



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



# Düşey yük etkisi altındaki kazık gruplarının bozkurt optimizasyon algoritması ile optimizasyonu

## *Optimization of pile groups under vertical loads using grey wolf optimizer*

*Yazar(lar) (Author(s)): Rasim TEMÜR<sup>1</sup>, Cihan ÖSER<sup>2</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0001-7154-2286*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-5057-0920*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Temür R. ve Öser C., “Düşey yük etkisi altındaki kazık gruplarının bozkurt optimizasyon algoritması ile optimizasyonu”, *Politeknik Dergisi*, 22(1): 19-32, (2019).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.gov.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.417754

# Düşey Yük Etkisi Altındaki Kazık Gruplarının Bozkurt Optimizasyon Algoritması ile Optimizasyonu

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Rasim TEMÜR\*, Cihan ÖSER**

Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, İstanbul Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 11.10.2017 ; Kabul/Accepted : 06.04.2018)

## ÖZ

Yumuşak/gevşek zeminler üzerine inşa edilecek temeller, geoteknik mühendisliği açısından büyük sorunlara neden olmaktadır. Temelden aktarılan düşey yükler, yumuşak/gevşek zeminde göçmeye ve/veya aşırı oturmalara neden olabilmektedir. Bu tür problemlerin önlenmesi için ilave geoteknik tedbirlerin alınması zorunlu olmaktadır. Temel altı kazık imalatı, günümüzde sıklıkla kullanılan tedbirlerden biridir. Kazıklar, sağlam zemin içindeki soket boylarına bağlı olarak, uç kazığı veya sürtünme kazığı olarak tanımlanmaktadır. Genellikle, temellerin altında meydana gelecek farklı oturmaların ve dış merkezlik etkisinin azaltılması için temel altında birden fazla kazık imal edilmektedir. Bu kazıkların birbirleriyle etkileşimi “grup etkisi” olarak tanımlanmaktadır ve bu etkileşim kazıkların yük taşıma kapasitelerinde azalmaya neden olmaktadır. Güvenli ve ekonomik bir tasarım için, tek bir kazığın taşıma kapasitesinin hesaplanması ve kazık grubundaki optimum kazık sayısının belirlenmesinde optimizasyon yapılması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, Bozkurt Optimizasyon algoritmasının düşey yük etkisi altındaki kazık gruplarının optimizasyon problemleri için geçerliliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla karşılaştırma yapılabilmesi için Parçacık Sürüşü Optimizasyon algoritması ve Geliştirilmiş Harmoni Arama algoritması kullanılmıştır. İncelenen yöntemlerin, düşey yük altındaki kazık grupları için hızlı, güvenli ve ekonomik tasarımlar yapılması konusunda mühendislere yardımcı olması amaçlanmaktadır. Yumuşak/gevşek zeminler içinde imal edilecek fore kazıkların taşıma kapasiteleri ve optimizasyonu ele alınmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Grup kazıklar, optimizasyon, metasezgisel algoritmalar, kazık tasarımı.

## Optimization of Pile Groups Under Vertical Loads Using Grey Wolf Optimizer

### ABSTRACT

Construction of foundations or embankments on a soft/loose soil deposit causes major problems in terms of geotechnical engineering. The vertical loads transferred from the foundation can cause failure and/or extreme settlements in the soft/loose soil. Additional geotechnical precautions must be taken in order to prevent such problems. Construction of piles under foundations is a widely used method. Piles are defined as point bearing piles or friction piles depending on the embedded length of the pile in the stiff layer or rock. Generally it is preferred to construct pile groups under the foundations to reduce the effects of differential settlements and eccentricity. The interaction of a pile with the others in a group is defined as “group efficiency” and this interaction causes reduction in the load-bearing capacities of the piles. It is necessary to calculate the bearing capacity of a single pile correctly and estimate the optimum number of piles in the group to make a safe and economical design. In this paper, it is aimed to investigate the robustness of Grey Wolf optimization algorithm for optimization problems of pile groups under vertical loads. In order to compare the validity of Grey Wolf Optimization algorithm, Particle Swarm Optimization algorithm and Improved Harmony Search algorithm are used. The proposed methods are intended to help engineers to make fast, safe and economical designs for pile groups. In this study, only the bearing capacities and optimization of bored pile groups are discussed.

**Keywords:** Group piles, optimization, meta-heuristic algorithms, pile design.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geoteknik mühendisliğinde karşılaşılan en önemli problemlerden birisi, yumuşak/gevşek zemin profili üzerine inşa edilen temellerdir. Temel zemininin - yumuşak/gevşek olması, yüksek sıkışabilir özellikte olması ve düşey yükleri taşıyamayacak kadar zayıf olması durumunda ilave tedbirlerin alınması zorunlu olmaktadır. Gerekli tedbirlerin alınmaması durumunda taşıma gücü göçmeleri ve/veya aşırı oturma problemleri meydana gelmektedir. Yumuşak/gevşek zeminin daha

yüksek mukavemetli bir malzeme ile değiştirilmesi, mevcut zeminin mukavemet özelliklerinin sıkıştırılarak iyileştirilmesi (vibro kompaksiyon, taş kolonlar, dinamik kompaksiyon, vb.), zemin içinde çimento enjeksiyonu ve bazı kimyasal bağlayıcılar yardımıyla kolonlar oluşturulması (jetgrout, derin karıştırma, vb.), çakma veya fore kazıkların imal edilmesi en çok kullanılan zemin iyileştirme yöntemleri olarak sayılabilir.

Üst yapı yüklerinin güvenli şekilde taşınabilmesi için ülkemizde en sık kullanılan yöntemlerden biri temel altı kazıklarının imal edilmesidir. Yumuşak/gevşek zemin tabakasının derinliğinin fazla olması durumunda

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : temur@istanbul.edu.tr

kazıkların sağlam zemin tabakasına soketlenmesi mümkün olmamaktadır. Bu gibi durumlarda kazıklar sürtünme kazığı olarak tasarlanmalıdır. Eğer kazıkların sağlam zemin tabakasına yeteri kadar soketlenmesi mümkün ise, bu durumda kazıklar uç kazığı olarak tanımlanmaktadır. Hem uç kazıklarının, hem de sürtünme kazıklarının nihai ve emniyetli taşıma kapasitelerinin hesaplanması Das [1] ve Bowles [2]'un çalışmalarında detaylı olarak anlatılmaktadır. Kazıklar, zeminde neden olabilecek deplasman miktarlarına bağlı olarak aşağıdaki şekilde sınıflandırılırlar :

1. Zeminde çok yer değiştirmeye neden olan kazıklar (çakma kazıklar)
2. Zeminde az yer değiştirmeye neden olan kazıklar (H kesitli, ucu açık çelik tüp kazıklar)
3. Zeminde yer değiştirmeye neden olmayan kazıklar (fore kazıklar)

Fore kazık uygulaması, Türkiye'de en fazla kullanılan yöntemlerden biri olduğundan bu çalışma kapsamında fore kazıkların optimizasyonu tercih edilmiştir.

Temellerdeki farklı oturmaların engellenmesi ve dış merkezlik etkisinin azaltılması için genellikle temellerin altına birden fazla kazık imal edilir. Sürtünme kazıklarından oluşan kazık grubu içindeki tek bir kazığın davranışı, grup içindeki diğer kazıklardan etkilenmektedir. Grup içindeki kazıklar arasındaki etkileşim "grup etkisi" olarak adlandırılmaktadır. Kazıkların birbirlerine çok yakın olması durumunda kazıklarda etkili olan gerilmeler kesişir. Bu sebepten dolayı, kazık grubunun taşıyabileceği toplam yük, grup içindeki her bir kazığın taşıyabileceği yüklerin toplamından daha az olmaktadır.

Güvenli ve ekonomik bir tasarım yapabilmek ve gruptaki yeterli ve uygun kazık sayısını doğru şekilde belirleyebilmek için optimizasyon yapılması önem arz etmektedir. Literatürde kazık gruplarının optimizasyonu konusunda yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Hurd ve Truman tarafından yapılan çalışmada [3] en iyileme kriteri yöntemi kullanılarak çelik kazıkların boyut optimizasyonu incelenmiştir. Chan vd. tarafından yapılan çalışmada [4] kazık gruplarının malzeme hacmi, kazık çapı ve sayısı genetik algoritma tabanlı bir yöntemle optimize edilmiştir. Hwang vd. [5] kazık sayısı belli olan

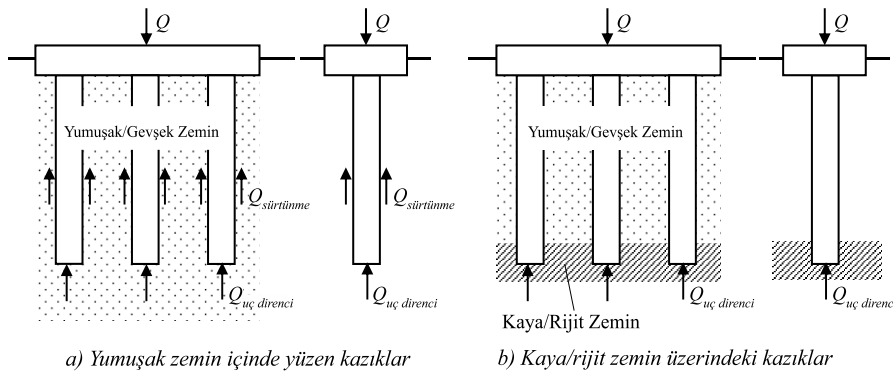
kazık gruplarında kazık çapı ve boyunun yanı sıra kazık başlığı kalınlığının optimizasyonunu genetik algoritma tabanlı bir yöntemle incelemişlerdir. Liu vd. [6] Çin mevzuatına uygun olarak kazık çapı, boyu ve sayısını genetik algoritma tabanlı bir yöntem kullanarak incelemişlerdir, Bengtlars vd. [7] tarafından genetik algoritma ve doğrudan arama yöntemleri kullanarak kazıkların koordinatları, eğimi ve sayısı optimize edilmiştir. Bu çalışmada, tek bir kazığın ve bir kazık grubunun taşıma kapasitesi, geoteknik mühendisliğinde uygulanan geleneksel yöntemler kullanılarak hesaplanmıştır. Literatürde yapılan kazık gruplarının optimizasyonu çalışmalarından farklı olarak bu çalışma kapsamında; Parçacık Sürüşü Optimizasyonu [8], Geliştirilmiş Harmoni Arama Algoritması [9] ve Bozkurt Optimizasyon Algoritması [10] kullanılmıştır.

