

# İki doğrultuda birleşik eğilme etkisindeki betonarme tekil temelin diferansiyel evrim algoritması kullanılarak optimum tasarımı

## Optimum design of RC footing subject to axial load and bi-directional flexure using differential evolution algorithm

Muhammet KAMAL<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.  
mkamal@pau.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 14.04.2023  
Kabul Tarihi/Accepted: 03.10.2023

Düzeltilme Tarihi/Revision: 15.09.2023

doi: 10.5505/pajes.2023.07404  
Araştırma Makalesi/Research Article

### Öz

Bu çalışmada iki doğrultuda bileşik eğilme etkisindeki betonarme tekil temellerin Diferansiyel Evrim (DE) algoritması kullanılarak optimum tasarımı gerçekleştirilmiştir. Temel boyutları, donatı sayısı ve çapı kesikli karar değişkeni olarak geliştirilen yaklaşımda, beton ve çelik malzemelerinin minimum maliyeti hedeflenmiştir. Yedi farklı karar değişkenine ilave olarak TS-500 Standart gereklilikleri için on sekiz farklı kısıt fonksiyonu optimizasyon modeline dahil edilmiştir. Farklı eksenel yük oranları, eksantrik ve zemin emniyet gerilme senaryoları oluşturularak birçok farklı tekil temel örneğinin optimum çözümleri sunulmuştur. DE tabanlı bir çözüm yaklaşımının, betonarme tekil temelin optimum tasarımında etkin bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Betonarme tekil temel, Optimizasyon, Sezgisel algoritma, Diferansiyel evrim algoritması.

### Abstract

In this study, the optimum design of the reinforced concrete (RC) footings subject to the axial load and bi-directional flexure was performed by using Differential Evolution (DE) algorithm. The minimum cost of concrete and steel materials was targeted in the developed approach as the decision variables of foundation dimensions, reinforcement numbers and diameters. In addition to seven different decision variables, eighteen different constraint functions are included in the optimization model for the TS-500 Standard requirements. Optimum solutions of many different reinforced concrete footing examples are presented by creating different axial load ratios, eccentricity and allowable bearing value of soil scenarios. It has been shown that a DE-based solution approach can be used effectively in the optimum design of a reinforced concrete footing.

**Keywords:** Reinforced concrete footing, Optimization, Metaheuristic algorithm, Differential evolution algorithm.

## 1 Giriş

Temeller, üst yapıdan gelen yükleri zemine güvenle aktarabilen ve oturmadan dolayı yapıda oluşabilecek hasarları önleyebilen önemli taşıyıcı elemanlardan biridir. Gelen yükün büyüklüğüne, yükü aktaran taşıyıcı elemana ve zemin tipine bağlı farklı temel türleri seçilebilmektedir. Eksenel yük oranları düşük kolon taşıyıcı elemanlara sahip ve kolon aralıkları fazla olan yapılarda tekil temeller kullanılabilir [1]. Özellikle önüretimli (prefabrik) betonarme yapılar, sanayi yapıları olduğu için geniş açıklıklara sahiptirler ve bu tür yapılarda tekil temel sıklıkla tercih edilmektedir. Yapıdan gelen yüklerin zemine güvenle aktarılabilmesi için bu tür temellerin tasarımı oldukça önemlidir. Bunun yanı sıra, sınırlı kaynakların tükenmemesi adına bu tür taşıyıcı elemanların minimum maliyet ile tasarlanması hedeflenmelidir. Birleşmiş Milletler Çevre Programının (United Nations Environment Programme, UNEP) 2019 yılında hazırladığı raporda, binalar ve inşaatların küresel CO<sub>2</sub> emisyonlarının %40'ını oluşturduğu belirtilmiştir [2]. Daha düşük karbon ayak izi ve kaynakların daha verimli kullanılabilmesi adına optimizasyon tekniklerinin tasarım süreçlerine dahil edilmesi oldukça önemlidir.

Optimizasyon teknikleri birçok mühendislik problemin çözümünde kullanılmıştır [3]–[6]. Karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde ise kolay programlanabilir olması ve optimum çözüme yakın sonuçlar üretmesi nedeniyle sezgisel optimizasyon algoritmaları tercih edilmiştir. Çelik yapılar [7–

10], betonarme istinat duvarları [11]–[16], sürekli temeller [17], öngermeli betonarme köprü kirişleri [18],[19] vb. birçok yapısal elemanın optimum tasarımında sezgisel algoritmalar başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Bu problemlerin yanı sıra tekil temellerin optimum tasarımları üzerine literatürde bazı çalışmalar da yer almaktadır. Camp ve Assadollahi [20], ACI-318-11 yönetmeliğine göre eksenel yük altındaki bir tekil temelin optimum tasarımını gerçekleştirmiştir. Geliştirilen hibrit BB-BC (Big Bang-Big Crunch) algoritması ile birlikte daha düşük maliyetli ve düşük CO<sub>2</sub> emisyonlu bir çözüm üretilmiştir. Daha sonraki çalışmalarda bir doğrultudaki bileşik eğilme etkisi (eksenel yük ve eğilme momenti) altındaki tekil temelin optimum tasarımı gerçekleştirilmiştir [21]–[23]. Literatürdeki birçok çalışmada, tek eksenli eğilme momenti için tekil temel tasarımı gerçekleştirilse de iki eksenli moment etkisi altındaki temelin tasarımı pek dikkate alınmamıştır. Bu çalışmanın amacı, iki doğrultuda bileşik eğilme etkisindeki betonarme tekil temelin optimum tasarımının gerçekleştirilmesidir. TS-500 standardı [24] ile uyumlu tekil temel tasarımı için sezgisel algoritmalar Diferansiyel Evrim (DE) [25] algoritması kullanılmıştır. Optimizasyon probleminde temel boyutları, donatı sayısı ve çapı kesikli değişken olarak seçilmiştir. Yedi farklı karar değişkenine ilave olarak TS-500 Standart gereklilikleri için on sekiz farklı kısıt fonksiyonu dikkate alınmıştır. Farklı eksenel yük oranları, dış merkezlik ve zemin emniyet gerilme senaryoları oluşturularak birçok farklı tekil temel örneğinin optimum çözümleri gerçekleştirilmiştir.

