ve dayanıklılıkta meydana gelen iyileşmenin çimentonun tek başına sağladığı iyileşmeye kıyasla anlamlı biçimde arttığını belirtmiştir. Jiang vd. [14] çimento ile iyileştirilmiş yumuşak zeminlerde silis dumanı katkısının UCS ve mikroyapı üzerindeki etkisini incelemiş, uygun silis dumanı içeriğinin C-S-H oluşumunu destekleyerek boşlukları doldurabildiğini ve dayanımı

artırabildiğini, ancak aşırı silis dumanı kullanımının su ihtiyacını artırarak makro gözenek/mikro çatlak oluşumu nedeniyle dayanım kazanımını sınırlayabileceğini belirtmiştir. Yang vd. [15] de silis dumanı ve mineral katkıların çimento ile iyileştirilmiş yumuşak kilin UCS davranışı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Li vd. [16] şişen ince taneli zeminlerin iyileştirilmesinde çimento ve silis dumanının beraber kullanımının dayanım ve dayanıklılık performansını iyileştirdiğini, çevrimsel ıslatma-kurutma koşullarında başlangıç UCS'sinin yaklaşık %84'ünün korunduğunu belirlemiştir. DKK ölçeğinde ise Yenginar ve Olgun [17], uçucu kül ikameli çimentolu DKK'lerin fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özelliklerini laboratuvar tipi derin karıştırma sistemiyle üretilmiş kolonlar üzerinde incelemiş ve mineral katkı kullanımının DKK performansında hem mekanik hem de sürdürülebilirlik açısından önemli bir potansiyel taşıdığını göstermiştir. Doğrudan DKK boyutlarında gerçekleştirilen güncel bir çalışmada Huan vd. [18], %0-%5 aralığındaki silis dumanı/çimento oranlarını farklı kür ortamlarında (tatlı su ve %2.5-%5 NaCl çözeltileri) inceleyerek %1 oranında dozajın tüm kür ortamlarında optimum performansı sağladığını; bu dozajın üzerinde ise tanecik topaklaşması ve hidrasyon reaksiyonu verimliliğindeki düşüş nedeniyle dayanım kazanımının azaldığını göstermiştir. Genel olarak, doğrudan DKK uygulamalarında silis dumanının bağımsız bir deneysel değişken olarak ele alındığı çalışmalar sınırlıdır. Bu nedenle silis dumanının DKK dayanımı üzerindeki etkisinin, çimento içeriği ve su/bağlayıcı oranı gibi temel değişkenlerle birlikte geniş fakat kontrollü bir deneysel tasarım aralığında değerlendirilmesi gerekmektedir.

DKK ve çimentolu zemin sistemlerinde çok sayıda parametrenin eşzamanlı ve etkileşimli olarak etkili olması, klasik tek değişkenli deney yaklaşımlarının tasarım uzayını yeterli biçimde açıklamakta sınırlı kalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle Taguchi yöntemi ve YYY türlerinden olan merkezi kompozit tasarım, Box-Behnken tasarımı ve D-optimal/I-optimal tasarım gibi deneysel tasarım yöntemleri zemin iyileştirme çalışmalarında giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar, sınırlı sayıda deney ile ana etkilerin, etkileşimlerin ve doğrusal olmayan eğilimlerin belirlenmesini ve deneysel sonuçların matematiksel olarak modellenmesini sağlamaktadır. Yenginar vd. [19] siltli zeminlerde DKK'yi etkileyen parametreleri Taguchi yöntemiyle inceleyerek çimento, uçucu kül, süper akışkanlaştırıcı ve su/bağlayıcı oranı gibi değişkenlerin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini göstermiştir. Eissa vd. [20] yumuşak kilin çimento, cüruf ve nano silika ile iyileştirilmesinde deneysel ve istatistiksel modelleme yaklaşımı kullanarak bağlayıcı kombinasyonlarının mekanik performans üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Chen vd. [21], uçucu kül ve cüruf esaslı geopolimer bağlayıcıların yumuşak zeminin iyileştirilmesinde Box-Behnken tasarımı ile modellenebileceğini göstermiştir. Wang vd. [22], yüksek fırın cürufu, baca gazı desülfürizasyon jipsi ve kalsiyum karbür cürufu içeren karışımları Box-Behnken tabanlı YYY ile optimize ederek yumuşak zemin iyileştirmesinde alternatif bağlayıcı sistemlerin performansının

modellenebileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca Ackah vd. [23], çimento ile iyileştirilmiş zeminlerde UCS ve elektriksel direnç ilişkisini I-optimal YYY ile modelleyip optimize ederek, I-optimal tasarımın zemin iyileştirmesi çalışmalarında çok değişkenli modelleme ve optimizasyon için kullanılabilirliğini göstermiştir. Ancak bu çalışmaların önemli bir kısmı DKK ölçeğinde üretilmiş kolonlardan alınan karot numunelere değil, laboratuvar karışımları veya farklı bağlayıcı sistemlerine dayanmaktadır. Bu nedenle laboratuvar ölçekli DKK üretimiyle elde edilen UCS verilerinin YYY çerçevesinde modellenmesi, DKK karışım tasarımının deneysel ve istatistiksel olarak birlikte değerlendirilmesi açısından önemlidir.

İstatistiksel modelleme yaklaşımlarının yanı sıra, metasezgisel optimizasyon algoritmaları da doğrusal olmayan, çok değişkenli ve kısıtlı geoteknik problemlerin incelenmesinde kullanılmaktadır. PSO, genetik algoritma, yapay arı kolonisi, arılar algoritması, gri kurt optimizasyonu ve benzeri yöntemler, geniş arama uzaylarında yerel optimumlara takılma riskini azaltabilmeleri ve kapalı formda çözümü zor olan problemlerde uygulanabilir çözümler üretebilmeleri nedeniyle geoteknik mühendisliğinde ilgi görmektedir. Kashani vd. [24], PSO türlerinin geoteknik problemlerdeki kullanımını kapsamlı olarak incelemiş ve PSO'nun geoteknik optimizasyon problemlerinde yaygın kullanılan sürü tabanlı algoritmalarından biri olduğunu ortaya koymuştur. Boumezerane [25], geoteknikte kullanılan optimizasyon yöntemlerini temeller, şev stabilitesi, zemin özellikleri ve araştırmaları gibi başlıklar altında sınıflandırarak deterministik ve metasezgisel yöntemlerin birlikte artan bir kullanım alanına sahip olduğunu göstermiştir. İyileştirilmiş zeminlerin dayanım tahmini için de veri odaklı ve metasezgisel destekli modellerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Tran [26], iyileştirilmiş zeminlerin UCS değerlerinin tahmininde gradyan artırma modellerini metasezgisel algoritmalarla birleştirmiş ve PSO tabanlı hibrit modelin yüksek tahmin performansı gösterebildiğini tespit etmiştir. Xiong vd. [27] ise çimentolu zemin iyileştirmesinde basınç dayanımını tahmin etmek için PSO-XGBoost hibrit modelini kullanmıştır. Zhao vd. [28] doğrudan DKK için çok başlı öz-dikkat modülü + evrişimli sinir ağı + farklılaştırılmış yaratıcı arama algoritmasını birleştirerek üç farklı büyük ölçekli mühendislik veri seti üzerinden UCS tahmini için olasılıksal bir tahmin çerçevesi geliştirmiştir. Sürü zekâsı temelli algoritmalar olan arılar algoritması da bal arılarının besin arama davranışından esinlenen, rastgele keşif araması ile iyi bölgeler çevresindeki komşuluk aramasını birlikte kullanan bir sürü zekâsı yaklaşımıdır [29]. Fakat arılar algoritması yönteminin bu makalede çalışılan konu kapsamında bilinen bir kullanımı literatürden tespit edilememiştir. Burada sunulan çalışmalar, geoteknik ve zemin iyileştirmesi problemlerinde metasezgisel algoritmaların kullanılabilirliğini desteklemektedir. Bununla birlikte, DKK karışım tasarımında aynı YYY tabanlı amaç fonksiyonu üzerinde analitik ve birden fazla sürü zekâsı temelli metasezgisel yöntemin karşılaştırmalı olarak uygulanması hâlen sınırlı bir araştırma alanıdır.

Mevcut literatür değerlendirildiğinde, DKK performansının çimento içeriği, su/bağlayıcı oranı, zemin su

muhtevası, mineral katkı kullanımı, kür koşulları ve karıştırma/uygulama kalitesi gibi çok sayıda değişken tarafından kontrol edildiği görülmektedir. Bununla birlikte, çalışmaların önemli bir bölümü tekil parametre etkilerine, laboratuvarda küçük kalıplarda oluşturulan dökme numunelere, belirli bir mineral katkı türüne veya yalnızca tek bir istatistiksel/optimizasyon yaklaşımına odaklanmaktadır. İncelenen literatürde; laboratuvar ölçekli DKK üretimiyle elde edilen karot numunelerin 28 günlük UCS sonuçlarını çimento içeriği, silis dumanı içeriği, akışkanlaştırıcı katkı oranı, su/bağlayıcı oranı ve zemin su muhtevası olmak üzere beş farklı değişken kapsamında I-optimal YYY ile modelleyen; elde edilen regresyon denklemini aynı tasarım kısıtları altında hem klasik analitik optimizasyon yaklaşımı olan Lagrange çarpanları hem de iki farklı sürü zekâsı temelli metasezgisel yöntem olan PSO ve arılar algoritması ile karşılaştırmalı olarak optimize eden ve optimum karışımı deneysel olarak doğrulayan bütüncül çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle mevcut çalışma, çimento ve silis dumanı esaslı DKK karışımlarında çok değişkenli deneysel tasarım, istatistiksel modelleme, analitik/metasezgisel optimizasyon ve laboratuvar ölçekli doğrulama aşamalarını bir araya getirerek literatüre katkı sunmayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda Konya Teknik Üniversitesi Sanayi Kampüsü'nden temin edilen düşük plastisiteli kil zemin üzerinde laboratuvar ölçekli DKK'ler üretilmiş; 28 günlük UCS değerleri YYY ile modellenmiş; modelden elde edilen amaç fonksiyonu Lagrange çarpanları, PSO ve arılar algoritması ile optimize edilmiş ve elde edilen optimum tasarımın deneysel sonuçlarla uyumu değerlendirilmiştir. Bu yaklaşım, DKK karışım oranlarının yalnızca deneysel deneme-yanılma yoluyla değil, veriye dayalı, karşılaştırmalı ve doğrulanabilir bir optimizasyon çerçevesinde belirlenmesine yönelik uygulanabilir bir metodolojik katkı sunmaktadır.

2 Materyal ve metod

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan zeminin, bağlayıcı malzemelerin (çimento, silis dumanı) ve akışkanlaştırıcı katkının temel özellikleri, laboratuvar ölçekli DKK'lerin oluşturulmasında izlenen yöntem, YYY çerçevesinde uygulanan I-optimal deney tasarımı, karot numuneler üzerinde gerçekleştirilen UCS deneylerinin detayları ve optimizasyon yöntemlerinin detayları sunulmuştur.