## 2. PROBLEM FORMULASYONU (PROBLEM FORMULATION)

Bir kazık grubunun nihai ve emniyetli taşıma kapasitesinin belirlenebilmesi için gruptaki her bir kazığın taşıma gücünün doğru şekilde hesaplanması gerekmektedir.

### 2.1. Düşey Yükler Altındaki Fore Kazıkların Taşıma Kapasitesi (Bearing Capacity of Bored Piles under Vertical Loads)

Bilindiği üzere temel altı kazıkları, üst yapı yüklerini zeminin derin tabakalarına aktarmak için kullanılan yapısal elemanlardır. Bu yük aktarımı, kazık shaftı yüzey alanı boyunca olabileceği gibi direk olarak kazık ucu tarafından da olabilmektedir. Bazı durumlarda sağlam zemin tabakasının yüzeyden oldukça derin olması nedeniyle kazık uçlarının sağlam tabakaya soketlenmesi mümkün olmamaktadır. Bu gibi durumlarda kazıkların tamamı yumuşak/gevşek zemin içinde kalmaktadır. Bu tür kazıklar düşey yük etkisi altında deplase olurlar ve üst yapı yükleri kazık shaftı boyunca oluşan sürtünme etkisi ve kazık ucundaki uç direnci tarafından taşınır (Şekil 1a). Kazık uçlarının sağlam zemine soketlenmesi durumlarında ise kazıklardaki deplasman miktarı çok düşük olduğundan kazık shaftı boyunca çevre sürtünmesi oluşmaz ve üst yapı yükleri yalnızca kazık uç direnci tarafından taşınır (Şekil 1b).



Şekil 1. Rijit zemin tabakasının derinliğine bağlı olarak kazıkların kullanımı (Conditions for use of pile foundations depending on depth of stiff soil layer)

Şekil 1a'da görüldüğü gibi uygun derinlikte kaya veya rijit zemin tabakanın olmaması durumunda kazıklar yumuşak/gevşek zemin içinde imal edilirler ve bu tür kazıklar "sürtünme kazığı" olarak tanımlanır. Sürtünme kazıklarının taşıma gücü Denklem 1'de görüldüğü gibidir.

$$Q = Q_{\text{sürtünme}} + Q_{\text{uç direnci}} \quad (1)$$

Şekil 1b'deki gibi kazık uçlarının kayaya veya sağlam zemin tabakasına soketlenmesi durumunda bu tür kazıklar "uç kazığı" olarak tanımlanmaktadır ve uç kazıklarının taşıma gücü Denklem 2'deki gibidir.

$$Q = Q_{\text{uç direnci}} \quad (2)$$

### 2.1.1. Fore kazıkların uç taşıma kapasitesi (Point bearing capacity of bored piles)

Geoteknik mühendisliğinde kazıklar derin temeller olarak tanımlanır ve yüzeysel temellere nazaran çok daha derinde imal edilirler. Kazıklı temellerin taban göçme davranışı, yüzeysel temellerin göçme davranışı ile aynı prensiplere sahiptir. Yüzeysel temellerin taşıma kapasiteleri Denklem 3'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$q_p = c \cdot N_c^* + q' \cdot N_q^* + \gamma \cdot D \cdot N_\gamma^* \quad (3)$$

Yüzeysel temellerden farklı olarak, derin temellerde temel genişliği (kazık çapı,  $D$ ) temel derinliğinden oldukça küçük olmaktadır ve bu nedenle Denklem 3'teki  $\gamma \cdot D \cdot N_\gamma^*$  terimi ihmal edilerek kazıkların nihai uç taşıma gücü ( $Q_p$ ) Denklem 5'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$q_p = c \cdot N_c^* + q' \cdot N_q^* \quad (4)$$

$$Q_p = q_p \cdot A_p \quad (5)$$

Denklem 3 ve 5'te:

$c$  : kazık ucunun içinde bulunduğu zemin tabakasının kohezyonunu

$q_p$  : birim uç direncini (örn.  $kN/m^2$ )

$q'$  : temel tabanı seviyesinde efektif düşey gerilmeyi (örn.  $kN/m^2$ )

$N_c^*, N_q^*, N_\gamma^*$  : taşıma kapasitesi faktörlerini

$A_p$  : kazık taban alanını

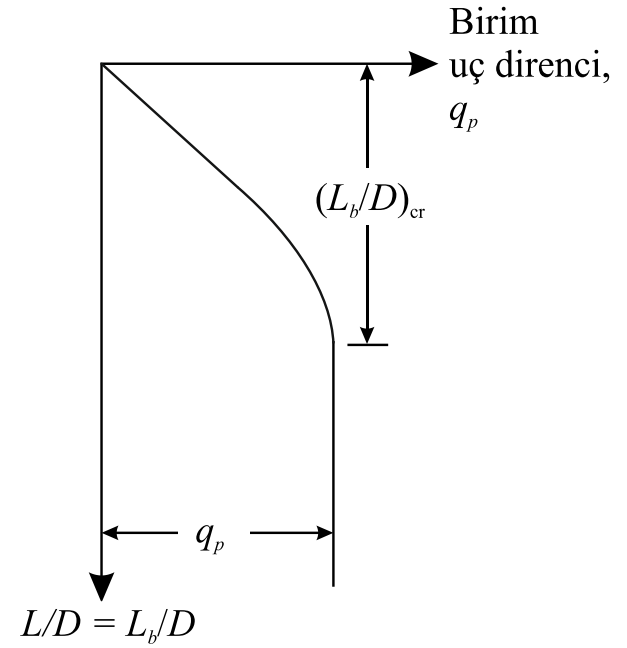
simgelemektedir. Denklem 4'te görüldüğü üzere taşıma gücü hesaplamaları hem kohezyon ( $c$ ) değerine, hem de kayma mukavemeti açısına ( $\phi$ ) bağlı olmaktadır. Bu nedenle kazıklarda uç taşıma kapasitesi, kazık ucunun granüler veya kohezyonlu zemin içinde bulunması durumları için ayrı ayrı hesaplanmaktadır.

#### 2.1.1.1. Granüler zeminlerde kazık uç taşıma kapasitesi (Point Bearing Capacity in Granular Soils)

Granüler zeminlerdeki kazıkların uç taşıma gücünün ( $Q_p$ ) hesaplanmasında birkaç farklı yöntem kullanılmaktadır [11-13]. Bu çalışma kapsamında, hesaplamalarda en sık kullanılan Meyerhof Yöntemi [11] ele alınmıştır.

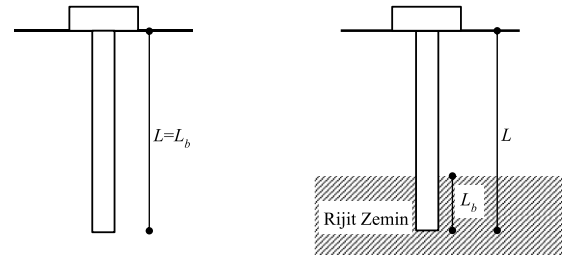
Meyerhof'un çalışmasında [11] anlatıldığı üzere, kumlu granüler zeminlerde bir kazığın uç taşıma kapasitesi, derinliğe bağlı olarak artmakta ve "kazık soket boyu/kazık çapı" oranının ( $L_b/D$ ) belli bir değere ulaşmasından sonra Şekil 2'de görüldüğü gibi sabit

kalmaktadır. Zemin tabakalanmasının Şekil 3a'daki gibi homojen olması durumunda kazık soket boyu, kazık boyuna eşit olmaktadır ( $L_b=L$ ). Ancak kazığın Şekil 3b'de görüldüğü gibi sağlam zemin tabakasına soketlenmesi durumunda kazık soket boyu  $L_b$  olmaktadır.



Şekil 2. Homojen kumlarda birim uç direncin değişimi (Variation of unit point resistance in homogenous sand)

Meyerhof yönteminde, taşıma gücü faktörlerinin ( $N_c^*$  ve  $N_q^*$ ),  $L_b/D$  oranı ile arttığı ve  $0.5(L_b/D)$  değerinde maksimum değere ulaşarak sabit kaldığı belirtilmektedir.



a) Homojen zemin tabakası içinde tek bir kazık b) Rijit zemin tabakasına soketlenen tek bir kazık

Şekil 3. Tek bir kazığın soket boyu (Embedment length of a single pile)

Granüler zeminlerde kohezyon değerinin sıfır olması nedeniyle ( $c=0$ ) Denklem 4 sadeleştirilerek Denklem 6'ya dönüşmektedir.

$$q_p = q' \cdot N_q^* \quad (6)$$

Meyerhof'a göre uç taşıma direnci belli bir derinlikten sonra sabit kalacaktır ve Denklem 7'de hesaplanan değer limit uç taşıma direnci olmaktadır.

$$q_p(\text{limit}) (kN/m^2) = 50 \cdot N_q^* \cdot \tan(\phi) \quad (7)$$

Taşıma gücü faktörü ( $N_q^*$ ) değerleri Çizelge 1'de verilmiştir [1].

### 2.1.1.2. Kohezyonlu zeminlerde kazık uç taşıma kapasitesi (Point Bearing Capacity in Cohesive Soils)

Kohezyonlu zeminlerdeki kazıkların uç taşıma kapasitesi ( $Q_p$ ), granüler zeminlerde olduğu gibi birkaç farklı yöntem ile hesaplanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, hesaplamalarda en sık kullanılan Meyerhof Yöntemi tercih edilmiştir.

Suya doymuş kohezyonlu zeminlerde kayma mukavemeti açısı değeri sıfır olmaktadır ( $\phi=0$ ) ve kazıkların uç taşıma gücü Denklem 8'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$q_p = c_u \cdot N_c^* = c_u \cdot 9 \quad (8)$$

Burada  $c_u$ , kohezyonlu zeminin drenajsız kayma mukavemetini temsil etmektedir.