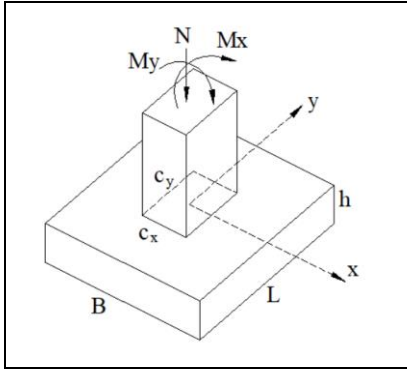
\*Yazışılan yazar/Corresponding author

## 2 Problemin tanımı

Eksenel yük ve iki eksenli moment etkisi altındaki betonarme tekil temellerin tipik gösterimi Şekil 1’de verilmiştir.  $N, M_x, M_y, B, L, h, c_x, c_y$  ifadeleri sırasıyla eksenel yük,  $x$  ve  $y$  eksenleri etrafındaki eğilme momentini, kalıp planı ölçülerini, temel yüksekliğini ve kolon enkesit boyutlarını temsil etmektedir. Her iki asal yöndeki moment etkisi ile birlikte temel tabanının herhangi bir noktasındaki gerilme değeri ( $\sigma_{x,y}$ ) Denklem (1) ile hesaplanabilmektedir. Temelin her bir uç noktasında farklı gerilmeler oluşacaktır (Şekil 2). Bu gerilmeler Şekil 2’de verildiği gibi TS-500’e göre doğrusal dağılım göstermektedir. Uç kısımlardaki dört farklı gerilme ( $\sigma_{1,2,3,4}$ ) Denklem (2) ile hesaplanabilmektedir.

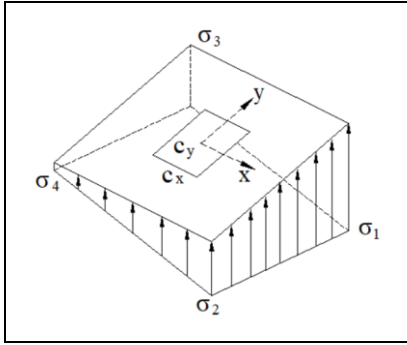
$$\sigma_{x,y} = \frac{N}{BL} \mp \frac{12M_x y}{BL^3} \mp \frac{12M_y x}{LB^3} \quad (1)$$

$$\sigma_{1,2,3,4} = \frac{N}{BL} \mp \frac{6M_x}{BL^3} \mp \frac{6M_y}{LB^3} \quad (2)$$



Şekil 1. Tipik tekil temel.

Figure 1. Typical RC footing.



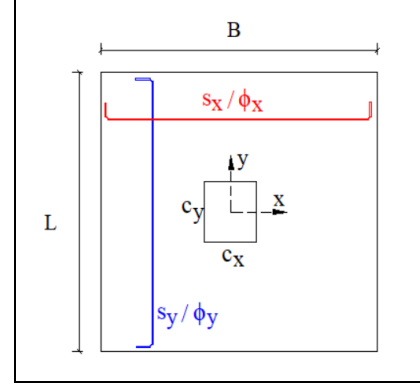
Şekil 2. Temel altındaki zemin gerilmeleri.

Figure 2. Soil pressures under the foundation.

### 2.1 Tasarım değişkenleri

Bu çalışmada ele alınan tekil temel tasarım problemi, temel plan boyutları ( $B = x_1$  ve  $L = x_2$ ), temel yüksekliği ( $h = x_3$ ), boyuna donatı adedi ( $s_x = x_4$  ve  $s_y = x_5$ ) ve çapı ( $\phi_x = x_6$  ve  $\phi_y = x_7$ ) olmak üzere yedi farklı kesikli değişkene sahiptir (Şekil 3). Bu tasarım değişkenlerine ait alt sınırlar için TS 500 yönetmeliği dikkate alınmıştır. TS 500’ e göre tekil temelin plandaki boyutlarının 70 cm’den ve kalınlığının 25 cm’den küçük olmaması gerekmektedir. Bu nedenle ilk üç tasarım değişkeninin alt sınırları Tablo 1’de belirtildiği gibi dikkate alınmıştır. Sahada uygulama kolaylığı olması adına ilk üç değişkenin değişim miktarları için 5 cm dikkate alınmıştır.

Dördüncü ve beşinci değişkenlerin alt limitleri, minimum temel boyutlarına bağlı olacağı için 4 olarak seçilmiştir. TS-500’e göre minimum boyuna donatı çapının 12 mm olması gerektiği için altıncı ve yedinci değişkenin alt limitleri 12 olarak kullanılmıştır.



Şekil 3. Plan görünümü ve donatı detayları.

Figure 3. Plan view and reinforcement details.

Tablo 1. Tasarım değişkenlerinin özellikleri.

Table 1. Properties of design variables.

Değişken	Sembol	Birim	Alt Limit	Üst Limit	Değişim
$x_1$	$B$	m	0.70	5	0.05
$x_2$	$L$	m	0.70	5	0.05
$x_3$	$h$	m	0.25	1.5	0.05
$x_4$	$s_x$	adet	4	60	1
$x_5$	$s_y$	adet	4	60	1
$x_6$	$\phi_x$	m	0.012	0.020	0.002
$x_7$	$\phi_y$	m	0.012	0.020	0.002

### 2.2 Amaç fonksiyonu

Bu çalışmada iki doğrultulu bileşik eğilme etkisi altındaki betonarme tekil temelin optimum tasarımı amaçlanmıştır. Bu amaç ile tekil temeli oluşturan beton ve çelik malzeme maliyetlerinin minimize edilmesi hedeflenmektedir. Tasarım probleminin amaç fonksiyonu ( $f(x)$ ) Denklem (3)’te verilmektedir.  $BF_c$  ve  $BF_s$ , ifadeleri beton ve çelik malzemelere ait birim fiyatları temsil etmektedir ve değerleri Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2. Örnek tekil temel tasarımı için girdi verileri.

Table 2. Input data for the sample RC footing design.