2.1 Malzemeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan kil zemin, Konya İli Selçuklu ilçesinde yer alan Konya Teknik Üniversitesi Sanayi Kampüs alanında yaklaşık 4 m derinlikten temin edilmiştir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre zemin sınıfı düşük plastisiteli kil (CL) olarak tanımlanmıştır. Zeminin fiziksel özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

DKK'nin imalatında ana bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu tercih edilmiştir. CEM I 42.5 R çimentosu, yüksek klinker içeriği sayesinde erken dayanım kazanma özelliği göstermektedir. Mineral katkı içermeyen bu çimento tipinin kullanılması, silis dumanı ilavesinin çimento-zemin matrisi içerisindeki katkısının daha açık

biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Bu kapsamda çimento tipi, 28 günlük UCS performansının karşılaştırılmasına uygun bir ana bağlayıcı olarak tercih edilmiştir. Çimentonun mineralojik bileşimi C_3S (%61.41), C_2S (%11.33) ve C_3A (%8.2) fazlarından oluşmaktadır. Özellikle yüksek C_3S ve C_2S içeriği, CEM I 42.5 R çimentosunun erken dönemde yüksek mukavemet kazanmasını sağlayan başlıca faktörler arasındadır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan zeminin fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Likit limit (LL, %)	33
Plastik limit (PL, %)	22
Plastisite indisi (PI, %)	11
Doğal su muhtevası (w_n , %)	12
Tane yoğunluğu (ρ_s , g/cm ³)	2.64
Optimum su muhtevası (w_{opt} , %)	20.5
En büyük kuru birim yoğunluğu ($\rho_{k,max}$, g/cm ³)	1.75
Çakıl miktarı (%)	10
Kum miktarı (%)	25
Silt miktarı (%)	53
Kil miktarı (%)	12

Deneyisel çalışmada çimentonun yerine belli yüzdelerde ikame olarak kullanılan silis dumanı, silisyum metali veya ferrosilisyum alaşımı üretimi sırasında ortaya çıkan bir atık ürün olarak kabul edilebilir. Silis dumanı, elektrik ark ocaklarında silisyum metali veya ferrosilisyum üretimi sırasında oluşan, ortalama tane boyutu yaklaşık 0.1 μm olan çok ince amorf SiO_2 parçacıklarının torba filtrelerde toplanmasıyla elde edilir. Toplanan bu malzeme, sonraki işlemlerle yoğunlaştırılmış formda da üretilmektedir. Elde edilen bu ürün, ASTM C-1240'ta [30] belirtilen şartlara uygun özellikler taşımaktadır. Brunauer–Emmett–Teller (BET) analizi sonucunda silis dumanının özgül yüzey alanı yaklaşık olarak 20000 m²/kg olarak elde edilmiştir. Yoğunluğu ise ortalama 2.2 g/cm³ mertebesinde. Silis dumanı, çimentonun hidratasyonu sonucunda oluşan kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) ile reaksiyona girerek C-S-H jeli meydana getirir. Bu oluşan C-S-H jeli, betonun dayanımını artıran esas bileşendir. Buna karşın $Ca(OH)_2$, dayanım artışına katkı sağlamayan, suda çözünür bir bileşiktir ve betonun boşluklu yapısının temel sebeplerindendir. Bu şekilde $Ca(OH)_2$ miktarı beton içerisinde mümkün olduğunca azaltılabilir.

Çalışmada DKK'nin oluşturulmasında modifiye fosfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Bu katkı, betonun erken ve nihai dayanımını geliştiren, yüksek oranda su azaltıcı bir katkı olduğu için tercih edilmiştir.

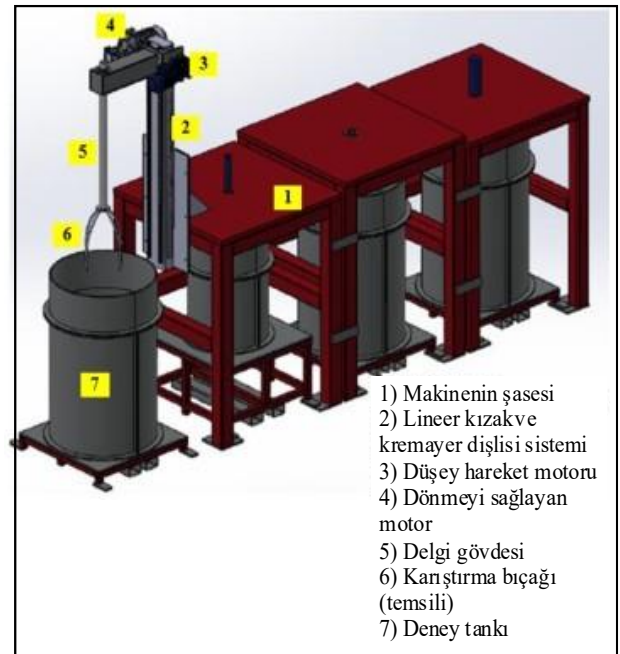
2.2 DKK oluşturulması

DKY'de çimento ve kireç gibi bağlayıcılar kuru veya şerbet formda zemine verilmekte ve mekanik karıştırma yoluyla zeminle homojen şekilde karıştırılarak kolon ya da panel türü iyileştirme elemanları meydana getirilmektedir. Yöntem, zayıf zeminlerin mühendislik performansını iyileştirmeyi amaçlayan yerinde bir zemin iyileştirme tekniğidir. Bağlayıcılar, iç kısmı boş olan tij aracılığıyla zemine enjekte edilir. Bu sırada tijin üzerine monte edilmiş

olan kanat ve bıçaklar, dönme hareketi sayesinde zemini keserek parçalar ve bağlayıcı malzemelerin zemine homojen biçimde dağılmasını sağlar. Böylelikle zeminin içinde kolonlar oluşturulur.

Laboratuvar ölçekli DKK'nin oluşturulması için, Konya Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'nda yer alan ve bir başka proje (TÜBİTAK projesi) kapsamında tasarlanan laboratuvar tipi derin karıştırma makinesi kullanılmıştır. Derin karıştırma makinesinin şematik görünümü Şekil 1'de verilmiştir. Derin karıştırma makinesinin şaftının düşey yöndeki hareket hızı, 0-100 cm/dk arasında ayarlanabilirken, şaftın kendi eksenini etrafındaki dönme hızı ise 0-100 devir/dk aralığında istenilen değerde ayarlanabilmektedir. Arazi uygulamalarında kullanılan sistemlere benzer şekilde tasarlanan derin karıştırma bıçağı 30 cm çapında olup, üzerinde 5 mm çapında dört adet nozül bulunmaktadır. Nozül çapları gerektiğinde 2 ve 2.5 mm çaplı cıvatalar ile daraltılabilmektedir.

Laboratuvar ölçekli kolonlar, model tanklar içerisinde oluşturulmuştur. Kullanılan tanklar 80 cm yüksekliğinde ve 50 cm çapında olup, ön konsolidasyon aşamasında zeminden su çıkışına imkân verecek şekilde tasarlanmıştır. Zemin, tank içerisine homojen biçimde %36 su muhtevasında (yaş yoğunluğu 1.84 g/cm³) ve tankın hacmini dolduracak zemin kütlesi hesaplandıktan sonra 3 kademede ve kontrollü bir şekilde yerleştirilmiştir. Tanka yerleştirilen zeminin su muhtevasının deneyisel çalışmalar için belirlenmiş su muhtevası değerlerine (%25–%33 aralığında) düşebilmesi için 5–7 gün süreyle ön konsolidasyon basıncı uygulanmıştır (Şekil 2).



Şekil 1. Laboratuvar tipi derin karıştırma makinesinin şematik görünümü [31]

Burada şunu belirtmek gerekir: Seçilen başlangıç %36 su muhtevası, ön konsolidasyon basıncı altında zeminden suyun drenajına ve kontrollü bir konsolidasyonla sahaya benzer bir

başlangıç efektif gerilme durumu oluşturulmasına imkân tanımıştır. LL'nin altında tank içine yerleştirme yapılması durumunda, zeminin başlangıç koşulu daha plastik ve daha az akıcı kıvama yaklaşacak ve ön konsolidasyon basıncı altında bir drenaj/konsolidasyon meydana gelmesi zor olacaktır. Buna göre, %36 su muhtevası değeri bir dayanım optimizasyon seviyesi olarak değil, model tankta çok yumuşak kil koşulunu temsil eden ve ön konsolidasyon aşamasıyla birlikte değerlendirilen hazırlık su muhtevası olarak kullanılmıştır.



Şekil 2. Zemine ön konsolidasyon basıncının uygulanması

Ön konsolidasyon tamamlandıktan sonra ilgili deney tasarımına göre 260 L hacimli karıştırma kazanında; belirlenen çimento, silis dumanı, süper akışkanlaştırıcı miktarları ve su/bağlayıcı oranları kullanılarak 10–15 dakika karıştırılmak suretiyle enjeksiyon karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan bu karışım, pompa yardımıyla kontrollü biçimde karıştırma bıçağına iletilerek zemin ile enjeksiyon malzemesinin etkin ve düzenli bir şekilde karışması sağlanmış ve DKK oluşturulmuştur (Şekil 3). DKK'ler 28 gün boyunca 23 ± 2 °C sıcaklıkta ve oda koşullarında kür edilmiştir. Hava ile teması/nem kaybını azaltmak için nemli bir örtü ile kolonların üstü örtülmüştür. Karotlar deneylerin yapılacağı gün alınmıştır.



Şekil 3. Laboratuvar ölçekli DKK oluşturulması

2.3 YYY ile deneysel tasarım ve UCS deneyi

YYY, bir yanıtın birden fazla değişken tarafından etkilendiği durumlarda, değişkenlerin yanıtı etkisini inceleyebilmek amacıyla istatistiksel ve matematiksel ifadelerin/araçların bir arada kullanıldığı bir yöntemdir. YYY sıklıkla yeni ürünlerin formülasyon çalışmalarında, mevcut ürün tasarımlarının geliştirilmesinde, süreçlerin optimizasyonunda ve süreçlerin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Yanıt değişkeni ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin tam matematiksel formunu belirlemek zor olabilir. Bu nedenle, YYY'deki ilk adım, yanıt değişkeni ile bağımsız değişkenler arasındaki gerçek ilişkiyi en iyi şekilde ifade edebilecek bir fonksiyonun tahmin edilmesidir. Genellikle, bağımsız değişkenlerin belirli bir aralığında düşük dereceli bir polinom kullanılır. Eğer yanıt değişkeni, bağımsız değişkenlerin doğrusal bir fonksiyonuyla yeterince iyi modellenilebiliyorsa, tahmin fonksiyonu ana etki terimlerini içeren birinci dereceden bir model olarak ifade edilir. Bir eğrilik varsa etkileşim ve ikinci dereceden terimler de istatistiksel modele dahil edilebilir.

