

Statik ve dinamik yüklere maruz betonarme konsol istinat duvarlarının diferansiyel gelişim algoritması ile optimum tasarımı

Optimum design of RC cantilever retaining walls subjected to static and dynamic loadings by differential evolution algorithm

Ali Haydar KAYHAN^{1*}, Ahmet DEMİR²

^{1,2}İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye.
hkayhan@pau.edu.tr, ademir@pau.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 17.02.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 30.06.2017
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.04834
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, betonarme konsol istinat duvarlarının minimum maliyetle tasarımında diferansiyel gelişim algoritması tekniğine dayalı bir yöntem kullanılmıştır. Düşey yüklerin yanı sıra hem statik hem de depremli durumdaki dinamik zemin itkileri gözönüne alınmıştır. TS-500'de tanımlanan betonarme tasarım kriterleri ve TS-7994'te tanımlanan devrilme, kayma ve zeminin taşıma gücü ile ilgili kriterler, optimum tasarım probleminin kısıtları olarak ele alınmıştır. Farklı zemin özellikleri için, istinat duvarının kesit ölçüleri ve betonarme donatı düzeni, dikkate alınan tüm kriterler sağlanacak biçimde elde edilmiştir. Duyarlılık analizi sonuçları, optimum tasarımın diferansiyel gelişim algoritması parametrelerinin seçiminden etkilendiğini göstermiştir. Dolayısıyla, diferansiyel gelişim algoritmasının, betonarme konsol istinat duvarlarının tasarımının optimum şekilde yapılabilmesi için etkin şekilde kullanılabileceği söylenebilir.

Anahtar kelimeler: Betonarme konsol istinat duvarı, Diferansiyel gelişim algoritması, Optimum tasarım

Abstract

In this study, a solution algorithm based on the differential evolution algorithm is used to optimally design the reinforced concrete cantilever retaining walls. Beside vertical loads, static and earthquake induced dynamic lateral soil pressure are taken into account for designing of the retaining walls. Requirements for reinforced concrete design given in TS-500 and requirements for sliding, overturning and soil bearing capacity evaluation given in TS-7994 are considered as constraints of the optimum design problem. For different combinations of soil properties, section dimensions and reinforcement of the retaining walls are obtained cost of the wall to be minimum and all the considered constraints to be satisfied. Results of sensitivity analysis show that optimum design is insensitive to the selection of differential evolution algorithm parameters. Therefore, differential evolution algorithm can be used as an effective way for optimally designing the reinforced concrete cantilever walls.

Keywords: Reinforced concrete retaining wall, Differential evolution algorithm, Optimum design

1 Giriş

İstinat (dayanma) yapıları farklı düzeyde bulunan zeminler sebebi ile oluşan yanal toprak etkisini, önceden belirlenen bir güvenlikle karşılayan ve genellikle yağma ya da betonarme olarak inşa edilen yapılardır [1]-[3]. Bu yapıların, minimum maliyet ile ve dikkate alınan tüm kriterler sağlanacak biçimde tasarımı, sık karşılaşılan, önemli bir mühendislik problemidir. İstinat yapılarının optimum tasarımı, geoteknik, yapısal ve ekonomik koşulları sağlamalıdır. Bu koşullar, optimizasyon probleminin kısıtları olarak dikkate alınmaktadır [4]-[8].

Son yıllarda, mühendislik optimizasyon problemlerinin çözümü için sezgisel optimizasyon teknikleri sık olarak kullanılmaktadır. Genetik algoritma [9], armoni araştırması [10], parçacık sürü optimizasyonu [11], yapay arı kolonisi [12] yaygın olarak kullanılan sezgisel tekniklerdendir. Mühendislik problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan sezgisel tekniklerden birisi de Diferansiyel Gelişim Algoritması'dır (DGA). DGA, popülasyon tabanlı diğer sezgisel algoritmalarda olduğu gibi, karar değişkenlerinin tanımlandığı çok boyutlu arama uzayında rastgele üretilmiş olan başlangıç popülasyonunun geliştirilmesine ve böylece optimum çözümün aranmasına dayanmaktadır [13],[14].

Sezgisel optimizasyon algoritmalarının istinat duvarlarının tasarımında kullanıldığı çalışmalara Khajehzadeh ve diğ. [15], Khajehzadeh ve Eslami [16], Ceranic ve diğ. [17], Kaveh ve

Abadi [18], Sheikholeslami ve diğ. [19], Camp ve Akin [20], Kaveh ve diğ. [21], Yepes ve diğ. [22], Talatahari ve Sheikholeslami [23], Temur ve Bekdas [24], Kumar ve Suribabu [25] tarafından yapılan çalışmalar örnek olarak verilebilir. Ancak belirtmek gerekir ki, bu çalışmalarda sadece statik yükler dikkate alınmış, dinamik yükler dikkate alınmamıştır. Dinamik etkilerin de dikkate alındığı çalışmalara ise Aydoğdu [26], Kaveh ve Soleimani [27], Kayabekir ve diğ. [28] tarafından yapılan çalışmalar örnek olarak gösterilebilir.