Değişken	Sembol	Birim	Değer
Eksenel yük	$N$	kN	3240
Moment	$M_x$	kNm	324
Moment	$M_y$	kNm	648
Kolon genişliği (x yönü)	$c_x$	m	0.60
Kolon genişliği (y yönü)	$c_y$	m	0.60
Beton örtüsü	$c_c$	m	0.05
Beton karakteristik dayanımı	$f_{ck}$	N/mm <sup>2</sup>	30
Beton tasarım basınç dayanımı	$f_{cd}$	N/mm <sup>2</sup>	20
Beton tasarım çekme dayanımı	$f_{ctd}$	N/mm <sup>2</sup>	1.278
Çelik karakteristik dayanımı	$f_{yk}$	N/mm <sup>2</sup>	420
Çelik tasarım çekme dayanımı	$f_{cd}$	N/mm <sup>2</sup>	365.2
Çelik birim hacim ağırlığı	$\gamma_s$	kN/m <sup>3</sup>	78.5
Zemin emniyet gerilmesi	$\sigma_{zem}$	kN/m <sup>2</sup>	250
Çelik birim fiyatı	$BF_s$	TL/kN	160
Beton birim fiyatı	$BF_c$	TL/m <sup>3</sup>	1350

$V_c$ , tekil temeldeki beton hacmini belirtmektedir.  $\gamma_s$ ,  $A_{sx} = s_x \pi \phi_x^2 / 4$ ,  $A_{sy} = s_y \pi \phi_y^2 / 4$ ,  $L_{sx}$ ,  $L_{sy}$  sembolleri sırasıyla çeliğin birim hacim ağırlığını, iki yöndeki boyuna donatılarının alanını ve boylarını yansıtmaktadır. Ayrıca, Denklem (3)'te yer alan  $(\mathbf{x})$ , karar değişkenlerinin saklandığı vektörü temsil etmektedir.

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{x}) = & BF_c V_c(\mathbf{x}) \\ & + BF_s \gamma_s [A_{sx}(\mathbf{x}) L_{sx}(\mathbf{x}) \\ & + A_{sy}(\mathbf{x}) L_{sy}(\mathbf{x})] + PK_i(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (3)$$

Denklem (3)'te yer alan  $PK_i(\mathbf{x})$  penaltı fonksiyonu, bir sonraki bölümde bahsedilen tasarım kısıtlarının sağlanmaması durumunda devreye girmektedir. İçerisinde penaltı (ceza) katsayılarını içeren bu fonksiyon, amaç fonksiyonunun minimize edilmesine yardım etmektedir. Tasarım kısıtlarının ilgili koşulları sağlandığı sürece penaltı fonksiyonu sıfır değerini alır ve amaç fonksiyonunu etkilemez. Fakat kısıt koşullarının sağlanmadığı durumda penaltı fonksiyonu devreye girerek amaç fonksiyonunun artırılmasını sağlar ve daha iyi bir çözümün araştırılmasına yardımcı olur.

### 2.3 Tasarım kısıtları

Temel tabanında oluşabilecek gerilmelerin sınırlandırılması Denklem (4) ve Denklem (7) arasındaki kısıt fonksiyonları ile sağlanmaktadır. Zemin dayanımı ( $f_{zu}$ ), zemin emniyet gerilmesinin ( $\sigma_{zem}$ ) 1.5 katı büyük olacak şekilde dikkate alınmıştır [26].  $f_{zn}$ , zemin emniyet net zemin dayanımını yansıtmaktadır ve  $f_{zn} = f_{zu} - 1.8h$  şeklinde hesaplanmaktadır. Temel tabanındaki maksimum gerilmenin  $\sigma_{mak}$  zemin dayanımlarından küçük olması gerekmektedir. Ayrıca temelde çekme gerilmelerinin oluşmaması için minimum gerilme  $\sigma_{min}$  pozitif değer almalıdır.

$$g_1(\mathbf{x}) = \frac{N}{f_{zu}} - BL \leq \quad (4)$$

$$g_2(\mathbf{x}) = \sigma_{min} \geq 0 \quad (5)$$

$$g_3(\mathbf{x}) = \sigma_{mak} - f_{zu} \leq 0 \quad (6)$$

$$g_4(\mathbf{x}) = f_{zn} - \sigma_{mak} \geq 0 \quad (7)$$

Temel tabanındaki gerilmelerden dolayı kritik kesitlerde (Şekil 4) kesme kuvvetleri ( $V_{dx}$ ,  $V_{dy}$ ) ve momentler ( $M_{dx}$ ,  $M_{dy}$ ) hesaplanarak temel tasarımı gerçekleştirilmelidir (Denklem 8, 9, 12, 13). Bu etkiler temelin kesme kapasiteleri ( $V_{rx}$ ,  $V_{ry}$ ) ve moment dayanımları ( $M_{rx}$ ,  $M_{ry}$ ) tarafından karşılanmalıdır. Ayrıca Denklem (10) ile hesaplanan zımbalama kuvveti ( $V_{pd}$ ) temelin zımbalama dayanımı ( $V_{pr}$ ) ile karşılanmalıdır. Denklemlerde yer alan  $d$  efektif kesit yüksekliğini belirtirken,  $\gamma$  sembolü ise dikdörtgen kolonlara sahip tekil temelin zımbalamadaki eğilme etkisini yansıtan bir katsayıdır (Denklem 11) (TS500).  $e_x$  ve  $e_y$  ifadeleri x ve y yönündeki dış merkezlikleri temsil ederken  $M/N$  (moment/eksenel yük) olarak hesaplanmaktadır.  $f_{cta}$  ve  $f_{yd}$  ise sırasıyla betonun çekme dayanımı ve çelik tasarım akma dayanımını yansıtmaktadır.

$$g_5(\mathbf{x}) = \left[ V_{dy} = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{c_x/2}^{B/2} \sigma_{(x,y)} d_x d_y \right] - [V_{cry} = 0.65 f_{cta} L d] \leq 0 \quad (8)$$