Çalışma kapsamında deneysel tasarım, YYY kapsamında I-optimal tasarım kriterine göre oluşturulmuştur. I-optimal tasarım, tasarım uzayı boyunca ortalama tahmin varyansını en aza indirerek istatistiksel modelin tahmin gücünü artırmayı amaçlayan bir optimal tasarım yaklaşımıdır. I-optimal tasarımda deney noktaları, önceden sabit bir geometrik düzene göre değil; tanımlanan tasarım/deney bölgesi ve kurulacak regresyon modeli dikkate alınarak bilgisayar destekli optimizasyon algoritmalarıyla seçilmektedir. Bu algoritmalar, başlangıçta tam mertebe sağlayan bir nokta kümesi oluşturmakta, ardından noktaları iteratif olarak değiştirerek ya da yerlerini güncelleyerek tasarım/deney bölgesi üzerindeki ortalama tahmin varyansını en aza indirmeye çalışmaktadır. Başka bir ifadeyle, I-optimal tasarımda katsayı tahmininden daha çok modelin tasarım uzayı genelindeki tahmin performansının iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Buna göre, bu çalışmada geliştirilen regresyon modelinin hem UCS tahmini hem de sonraki optimizasyon aşamalarında amaç fonksiyonu olarak

kullanılacak olması nedeniyle I-optimal tasarım tercih edilmiş ve karışım tablosu hazırlanmıştır (Tablo 2). Tasarımdaki karışımlar için oluşturulan kolonlardan 28 günlük kür süresinin sonunda alınan karotların 5 cm çapında ve 10 cm boyunda olacak şekilde kesilmesiyle hazırlanan numuneler üzerinde toplam 21 adet tasarım için iki tekrarlı olmak üzere UCS deneyleri ASTM D2166 [32] dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Her bir karışım için ikişer karot numunesi için elde edilen gerilme–gerinim eğrilerinden en yüksek eksenel gerilme değerleri alınmış; bu değerlerin ortalaması ilgili tasarımın UCS değeri olarak kabul edilmiştir. UCS’ler yanıt değişkenleri olup, bu değerler kullanılarak ANOVA gerçekleştirilmiş ve istatistiksel analiz yapılmıştır.

Tablo 2. 5 parametrelili YYY tasarım tablosu

Tasarım (Karışım)	Çimento %	Silis dumanı %	Katkı %	Su / Bağlayıcı	Su muhtevası %
T1	5.000	0.000	0.000	0.900	25.000
T2	20.000	15.000	2.200	2.420	33.000
T3	5.000	15.000	1.100	2.500	25.000
T4	5.000	0.000	5.000	2.500	25.000
T5	20.000	15.000	0.000	0.900	27.000
T6	13.320	15.000	4.600	0.900	33.000
T7	13.310	0.000	2.250	1.620	29.000
T8	5.520	12.600	4.825	2.440	31.800
T9	5.820	15.000	0.000	1.610	33.000
T10	5.000	15.000	5.000	1.220	25.000
T11	20.000	0.000	0.000	2.500	25.000
T12	5.000	0.000	1.000	2.500	33.000
T13	20.000	3.750	0.000	0.900	33.000
T14	13.250	7.500	2.250	1.620	25.000
T15	20.000	9.000	4.900	1.660	29.760
T16	12.720	8.770	0.000	2.460	29.680
T17	5.220	8.850	2.370	0.900	29.680
T18	20.000	0.000	5.000	0.900	25.000
T19	16.940	0.000	5.000	2.500	33.000
T20	16.850	15.000	5.000	2.500	25.000
T21	5.000	0.000	5.000	1.220	33.000

YYY’nin temel amacı, yüksek dayanımlı ve homojen DKK’lerin elde edilmesi için bağlayıcı bileşenlerin optimum miktarlarının belirlenmesidir. Deneysel tasarım sürecinde, her bir parametre için alt ve üst sınırlar tanımlanmış; I-optimal tasarım çerçevesinde bu sınırlar içerisinde ara değerler üretilerek deney programı oluşturulmuştur. Elde edilen deney sonuçları kullanılarak, parametreler ile UCS değerleri arasındaki ilişki modellenmiştir. Bu kapsamda, çimento yüzdesi, silis dumanı yüzdesi, süper akışkanlaştırıcı (katkı) yüzdesi, su muhtevası ve su/bağlayıcı oranı olmak üzere beş farklı parametre seçilmiştir (Tablo 2). Su muhtevası %25–%33, Çimento %5–%20, silis dumanı ise %0–%15 aralığında seçilmiş olup, bu yüzdelere kuru kil ağırlığına göre belirlenmiştir. Süper akışkanlaştırıcı miktarı bağlayıcı içeriğinin %0–%5’i olarak tanımlanmış, su/bağlayıcı oranı ise 0.9–2.5 aralığında alınmıştır.

Deneysel tasarımda kullanılan parametre aralıkları, çimentolu zemin ve DKK literatüründe kullanılan değerler

dikkate alınarak ve YYY modeli için yeterli genişlikte bir tasarım uzayı oluşturacak şekilde belirlenmiştir. Çimento içeriği için %5–%20 aralığı, çimentolu zemin/DKK çalışmalarında yaygın kullanılan düşük-orta-yüksek bağlayıcı seviyelerini temsil etmektedir [33, 34]. Silis dumanı için %0–%15 aralığı, katkısız kontrol durumundan başlayarak silis dumanının pozitif ve dolgu etkisinin farklı seviyelerde incelenmesi amacıyla seçilmiştir; bu üst sınır, tipik optimum değeri temsil etmekten ziyade, yüksek katkı oranlarında oluşabilecek azalan getiri veya işlenebilirlik etkilerinin de gözlemlenebilmesi için genişletilmiş bir deneysel sınır olarak değerlendirilmiş olup, esasen literatür çalışmalarında [13, 14, 16] bu üst sınıra çıkmamıştır. Akışkanlaştırıcı katkı için %0–%5 aralığı, katkısız karışımı ve önceki DKK çalışmalarında bildirilen yaklaşık %1.5–%3 optimum katkı seviyelerini kapsayacak şekilde seçilmiştir [17, 19]. Su/bağlayıcı oranı için literatürde [9, 10] 2.5 değerine genelde çıkmaması olmasına rağmen, 0.9–2.5 aralığı, düşük su/bağlayıcı oranlarındaki yüksek dayanım ile yüksek su/bağlayıcı oranlarında oluşabilecek seyrekleme ve dayanım azalmasını aynı tasarım uzayında değerlendirmek amacıyla belirlenmiştir. Zemin su muhtevası için %25–%33 aralığı ise kullanılan CL zeminin PL (%22) ve LL (%33) değerleri dikkate alınarak, plastik kıvamdan likit limite kadar olan koşulları temsil edecek şekilde seçilmiştir [4, 8]. Buna göre deneysel çalışmada belirlenen parametre seviyelerinin üst ve alt sınırlarının literatürde yaygın olarak kullanılan sınırlarda veya sınırların dışında kalacak şekilde seçilmesiyle, daha geniş bir tasarım uzayında güvenilir istatistiksel modellerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

2.4 Optimizasyon yöntemleri

Bu bölümde, deneysel verilerin istatistiksel analiziyle oluşturulmuş YYY tabanlı regresyon denkleminin optimize edilmesinde kullanılan Lagrange çarpanları, PSO ve arılar algoritmasının ayrıntıları açıklanmıştır.

2.4.1 Lagrange çarpanları

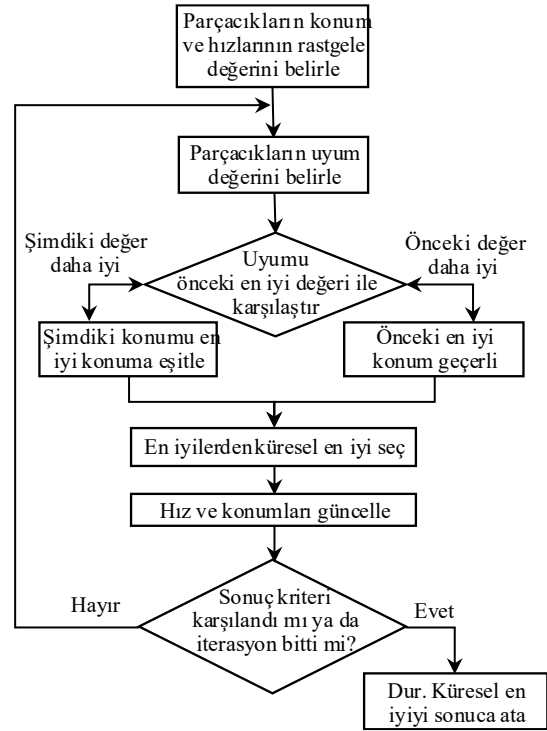
Lagrange Çarpanları yöntemi, kısıtlı optimizasyon problemlerinde yaygın olarak kullanılan klasik ve güçlü bir matematiksel yaklaşımdır. Bu yöntem, bir veya birden fazla kısıt fonksiyonu altında tanımlanan çok değişkenli bir amaç fonksiyonunun yerel en büyük veya en küçük noktalarının belirlenmesine olanak tanır. Özellikle mühendislik optimizasyonu problemlerinde, tasarım değişkenlerinin fiziksel, geometrik veya deneysel sınırlar tarafından kısıtlandığı durumlarda etkin bir çözüm aracı olarak kullanılmaktadır [35, 36]. Genel formda, sürekli ve türevlenebilir bir amaç fonksiyonu $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ile bunu sınırlayan $g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ biçimindeki bir kısıt fonksiyonu ele alındığında, Lagrange çarpanları yöntemi, optimum noktanın amaç fonksiyonunun gradyanı ile kısıt fonksiyonunun gradyanının doğrusal olarak bağımlı olduğu noktada gerçekleştiği varsayımına dayanır. Matematiksel olarak bu durum $\nabla f = \lambda \nabla g$ şeklinde ifade edilir; burada λ , Lagrange çarpanı olup, kısıt fonksiyonunun amaç fonksiyonu üzerindeki etkisinin büyüklüğünü temsil etmektedir [37]. Kısıt fonksiyonu g , çok boyutlu uzayda bir yüzey veya eğriyi temsil ederken, amaç fonksiyonunun

seviye yüzeyleri bu kısıt yüzeyi üzerinde ilerler. Optimum noktada, amaç fonksiyonuna ait seviye yüzeyi ile kısıt yüzeyi birbirine teğet olup, her iki fonksiyonun gradyan vektörleri aynı doğrultudadır. Başka bir ifadeyle, amaç fonksiyonunun artış yönü ile kısıt yüzeyine dik yön çakışmaktadır [38]. Bununla birlikte, Lagrange çarpanları yöntemi, çözümün yerel bir optimumu temsil edebileceği ve başlangıçta tanımlanan kısıtların doğruluğuna yüksek derecede bağımlı olduğu için, karmaşık ve çok parametrelili problemlerde tek başına yeterli olmayabilmektedir. Bu nedenle güncel çalışmalarda, Lagrange çarpanları yöntemi sıklıkla PSO ve arılar algoritması gibi küresel arama yeteneğine sahip metasezgisel optimizasyon teknikleri ile birlikte kullanılır [39].