**Çizelge 1.** Taşıma gücü faktörü ( $N_q^*$ ) değerleri (Interpolated values of  $N_q^*$ )

İçsel sürtünme açısı, $\phi$ (°)	$N_q^*$	İçsel sürtünme açısı, $\phi$ (°)	$N_q^*$
20	12.4	33	96.0
21	13.8	34	115.0
22	15.5	35	143.0
23	17.9	36	168.0
24	21.4	37	194.0
25	26.0	38	231.0
26	29.5	39	276.0
27	34.0	40	346.0
28	39.7	41	420.0
29	46.5	42	525.0
30	56.7	43	650.0
31	68.2	44	780.0
32	81.0	45	930.0

### 2.1.2. Fore kazıkların sürtünme direnci (Frictional Resistance of Bored Piles)

Kazık shaftı boyunca oluşan çevre sürtünmesi ( $Q_f$ ) Denklem 9'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$Q_f = \sum(p \cdot \Delta L \cdot f) \quad (9)$$

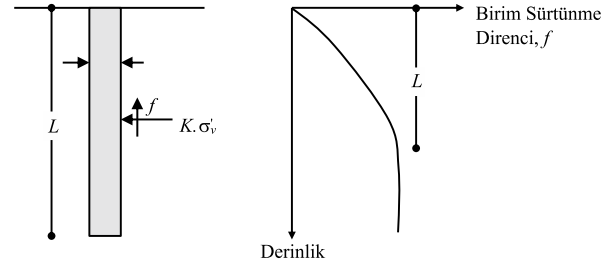
Denklem 9'da:

$f$  : ilgili zemin tabakası için birim sürtünme direncini

$\Delta L$  : ilgili zemin tabakasının kalınlığını

$p$  : kazık shaftının çevresini

simgelemektedir. Kazık shaftı boyunca oluşan sürtünme direnci, kazık gövdesinin içinde bulunduğu her zemin tabakası için zemin türüne bağlı olarak (granüler, kohezyonlu) ayrı ayrı hesaplanmaktadır.



**Şekil 4.** Granüler zeminlerde kazık shaftı boyunca oluşan birim sürtünme direnci (Unit frictional resistance along pile shaft in granular soils)

### 2.1.2.1. Granüler zeminlerde sürtünme direnci (Frictional Resistance in Granular Soils)

Günümüze kadar yapılan çalışmalara ve gözlemlere göre, birim sürtünme direncinin derinlikle birlikte arttığı ve belirli bir  $L'$  derinliğinden itibaren sabit kaldığı bilinmektedir. Kritik  $L'$  derinliği, kazık çapı olan  $D$ 'nin 15-20 katı kadar olabilmektedir. Birim sürtünme direncinin derinliğe bağlı olarak değişimi Şekil 4'te görülmektedir.

Granüler zeminler için sürtünme direnci ( $f$ ), Denklem 10'da görüldüğü gibi elde edilmektedir.

$$f = K \cdot \sigma_v' \cdot \tan(\delta) \quad (10)$$

Denklem 10'da;

$K$  : ilgili zemin tabakası için efektif yanal toprak basıncı katsayısını

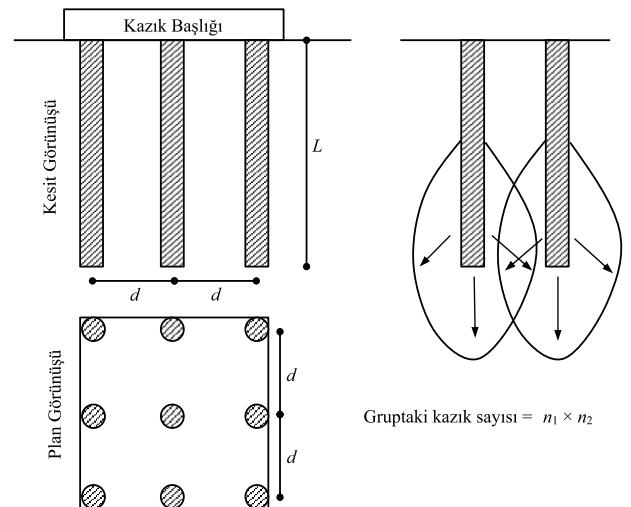
$\sigma_v'$  : ilgili zemin tabakası için ortalama düşey efektif gerilmeyi

$\delta$  : zemin-kazık arası sürtünme açısını

simgelemektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, sürtünme direnci belirli bir  $L'$  derinliğinden itibaren sabit kalmaktadır. Buna bağlı olarak, kritik derinlik olan  $L'$  ile kazık uç noktası olan  $L$  arasındaki bölümde;

$$f = f_{z=L'} \quad (11)$$

Denklem 10'da verilen toprak basıncı katsayısı ( $K$ ) fore kazık için 0.7 ve zemin-kazık sürtünme açısı ( $\delta$ ) beton için  $\frac{3}{4}\phi$  olarak kullanılmaktadır [14].



**Şekil 5.** Kazık grupları ve zemin gerilmelerinin üst üste çakışması [1] (Pile groups and overlap of soil pressures)

### 2.1.2.2. Kohezyonlu zeminlerde sürtünme direnci (Frictional Resistance in Cohesive Soils)

Kohezyonlu zeminlerde sürtünme direncinin hesaplanmasında sıklıkla kullanılan yöntemlerden ikisi:  $\alpha$  yöntemi ve  $\lambda$  yöntemidir. Bu çalışma kapsamında kohezyonlu zeminlerde sürtünme direncinin hesaplanmasında  $\alpha$  yöntemi tercih edilmiştir.

$\alpha$  yöntemine göre birim sürtünme direnci ( $f$ ) Denklem 12'de görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

$$f = \alpha \cdot c_u \quad (12)$$

Denklem 12'de  $\alpha$ , ampirik adezyon katsayısını simgelemektedir ve drenajsız kayma mukavemeti ( $c_u$ ) değerine bağlı olarak Terzaghi [15] tarafından yayımlanan tablodan elde edilmektedir.

### 2.2. Kazık Gruplarında Grup Etkisi (Group Efficiency in Pile Groups)

Kazık gruplarının taşıma kapasitesinin hesaplanması karmaşık bir konudur. Bir kazık grubunda bir veya daha fazla kazığın birbirine yakın olarak imal edilmesi durumunda, çevre sürtünmesi ve/veya uç taşıma gücü nedeniyle oluşan zemin gerilmelerinin üst üste çakışacağı ve kazıkların toplam taşıma gücünde azalma meydana geleceği kabul edilmektedir. Bir kazık grubundaki zemin gerilmelerinin çakışması Şekil 5'teki gibi gösterilmektedir. Grup içindeki kazıkların yoğunluğunun fazla olması ve kazıkların birbirine fazla yakın olması durumunda kazıklar bir bütün olarak göçmeye uğrar ve/veya aşırı oturmalar meydana gelir.

Çeşitli yönetmeliklere göre önerilen kazık merkezleri arasındaki olması gereken minimum mesafeler Çizelge 2'de verilmektedir.

**Çizelge 2.** Kazık merkezleri arasındaki olması gereken minimum mesafeler (Minimum center to center pile spacings)

Kazık Türü	Yönetmelik		
	BOCA [16]	NBC [17]	CBC [18]
Sürtünme Kazıkları	2D* veya 1.75H** $\geq$ 760mm	2D veya 1.75H $\geq$ 760mm	2D veya 2H $\geq$ 760mm
Uç Kazıkları	2D veya 1.75H $\geq$ 610mm	2D veya 1.75H $\geq$ 610mm	

D\* Kazık çapı

H\*\* Dikdörtgen kesitli kazıkların diyagonal uzunluğu

Bir gruptaki kazıklar ve çevresindeki zemin arasındaki etkileşim çok karmaşık olup, grubun nihai taşıma kapasitesi sürtünme kazıkları için tek bir kazığın nihai taşıma kapasitesi ile kazık sayısının çarpımına eşit olmamaktadır. Kazıklar arasındaki bu etkileşimlerin tesiri "Grup Etkisi" olarak adlandırılmaktadır. Bir kazık grubunun yük taşıma kapasitesi Denklem 13'te görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

$$Q_{u(grup)} = Q_{u(kazık)} \cdot \eta \cdot n \quad (13)$$

Grup etkinlik katsayısının hesaplanmasında Denklem 14-16'da verilen formüller [1] kullanılmaktadır.

#### Converse-Labarre denklemi:

$$\eta = 1 - \left[ \frac{(n_1-1) \cdot n_2 + (n_2-1) \cdot n_1}{90 \cdot n_1 \cdot n_2} \right] \cdot \tan^{-1} \left( \frac{D}{d} \right) \quad (14)$$

#### Los Angeles Grup Etkinlik denklemi:

$$\eta = 1 - \frac{D}{\pi d \cdot n_1 \cdot n_2} \left[ n_1 \cdot (n_2 - 1) + n_2 \cdot (n_1 - 1) + \sqrt{2} \cdot (n_1 - 1) \cdot (n_2 - 1) \right] \quad (15)$$

#### Seiler-Keeny denklemi:

$$\eta = \left( 1 - \left[ \frac{11d}{7(d^2-1)} \right] \cdot \left[ \frac{n_1+n_2-2}{n_1+n_2-1} \right] \right) + \frac{0,3}{n_1+n_2} \quad (16)$$

Denklem 13-16'da;

$\eta$  : grup etkinlik katsayısı

$Q_{u(grup)}$  : kazık grubunun nihai yük taşıma kapasitesi

$Q_{u(kazık)}$  : tek bir kazığın nihai yük taşıma kapasitesi

$n$  : gruptaki kazık sayısı

$n_1, n_2$  : kazık grubunun iki yönündeki kazık sayıları

$D$  : kazık çapı

$d$  : kazık merkezleri arasındaki mesafe

olarak tanımlanmaktadır.

### 3. OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI (OPTIMIZATION ALGORITHMS)

Bu çalışmada, düşey yük altındaki kazık gruplarının optimum tasarımını incelemek amacıyla üç farklı optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmalarından ikisi literatürde çok sayıda problemin çözümünde başarı ile uygulanan Parçacık Sürüsü Optimizasyon (PSO) algoritması ve Harmoni Arama algoritmasının geliştirilmiş sürümü olan Geliştirilmiş Harmoni Arama (GHA) algoritmasıdır. Üçüncü algoritma ise Mirjalili vd. [10] tarafından geliştirilen Bozkurt Optimizasyon (BO) Algoritması'dır. Bu algoritmaların çalışma prensipleri, takip eden alt başlıklarda açıklanmıştır.