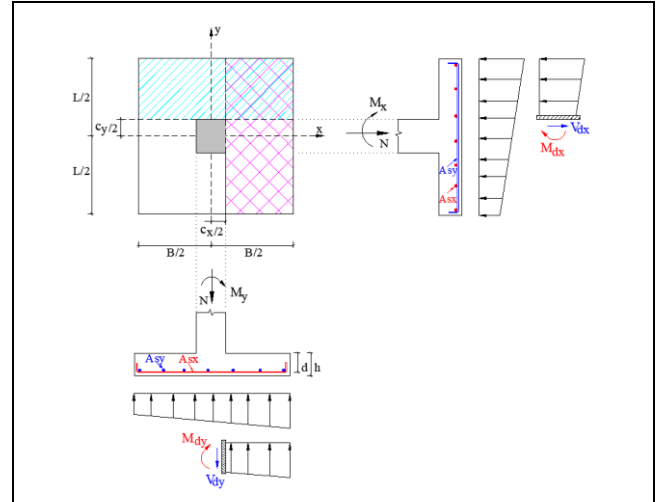
$$g_6(\mathbf{x}) = \left[ V_{dx} = \int_{c_y/2}^{L/2} \int_{-B/2}^{B/2} \sigma_{(x,y)} d_x d_y \right] - [V_{crx} = 0.65 f_{cta} B d] \leq 0 \quad (9)$$

$$g_7(\mathbf{x}) = [V_{pr} = \gamma f_{cta} 2(c_x + c_y + 2d)d] - \left[ V_{pd} = P - \frac{P(c_x + d)(c_y + d)}{BL} \right] \geq 0; \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + 1.5 \frac{e_x + e_y}{\sqrt{(c_x + d)(c_y + d)}}} (0.4) \quad (11)$$

$$g_8(\mathbf{x}) = \left[ M_{dx} = \int_{c_y/2}^{L/2} \int_{-B/2}^{B/2} \sigma_{(x,y)} (y - \frac{c_y}{2}) d_x d_y \right] - [M_{ry} = 0.86 A_{sy} f_{yd} d] \leq 0 \quad (12)$$

$$g_9(\mathbf{x}) = \left[ M_{dy} = \int_{-L/2}^{L/2} \int_{c_x/2}^{B/2} \sigma_{(x,y)} (x - \frac{c_x}{2}) d_x d_y \right] - [M_{rx} = 0.86 A_{sx} f_{yd} d] \leq 0 \quad (13)$$



Şekil 4. Temel altındaki gerilmelerden dolayı kritik kesitlerde oluşan kesme ve momentler.

Figure 4. Shears and moments in critical sections due to the soil pressures under the foundation.

TS 500'e göre minimum çekme donatısı oranı ( $\rho_{min}$ ) 0.002 olmalıdır. Bu koşul Denklem (14)-(15) kısıt fonksiyonları ile dikkate alınmıştır. Ayrıca, sehim hesabı gerektirmeyen ve süneklik koşulunu sağlayan [1] donatı oranı ( $\rho_l$ ) üst limit olarak Denklem 16-17'de verilmiştir. Bu denklemlerde yer alan  $f_{cd}$ , betonun tasarım basınç dayanımını ifade etmektedir.

$$g_{10}(\mathbf{x}) = \left[ \rho_x = \frac{A_{sx}}{Ld} \right] - \rho_{min} \geq 0 \quad (14)$$

$$g_{11}(\mathbf{x}) = \left[ \rho_y = \frac{A_{sy}}{Bd} \right] - \rho_{min} \geq 0 \quad (15)$$

$$g_{12}(\mathbf{x}) = \rho_x - \left[ \rho_l = 0.235 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \right] \leq 0 \quad (16)$$

$$g_{13}(\mathbf{x}) = \rho_y - \rho_l \leq 0 \quad (17)$$

Yukarıda yer alan tasarım koşullarına ilave olarak TS 500, tekil temel alanının 1 m<sup>2</sup>' den, temel boyutlarının konsol açıklığının 1/4'ten büyük olmasını ve donatı açıklığının 25 cm'yi aşmamasını önermektedir. Bu öneri, Denklem (18)-(22)'de yer alan kısıt fonksiyonları ile dikkate alınmıştır.

$$g_{14}(\mathbf{x}) = BL - 1 \geq 0 \quad (18)$$

$$g_{15}(\mathbf{x}) = h - \frac{B - c_x}{8} \geq 0 \quad (19)$$

$$g_{16}(\mathbf{x}) = h - \frac{L - c_y}{8} \geq 0 \quad (20)$$

$$g_{17}(\mathbf{x}) = \frac{B}{s_y - 1} - 25 \leq 0 \quad (21)$$

$$g_{18}(\mathbf{x}) = \frac{L}{s_x - 1} - 25 \leq 0 \quad (22)$$

### 3 Diferansiyel evrim algoritması

Diferansiyel Evrim (DE) algoritması Storn ve Price tarafından geliştirilmiş popülasyon tabanlı bir sezgisel algoritmadır [24]. Çözüm aşamasında, çaprazlama, mutasyon ve seçim operatörleri kullanılmaktadır. Lokal optimum çözümlerden kaçınması ve kolay programlanabilir olmasından dolayı DE algoritması oldukça sık kullanılmaktadır. Bu algoritmanın matematiksel bir problemi çözme adımları aşağıda verilmiştir.

Algoritmada yer alan parametrelerden biri olan  $NP$ , popülasyon büyüklüğünü ifade etmekte olup çözüme ait karar değişkenlerinin saklandığı çözüm vektörlerini içerisinde barındırmaktadır. Çözüm vektörü boyutu ( $ND$ ), karar değişkeni sayısı kadardır. Değişkenlere ait alt ve üst limitler de dahil edilerek çözüm vektörleri rastgele sayılar ile oluşturulur (Denklem 23). Bu çözüm vektörleri popülasyon ( $NP$ ) adedi kadar üretilir. Denklem (23)'te verilen  $G$ , jenerasyon indisini,  $r(0,1)$  değeri ise 0 ile 1 arasında rastgele seçilen ve üniform dağılıma sahip sayıyı temsil etmektedir.  $x_{j,G}^i$ ,  $G$  inci jenerasyonun  $i$  inci çözüm vektöründe bulunan  $j$  inci değişkeni,  $x_{jmin}^i$ ,  $i$  inci çözüm vektöründeki  $j$  inci değişkenin alt limitini,  $x_{jmak}^i$ ,  $i$  inci çözüm vektöründeki  $j$  inci değişkenin üst limitini belirtmektedir. Sonuç olarak, popülasyon  $ND*NP$  adet ( $j \in \{1,2,\dots,ND\}$ )\*( $i \in \{1,2,\dots,NP\}$ ) karar değişkeninden oluşmaktadır.