2.4.2 Parçacık sürü optimizasyonu algoritması

PSO, sürekli ve ayrık arama uzaylarında tanımlanan karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan, sürü zekâsı temelli metasezgisel bir optimizasyon yöntemidir. Algoritma, çözüm uzayında hareket eden ve her biri olası bir çözümü temsil eden “parçacıklar” aracılığıyla, amaç fonksiyonunun küresel optimumunu aramayı hedefler. PSO’nun temel yaklaşımı, bireysel deneyim ile sürü içi bilgi paylaşımının birlikte değerlendirilmesine dayanmaktadır [40]. PSO algoritmasında her parçacık, arama uzayında bir konum ve bu konuma bağlı bir hız vektörü ile tanımlanır. Optimizasyon süreci boyunca parçacıklar, kendi geçmiş deneyimlerinden elde ettikleri en iyi çözüm (kişisel en iyi – p_{eniyi}) ile sürüdeki tüm parçacıklar arasında paylaşılan en iyi çözüm (g_{eniyi}) doğrultusunda hareket eder. Bu yapı sayesinde algoritma hem yerel arama yeteneğini korumakta hem de küresel optimuma yönelim göstermektedir. Parçacıkların hız ve konum güncellemeleri basit matematiksel ifadelerle tanımlanmakta olup, bu durum PSO’yu hesaplama maliyeti açısından avantajlı kılmaktadır [41]. PSO algoritmasının performansı; eylemsizlik katsayısı, bilişsel ve sosyal hızlandırma katsayıları ile parçacık sayısı gibi kontrol parametrelerine bağlıdır. Bu parametrelerin sabit alınması yerine uyarlanabilir/dinamik veya doğrusal olmayan biçimde güncellenmesiyle, yakınsama hızı artırılabilir ve erken yakınsama problemi azaltılabilir.

Özellikle mühendislik uygulamalarında geliştirilen uyarlamalı PSO ve hibrit PSO yaklaşımları, çözüm kararlılığı ve tekrarlanabilirlik açısından klasik PSO’ya göre daha başarılı sonuçlar sunmaktadır. Geoteknik mühendisliği ve zemin iyileştirme uygulamalarında PSO, bağlayıcı oranlarının, su/bağlayıcı oranının ve karışım parametrelerinin optimize edilmesinde etkin biçimde kullanılabilir. YYY veya regresyon temelli modellerden elde edilen amaç fonksiyonlarının PSO ile optimize edilmesi, deney sayısının azaltılmasına ve optimum tasarım noktalarının güvenilir biçimde belirlenmesine olanak tanımaktadır [42]. Ayrıca PSO, analitik çözümler sunan Lagrange çarpanları yöntemi ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması ve doğrulanması amacıyla da tercih edilmektedir. Algoritma ile optimizasyon işleminin süreci Şekil 4’te ve algoritma parametreleri Tablo 3’te verilmiştir.



Şekil 4. PSO ile optimizasyon işlemi süreci

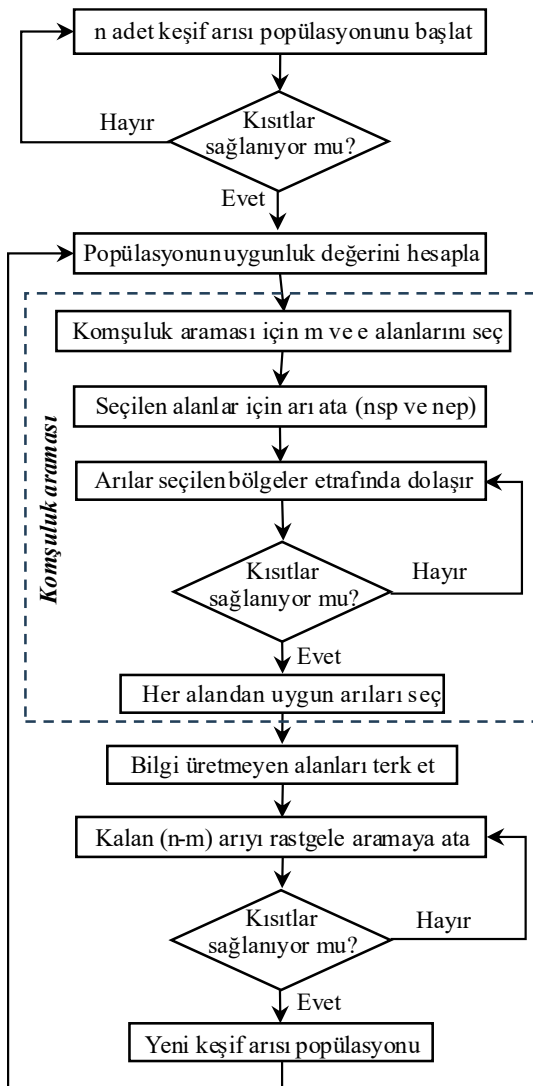
Tablo 3. PSO parametreleri

Parametre	Açıklama
n	Sürü büyüklüğü, parçacık sayısı
w	Eylemsizlik katsayısı
c_1 ve c_2	Hızlandırma katsayıları
V_{maks}	Bir parçacığın en büyük hızı
p_{eniyi}	Bir parçacığın en iyi konumu
g_{eniyi}	Tüm sürünün en iyi konumu
itr	Durdurma kriteri / iterasyon

2.4.3 Arılar algoritması

Arılar algoritması, sürü zekâsı temelli metasezgisel optimizasyon yöntemleri arasında yer almakta olup, karmaşık ve çok değişkenli optimizasyon problemlerinin çözümünde etkin bir arama algoritması olarak kullanılmaktadır. Algoritma, doğadaki bal arılarının nektar arama davranışlarından esinlenerek geliştirilmiş olup, özellikle geniş arama uzaylarında küresel optimumun bulunmasına yönelik güçlü bir keşif-yoğunlaştırma (*exploration-exploitation*) dengesi sunmaktadır [29, 43]. Arılar algoritmasının temel yaklaşımı, çözüm uzayının başlangıçta rastgele örneklenmesi ve bu örnekler arasından muhtemel optimum içeren bölgelerin sistematik olarak daha ayrıntılı biçimde araştırılmasına dayanmaktadır. Optimizasyon süreci, başlangıçta oluşturulan rastgele çözümlerin (besin kaynaklarının) değerlendirilmesiyle başlar ve amaç fonksiyonunu en iyi temsil eden bölgeler belirlenir. Daha sonra bu bölgelerin çevresinde yoğunlaştırılmış bir yerel arama gerçekleştirilirken, aynı anda yeni bölgelerin keşfi için rastgele arama da sürdürülür. Bu ikili yapı sayesinde algoritma, yerel optimumlara erken yakınsama riskini azaltmaktadır. Arıların çalışma prensibiyle ilgili algoritmalarda, arama sürecini yönlendiren

üç temel arı sınıfı tanımlanmaktadır. Kâşif arılar, çözüm uzayında tamamen rastgele hareket ederek yeni ve daha önce keşfedilmemiş bölgeleri araştırır; bu sayede algoritmanın küresel arama kabiliyeti korunur. Takipçi arılar, belirlenen muhtemel optimum içeren bölgeler etrafında yoğunlaşarak amaç fonksiyonunu iyileştirmeye yönelik yerel arama gerçekleştirir ve elde edilen çözüm kalitesini artırır. İzci arılar ise takipçi arıların paylaştığı bilgiye dayanarak en iyi bölgeleri seçer ve bu bölgelerin daha ayrıntılı şekilde araştırılmasına karar verir [44]. Bu bilgi paylaşımı ve görev dağılımı mekanizması, algoritmanın hızlı ve kararlı yakınsama göstermesinde önemli rol oynamaktadır. Arılar algoritmasının performansı; arı sayısı, seçilen bölge sayısı, elit bölgelerin tanımı, bu bölgelere tahsis edilen arı sayısı ve bölge arama yarıçapı gibi kontrol parametrelerine bağlıdır. Bu parametrelerin uygun şekilde seçilmesi, çözüm doğruluğu ve hesaplama maliyeti arasında denge kurulmasını sağlamaktadır. Algoritma kullanılarak yapılan optimizasyon işleminin sürecini gösteren akış şeması Şekil 5'te verilmiştir. Algoritma parametreleri Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 5. Arılar algoritması ile optimizasyon işlemi süreci

Tablo 4. Arılar algoritması parametreleri

Parametre	Açıklama
n	Kâşif Arı Sayısı
m	Ziyaret edilen "n" nokta içinden seçilen en uygun bölge sayısı
e	Seçilen "m" bölge içindeki en iyi bölge sayısı
nep	En iyi "e" bölgeye gönderilen arı sayısı
nsp	Kalan (m-e) bölgeye gönderilen arı sayısı
ngh	Bölge boyutu
itr	Durdurma kriteri / iterasyon

3 Bulgular ve tartışma

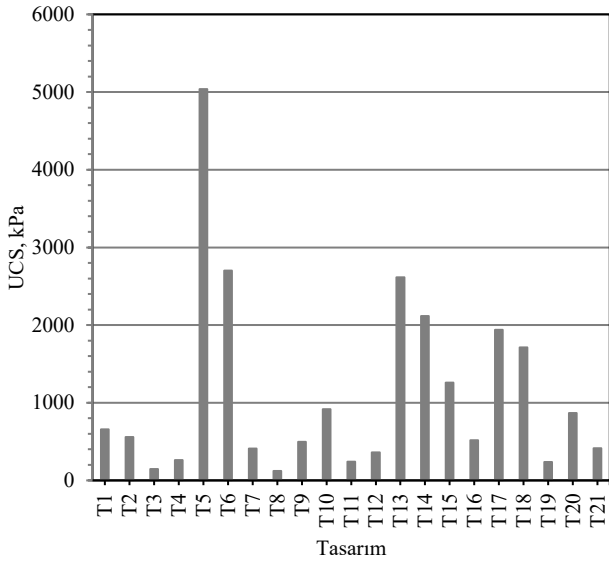
Elde edilen bulgular bu bölümde sunulmuştur. Öncelikle 21 karışım için elde edilen UCS deney sonuçlarının YYY çerçevesinde istatistiksel olarak değerlendirilmesi ve ANOVA bulguları değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmenin ardından Lagrange çarpanları, PSO ve arılar algoritması ile gerçekleştirilen optimizasyon işlemlerinin sonuçlarının karşılaştırmalı analizi yapılmıştır.

3.1 Deney sonuçlarının YYY ile değerlendirilmesi

Deneyisel çalışmalar kapsamında 21 adet tasarım için oluşturulan laboratuvar ölçekli DKK 28 gün boyunca kür edilmiştir. Kür işlemi sonunda DKK'nin tanktan çıkarılması esnasında yapılan ölçümler sonucunda kolonların ortalama boylarının 75 cm, çaplarının ise 30 cm olduğu belirlenmiştir (Şekil 6). Kür süresi sonunda kolonlardan farklı seviyelerden 10 cm yüksekliğinde ve 5 cm çapında karot numuneleri alınarak UCS deneyleri gerçekleştirilmiştir. UCS deney sonuçları Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 6. DKK için boyut kontrolü ve karot numuneleri



Şekil 7. UCS değerlerinin tasarım karışımlarına göre değişimi

Deney sonuçları incelendiğinde, UCS değerlerinin 123.8 kPa ile 5037.70 kPa arasında geniş bir aralıkta değiştiği görülmüştür. En yüksek dayanım, karışımda yüksek çimento oranı (%20), yüksek silis dumanı oranı (%15) ve düşük su/bağlayıcı oranı (0.9) olduğunda elde edilmiştir. Bu durum, çimento miktarının ve su/bağlayıcı oranının DKK'nin mekanik performansı üzerindeki baskın rolünü doğrulamaktadır. Benzer eğilimler, yumuşak ve düşük plastisiteli killeri üzerinde yapılan önceki çalışmalarda da gözlenmiştir [1–3].