#### 3.1. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)

Kennedy ve Eberhart [8] tarafından, kuşların ve balıkların sürü davranışlarından ilham alınarak geliştirilen Parçacık Sürüsü Optimizasyon (PSO) algoritması, kullanım alanı en geniş algoritmalarından birisidir. PSO algoritmasında, diğer metasezgisel algoritmalarda olduğu gibi öncelikle, tanımlanmış limit değerler arasında yer alan rastgele değerler seçilerek bir başlangıç çözüm matrisi oluşturulur ve amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır. Elde edilen amaç fonksiyonu değerleri kullanılarak yeni bir çözüm kümesi üretilir. Üretilen yeni çözüm kümesinin eski çözüm kümesinden daha iyi bir amaç fonksiyonu değerine sahip olması durumunda, eski çözüm kümesi matristen çıkartılır ve

yerine yeni çözüm kümesi eklenir. Bu işlem durdurma kriteri sağlanıncaya kadar devam eder.

PSO algoritmasında yeni çözüm kümesinin elemanlarını üretmek için bir hız vektörü üretilir ve bu hız değerleri, eski çözüm kümesi değerlerine eklenir. Bu işlemlerin denklemleri aşağıdaki gibi yazılır:

$$V_i^{t+1} = V_i^t + C_1 \cdot r_1^{t+1} \cdot (X_{lbest} - X_i^t) + C_2 \cdot r_2^{t+1} \cdot (X_{gbest} - X_i^t) \quad (17a)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (17b)$$

Denklem 17'de  $t$  iterasyon numarasını,  $V_i^{t+1}$  parçacığın hızını,  $V_i^t$  parçacığın önceki hızını,  $C_1$  ve  $C_2$  ivme sabitlerini,  $r_1^{t+1}$  ve  $r_2^{t+1}$  [0, 1] arasında düzgün dağılımlı rastgele sayıları,  $X_{lbest}$  parçacığın geçmişteki en iyi konumunu,  $X_{gbest}$  en iyi amaç fonksiyonu değerine sahip çözüm kümesindeki parçacığın konumunu,  $X_i^{t+1}$  parçacığın yeni konumunu ve  $X_i^t$  ise parçacığın önceki konumunu simgelemektedir.

Shi ve Eberhart [19], atalet ağırlığı olarak adlandırılan ve  $w$  ile simgelenen bir katsayıyı hız denkleminde ekleyerek, algoritmanın başarımını artırmayı amaçlamışlardır. Atalet ağırlığının eklenmesiyle yeni çözüm kümesi elemanlarını üretmek için kullanılan hız denklemleri

$$V_i^{t+1} = w \cdot V_i^t + C_1 \cdot r_1^{t+1} \cdot (X_{lbest} - X_i^t) + C_2 \cdot r_2^{t+1} \cdot (X_{gbest} - X_i^t) \quad (18)$$

olarak değiştirilmiştir. Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak kullanılması sebebiyle atalet ağırlığının yer aldığı hız denklemi tercih edilmiştir.

### 3.2. Geliştirilmiş Harmoni Arama (Improved Harmony Search)

Harmoni Arama (HA) Geem vd. [9] tarafından geliştirilen bir metasezgisel algoritmadır. HA üç adet algoritmaya özgü parametreye ihtiyaç duymaktadır. Bu parametreler; harmoni belleğini dikkate alma oranı (HMCR), ton ayarlama oranı (PAR) ve bant genişliğidir (bw).

HA algoritmasında, yeni bir çözüm kümesinin değerleri Denklem 19 kullanılarak üretilir:

$$X'_i \leftarrow \begin{cases} X'_i \in \{X_i^1, X_i^2, \dots, X_i^{HMS}\} & \text{olasılık HMCR} \\ X'_i \in x_i & \text{olasılık (1 - HMCR)} \end{cases} \quad (19a)$$

$$\text{Ton ayarlama kararı } X'_i \leftarrow \begin{cases} \text{Evet} & \text{olasılık PAR} \\ \text{Hayır} & \text{olasılık (1 - PAR)} \end{cases} \quad (19b)$$

Bu denklemde;  $i$  numaralı değişkenin değeri  $X'_i$ , popülasyon sayısı  $HMS$ ,  $i$  numaralı değişkenin bellekteki değerleri  $\{X_i^1, X_i^2, \dots, X_i^{HMS}\}$ ,  $i$  numaralı değişkene ait arama aralığı  $x_i$  ile gösterilmiştir. PAR olasılığının gerçekleşmesi durumunda,  $X'_i$  aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$X'_i = X'_i \pm \text{rand}() \cdot bw \quad (20)$$

Bu işlemlerin sonucunda üretilen yeni çözüm kümesinin amaç fonksiyonu değerinin, bellekteki en kötü değere sahip olan çözüm kümesinden daha iyi olması durumunda, bellekteki en kötü değere sahip olan çözüm kümesi bellekten silinir ve yeni çözüm kümesi belleğe eklenir. Bu işlem, durdurma kriteri sağlanıncaya kadar devam eder.

Mahdavi vd. [20] "Geliştirilmiş Harmoni Arama (GHA)" adını verdikleri yeni bir HA türevi yayımlamışlardır. Buna göre, optimizasyon işlemi süresince iterasyon sayısına bağlı olarak PAR değeri doğrusal, bw değeri ise üstel olarak değişmektedir. Bu parametrelerin değişimi aşağıdaki denklemlerle hesaplanmaktadır:

$$PAR(gn) = PAR_{min} + \frac{(PAR_{max} - PAR_{min})}{NI} \times gn \quad (21a)$$

$$bw(gn) = bw_{max} \cdot \exp(c \cdot gn); c = \frac{\ln(\frac{bw_{min}}{bw_{max}})}{NI} \quad (21b)$$

Bu denklemlerde,  $PAR(gn)$  bir iterasyondaki ton ayarlama oranını,  $PAR_{min}$  ve  $PAR_{max}$  ton ayarlama oranının en düşük ve en yüksek değerlerini,  $NI$  optimizasyon işleminde yapılacak maksimum iterasyon sayısını,  $gn$  iterasyon numarasını,  $bw(gn)$  bir iterasyondaki bant genişliği değerini,  $bw_{max}$  ve  $bw_{min}$  ise bant genişliğinin alabileceği en büyük ve en küçük değerleri temsil etmektedir.

### 3.3. Bozkurt Optimizasyon Algoritması (Grey Wolf Optimizer)

Mirjalili vd. [10] tarafından, bozkurtların (İngilizce: Grey Wolf, Latince: *Canis lupus*) avlanma davranışlarından ilham alınarak geliştirilmiştir. Buna göre; başlangıç çözüm kümeleri, amaç fonksiyonu değerlerine göre sıralanır ve en iyi değere sahip ilk üç çözüm kümesi sırasıyla alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) ve delta ( $\delta$ ) kümesi olarak tanımlanır. Belirlenen bu kümelerdeki değerler Denklem 22-24'te kullanılarak üç yeni değer üretilir.

$$X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot |C_1 \cdot X_\alpha - X| \quad (22)$$

$$X_2 = X_\beta - A_2 \cdot |C_2 \cdot X_\beta - X| \quad (23)$$

$$X_3 = X_\delta - A_3 \cdot |C_3 \cdot X_\delta - X| \quad (24)$$

Bu denklemlerde  $X_\alpha$ ,  $X_\beta$  ve  $X_\delta$  terimleri sırasıyla  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\delta$  kümelerindeki değişken değerlerini,  $X$  mevcut çözüm kümeleri içindeki bir değeri simgelemektedir. Denklemde bulunan  $A$  ve  $C$  değerleri ise değişken katsayısı olup Denklem 25-26 ile hesaplanırlar.

$$A = 2 \cdot a \cdot r_1 - a \quad (25)$$

$$C = 2 \cdot r_2 \quad (26)$$

Bu denklemlerde  $r_1$  ve  $r_2$  [0,1] arasında düzgün dağılımlı iki farklı rastgele sayıdır.  $a$  ise iterasyon sayısına bağlı olarak 2'den 0'a doğru azalan bir katsayıdır.

$\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\delta$  kümeleri için ayrı ayrı hesaplanan üç değer aritmetik ortalaması, yeni çözüm kümesinin değerini vermektedir (Denklem 27).

$$X_{yeni} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (27)$$

Bu işlemler sonucunda üretilen yeni çözüm kümeleri, önceki çözüm kümelerinin yerine geçer. Amaç fonksiyonu değerleri alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) ve delta ( $\delta$ ) kümelerinin amaç fonksiyonu değerlerinden daha iyi değerlere sahipse, bu kümeler yeni kümelerin değerleriyle güncellenir ve iterasyon işlemine durdurma kriteri sağlanıncaya kadar devam edilir.

#### 4. AMAÇ FONKSİYONU (OBJECTIVE FUNCTION)

Bu çalışmada, kazık çapları, kazık boyları ve aralıkları optimizasyon değişkeni olarak tanımlanmıştır. Amaç fonksiyonu ise delgi, donatı, beton, nakliye ve işçilik maliyetlerinin tamamını içeren en düşük toplam maliyet olarak tanımlanmıştır. Kazıklar için maliyet optimizasyonunun amaç fonksiyonu

$$\min f(X) = n_1 \cdot n_2 \cdot C_p \quad (28)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemde,  $n_1$  ve  $n_2$  iki yöndeki kazık sayılarını,  $C_p$  ise kazık birim maliyetini temsil etmektedir.

#### 5. SAYISAL ÖRNEKLER (NUMERICAL EXAMPLES)

Bu çalışma kapsamında üç farklı sayısal örnek ele alınmıştır. Bütün örnekler için temel boyutları  $20 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ , toplam sürüş yükü  $100000 \text{ kN}$ , kazık aralıkları için alt ve üst değerler ise sırasıyla  $2.5D$  ve  $4D$  olarak tanımlanmıştır. Kazık çapı ve birim maliyet değerleri ise Çizelge 3'te sunulmuştur.