$$x_{j,G}^i = x_{jmin}^i + r(0,1) * (x_{jmak}^i - x_{jmin}^i) \quad (23)$$

Oluşturulan her bir çözüm vektörü için amaç fonksiyonu değeri hesaplanır. Sonrasında, popülasyon içerisinde rastgele 3 adet çözüm vektörü ( $x^{r_1}, x^{r_2}, x^{r_3}$ ) seçilir. Bu vektörlerden ikisinin farkı alınarak ölçek katsayısı ( $F$ ) ile çarpılır (Denklem 24). Ölçeklenen bu yeni vektör, üçüncü vektör ile toplanarak mutasyona uğramış yeni bir çözüm vektörü elde edilir. Mutasyon vektöründeki ( $v$ ) karar değişkenlerinin alt ve üst limitleri aşıp aşmadığı incelenir.

$$v_{j,G}^i = x_{j,G}^{r_3} + F(x_{j,G}^{r_1} - x_{j,G}^{r_2}) \quad (24)$$

Mutasyon vektörü ile popülasyondaki çözüm vektörleri arasında çaprazlama işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem sırasında, 0 ile 1 arasında rastgele seçilen değer  $CR$  katsayısından küçük veya eşit olduğu durumda, yeni türetilen çözüm vektöründeki ( $u$ ) karar değişkeni mutasyona uğramış

vektörden ( $v$ ) gelir. Aksi durumda, yeni vektördeki karar değişkeni mevcut çözüm vektöründen ( $x$ ) karşılanır. Bunun yanı sıra,  $j = j_r$  koşulu ile birlikte mutasyon vektöründen en az bir adet karar değişkeninin yeni vektöre aktarılması sağlanır (Denklem 25).

$$u_{j,G}^i = \begin{cases} v_{j,G}^i & \text{eğer } r_j(0,1) \leq CR \text{ veya } j = j_r \\ x_{j,G}^i & \text{değilse} \end{cases} \quad (25)$$

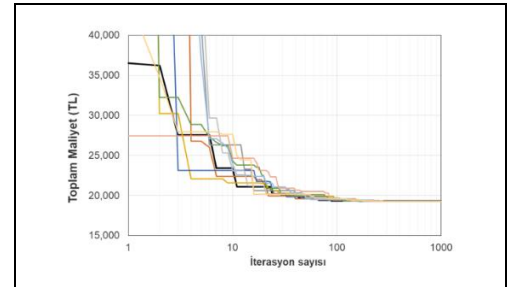
Yeni çözüm vektörü ( $u$ ) ile mevcut çözüm vektörü ( $v$ ) için hesaplanan amaç fonksiyonları kıyaslanır. Amaç fonksiyonu açısından daha iyi değere sahip olan çözüm vektörü seçilerek bir sonraki jenerasyona aktarılır (Denklem 26). Bu iteratif işlemler, belirlenen jenerasyon sayısına kadar devam etmektedir.

$$x_{G+1}^i = \begin{cases} u_G^i & \text{eğer } f(u_G^i) \leq f(x_G^i) \\ x_G^i & \text{değilse} \end{cases} \quad (26)$$

### 4 Tasarım örnekleri

#### 4.1 Örnek bir problem

Tablo 2'de girdileri verilen iki doğrultuda eğilme etkisi altındaki tekil temel optimum tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu örnek problemde, eksenel yük oranı %30,  $e_x = 0.2$  m ve  $e_y = 0.1$  m olarak dikkate alınarak  $x$  ve  $y$  yönündeki moment değerleri seçilmiştir. Beton karakteristik basınç dayanımı ve çelik karakteristik akma dayanımı sırasıyla 30 ve 420 MPa kabul edilmiştir. Zemin emniyet gerilmesi ise 25 t/m<sup>2</sup> olarak seçilmiştir. DE algoritma parametreleri  $NP = 20$ ,  $F = 0.2$  ve  $CR = 0.4$  alınarak çözüm gerçekleştirilmiştir. İterasyon sayısı 1000 olarak dikkate alınmıştır ve çözüm 10 kez tekrarlanarak en iyi çözüm belirlenmiştir. İterasyon süresi boyunca en iyi çözüme ait yakınsama grafiği Şekil 5'te verilmiştir. Minimum maliyetin elde edildiği çözüme ait tasarım değişkenleri ve malzeme maliyetleri Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 5. Örnek problemin yakınsama grafiği.

Figure 5. Convergence graphs of the example problem.

Tablo 3. Analiz sonucu hesaplanan tasarım değişkenleri ve maliyet değerleri.

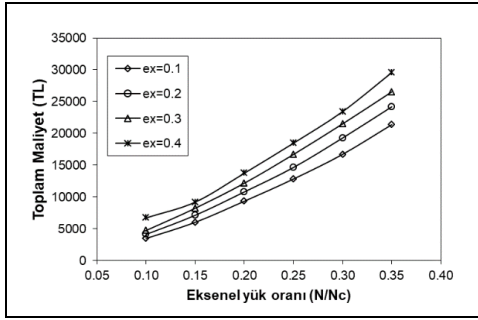
Table 3. Design variables and cost values calculated as a result of the analysis.

Değişken	Sembol	Değer
$x_1$	$B$	3.70
$x_2$	$L$	3.60
$x_3$	$h$	0.65
$x_4 - x_6$	$s_x / \phi_x (A_{sx})$	22φ20
$x_5 - x_7$	$s_y / \phi_y (A_{sy})$	30φ16
Toplam maliyet (TL)		19253.3
Beton maliyeti (TL)		11688.3
Çelik maliyeti (TL)		7565.0

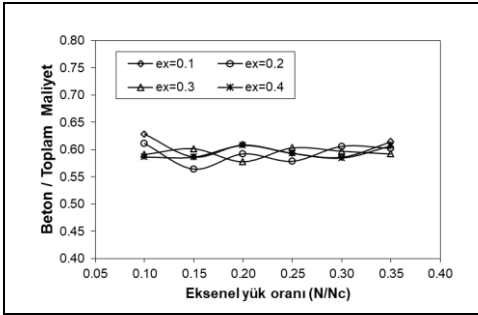
#### 4.2 Eksenel yük ve dış merkezliğin tasarım maliyetine etkileri

Bu bölümde, eksenel yük oranı ve ek dış merkezliğin tekil temelin maliyetine olan etkileri araştırılmıştır. Eksenel yük oranları 0.15-0.35 arasında değişirken,  $e_y = 0.1$  m sabit olup  $e_x$  ise 0.1-0.4 m aralığında değişmektedir. Altı farklı eksenel yük oranı ve dört farklı dış merkezlik değeri için toplam 24 farklı tekil temel örneğinin optimum maliyet değerleri belirlenmiştir. Her bir örnek 10'ar kez çözüm yapılarak elde edilen en iyi çözümler Şekil 6(a)'da verilmiştir. Bu örneklerdeki kolon kesitleri ve zemin emniyet gerilmesi girdileri Tablo 2'den alınmıştır.