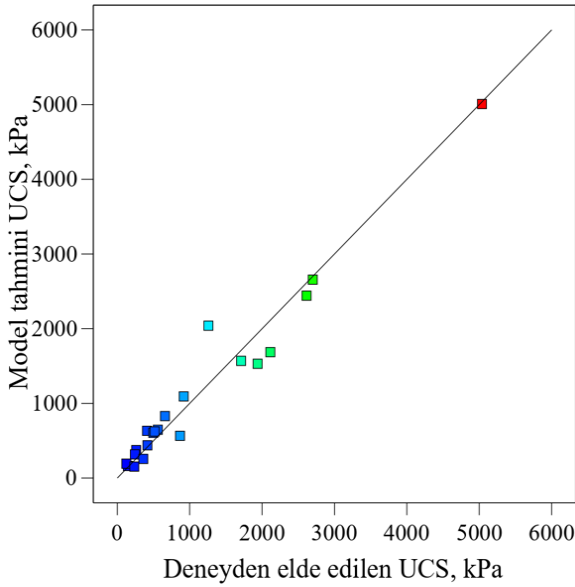
Deneylerden elde edilen UCS değerleri ile parametreler arasındaki ilişkinin değerlendirilmesinde kullanılan ANOVA, Design Expert paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım parametrelerinin terimleri ile sonuçlar (bu durumda UCS) arasındaki ilişkiyi ifade eden istatistiksel model regresyon analizi yapılarak oluşturulmuştur. UCS değerlerinin alt ve üst değerleri arasındaki farkın büyük olması nedeniyle, varyansı dengelemek ve daha iyi yanıt yüzeyi oluşturmak amacıyla UCS değerlerinde karekök dönüşümü uygulanmıştır (Denklem (1)). Denklemde X_1 : Çimento yüzdesi, X_2 : Silis dumanı yüzdesi, X_3 : Akışkanlaştırıcı katkı yüzdesi, X_4 : Su/bağlayıcı oranı, X_5 : Zemin su muhtevası olmaktadır. Modelin genel p-değerinin 0.05'ten küçük olması istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ifade etmektedir (Tablo 5). Model R^2 değerinin 1'e çok yakın olması ($R^2=0.945$) ve tahmini R^2 (0.901) ile düzeltilmiş R^2 (0.830) değerlerinin hem yüksek hem de arasındaki farkın 0.2'den az olması, düşük p-değerleri ile beraber değerlendirildiğinde modelin yüksek bir tutarlılıkla DKK'lerin UCS değerleri ve ilgili terimler arasındaki ilişkiyi ortaya koyabildiğini göstermiştir. Söz konusu ilişki Şekil 8'de açıkça görülmektedir. Fakat, akışkanlaştırıcı katkı yüzdesi ve su muhtevası için p-değerleri 0.05'ten büyük olmuştur. Buna göre, bu parametrelerin dayanım üzerinde etkileri diğer parametrelere göre daha zayıf olmuştur. Ayrıca, bağımsız değişkenler arasındaki doğrusal ilişkileri değerlendirmek amacıyla

Pearson korelasyon analizi yapılmıştır. Tablo 6'da verilen korelasyon matrisi incelendiğinde, parametreler arasındaki korelasyon katsayılarının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bağımsız değişkenler arasındaki en yüksek mutlak korelasyon katsayısı yaklaşık 0.044 olup, bu değer değişkenler arasında model yapısını olumsuz etkileyebilecek düzeyde doğrusal ilişki bulunmadığını göstermektedir. ANOVA sonuçlarına göre su/bağlayıcı oranı ($p < 0.0001$) ve çimento yüzdesi ($p = 0.0002$) UCS üzerinde istatistiksel olarak en belirleyici parametreler olarak öne çıkmıştır. Silis dumanı yüzdesi de dayanım üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olmakla birlikte ($p = 0.0010$), zemin su muhtevası ve süper akışkanlaştırıcı katkının etkileri istatistiksel olarak diğer parametrelere kıyasla anlamlı bulunmamıştır (sırasıyla $p = 0.0883$ ve $p = 0.5428$). Bu sonuç, süper akışkanlaştırıcının enjeksiyon karışımının işlenebilirliğini artırmaya yönelik bir katkı malzemesi olduğunu ve doğrudan dayanım gelişimine katkısının sınırlı kaldığını ortaya koymakta olup ilgili literatür bulgularıyla da uyum içindedir [17, 19]. ANOVA tablosunda da görüldüğü üzere su/bağlayıcı oranı en yüksek F-değerine sahip parametredir ($F = 100.6$). Su/bağlayıcı oranının bu derece baskın etkisi, zemin su muhtevasının bağımsız katkısının istatistiksel olarak görünmez hale gelmesine yol açmıştır. Bu bulgu Filz vd. [45] tarafından ortaya konan ve toplam su/çimento oranının UCS üzerinde çimento miktarından bile daha güçlü etkisi olduğuna dair gözlem ile tutarlıdır. Buna göre su muhtevasının $p > 0.05$ çıkması, seçilen %25–%33 aralığının çalışılan CL zemin için görece sınırlı olması, su/bağlayıcı oranının daha geniş ve baskın bir değişim aralığında tanımlanması ve modelde toplam su etkisinin büyük ölçüde su/bağlayıcı oranı tarafından temsil edilmesiyle ilişkilidir.

$$\sqrt{UCS} = 40.733 + 1.427 \times X_1 + 2.969 \times X_2 - 0.324 \times X_3 - 1.749 \times X_4 - 0.599 \times X_5 + 0.086 \times X_1 \times X_2 - 0.656 \times X_1 \times X_4 - 0.822 \times X_2 \times X_4 - 0.126 \times X_2^2 \quad (1)$$

Tablo 5. UCS için ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri
Model	4719.640	9	524.400	21.1	<0.0001
Çimento	774.770	1	774.770	31.2	0.0002
Silis dumanı	488.910	1	488.910	19.7	0.0010
Katkı	9.790	1	9.790	0.4	0.5428
Su/Bağlayıcı	2495.610	1	2495.610	100.6	<0.0001
Su muhtevası	86.810	1	86.810	3.5	0.0883
Çimento× Silis dumanı	273.750	1	273.750	11.0	0.0068
Çimento× (Su/bağlayıcı)	182.930	1	182.930	7.4	0.0201
Silis dumanı× (Su/bağlayıcı)	284.740	1	284.740	11.5	0.0061
(Silis dumanı) ²	158.420	1	158.420	6.4	0.0282
Kalıntı	273.010	11	24.820		
Toplam	4992.650	20			



Şekil 8. Deney verileri ile model tahminleri arasındaki ilişki

Tablo 6. Korelasyon analizi sonuçları

Parametre	Çimento	Silis dumanı	Katkı	Su/bağlayıcı	Su muhtevası
Çimento	1.000	-0.001	-0.042	-0.039	-0.000
Silis dumanı	-0.001	1.000	0.001	0.000	0.036
Katkı	-0.042	0.001	1.000	0.044	-0.003
Su/bağlayıcı	-0.039	0.000	0.044	1.000	0.002
Su muhtevası	-0.000	0.036	-0.003	0.002	1.000

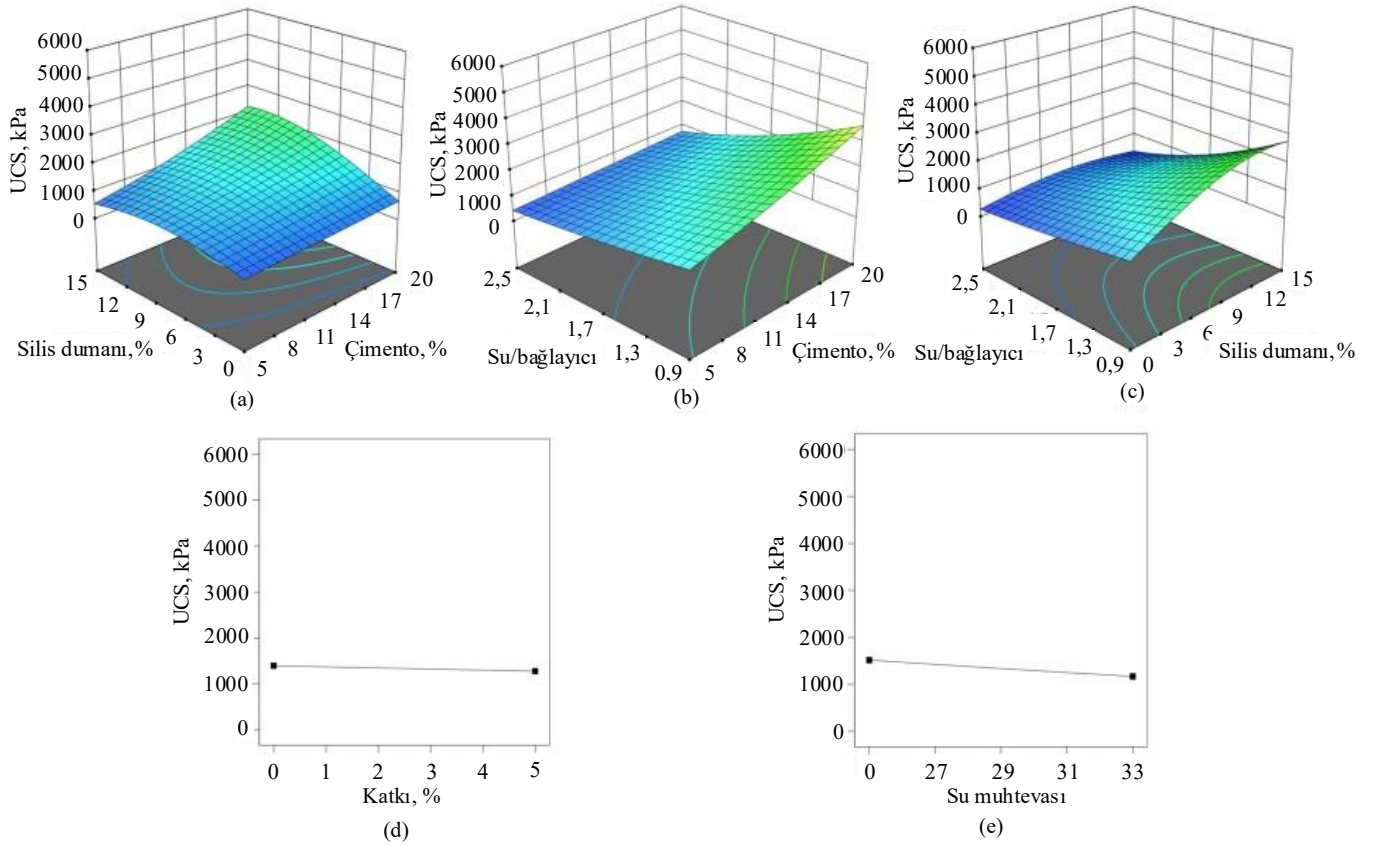
Şekil 9’da parametre seviyelerindeki değişim ile UCS değişimleri verilmiştir. Su/bağlayıcı oranının artması dayanımda önemli düşüşlere neden olmuştur. Buna göre karıştırma suyunun artmasıyla şerbetin seyrelmesi, dayanım kazanmış yapının kılcal gözenekliliğinin artması ve hidrasyon ürünlerinin karışımdaki toplam oranının düşmesi gibi etkiler killi zeminlerin çimento ile iyileştirilmesinde bilinen olumsuz durumlardandır [4, 6, 9]. Zemin su muhtevasının dayanım üzerindeki olumsuz etkisi de benzer bir fiziksel davranıştan kaynaklanmaktadır. Çimento oranının dayanım üzerindeki baskın rolü açık bir şekilde belirlenmiştir. Diğer parametreler sabit tutulduğunda çimento oranının artmasıyla UCS değerleri belirgin biçimde yükselmiştir. Çünkü bağlayıcı miktarındaki artış hidrasyon ürünlerinin miktarını artırır; bu da klasik çimento katkılı zemin iyileştirme çalışmalarıyla tutarlıdır [4, 6, 9]. Silis dumanındaki artış çok ince ve yüksek reaktif tanelerin miktarını artırarak ikincil puzolanik reaksiyonları artırmıştır. Modelde silis dumanının ikinci dereceden teriminin negatif katsayıya sahip olması, silis dumanının faydasının sınırlı olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni muhtemelen ince tanelerin miktarının artmasıyla su ihtiyacının da artmasıdır. Bu durum, silis dumanı tanelerinin reaksiyona giremeyecek şekilde kümelenmesine ve mevcut $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaktif silika arasındaki dengenin bozulmasına yol açabilir [13, 14]. Sonuç olarak, en yüksek UCS değerleri, düşük su/bağlayıcı oranı (0.9) ve yüksek çimento oranı (%20) kombinasyonunda elde

edilirken, su/bağlayıcı oranının 2.5’e çıkması aynı çimento dozajında dahi dayanımda ciddi kayıplara yol açmaktadır.