**Çizelge 3.** Kazık çapları ve birim maliyetleri (Diameters and unit costs for pile)

Kazık çapı (m)	Birim Maliyet (₺/m)	
	Kazık boyu < 18 m	Kazık boyu > 18 m
0.30	69.50	69.50
0.45	92.74	92.74
0.65	158.20	170.05
0.80	209.85	229.60
1.00	318.85	354.78
1.20	440.81	492.14
1.65	739.79	842.44

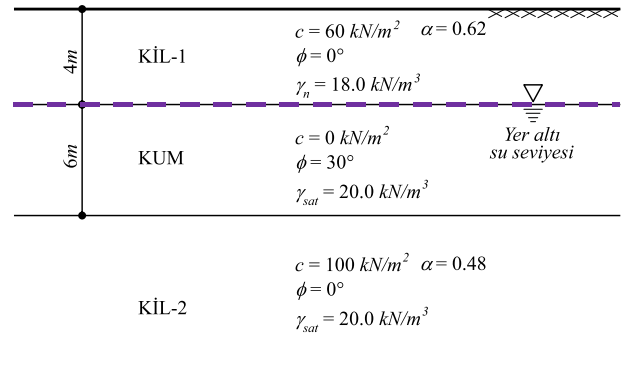
Optimizasyon işlemi sırasında türetilen farklı kazık boylarının uç kazık davranışına sebep olmaması ve kazıkların sadece sürtünmeli kazık olarak davranabilmesi için kullanılan örneklerdeki en alt zemin tabakasının derinliği sonsuz kabul edilmiştir. Analizlerde kazık gruplarının taşıma kapasitesi limit durum (*Güvenlik katsayısı* = 1) için belirlenmiştir.

PSO algoritması için Pedersen [21] tarafından önerilen algoritma parametreleri kullanılmıştır. Buna göre ivme

sabitleri  $C_1 = -0.6485$ ,  $C_2 = 2.6475$  ve atalet ağırlığı  $w = -0.6031$  olarak kullanılmıştır. GHA algoritması için ise Yang [22] tarafından önerilen  $HMCR = 0.9$ ,  $PAR_{min} = 0.4$ ,  $PAR_{max} = 0.9$ ,  $bw_{min} = 0.0001$ ,  $bw_{max} = 1$  parametreleri kullanılmıştır. Durdurma kriteri olarak belirlenen maksimum iterasyon sayıları, PSO ve BO için [10 20 30 40 50 60 70 80 90 100], GHA için ise [500 600 700 800 900 1000 2000 3000 4000 5000] olarak tanımlanmıştır. Popülasyon sayısının optimizasyon başarımına etkilerini incelemek adına [5 10 15 20 25 30 35 40 45 50] popülasyon sayıları kullanılmıştır. Seçilen popülasyon sayıları ve maksimum iterasyon sayıları kullanıldığında, her bir algoritma için en fazla 5000 amaç fonksiyonu değerlendirmesi yapılmış olacaktır. Örneklerde, her algoritma ve popülasyon sayısı için 100'er defa bağımsız optimizasyon işlemi yapılmıştır. 100 bağımsız optimizasyon sonucunda elde edilen tasarımların kabul edilebilirliği, en düşük ve en yüksek toplam maliyetin birbirine eşit, başka bir deyişle standart sapma değerinin "0" olması olarak tanımlanmıştır.

##### 5.1. Örnek-1 (Example-1)

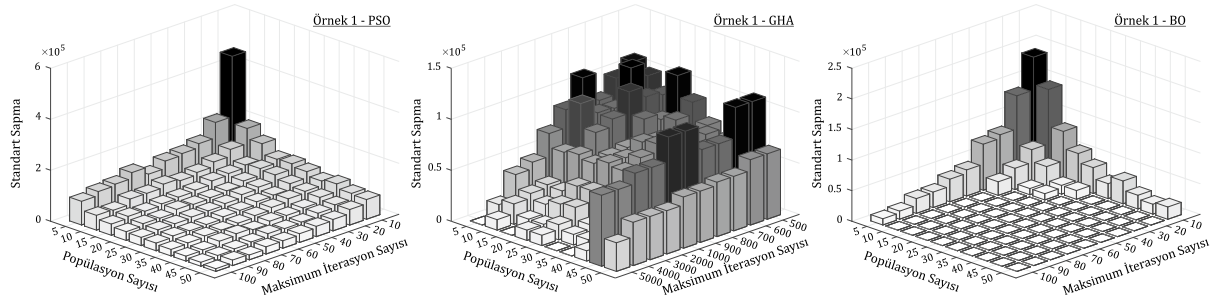
Üç zemin tabakası bulunan bu örnekte, farklı özelliklere sahip iki kil tabakasının arasında bir kum tabakası bulunmaktadır. Yüzeyin hemen altındaki kil tabakasının derinliği  $4 \text{ m}$ , kum tabakasının derinliği ise  $6 \text{ m}$ 'dir. Yer altı su seviyesi ise yüzeyin  $4 \text{ m}$  altında, kil ve kum tabakasının birleştiği yüzeydedir. Zemin tabakalarının detayları ve zeminlerin teknik özellikleri Şekil 6'da sunulmuştur.



**Şekil 6.** Örnek-1'e ait zemin tabakaları (Soil stratification for Example-1)

Farklı popülasyon ve maksimum iterasyon sayıları kullanılarak yapılan 100'er bağımsız analiz sonucunda elde edilen standart sapma değerlerinin dağılımı Şekil 7'de sunulmuştur. Algoritmaların her popülasyon sayısı için en düşük standart sapma değerini veren maksimum iterasyon sayısı belirlenmiştir. En düşük standart sapma değerini veren birden fazla maksimum iterasyon sayısı olması durumunda, en düşük maksimum iterasyon sayısı seçilmiştir. Seçilen değerlerle elde edilen sonuçlar Çizelge 4'te sunulmuştur.





Şekil 7. Örnek-1 için elde edilen standart sapma değerleri (Standard deviation values for Example-1)

Çizelge 4. Örnek-1 için elde edilen maliyetler ve karşılaştırmaları (The optimum costs and comparison for Example-1)

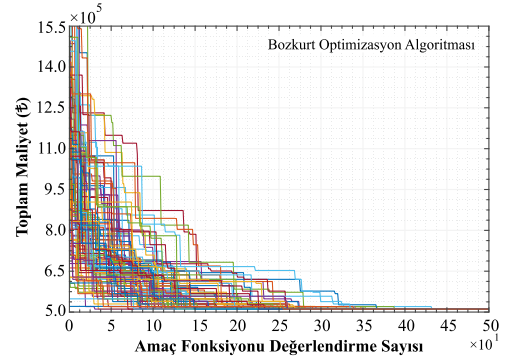
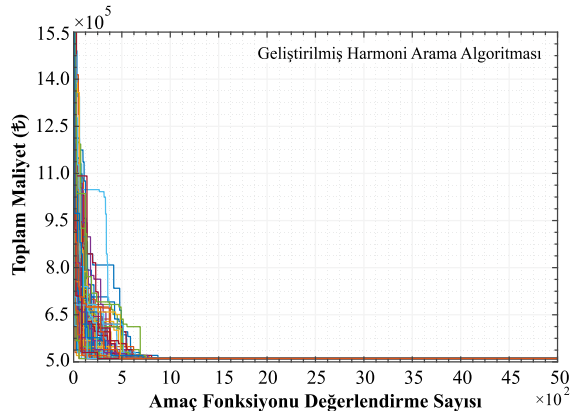
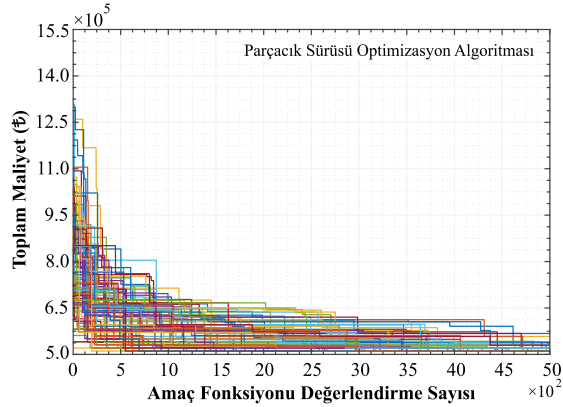
	Populasyon Sayısı	Maksimum İterasyon Sayısı	Amaç Fonksiyonu Değ. Sayısı	En düşük maliyet (₺)	En yüksek maliyet (₺)	Ortalama maliyet (₺)	Standart Sapma
PSO	5	100	500	510812	878467	618451	92770.11
	10	90	900	510812	768583	567501	55116.33
	15	100	1500	510812	685270	550549	44102.31
	20	100	2000	510812	664594	533025	34378.39
	25	100	2500	510812	640741	532664	32257.64
	30	100	3000	510812	624326	528360	30076.34
	35	100	3500	510812	644830	524681	25401.68
	40	100	4000	510812	620288	521299	19318.40
	45	100	4500	510812	584123	518680	15443.18
	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>5000</b>	<b>510812</b>	<b>567569</b>	<b>515901</b>	<b>10553.10</b>
GHA	<b>5</b>	<b>5000</b>	<b>5000</b>	<b>510812</b>	<b>510812</b>	<b>510812</b>	<b>0.00</b>
	10	5000	5000	510812	612180	511986	10246.97
	15	5000	5000	510812	510812	510812	0.00
	20	4000	4000	510812	612180	511826	10136.81
	25	5000	5000	510812	612180	511826	10136.81
	30	5000	5000	510812	510812	510812	0.00
	35	5000	5000	510812	510812	510812	0.00
	40	4000	4000	510812	578698	512813	10069.32
	45	5000	5000	510812	612180	511826	10136.81
	50	4000	4000	510812	612180	512299	10473.54
BO	5	100	500	510812	612180	511826	10136.81
	<b>10</b>	<b>50</b>	<b>500</b>	<b>510812</b>	<b>510812</b>	<b>510812</b>	<b>0.00</b>
	15	40	600	510812	510812	510812	0.00
	20	40	800	510812	510812	510812	0.00
	25	30	750	510812	510812	510812	0.00
	30	20	600	510812	510812	510812	0.00
	35	20	700	510812	510812	510812	0.00
	40	20	800	510812	510812	510812	0.00
	45	20	900	510812	510812	510812	0.00
	50	20	1000	510812	510812	510812	0.00

Her algoritma için bulunan en iyi sonuç kalın harflerle gösterilmiştir.