Şekil 6(a) incelendiğinde, eksenel yük oranı veya dış merkezliğin artışı ile birlikte temel tasarım maliyetlerinin arttığı görülmektedir. Farklı eksenel yük oranı ve dış merkezlik için oluşturulan örnekler için beton maliyetleri, toplam maliyete oranlanmıştır Şekil 6(b). Bu oranlar, 0.56-0.63 aralığında değişmektedir. Tüm örnekler için bu oran 0.60 olarak hesaplanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 6. Dış merkezlik ve eksenel yük oranının. (a): Toplam maliyetine. (b): Beton maliyetine etkisi.

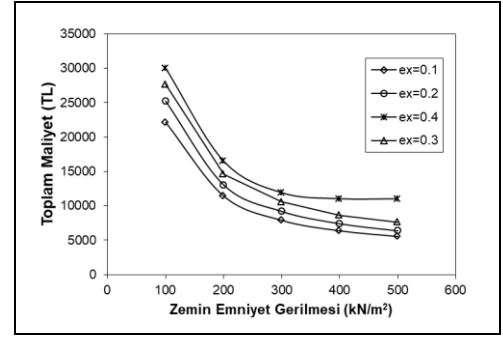
Figure 6. Effect of eccentricity and axial load ratio on. (a): Total cost. (b): Concrete cost.

#### 4.3 Zemin emniyet gerilmesinin tasarım maliyetine etkisi

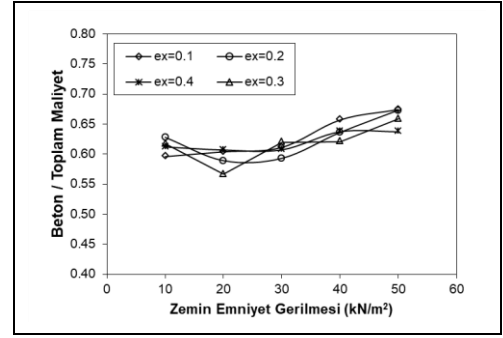
Bu bölümde ise, zemin emniyet gerilmesi ve ek dış merkezliğin tekil temelin toplam maliyetine olan etkileri incelenmiştir. Eksenel yük oranı  $N/N_c = 0.2$ ,  $e_y = 0.1$  m değerlerine sahip iken  $e_x$  ise 0.1-0.4 m aralığında değişmektedir. Beş farklı zemin emniyet gerilmesi ve dört farklı dış merkezlik değeri için toplam 20 farklı tekil temel örneğinin en iyi maliyet değerleri belirlenmiştir. Her bir örnek 10'ar kez çözüm yapılarak en iyi çözümler Şekil 7(a)'da verilmiştir. Bu örneklerdeki kolon kesitleri Tablo 2'de verilmiştir.

Şekil 7(a)'ya göre, emniyet gerilmesi ile temel tasarım maliyeti arasında ters ilişki bulunmaktadır. Zemin emniyet gerilmesinin artması ve dış merkezliğin azalması ile birlikte en düşük maliyetli temel tasarımı elde edilmektedir. Zemin emniyet gerilmesinin  $400 \text{ kN/m}^2$ 'den büyük olması durumunda, toplam temel maliyetinin zemin emniyet gerilmesinden daha az etkilendiği görülmektedir.

Farklı eksenel yük oranı ve dış merkezlik için oluşturulan örnekler için beton maliyetleri, toplam maliyete oranlanmıştır Şekil 7(b). Bu oranlar, 0.57-0.67 aralığında değişmektedir. Yirmi farklı örnek için ortalama değer 0.62 olarak elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 7. Dış merkezlik ve zemin emniyet gerilmesinin. (a): Toplam maliyetine. (b): Beton maliyetine etkisi.

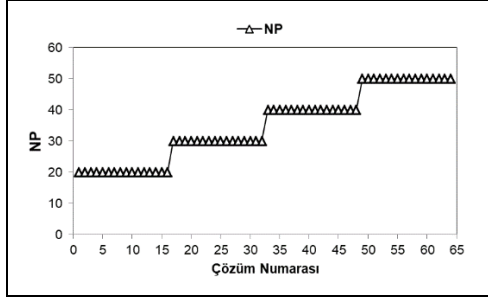
Figure 7. Effect of eccentricity and allowable soil pressure on. (a): Total cost. (b): Concrete cost.

#### 4.4 Duyarlılık analizi

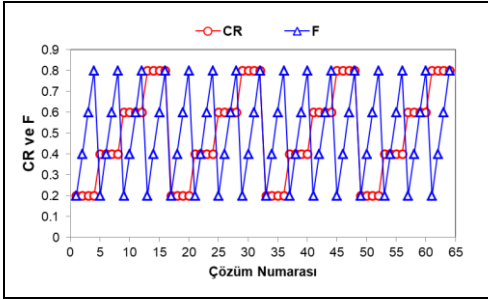
Diferansiyel Evrim algoritmasında yer alan parametrelere bağlı olarak optimizasyon probleminin sonuçları farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle algoritmanın performansının farklı parametreler için test edilmesi önemlidir. Bu kapsamda Tablo 2'de yer alan örnek problem için iki farklı senaryo (Senaryo-1 ve Senaryo-2) dikkate alınmıştır. İlk senaryoda, 4 farklı popülasyon sayısı  $NP \in [20, 30, 40, 50]$ , 4 farklı çaprazlama oranı  $CR \in [0.2, 0.4, 0.6, 0.8]$  ve 4 farklı ölçek katsayısı  $F \in [0.2, 0.4, 0.6, 0.8]$  olmak üzere toplam 64 farklı parametre için analiz gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler Tan ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışmadan alınmıştır [6]. Senaryo 1 için dikkate alınan parametre değerlerinin değişimi Şekil 8'de verilmiştir.