Çimento ve silis dumanı etkileşimi incelendiğinde silis dumanının, çimento yüzdesi arttıkça daha etkili hale geldiği görülmüştür. Çünkü silis dumanının dayanıma katkı sağlayan puzolanik reaksiyonları gerçekleştirebilmesi için yeterince alkali ve kalsiyum açısından zengin bir ortama ihtiyacı vardır. Çimento yüzdesi düşük olduğunda, silis dumanının bir kısmı ağırlıklı olarak inert çok ince bir dolgu malzemesi gibi davranır; fakat çimento miktarı arttığında, ortamda daha fazla kalsiyum hidroksit ortaya çıkarak puzolanik reaksiyon etkisini daha çok açığa çıkarır [13-15]. Çimento ve su/bağlayıcı etkileşimi, çimentonun dayanıma olumlu etkisinin su/bağlayıcı oranı arttıkça zayıfladığını ortaya koymuştur. Buna göre, çimento yüzdesini artırmak, aşırı seyreltik şerbetin olumsuz özelliklerini telafi edemez. Bu davranış DKK’lerde bağlayıcı fazla olsa bile su/bağlayıcı oranının fazla olmasının dayanımda daha kritik etkisinin olduğunu göstermektedir.

T3, T4, T8, T11 ve T12 karışımları birlikte değerlendirildiğinde, düşük UCS değerlerinin temel olarak yüksek su/bağlayıcı oranı ile ilişkili olduğu görülmektedir. T3, T4, T11 ve T12 karışımlarında su/bağlayıcı oranı 2.50 iken, T8 karışımında bu değer 2.44’tür. ANOVA sonuçlarında da belirtildiği üzere su/bağlayıcı oranı UCS üzerinde istatistiksel olarak etkili parametre olup, en baskın etkiyi göstermektedir. Yüksek su/bağlayıcı oranı, bağlayıcı şerbetin seyrelmesine, hidrasyon ürünlerinin birim hacimdeki yoğunluğunun azalmasına, daha boşluklu bir çimento-zemin matrisi oluşmasına ve çimento-zemin bağlarının zayıflamasına neden olarak UCS değerini düşürebilir. T3, T4, T8 ve T12 karışımlarında çimento oranının düşük veya alt sınıra yakın olması, yüksek su/bağlayıcı oranının olumsuz etkisini daha da belirgin hale getirmiştir. T11 karışımında ise çimento oranı yüksek olmasına rağmen su/bağlayıcı oranının 2.50 olması, yüksek çimento miktarının aşırı seyrelme etkisini tamamen telafi edemediğini göstermektedir. Bu değerlendirme, zemin su muhtevası/çimento oranının ve su/bağlayıcı oranının çimentolu zemin dayanımındaki temel rolünü vurgulayan literatürle uyumludur [4, 9, 10]. Ayrıca T3 ve T8 karışımlarında silis dumanı oranı yüksek olmasına rağmen çimento miktarının düşük olması, silis dumanının puzolanik reaksiyon için ihtiyaç duyduğu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarını sınırlamış olabilir. Bu nedenle silis dumanı tek başına ana bağlayıcı gibi değil, çimento hidrasyonu sonucunda oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona giren destekleyici bir mineral katkı olarak değerlendirilmelidir.

Deneylerden elde edilen UCS değerleri ile modelden tahmin edilen değerler arasındaki yakın ilişki geliştirilen regresyon denkleminin optimizasyon çalışmalarında amaç fonksiyonu olarak kullanılabilirliğini ortaya koymuştur. İstatistiksel analiz sonucunda elde edilen bu model kullanılarak UCS’yi model terimlerine bağlı olarak temsil eden amaç fonksiyonu tanımlanmıştır (Denklemler (1)). YYY ile geliştirilen bu regresyon denklemi, optimizasyon çalışmalarında amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır.



Şekil 9. Parametrelerin UCS değişimine etkisi (grafiklerde diğer parametreler ortalama seviyede seçilmiştir): (a) silis dumanı ve çimento, (b) su/bağlayıcı ve çimento, (c) su/bağlayıcı ve silis dumanı (d) katkı, (e) su muhtevası

3.2 Kontrol amaçlı indirgenmiş regresyon modeli ve performans karşılaştırması

Akışkanlaştırıcı katkı ve su muhtevasının p-değerlerinin 0.05'ten büyük olması nedeniyle, bu değişkenlerin model performansı üzerindeki etkisini daha açık değerlendirebilmek amacıyla ek olarak indirgenmiş regresyon modeli ile bir kontrol analizi yapılmıştır. Bu kapsamda, katkı ve su muhtevası parametreleri çıkarılarak indirgenmiş bir regresyon modeli kurulmuş (Denklem (2)) ve ANOVA gerçekleştirilmiştir (Tablo 7). Bu model, mevcut modelin yerine geçmesi amacıyla değil, istatistiksel olarak anlamlı olmayan değişkenlerin çıkarılmasının model performansında belirgin bir iyileşme sağlayıp sağlamadığını değerlendirmek amacıyla oluşturulmuştur. İndirgenmiş modelin R^2 , düzeltilmiş R^2 ve tahmini R^2 değerleri sırasıyla 0.926, 0.886 ve 0.829 olarak elde edilmiş (Tablo 8); mevcut model için elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında, mevcut modelin tahmin performansında az farkla daha üstün olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, katkı ve su muhtevası ana etki terimlerinin UCS üzerindeki doğrudan istatistiksel etkileri sınırlı olmakla birlikte, akışkanlaştırıcı katkının karışımın işlenebilirliği/homojenliği ve zemin su muhtevasının kıvam/karışabilirlik üzerindeki fiziksel etkileri dikkate alınarak mevcut modelde korunmuştur. Bununla birlikte, indirgenmiş model sonuçları mevcut modelin istatistiksel yeterliliğini kontrol etmek amacıyla ek analiz olarak

sunulmuştur. Optimizasyon süreçlerinde Bölüm 3.1'de verilen model ve denklemi kullanılmıştır.

$$\sqrt{UCS} = 22.890 + 1.484 \times X_1 + 2.810 \times X_2 - 2.174 \times X_4 + 0.080 \times X_1 \times X_2 - 0.660 \times X_1 \times X_4 - 0.767 \times X_2 \times X_4 - 0.118 \times X_2^2 \quad (2)$$

Tablo 7. İndirgenmiş model ANOVA sonuçları

Kaynak	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Ortalama kare	F-değeri	p-değeri
Model	4622.390	7	660.340	23.2	<0.0001
Çimento	783.760	1	783.760	27.5	0.0002
Silis dumanı	466.290	1	466.290	16.4	0.0014
Su/Bağlayıcı	2516.310	1	2516.310	88.4	<0.0001
Çimento× Silis dumanı	240.650	1	240.650	8.5	0.0122
Çimento× (Su/bağlayıcı)	185.220	1	185.220	6.5	0.0242
Silis dumanı× (Su/bağlayıcı)	251.840	1	251.840	8.8	0.0108
(Silis dumanı) ²	142.270	1	142.270	5.0	0.0436
Kalıntı	370.260	13	28.480		
Toplam	4992.650	20			

Tablo 8. Esas model ve indirgenmiş model karşılaştırması

Performans ölçütü	Esas model	İndirgenmiş model
R ²	0.945	0.926
Düzeltilmiş R ²	0.901	0.886
Tahmini R ²	0.830	0.829
Model p-değeri	<0.0001	<0.0001
Standart hata (RMSE)	4.98	5.34

3.3 Optimizasyon

YYY ile istatistiksel analiz ile geliştirilen ve [Denklem \(1\)](#)'de verilen regresyon temelli amaç fonksiyonu, üç farklı optimizasyon yaklaşımı ile ayrı ayrı optimize edilmiş; elde edilen sonuçlar hem en büyük UCS değeri hem de optimum tasarım parametreleri açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Yani optimizasyon işlemi UCS'nin en büyük olmasını sağlayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon probleminde amaç fonksiyonu yanında kısıtlara da ihtiyaç duyulmaktadır. Deneysel çalışmalarda YYY tasarım tablosunda parametreler için belirlenen sınırlar doğrultusunda [Tablo 9](#)'da verilen kısıtlar seçilmiştir. Optimizasyon sürecinde, bu kısıtların sağlanmasını temin etmek amacıyla ceza fonksiyonu yaklaşımı kullanılmıştır [\[46\]](#). Tüm kısıtlar, amaç fonksiyonu ile birlikte 10⁶ değerinde bir ceza katsayısı ile çarpılarak değerlendirilmiş ve böylece çözümün yalnızca tanımlanan sınırlar içerisinde kalması sağlanmıştır. Bu amaçla Lagrange çarpanları, PSO ve arılar algoritması kullanılmış; her üç yöntem de aynı amaç fonksiyonu ve aynı kısıtlar altında çalıştırılmıştır. Böylece yöntemler arasında meydana gelebilecek farkların yöntemlerin çalışma ilkelerinden kaynaklandığından emin olunmuştur. Üç optimizasyon yöntemi için en büyük UCS değerinin elde edildiği parametre seviyeleri ve yakınsama özellikleri [Tablo 10](#)'da topluca verilmiştir. Optimizasyon yöntemlerinin doğruluğunu inceleyebilmek amacıyla PSO ve arılar algoritması tarafından elde edilmiş olan optimum karışım ile DKK oluşturulmuş, 28 gün kür edilmiş ve alınan karotlardan UCS deneyleri yapılmıştır. Bu karotların ortalama UCS değerleri 5218 kPa olarak elde edilmiştir.