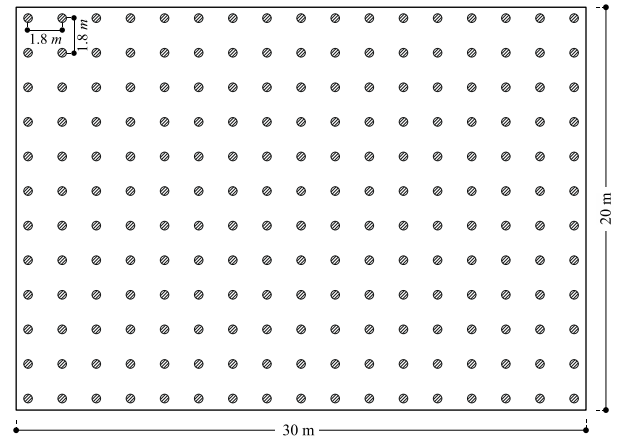
Çizelge 4'te sunulan optimizasyon sonuçlarına göre, bu örnekte en düşük maliyet 510812 ₺ olarak elde edilmiştir ve kullanılan bütün algoritmalar, göz önünde bulundurulmuş bütün popülasyon sayılarında bu maliyete ulaşabilmişlerdir. Ancak, en düşük ve en yüksek maliyetler ile birlikte standart sapma değerleri de incelendiğinde, GHA algoritması 5, 30 ve 35, BO algoritması 10 ve üzeri popülasyon sayılarında kabul edilebilir sonuçlar verirken PSO algoritması göz önünde bulundurulmuş popülasyon sayılarının hiç birinde kabul edilebilir sonuçlar elde edememiştir. Elde edilen maliyet istatistikleri Çizelge 4'te yer almaktadır.

100'er bağımsız analiz sonucunda algoritmaların nihai sonuca ulaştıkları amaç fonksiyonu değerlendirme sayıları incelendiğinde, GHA algoritmasının kabul edilebilir sonuçları elde etmesi için ihtiyaç duyduğu amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı 5000 iken, BO algoritmasının 500 değerlendirme sonucu en düşük maliyetli tasarımı elde edebildiği görülmüştür. Algoritmaların Örnek-1 için yaklaşım grafikleri Şekil 8'de sunulmuştur.

Optimizasyon işlemleri sonucunda elde edilen en düşük maliyetli tasarımda kazıkların çapı 0.45 m kazıkların boyu 27 m, kazık aralıkları 1.8 m, her iki yöndeki kazık sayıları  $n_1$  ve  $n_2$  ise 12 ve 17 olarak hesaplanmıştır. Tasarımdaki toplam kazık sayısı ise 204 olmaktadır. Kazıkların yerleşim planı Şekil 9'da sunulmuştur. Kazık tasarımında ve donatı hesabında kazık boyu ile kazık çapı oranına bağlı olarak narinlik incelemesinin de yapılması önem arz etmektedir. Ancak bu çalışma kapsamında narinlik etkisi göz önünde bulundurulmamış ve ihmal edilmiştir.

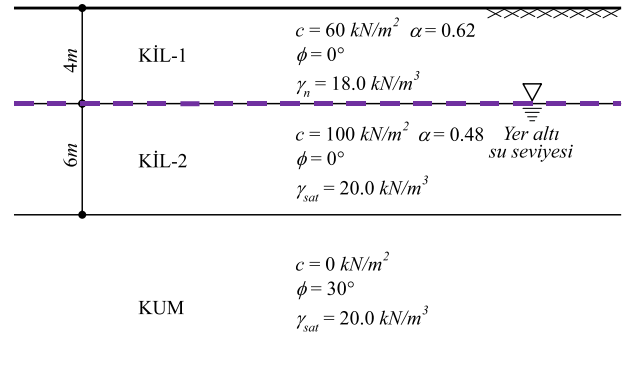


Şekil 8. Örnek-1 için yaklaşım grafikleri (Convergence curves for Example-1)



Şekil 9. Kazık yerleşim planı (The foundation plan)

## 5.2. Örnek-2 (Example-2)



Şekil 10. Örnek-2'ye ait zemin tabakaları (Soil stratification for Example-2)

Bu örnekte kullanılan zemin özellikleri, tabaka kalınlıkları ve yer altı su seviyesi Örnek-1 ile aynı değerlere sahiptir. İlk örnekten farklı olarak KİL-2 tabakası ile KUM tabakaları yer değiştirmiştir. Bu değişiklik sonucunda kazıkların uç dirençlerinin kum tabakasında oluşmasının maliyete etkisi incelenecektir. Örneğe ait detaylar Şekil 10'da gösterilmiştir.

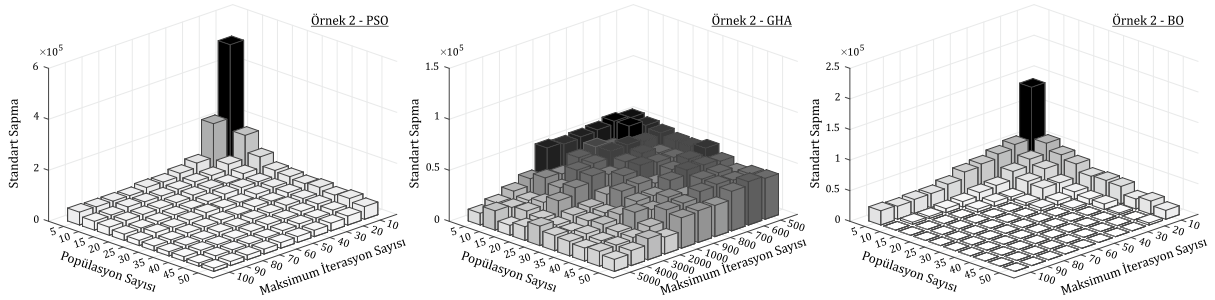
Çalışma kapsamında, kullanılan üç farklı algoritmanın farklı popülasyon sayıları kullanılarak en düşük maliyet 406758 ₺ olarak elde edilmiştir. En düşük maliyetli

tasarımda kazık çapı 0.45 m, kazık boyu 21.5 m ve kazık aralığı 1.8 m olarak hesaplanmıştır.

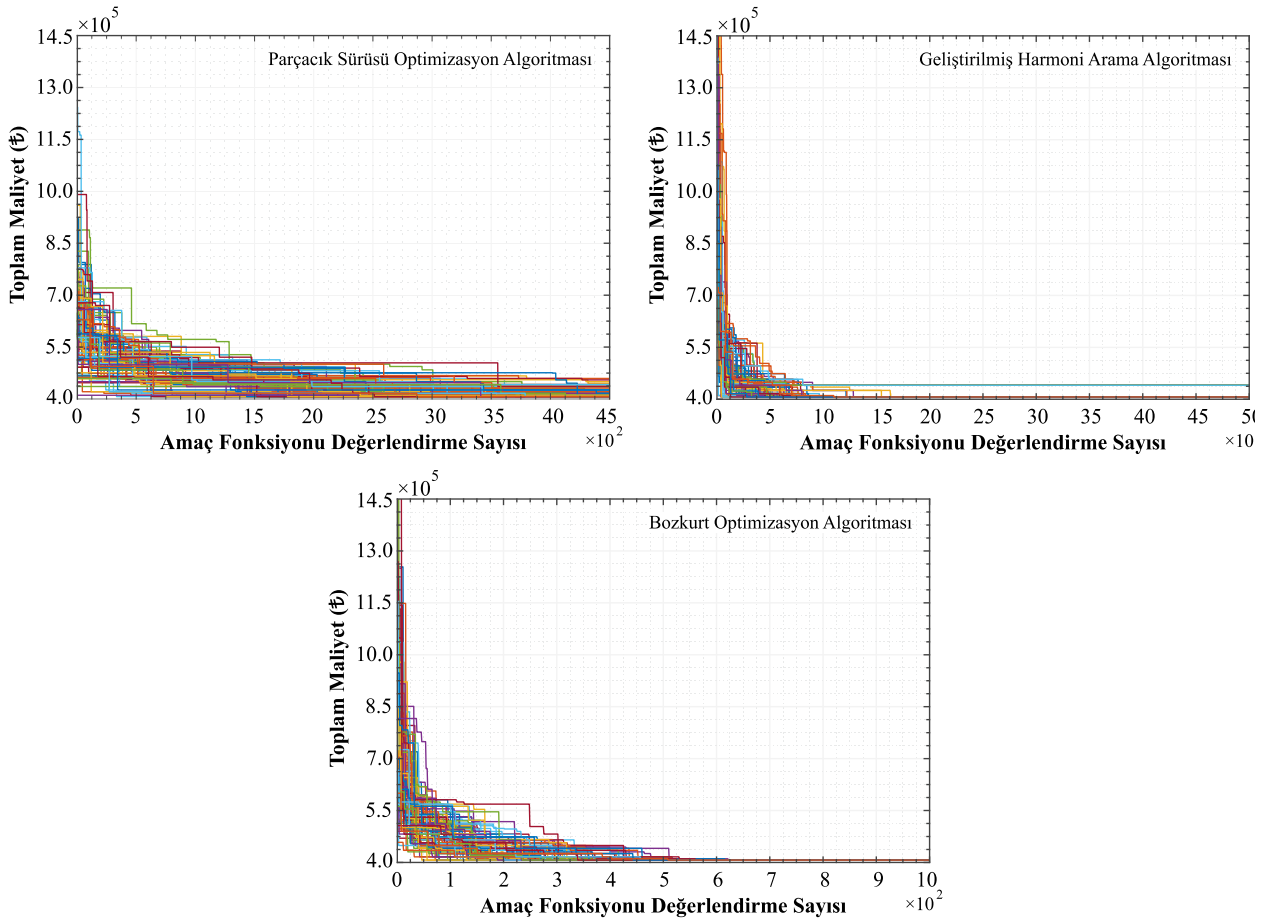
Örnek-1’de olduğu gibi 100’er bağımsız analiz sonucunda elde edilen standart sapma değerlerinin dağılımı incelenmiş ve Şekil 11’de sunulmuştur. Algoritmaların her popülasyon sayısı için en düşük standart sapma değerini veren maksimum iterasyon sayısı belirlenmiştir. Her popülasyon sayısına karşılık en düşük standart sapma değerine sahip olan uygun iterasyon sayısı belirlenmiş ve bu değerlerle elde edilen sonuçlar Çizelge 5’te sunulmuştur.

farklı popülasyon sayılarının tamamında en düşük toplam maliyet değeri elde edilmekle birlikte, standart sapma değerleri göz önünde bulundurulduğunda hiç birinde kabul edilebilir sonuçlar elde edilememiştir. BO algoritmasında ise bütün popülasyon sayılarında en düşük maliyetli tasarım elde edilmekle birlikte, 10 ve üzeri popülasyon sayılarında kabul edilebilir sonuçlar bulunmuştur.