Senaryo-2'de DE parametreleri üniform olarak rastgele üretilmiştir. Bu parametrelere ait alt ve üst sınır değerler, Elçi ve Ayvaz tarafından gerçekleştirilen çalışmadaki öneriler dikkate alınarak şu şekildedir:  $10 \leq NP \leq 100$ ,  $0.0 \leq CR \leq 1$

ve  $0.5 \leq NP \leq 1$  [27]. 30 farklı analiz için rastgele seçilen DE parametrelerinin değişimi Şekil 9'da verilmiştir.



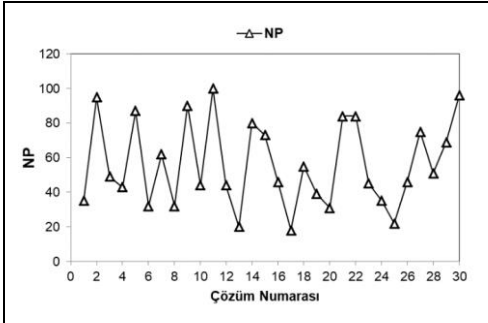
(a)



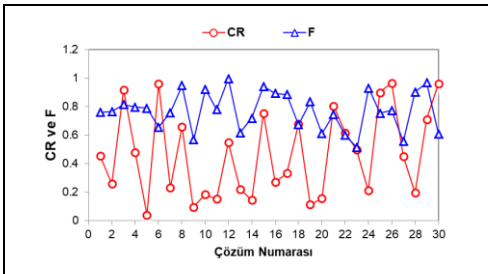
(b)

Şekil 8. Senaryo 1 için parametre değişimi. (a): Popülasyon sayısı. (b): CR ve F katsayıları.

Figure 8. Variation of parameter values for Scenario-1. (a): Number of population. (b): Crossover rate (CR) and scale factor (F).



(a)



(b)

Şekil 9. Senaryo 2 için parametre değişimi. (a): Popülasyon sayısı. (b): CR ve F katsayıları.

Figure 9. Variation of parameter values for Scenario-2. (a): Number of population. (b): Crossover rate (CR) and scale factor (F).

İki farklı senaryo için gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre elde edilen minimum maliyetler eşit ve 19253.3 TL'dir. Senaryo-1 ve Senaryo-2, farklı Senaryo-1 için maksimum maliyet 19993.5 TL olarak elde edilirken ortalama maliyet ise 19324.3 TL olarak belirlenmiştir (Tablo 4). Senaryo-2 için ise maksimum ve ortalama maliyetler sırasıyla 19388.8 TL ve 19272.1 TL'dir. Çözümler için standart sapma değerleri kullanılarak varyasyon katsayıları hesaplanmıştır. Senaryo-1 ve Senaryo-2 için varyasyon katsayıları sırasıyla 0.007 ve 0.001 olarak elde edilmiştir.

İki senaryo için farklı yaklaşım dikkate alınsa da, en düşük maliyetlerin değişmediği görülmüştür. Bu sonuç, geliştirilen DE tabanlı optimizasyon yaklaşım ile parametre değerlerine bağlı kalmadan en iyi çözümlere ulaşılabileceğini göstermiştir. Ayrıca iki farklı senaryodaki tüm parametre değerleri için tüm kısıtlar sağlanmıştır.

Tablo 4. İki farklı senaryo için elde edilen betonarme tekil temel maliyetlerine ait istatistiksel veriler.

Table 4. Statistical data of RC footing costs obtained for two different scenarios

	Senaryo-1	Senaryo-2
Minimum Maliyet (TL)	19253.3	19253.3
Maksimum Maliyet (TL)	19993.5	19388.8
Ortalama Maliyet (TL)	19324.3	19272.1
Standart Sapma (TL)	133.3	26.7
Varyasyon Katsayısı	0.007	0.001

## 5 Sonuçlar

Bu çalışmada, TS-500 standardı ile uyumlu eksenel yük ve iki doğrultuda bileşik eğilme etkisindeki betonarme tekil temelin optimum tasarımı için DE algoritması ile bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Farklı eksenel yük oranı, dış merkezlik ve zemin emniyet gerilme değerleri için yönetmelik koşullarının tamamını sağlayan optimum tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir:

- ✓ Eksenel yük oranı ve dış merkezlik etkilerinin tekil temel tasarım maliyeti üzerinde doğrusal artan bir ilişki bulunmaktadır,
- ✓ Zemin emniyet gerilmesi ile toplam temel maliyeti arasında ise ters bir ilişki görülmektedir. Fakat zemin emniyet gerilmesinin 400 kN/m<sup>2</sup>'den daha büyük olduğu durumlarda, toplam temel maliyeti zemin emniyet gerilmesinden daha az etkilenebilmektedir,
- ✓ Farklı eksenel yük oranı, dış merkezlik ve zemin emniyet gerilmesi için oluşturulan 44 farklı örnekte, beton maliyetleri toplam maliyetin yaklaşık %60'ına karşılık gelmiştir,
- ✓ DE algoritmasında yer alan parametrelerin optimum tekil temel tasarımı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir,
- ✓ DE çözüm parametrelerinin seçiminde iki farklı yaklaşım kullanılmıştır. İlk yöntemde parametreler yazar tarafından belirlenirken, diğer yöntemde ise parametrelerin eş zamanlı olarak değiştiği ve normal dağılım kullanılarak örneklendiği varsayılmıştır,
- ✓ İki farklı seçim yöntemi için toplam temel maliyetleri aynı elde edilmiştir. Fakat ikinci yöntemin saçılımı daha düşük elde edilmiştir.

Bu çalışmanın sonuçları, DE tabanlı çözümün, iki doğrultuda bileşik eğilme etkisindeki betonarme tekil temelin optimum tasarımında etkin bir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

## 6 Conclusions

In this study, a solution method with DE algorithm has been developed for the optimum design of a RC footing subject to axial load and bidirectional flexure compatible with TS500. For different axial load ratio, eccentricity and allowable soil pressure values, optimum designs have been realized that meet all the conditions in TS500. The obtained findings are given below:

- ✓ There is a linear increasing relationship between the axial load ratio and eccentricity effects on the design cost of RC footing,
- ✓ There is an inverse relationship between the allowable soil pressure and the total cost of RC footing. However, in cases where the allowable soil pressure is greater than 400 kN/m<sup>2</sup>, the total foundation cost is less affected by the allowable soil pressure,
- ✓ The concrete costs corresponded to approximately 60% of the total cost in 44 different examples created for different axial load ratio, eccentricity and allowable soil pressure,
- ✓ Sensitivity analysis was performed to evaluate the effects of the solution parameters in the DE algorithm on the optimum RC footing design,
- ✓ Two different approaches were used in the selection of DE solution parameters. In the first method, the parameters were determined by the author, while in the other method, it was assumed that the parameters were simultaneously changed and sampled using the normal distribution,
- ✓ The total foundation costs for the two different selection methods are the same. However, the scattering of the second method was obtained lower.