Lagrange çarpanları yöntemi, Matlab ortamında uygulanmış ve analitik yapısı gereği tek ve kesin bir optimum çözüm üretmiştir. Optimizasyon sonucunda parametreler için elde edilen değerler [Tablo 10](#)'da verilmiş olup bu değerlerin amaç fonksiyonuna yerleştirilmesiyle hesaplanan UCS değeri (bu durumda en büyük UCS olur) 5089.68 kPa olarak bulunmuştur. Optimum noktada; çimento yüzdesi üst sınırdaki (%20) ve silis dumanı oranı üst sınıra yakın (%14.59), su/bağlayıcı oranı ise alt sınıra yakın (0.913) olmuştur. Bu sonuç, regresyon denkleminin doğrusal ve ikinci dereceden terimlerinin baskın etkisinin kısıt sınırlarında yoğunlaştığını ortaya koymakta olup Lagrange çarpanları yönteminin gradyan koşullarına dayalı analitik yapısıyla tutarlıdır. Bununla birlikte, yöntem problemin yapısına ve başlangıç koşullarına bağlı olarak yerel optimum çözümler üretebileceği için elde edilen sonucun gerçek anlamda küresel optimumu temsil edip etmediği alternatif optimizasyon yaklaşımlarıyla karşılaştırılmadan kesin olarak belirlenemeyebilir [\[37–39\]](#).

Tablo 9. Optimizasyon işleminde parametreler için uygulanan kısıtlar

Parametre	Alt sınır	Üst sınır
Çimento, X ₁	%5	%20
Silis dumanı, X ₂	%0	%15
Katkı, X ₃	%0	%5
Su/Bağlayıcı, X ₄	0.9	2.5
Su muhtevası, X ₅	%25	%33

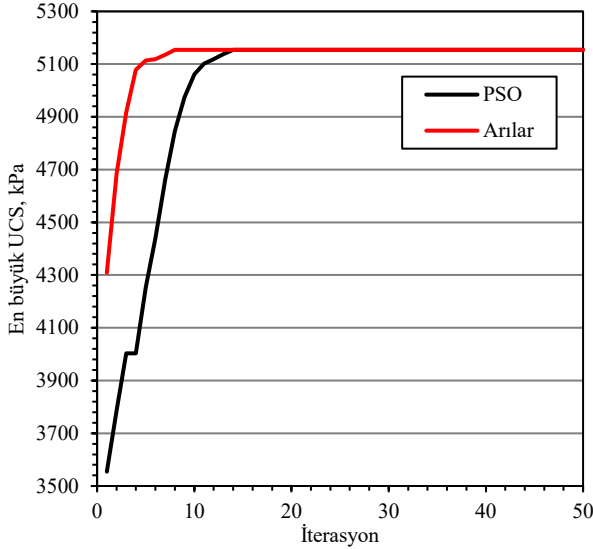
Tablo 10. Optimizasyon sonuçları

Özellik	Yöntem		
	Lagrange çarpanları	PSO	Arılar algoritması
Yakınsadığı iterasyon	-	14	7
Toplam iterasyon	-	50	50
En büyük UCS, kPa	5089.68	5154.24	5154.24
Optimum X ₁ , %	20.00	20.00	20.00
Optimum X ₂ , %	14.59	15.00	15.00
Optimum X ₃ , %	0.005	0.00	0.00
Optimum X ₄	0.913	0.900	0.900
Optimum X ₅ , %	25.00	25.00	25.00

PSO ile optimizasyonda 50 parçacıktan oluşan bir popülasyon ile 50 iterasyon boyunca optimizasyon yürütülmüş; eylemsizlik katsayısının en düşük değeri 0.4 ve en büyük değeri 0.9 olarak seçilmiştir. Ayrıca hızlandırma katsayıları olan hem c₁ hem de c₂ katsayıları 2 olarak belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda en büyük UCS değerini sağlayan [Tablo 10](#)'daki optimum parametreler ile hesaplanan UCS değeri 5154.24 kPa olarak elde edilmiş ve bu değer Lagrange çarpanları sonucunun %1.27 kadar üstünde olmuş ve arılar algoritması sonucu ile aynı olmuştur. Yakınsama grafiği incelendiğinde ([Şekil 10](#)), 14. İterasyondan sonra en büyük UCS değerinde bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Bu durum, PSO'nun söz konusu problem için belirlenen parametre seviyeleri ile yeterince geniş bir çözüm uzayı taraması gerçekleştirebildiğine işaret etmektedir [\[24\]](#). Seçilen eylemsizlik katsayısı aralığı (0.4–0.9) ve hızlandırma katsayıları (c₁ = c₂ = 2) standart değerler olmakla birlikte, doğrusal olmayan ve çok modlu bir amaç fonksiyonunda yerel bir optimumdan kaçınmak için bu çalışma özelinde yeterli olduğunu göstermiştir [\[47\]](#).

Arılar Algoritması ile optimizasyonda 50 kâşif arıdan oluşan başlangıç popülasyonu ile 50 iterasyon boyunca optimizasyon gerçekleştirilmiş; algoritma ile ilgili parametreler olan m, e, nep, nsp ve ngh değerleri sırasıyla 10, 3, 15, 10 ve 2 olarak seçilmiştir. Optimizasyon işlemi sonucunda en büyük UCS değerini sağlayan [Tablo 10](#)'daki parametrelerin optimum seviyeleri ile hesaplanan UCS değeri 5154.24 kPa olarak elde edilmiştir. Bu sonuç Lagrange çarpanları yöntemiyle bulunan değerden yalnızca %1.27 daha büyük ve PSO sonucu ile aynı olmuştur. Yakınsama grafiği ([Şekil 10](#)) incelendiğinde, algoritmanın iterasyon boyunca kararlı ve sürekli bir iyileşme sergilediği ve 7. İterasyondan sonra UCS değerinin değişmediği gözlenmiştir. Bu davranış, arılar algoritmasının keşif ve yoğunlaştırma aşamaları arasındaki dinamik dengeye

bağlanabilir [29]. Kâşif arıların geniş arama uzayında yeni bölgeleri taraması, takipçi arıların ise muhtemel optimum içeren bölgeleri derinlemesine araştırması sayesinde algoritma yerel optimumlara erken yakınsamadan kaçınılmaktadır.



Şekil 10. PSO ve arılar algoritması için yakınsama grafiği

Üç optimizasyon yönteminin en yüksek UCS değerlerinin doğruluğunu kontrol etmek için laboratuvar ortamında oluşturulan bir DKK'nin UCS değeri; Lagrange çarpanları, PSO ve arılar algoritması UCS değerlerinden sırasıyla %2.52, %1.24 ve %1.24 kadar fazla olmuştur. Bu durum optimizasyon algoritmalarının ve aynı zamanda YYY ile elde edilen karekök dönüşümlü istatistiksel model denkleminin DKK dayanımının modellenmesinde ve optimizasyonunda güvenli bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Ek olarak tüm yöntemlerin optimum noktada süper akışkanlaştırıcı katkı yüzdesini ve su/bağlayıcı oranını alt sınıra yakın veya alt sınırdan belirlemesi, istatistiksel analiz bulgularıyla tam örtüşmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, killi bir zeminde 5 farklı parametre dikkate alınarak oluşturulan DKK'lerin 28 günlük kür süresi sonunda UCS değerleri elde edilmiş, elde edilen bu değerler istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiş, analitik ve metasezgisel yöntemlerle optimizasyon gerçekleştirilmiştir. YYY kullanılarak toplam 21 farklı karışım tasarımı için oluşturulan laboratuvar ölçekli DKK'lerden alınan karot numuneleri üzerinde gerçekleştirilen UCS deney sonuçları, davranışı etkileyen parametrelerin dayanım üzerinde belirleyici etkiler yarattığını açık biçimde ortaya koymuştur.

Deney sonuçlarına göre UCS değerinin 5037.70 kPa değerine kadar çıkabildiği belirlenmiştir. Çimento ve silis dumanı artışı ile dayanım artarken katkı, su/bağlayıcı ve su muhtevası dayanımı azaltıcı yönde etki etmiştir. ANOVA sonuçlarına göre, su/bağlayıcı oranı ve çimento yüzdesi UCS değerleri üzerinde en anlamlı parametreler olurken, silis dumanı yüzdesi de dayanım üzerinde etkili olmuştur.

Akışkanlaştırıcı katkı ve zemin su muhtevasının UCS üzerindeki etkileri önemli olmazken, akışkanlaştırıcı katkı işlenebilirliği iyileştirme noktasında önemlidir.

İstatistiksel analiz ile DKK dayanımını yüksek tutarlılıkla (yüksek R^2 ve düşük p-değeri) temsil edebilen; parametrelerin ana etki, bazı etkileşim ve silis dumanının ikinci dereceden terimlerini içeren anlamlı bir model kurulabilmiştir. Bu durum, YYY'nin benzer geoteknik problemlerin incelenmesinde ve davranışın araştırılmasında etkin bir deneysel tasarım yöntemi olduğunu göstermiştir.

Optimizasyon işleminde, aynı amaç fonksiyonu ve kısıtlar altında Lagrange çarpanları, PSO ve arılar algoritması kullanılarak en büyük UCS değerleri belirlenmiştir. Kontrol amaçlı olarak, yöntemlerden elde edilen optimum parametre seviyelerine göre yapılmış laboratuvar ölçekli çalışmadan elde edilen UCS ile yöntemlerin elde ettiği en büyük UCS arasında en fazla %2.52 değerinde bir fark olduğu belirlenmiştir. Lagrange çarpanları yönteminde PSO ve arılar algoritmasına göre daha düşük, en büyük UCS değeri elde edilmiş; PSO ve arılar algoritması ile aynı en büyük UCS değeri elde edilmiştir. Buna göre, analitik ve metasezgisel yöntemlerle optimizasyon işleminin DKK dayanımını etkileyen parametrelerin optimizasyonunda güvenilir bir şekilde kullanılabileceği ortaya çıkmıştır. Özellikle PSO ve arılar algoritması deneysel veriye daha yakın iken Lagrange çarpanları yöntemi de kabul edilebilir bir sonuç üretmiştir.

YYY tabanlı karekök dönüşümlü regresyon denklemi ($R^2 = 0.945$), ön tasarım aşamasında geniş kapsamlı deney programlarına gerek kalmadan dayanım tahminine olanak tanıyabilir. Bununla beraber ANOVA'da baskın çıkan su/bağlayıcı, çimento ve silis dumanı oranları tasarımda öncelikli kontrol parametreleri olarak ele alınmalıdır. Ayrıca, laboratuvar ölçekli DKK tasarımında bu çalışmada elde edilen optimum karışım, benzer fiziksel özelliklere sahip düşük plastisiteli zeminlerde gerçekleştirilecek DKK uygulamaları için bir başlangıç tasarım referansı olarak değerlendirilebilir. Lagrange çarpanları, PSO ve arılar algoritmasının yakın optimum değerlere yakınsaması, analitik ve metasezgisel yöntemlerin DKK tasarımında karşılıklı doğrulama amacıyla birlikte kullanılabileceğini göstermektedir.