Optimizasyon işlemleri sonucunda, kabul edilebilir nihai çözüme ulaşmak için, BO algoritması için en az 900 amaç fonksiyonu değerlendirmesine ihtiyaç



Şekil 11. Örnek-2 için elde edilen standart sapma değerleri (Standard deviation values for Example-2)



Şekil 12. Örnek-2 için yaklaşım grafikleri (Convergence curves for Example-2)

Çizelge 5’te verilen optimizasyon sonuçları incelendiğinde, PSO ve GHA algoritması kullanılarak yapılan 100’er bağımsız analiz sonucunda, kullanılan

duyulmaktadır. Algoritmaların 100’er bağımsız optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen yaklaşım grafikleri Şekil 12’de sunulmuştur.

**Çizelge 5.** Örnek-2 için elde edilen maliyetler ve karşılaştırmaları (The optimum costs and comparison for Example-2)

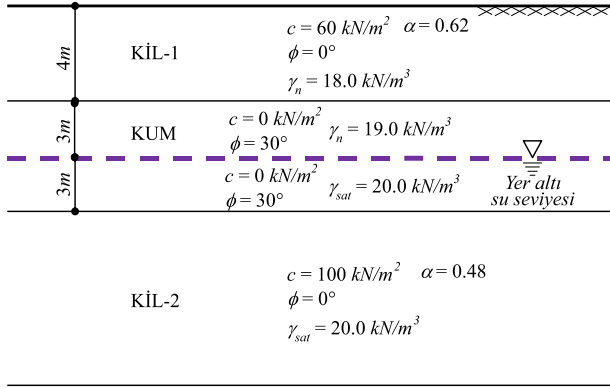
	Popülasyon Sayısı	Maksimum İterasyon Sayısı	Amaç Fonksiyonu Değ. Sayısı	En düşük maliyet (₺)	En yüksek maliyet (₺)	Ortalama maliyet (₺)	Standart Sapma
PSO	5	80	400	406758	581284	484399	48001.29
	10	100	1000	406758	562329	443047	34495.86
	15	100	1500	406758	542100	440554	31804.92
	20	100	2000	406758	528998	428286	24609.13
	25	100	2500	406758	481042	424153	20390.63
	30	100	3000	406758	502138	420487	18303.46
	35	100	3500	406758	474365	418629	16643.64
	40	100	4000	406758	502138	418599	17073.61
	<b>45</b>	<b>100</b>	<b>4500</b>	<b>406758</b>	<b>458052</b>	<b>413867</b>	<b>12558.39</b>
	50	100	5000	406758	463515	413814	12833.97
GHA	5	5000	5000	406758	440770	411274	11498.13
	10	4000	4000	406758	496692	415480	16541.17
	<b>15</b>	<b>5000</b>	<b>5000</b>	<b>406758</b>	<b>440770</b>	<b>409819</b>	<b>9782.64</b>
	20	5000	5000	406758	496692	411286	13475.95
	25	4000	4000	406758	448932	414606	14340.73
	30	4000	4000	406758	457094	413365	13558.02
	35	5000	5000	406758	440770	414600	14194.80
	40	5000	5000	406758	440770	412976	12791.82
	45	5000	5000	406758	463515	414601	14568.47
	50	5000	5000	406758	440770	412447	11796.48
BO	5	90	450	406758	562329	415038	21123.35
	10	100	1000	406758	406758	406758	0.00
	15	70	1050	406758	406758	406758	0.00
	20	50	1000	406758	406758	406758	0.00
	25	50	1250	406758	406758	406758	0.00
	30	40	1200	406758	406758	406758	0.00
	35	30	1050	406758	406758	406758	0.00
	40	30	1200	406758	406758	406758	0.00
	<b>45</b>	<b>20</b>	<b>900</b>	<b>406758</b>	<b>406758</b>	<b>406758</b>	<b>0.00</b>
	50	30	1500	406758	406758	406758	0.00

Her algoritma için bulunan en iyi sonuç kalın harflerle gösterilmiştir.

### 5.3. Örnek-3 (Example-3)

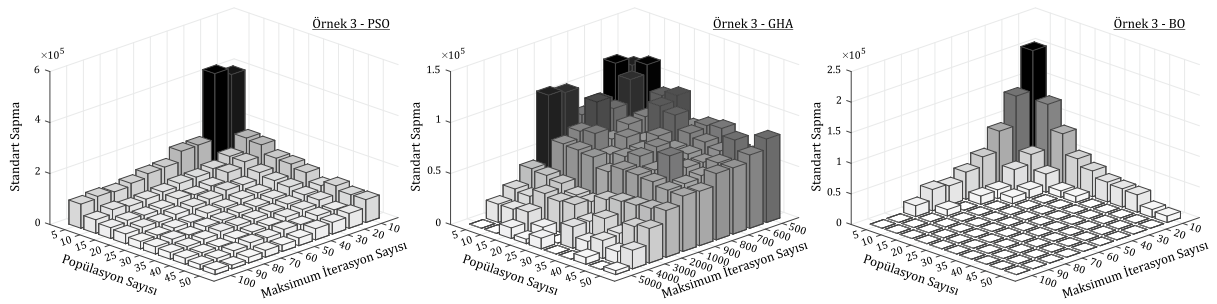
Bu örnekte kullanılan tabakaların konum ve özellikleri ilk örnekle aynı olmakla birlikte yer altı su seviyesi 3 m daha derinde, KUM tabakasının ortasında yer almaktadır. Bu sayede KUM tabakasının hem suya doygun hem de kuru olduğu durumun aynı örnekte incelenmesi amaçlanmıştır. KUM tabakasının birim hacim ağırlığı su seviyesinin altında  $\gamma_{sat} = 20.0 \text{ kN/m}^3$  iken, su seviyesinin üstünde  $\gamma_n = 19.0 \text{ kN/m}^3$ 'tür. Tabakalanma ve zemin özellikleri Şekil 13'te gösterilmiştir.

Farklı popülasyon ve maksimum iterasyon sayıları kullanılarak 100'er bağımsız optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen standart sapma değerleri dağılımı Şekil 14'te sunulmuştur. Diğer örneklerde olduğu gibi genel eğilim üç algoritmada da amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı arttıkça standart sapma değerinin azalması yönündedir. Her popülasyon sayısına karşılık seçilen iterasyon sayıları Çizelge 6'da sunulmuştur.

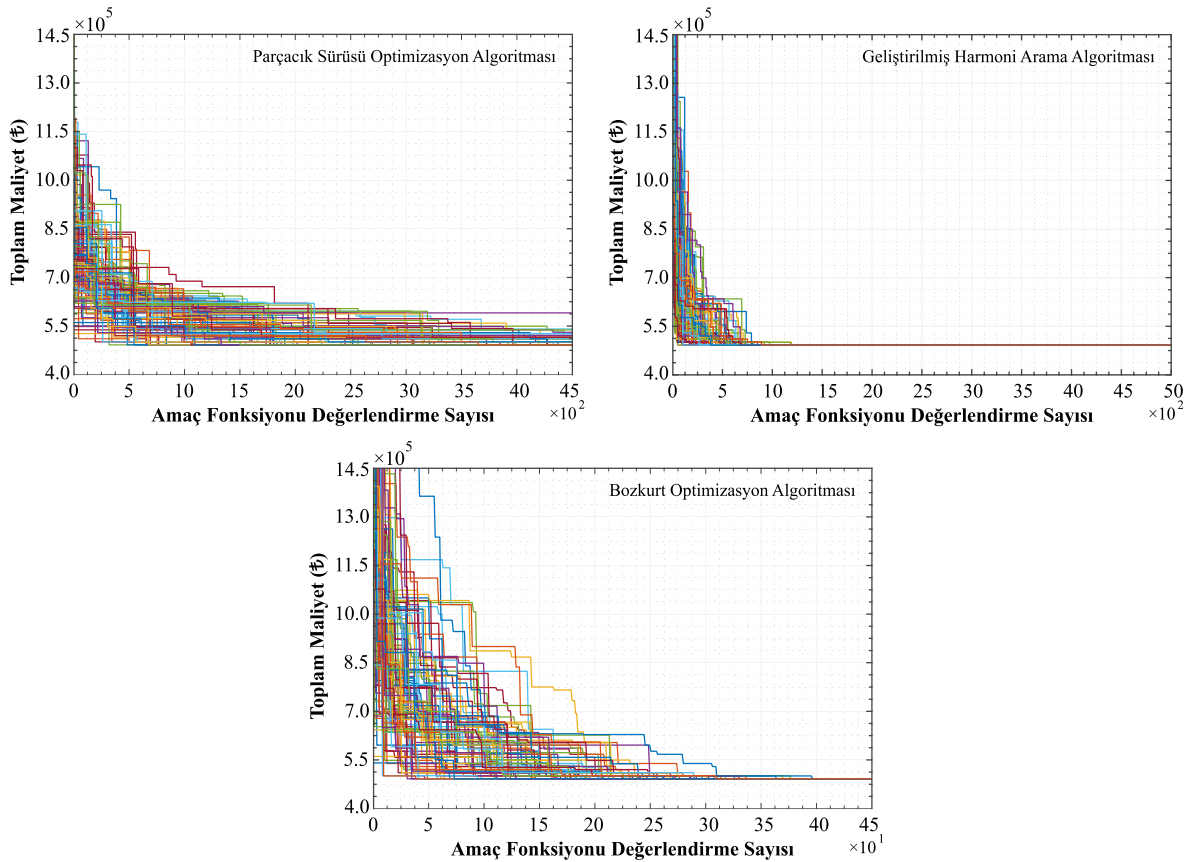


Şekil 13. Örnek-3'e ait zemin tabakaları (Soil stratification for Example-3)

Optimizasyon sonuçlarına göre, emniyet şartlarını yerine getiren tasarımlar içerisinde elde edilen en düşük maliyet 491893 ₺ olmaktadır. Bu maliyete sahip tasarım üç algoritma ve bütün popülasyon sayıları ile elde edilebilmiştir. Çizelge 6'da sunulan ve 100'er bağımsız optimizasyona ait maliyetler ve standart sapma değerleri incelendiğinde, PSO algoritmasında göz önünde bulundurulmuş popülasyon sayılarının hiç biriyle kabul edilebilir sonuçlar elde edilememiştir. GHA algoritması 5, 10, 25, 30, 35 ve 45 popülasyon sayıları ile kabul edilebilir sonuçlar elde ederken, BO algoritması kullanılan bütün popülasyon sayılarında en düşük maliyet ve en düşük standart sapma değerlerini elde etmiştir. Elde edilen en düşük maliyete sahip tasarımda



Şekil 14. Örnek-3 için elde edilen standart sapma değerleri (Standard deviation values for Example-3)



Şekil 15. Örnek-3 için yaklaşım grafikleri (Convergence curves for Example-3)

kazıkların çapı 0.45 m, boyu 26 m ve aralığı ise 1.8 m olarak hesaplanmıştır.