The results of this study reveal that the DE-based solution can be used effectively in the optimum design of a RC footing subject to axial load and bidirectional flexure.

## 7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Muhammet KAMAL fikrin oluşması, tasarımın yapılması ve literatür taraması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve sonuçların incelenmesi başlıklarında katkı sunmuştur.

## 8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## 9 Kaynaklar

- [1] Ersoy U, Özcebe G. *Betonarme-I*. 3. Baskı. İstanbul, Türkiye, Evrim, 2012.
- [2] International Energy Agency and the United Nations Environment Programme. "2019 global status report for buildings and construction: towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector". Global Alliance for Buildings and Construction, Paris, France, Job No.: DTI/2265/PA, 2019.
- [3] Çakıcı Z, Yıldırım MS. "Toprak dağıtımında oluşabilecek girişim durumunun önlenmesi için optimizasyon tabanlı çözüm yaklaşım". *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(4), 1455-1473, 2022.
- [4] Olayode IO, Severino A, Tartibu LK, Arena F, Cakici Z. "Performance evaluation of a hybrid pso enhanced anfis model in prediction of traffic flow of vehicles on freeways: traffic data evidence from South Africa". *Infrastructures*, 7(1), 1-29, 2022.
- [5] Cakici Z, Murat YS, Aydin MM. "Design of an efficient vehicle-actuated signal control logic for signalized intersections". *Scientia Iranica*, 29(3), 1059-1076, 2022.
- [6] Tan E, Sadak D, Ayvaz MT. "Optimum design of sewer systems by using differential evolution algorithm". *Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers*, 31(5), 10229-10250, 2020.
- [7] Mortazavi A. "Size and layout optimization of truss structures with dynamic constraints using the interactive fuzzy search algorithm". *Engineering Optimization*, 53(3), 369-391, 2021.
- [8] Mortazavi A. "Bayesian Interactive Search Algorithm: A New Probabilistic Swarm Intelligence Tested on Mathematical and Structural Optimization Problems". *Advances in Engineering Software*, 155, 1-21, 2021.
- [9] Daloglu AT, Artar M, Özgün K, Karakas A, "Optimum design of steel space frames including soil-structure interaction". *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54, 117-131, 2016.
- [10] Ayvaz MT, Kayhan AH, Ceylan H, Gurarslan G. "Hybridizing the harmony search algorithm with a spreadsheet "Solver" for solving continuous engineering optimization problems". *Engineering Optimization*, 41(12), 1119-1144, 2009.
- [11] Kaveh A, Abadi ASM. "Harmony search based algorithms for the optimum cost design of reinforced concrete cantilever retaining walls". *International Journal of Civil Engineering*, 9(1), 1-8, 2011.
- [12] Aydogdu I, "Cost optimization of reinforced concrete cantilever retaining walls under seismic loading using a biogeography-based optimization algorithm with Levy flights". *Engineering Optimization*, 49(3), 381-400, 2017.
- [13] Molina-Moreno F, García-Segura T, Martí JV, Yepes V. "Optimization of buttressed earth-retaining walls using hybrid harmony search algorithms". *Engineering Structures*, 134, 205-216, 2017.
- [14] Camp CV, Akin A. "Design of retaining walls using big bang-big crunch optimization". *Journal of Structural Engineering*, 138(3), 438-448, 2012.
- [15] Yücel M, Bekdaş G, Nigdeli SM, Kayabekir AE. "An artificial intelligence-based prediction model for optimum design variables of reinforced concrete retaining walls". *International Journal of Geomechanics*, 21(12), 1-10, 2021.
- [16] Kayhan AH, Demir A. "Statik ve dinamik yüklerle maruz betonarme konsol istinat duvarlarının diferansiyel gelişim algoritması ile optimum tasarımı", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(3), 403-412, 2018.
- [17] Kamal M, Inel M. "Optimum design of reinforced concrete continuous foundation using differential evolution algorithm". *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 8401-8415, 2019.
- [18] Martí JV, Gonzalez-Vidoso F, Yepes V, Alcalá J. "Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing". *Engineering Structures*, 48, 342-352, 2013.
- [19] Aydın Z, Ayvaz Y. "Overall cost optimization of prestressed concrete bridge using genetic algorithm". *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 17, 769-776, 2013.
- [20] Camp CV, Assadollahi A. "CO2 and cost optimization of reinforced concrete footings using a hybrid big bang-big crunch algorithm" *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48, 411-426, 2013.

- [21] Camp CV, Assadollahi A. "CO2 and cost optimization of reinforced concrete footings subjected to uniaxial uplift". *Journal of Building Engineering*, 3, 171-183, 2015.
- [22] Chaudhuri P, Maity D. "Cost optimization of rectangular RC footing using GA and UPSO". *Soft Computing*, 24, 709-721, 2020.
- [23] Öztürk HT, Bir doğrultuda birleşik eğilme etkisindeki tekil temellerin çeşitli sezgisel algoritmalarla TS500'e göre minimum maliyetle optimum tasarımı". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1030-1036, 2018.
- [24] Türk Standardı. "Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları". Türk Standartları Enstitüsü, TS-500, Ankara, Türkiye, 1997.
- [25] Storn R, Price K. "Differential evolution- a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces", *Journal of Global Optimization*, 11, 341-359, 1997.
- [26] Ersoy U. *Betonarme-II Döşeme ve Temeller*. 3. Baskı. İstanbul, Türkiye, Evrim, 2011.
- [27] Elçi A, Ayvaz MT. "Differential-Evolution algorithm based optimization for the site selection of groundwater production wells with the consideration of the vulnerability concept". *Journal of Hydrology*, 511, 736-749, 2014.