CRedit yazarlık katkı beyanı

Murat Olgun: Kavramsallaştırma, Fon sağlama, Yöntem, Proje yönetimi, Kaynak sağlama, Danışmanlık; **Mustafa Abdalwahid Noori Noori:** Veri düzenleme, Formal analiz, Araştırma, Yöntem, Yazılım; **Ekrem Burak Toka:** Kavramsallaştırma, Veri düzenleme, Formal analiz, Doğrulama, Görselleştirme, Yazma-ilk taslak, Yazma-inceleme ve düzenleme; **Alican Şenkaya:** Araştırma, Doğrulama, Yazma-inceleme ve düzenleme.

Teşekkür

Bu çalışmada Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 18401004 numaralı proje ile desteklenen "Katkı İçerikli Derin Karıştırma Kolonları Performans Özelliklerinin Model Deneylerle Araştırılması" isimli yüksek lisans tezinin deneysel verileri kullanılmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Yazım sürecinde üretken yapay zekâ (YZ) ve YZ destekli teknolojilerin kullanımına ilişkin beyan

Yazarlar, bu çalışmanın hazırlanmasında herhangi bir yapay zekâ aracı kullanmamıştır.

Kaynaklar

- [1] D. T. Bergado and G. A. Lorenzo, "Economical mixing method for cement deep mixing," *Proceedings of GeoFrontiers 2005: Innovations in Grouting and Soil Improvement*, Geotechnical Special Publication No. 136, pp. 1-10, Austin, TX, USA, 24-26 January 2005.
- [2] D. S. Yang, "Chapter 2.5: Deep Mixing," *Proceedings of the ASCE Geo-Institute Conference: In Situ Ground Improvement, Reinforcement and Treatment: A Twenty-Year Update and a Vision for the 21st Century*, Ground Reinforcement Committee, pp. 130-150, Logan, UT, USA, 16-17 July 1997.
- [3] S. Horpibulsuk, R. Rachan, A. Chinkulkijniwat, Y. Raksachon and A. Suddeepong, "Analysis of strength development in cement-stabilized silty clay from microstructural considerations," *Construction and Building Materials*, 24 (10), 2011-2021, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.011>.
- [4] S. Horpibulsuk, N. Miura and T. S. Nagaraj, "Clay-water/cement ratio identity for cement admixed soft clays," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (2), 187-192, 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:2\(187\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(187)).
- [5] S. Horpibulsuk, R. Rachan and A. Suddeepong, "State of the art in strength development of soil-cement columns," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 165 (4), 201-215, 2012. <https://doi.org/10.1680/grim.11.00006>.
- [6] F. H. Lee, Y. Lee, S. H. Chew and K. Y. Yong, "Strength and modulus of marine clay-cement mixes," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (2), 178-186, 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:2\(178\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(178)).
- [7] G. A. Lorenzo and D. T. Bergado, "Fundamental parameters of cement-admixed clay—new approach," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130 (10), 1042-1050, 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:10\(1042\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:10(1042)).
- [8] G. A. Lorenzo and D. T. Bergado, "Fundamental characteristics of cement-admixed clay in deep mixing," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (2), 161-174, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:2\(161\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:2(161)).
- [9] H. Yu, Y. Yi, K. Yao, A. Romagnoli, W. L. Tan and A. B. P. Chang, "Effect of water/cement ratio on properties of cement-stabilized Singapore soft marine clay for wet deep mixing application," *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15 (9), 1198-1205, 2021. <https://doi.org/10.1080/19386362.2021.1890939>.
- [10] F. Wang, K. Li and Y. Liu, "Optimal water-cement ratio of cement-stabilized soil," *Construction and Building Materials*, 320, 126211, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126211>.
- [11] L. Liu, T. Deng, Y. Deng, L. Zhan, S. Horpibulsuk and Q. Wang, "Stabilization nature and unified strength characterization for cement-based stabilized soils," *Construction and Building Materials*, 336, 127544, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127544>.
- [12] A. Soltani, A. Deng, A. Taheri, M. Mirzababaei and M. B. Jaksa, "A dimensional description of the unconfined compressive strength of artificially cemented fine-grained soils," *Journal of Adhesion Science and Technology*, 34 (15), 1679-1703, 2020. <https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1717804>.
- [13] A. R. Goodarzi, H. R. Akbari and M. Salimi, "Enhanced stabilization of highly expansive clays by mixing cement and silica fume," *Applied Clay Science*, 132-133, 675-684, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.023>.
- [14] N. Jiang, C. Wang, Z. Wang, B. Li and Y.-A. Liu, "Strength characteristics and microstructure of cement stabilized soft soil admixed with silica fume," *Materials*, 14 (8), 1929, 2021. <https://doi.org/10.3390/ma14081929>.
- [15] Q. Yang, C. Du, J. Zhang and G. Yang, "Influence of silica fume and additives on unconfined compressive strength of cement-stabilized marine soft clay," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32 (2), 04019346, 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003010](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003010).
- [16] W. Li, W. Liu, B. Wang, X. Zhan, J. Zuo, Y. Shan, S. Han and T. Wang, "Synergistic effects of cement-silica fume composite on expansive soil stabilization: Mechanisms, microstructure, and durability," *Results in Engineering*, 28, 107811, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107811>.
- [17] Y. Yenginar and M. Olgun, "Physical, mechanical, and microstructural characteristics of fly ash replaced cement deep mixing columns," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83, 309, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03800-z>.
- [18] V. N. P. Huan, T. N. Nguyen and S. Chaiyaput, "Optimizing silica fume admixture for enhanced strength of soil-cement columns," *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 12, 252, 2025. <https://doi.org/10.1007/s40515-025-00699-1>.
- [19] Y. Yenginar, A. A. M. M. Mobark and M. Olgun, "Investigating the construction parameters of deep mixing columns in silty soils," *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 5 (3), 464-474, 2021. <https://doi.org/10.35860/iarej.978978>.

- [20] A. Eissa, M. T. Bassuoni, A. Ghazy and M. Alfaro, "Improving the properties of soft clay using cement, slag, and nanosilica: experimental and statistical modeling," *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34 (4), 04022031, 2022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004172](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004172).
- [21] K. Chen, D. Wu, Z. Zhang, C. Pan, X. Shen, L. Xia and J. Zang, "Modeling and optimization of fly ash-slag-based geopolymers using response surface method and its application in soft soil stabilization," *Construction and Building Materials*, 315, 125723, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125723>.
- [22] X. Wang, S. Kim, Y. Wu, Y. Liu, T. Liu and Y. Wang, "Study on the optimization and performance of GFC soil stabilizer based on response surface methodology in soft soil stabilization," *Soils and Foundations*, 63 (2), 101278, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101278>.
- [23] F. S. Ackah, R. Owusu, Y. Xiao and J. Ali, "Prediction and optimization of electrical resistivity and unconfined compressive strength of cement-treated subgrade soil using I-optimal response surface methodology," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 60, 101878, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2024.101878>.
- [24] A. R. Kashani, R. Chiong, S. Mirjalili and A. H. Gandomi, "Particle swarm optimization variants for solving geotechnical problems: review and comparative analysis," *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28 (3), 1871-1927, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09442-0>.
- [25] D. Boumezerane, "Recent tendencies in the use of optimization techniques in geotechnics: a review," *Geotechnics*, 2 (1), 114-132, 2022. <https://doi.org/10.3390/geotechnics2010005>.
- [26] V. Q. Tran, "Hybrid gradient boosting with meta-heuristic algorithms prediction of unconfined compressive strength of stabilized soil based on initial soil properties, mix design and effective compaction," *Journal of Cleaner Production*, 355, 131683, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131683>.
- [27] J. Xiong, Y. Gong, X. Liu, Y. Li, L. Chen, C. Liao and C. Zhang, "A PSO-XGBoost model for predicting the compressive strength of cement-soil mixing pile considering field environment simulation," *Buildings*, 15 (15), 2740, 2025. <https://doi.org/10.3390/buildings15152740>.
- [28] Y. Zhao, X. Wang, W. Shen and C. Teng, "Probabilistic prediction of unconfined compressive strength for deep cement mixing piles using multi-head attention and convolutional neural networks," *Case Studies in Construction Materials*, 23, e05097, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05097>.
- [29] D. T. Pham and M. Castellani, "The bees algorithm: modelling foraging behaviour to solve continuous optimization problems," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 223 (12), 2919-2938, 2009. <https://doi.org/10.1243/09544062JMES1494>.
- [30] ASTM C1240-20, *Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020. <https://doi.org/10.1520/C1240-20>.
- [31] Y. Yenginar, "Derin karıştırma kolonlarının performansını etkileyen faktörlerin model deneylerle araştırılması," Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya, Türkiye, 2020.
- [32] ASTM D2166-00, *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000. <https://doi.org/10.1520/D2166-00>.
- [33] S. J. Abbey, S. Ngambi and E. Ganjian, "Development of strength models for prediction of unconfined compressive strength of cement/byproduct material improved soils," *Geotechnical Testing Journal*, 40 (6), 928-935, 2017. <https://doi.org/10.1520/GTJ20160138>.
- [34] A. B. Ekmen, H. M. Algin and M. Özen, "Strength and stiffness optimisation of fly ash-admixed DCM columns constructed in clayey silty sand," *Transportation Geotechnics*, 24, 100364, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100364>.
- [35] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- [36] J. Nocedal and S. J. Wright, *Numerical Optimization*, 2nd ed., Springer, New York, 2006.
- [37] M. S. Bazaraa, H. D. Sherali and C. M. Shetty, *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2006.
- [38] D. P. Bertsekas, *Nonlinear Programming*, 3rd ed., Athena Scientific, Belmont, MA, 2016.
- [39] S. S. Rao, *Engineering Optimization: Theory and Practice*, 5th ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2019.
- [40] R. Poli, J. Kennedy and T. Blackwell, "Particle swarm optimization: An overview," *Swarm Intelligence*, 1 (1), 33-57, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11721-007-0002-0>.
- [41] M. Clerc, *Particle Swarm Optimization*. ISTE Ltd., London, 2006.
- [42] B. Han, K. Ji, B. P. M. Singh, J. Qiu and P. Zhang, "An optimization method for mix proportion of wet-mix shotcrete: Combining artificial neural network with particle swarm optimization," *Applied Sciences*, 12 (3), 1698, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12031698>.
- [43] M. Castellani, S. Otri and D. T. Pham, "Printed circuit board assembly time minimisation using a novel Bees Algorithm," *Computers & Industrial Engineering*, 133, 186-194, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.05.015>.
- [44] X. S. Yang, *Nature-Inspired Optimization Algorithms*, 2nd ed., Academic Press/Elsevier, Amsterdam, 2020.
- [45] G. M. Filz, D. K. Hodges, D. E. Weatherby and W. A. Marr, "Standardized definitions and laboratory procedures for soil-cement specimens applicable to the wet method of deep mixing," *Proceedings of*

- GeoFrontiers 2005: Innovations in Grouting and Soil Improvement, Geotechnical Special Publication No. 136, pp. 1-13, Austin, TX, USA, 24-26 January 2005.
- [46] N. D. Lagaros, M. Kournoutos, N. A. Kallioras and A. N. Nordas, "Constraint handling techniques for metaheuristics: a state-of-the-art review and new variants," *Optimization and Engineering*, 24, 2251-2298, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11081-022-09782-9>.
- [47] Y. Shi and R. C. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence, pp. 69-73, Anchorage, AK, USA, 4-9 May 1998.