GHA algoritmasında 4000, BO algoritmasında ise 450 amaç fonksiyonu değerlendirmesi ile kabul edilebilir sonuçlar elde edilebilmiştir. Algoritmaların 100'er bağımsız optimizasyon sürecinde elde edilen yaklaşım grafikleri Şekil 15'teki gibidir.

optimizasyonu incelenmiştir. Optimizasyon sürecinde, emniyet şartlarını sağlayan muhtemel tasarımlar içerisindeki, en düşük maliyetli tasarımın elde edilmesi amaçlanmış ve problemin amaç fonksiyonu buna göre tanımlanmıştır.

Çalışmada, üç farklı örnek incelenmiş, örneklerin çözümünde ise üç farklı metasezgisel algoritma

**Çizelge 6.** Örnek-3 için elde edilen maliyetler ve karşılaştırmaları (The optimum costs and comparison for Example-3)

	Popülasyon Sayısı	Maksimum İterasyon Sayısı	Amaç Fonksiyonu Değ. Sayısı	En düşük maliyet (₺)	En yüksek maliyet (₺)	Ortalama maliyet (₺)	Standart Sapma
PSO	5	90	450	491893	1029883	605557	102143.70
	10	100	1000	491893	774840	554933	53260.82
	15	100	1500	491893	630632	531911	42438.78
	20	80	1600	491893	649825	525796	38758.15
	25	100	2500	491893	620342	510350	28988.92
	30	100	3000	491893	624875	508764	28178.78
	35	90	3150	491893	605519	511702	26852.89
	40	80	3200	491893	620288	507805	23525.25
	45	100	4500	491893	605519	501007	19700.28
		<b>50</b>	<b>90</b>	<b>4500</b>	<b>491893</b>	<b>590750</b>	<b>499251</b>
GHA	5	5000	5000	491893	491893	491893	0.00
	10	5000	5000	491893	491893	491893	0.00
	15	5000	5000	491893	595855	492933	10396.22
	20	4000	4000	491893	595855	492933	10396.22
	<b>25</b>	<b>4000</b>	<b>4000</b>	<b>491893</b>	<b>491893</b>	<b>491893</b>	<b>0.00</b>
	30	5000	5000	491893	491893	491893	0.00
	35	5000	5000	491893	491893	491893	0.00
	40	5000	5000	491893	558109	492555	6621.64
	45	5000	5000	491893	491893	491893	0.00
	50	5000	5000	491893	529731	492366	3890.96
BO	<b>5</b>	<b>90</b>	<b>450</b>	<b>491893</b>	<b>491893</b>	<b>491893</b>	<b>0.00</b>
	10	60	600	491893	491893	491893	0.00
	15	50	750	491893	491893	491893	0.00
	20	30	600	491893	491893	491893	0.00
	25	30	750	491893	491893	491893	0.00
	30	20	600	491893	491893	491893	0.00
	35	20	700	491893	491893	491893	0.00
	40	20	800	491893	491893	491893	0.00
	45	20	900	491893	491893	491893	0.00
	50	20	1000	491893	491893	491893	0.00

Her algoritma için bulunan en iyi sonuç kalın harflerle gösterilmiştir.

## 6. TARTIŞMA VE SONUÇ (RESULTS and DISCUSSION)

Bu çalışma kapsamında, düşey yükler altındaki temel kazık gruplarının metasezgisel algoritmalarla

kullanılmıştır. Bu algoritmalar için on farklı popülasyon sayısının başarımı incelenmiştir. Her algoritma ve popülasyon sayısı için 100'er bağımsız optimizasyon işlemi yapılmıştır. Hem algoritma hem de popülasyon

sayısı başarımında kriter olarak bu bağımsız analizlerin sonucunda elde edilen en yüksek ve en düşük maliyetler arasındaki farkın, başka bir deyişle standart sapma değerinin "0" olması tanımlanmıştır.

Buna göre; örneklerin tamamında algoritmaların farklı popülasyon sayıları ile elde ettikleri en düşük maliyet değerleri birbirine eşittir. Ancak standart sapma değerleri incelendiğinde, bazı popülasyon sayılarının tanımlanan kabul edilebilirlik kriterlerini sağlayamadıkları görülmüştür. PSO algoritması çalışmada kullanılan farklı popülasyon sayılarının hiçbirinde kabul edilebilir sonuçlar üretmezken, GHA Örnek-1 ve Örnek-3 için kabul edilebilir sonuçlar üretmiş, Örnek-2 için yüksek standart sapma değerleri elde etmiştir. BO algoritmasında ise 10 ve üzeri popülasyon sayıları kullanılarak elde edilen sonuçların, üç örnek üzerinde de tanımlanan başarı kriterini sağladıkları belirlenmiştir. Ayrıca GHA algoritması kabul edilebilir sonuçlar ürettiği Örnek-1 ve Örnek-3 için sırasıyla 5000 ve 4000 amaç fonksiyonu değerlendirme sayısına gereksinim duyarken, BO algoritmasında üç örnek için sırasıyla 500, 900 ve 450 değerlendirme sayısı yeterli olmaktadır.

Çalışmada kullanılan parametrelerle incelenen örneklerin optimizasyon sonuçlarına göre, BO algoritması hem bütün örneklerde kabul edilebilir sonuçlar elde etmiş hem de bu sonuçlara çalışmada kullanılan diğer algoritmalarından daha düşük işlem hacmiyle ulaşmıştır. Bu sebeplerle BO algoritmasının düşey yük etkisi altındaki kazıkların maliyet optimizasyonu konusunda, hem PSO hem de GHA algoritmasına kıyasla daha başarılı olduğu görülmüştür. Farklı parametrelerle gerçekleştirilen optimizasyon işlemleri sonucunda elde edilmiş standart sapma değerleri de incelendiğinde BO algoritmasının tutarlı sonuçlar ürettiği, buna ek olarak düşük işlem hacmine gereksinim duyması sebebiyle düşey yük etkisi altındaki kazıkların optimizasyonu konusunda uygun bir yöntem olduğu söylenebilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Das BM, *Principles of Foundation Engineering, SI Edition. Cengage Learning*, 2010.
- [2] Bowles JE, *Foundation Analysis and Design. McGraw-Hill*, 1996.
- [3] Hurd AJ, Truman KZ. "Optimization Method of Pile Foundations". *Advances in Engineering Structures, Mechanics & Construction*, Dordrecht, 2006.
- [4] Chan CM, Zhang LM, Ng JTM. "Optimization of Pile Groups Using Hybrid Genetic Algorithms". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(4): 497-505, 2009.
- [5] Hwang JH, Lyu YD, Chung MC. "Optimizing Pile Group Design Using a Real Genetic Approach". *The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2011.
- [6] Liu X, Cheng G, Wang B, Lin S. "Optimum design of pile foundation by automatic grouping genetic algorithms". *ISRN Civil Engineering*, 2012, 2012.
- [7] Bengtlars A, Våljamets E. "Optimization of Pile Groups: A practical study using Genetic Algorithm and Direct Search with four different objective functions". *Master Thesis*, Structural Design and Bridges, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2014.
- [8] Kennedy J, Eberhart R. "Particle swarm optimization". *IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, WA, Australia, 1995.
- [9] Geem ZW, Kim JH, Loganathan GV. "A new heuristic optimization algorithm: Harmony search". *Simulation*, 76(2): 60-68, 2001.
- [10] Mirjalili S, Mirjalili SM, Lewis A. "Grey Wolf Optimizer". *Advances in Engineering Software*, 69: 46-61, 2014.
- [11] Meyerhof GG. "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations". *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 102(3): 195-228, 1976.
- [12] Vesic AS. "Design of pile foundations". *NCHRP synthesis of highway practice*, (42): 1977.
- [13] Janbu N. "Static bearing capacity of friction piles". *Sechste Europaeische Konferenz Fuer Bodenmechanik Und Grundbau*, 1976.
- [14] US Navy, *NAVFAC Design Manuals 7.1 and 7.2 : Foundations and Earth Structures*. Arlington, VA: *Naval Facilities Engineering Command*, 1988.
- [15] Terzaghi K, Peck RB, Mesri G, *Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons*, 1996.
- [16] *The BOCA National Building Code. Building Officials & Code Administrators International*, 1993.
- [17] *The National Building Code. American Insurance Association Engineering and Safety Service.*, 1976.
- [18] *City of Chicago Building Code. American Legal Publishing Corporation*, 1994.
- [19] Shi Y, Eberhart R. "A modified particle swarm optimizer". *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on*, 1998.
- [20] Mahdavi M, Fesanghary M, Damangir E. "An improved harmony search algorithm for solving optimization problems". *Applied Mathematics and Computation*, 188(2): 1567-1579, 2007.
- [21] Pedersen MEH, "Good parameters for particle swarm optimization," in "Hvass Lab., Copenhagen, Denmark, Tech. Rep. HL1001," 2010.
- [22] Yang X-S, *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms. Luniver Press*, 2008.