Bu çalışmada, betonarme konsol istinat duvarlarının minimum maliyetle tasarımında DGA tekniğine dayanan bir çözüm yöntemi kullanılmıştır. Düşey yükler ile beraber hem statik yükler hem de deprem etkisi ile oluşacak dinamik yükler dikkate alınmıştır. Ayrıca, istinat duvarı arkasında çift tabakalı zemin durumu da dikkate alınmıştır. Depremler durumunda dikkate alınması gereken ilave dinamik yükler ve koşullar Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'te (DBYBHY) [29] yer almaktadır. Betonarme tasarımı için, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları standardında (TS-500) [30] yer alan koşullar ve istinat duvarları için Zemin Dayanma Yapıları: Sınıflandırma, Özellikleri ve Projelendirme Esasları standardında (TS-7994) [1] yer alan devrilme, kayma ve zeminin taşıma gücü için tanımlanmış kriterler, optimum tasarım probleminin kısıtları olarak ele alınmıştır. DGA parametre değerlerinin elde edilen sonuçlar üzerindeki etkisinin değerlendirilebilmesi amacıyla detaylı bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Gözönüne alınacak

farklı düzeydeki deprem etkilerinin ve zemin içsel sürtünme açısının optimum maliyet üzerindeki etkileri de araştırılmıştır.

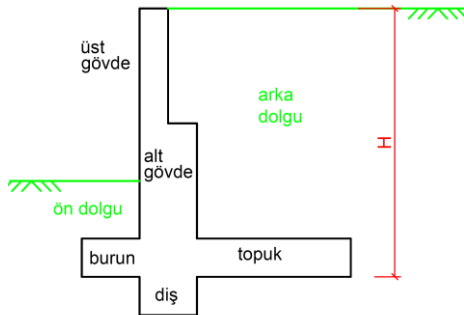
2 Betonarme konsol istinat duvarları

2.1 Genel tanımlar

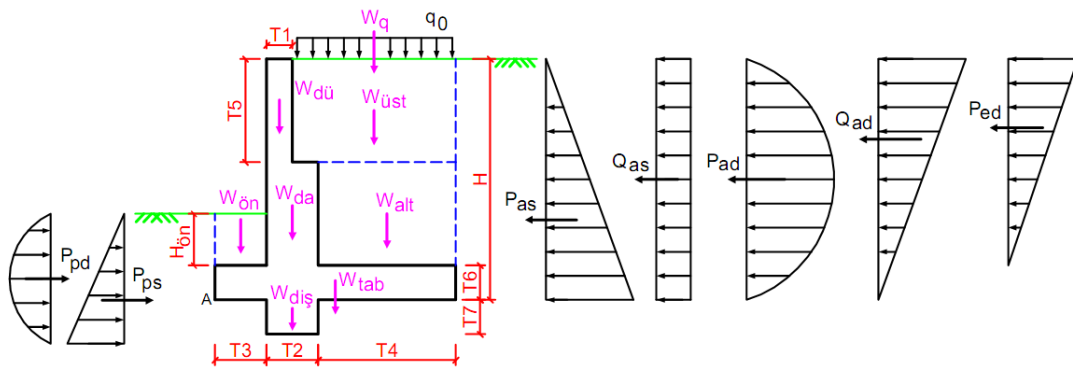
İstinat duvarları, rijit, yarı rijit ve esnek olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Rijit istinat duvarları kendi ağırlıkları ve temel üzerindeki dolgu ağırlığı ile toprak itkisine karşı dengeyi sağlamaktadır. Yarı rijit istinat duvarları, toprak itkisini karşılamakla beraber belirli bir limitin ötesinde hareket ederek veya toprak basıncının önemli bir kısmını zeminin kendisine aktararak çalışır. Esnek istinat duvarları ise, temel zemininin duvarları taşıyamayacak kadar yetersiz olduğu durumlarda, geçici duvar oluşturma mecburiyeti ve yeniden kullanma olanağı sebebi ile tercih edilmektedir [3],[30],[31].

TS-7994'e göre istinat duvarlarının projelendirilmesinde, öncelikle esas alınan yüksekliğe bağlı olarak ön boyutlar belirlenmektedir (ön tasarım). Daha sonra zemin ve dolgu malzemesi özellikleri, yeraltı suyu durumu, deprem etkisi, topografya ve dış yükler vb. etkiler tespit edilmektedir. Seçilen ön boyutlar ve belirlenen etkiler için devrilme, kayma, taşıma gücü, toptan göçme ve oturma kontrolleri yapılarak kontrol sonuçlarının gerektirdiği şekilde duvar boyutları yenilenmektedir (kesin tasarım).

Bu çalışmada ele alınan konsol istinat duvarları, çalışma biçimi olarak rijit dayanma yapıları grubuna girmekte, plak sürekli temele benzer bir temel ile ankastre olarak temele bağlanan gövdeden oluşmaktadır (Şekil 1). Duvarın ağırlığı, varsa zemin üzerindeki dış yük ile duvarın önündeki ve arkasındaki zemin kütlelerinden kaynaklanan düşey yüklerin yanında yine dış yük ile zeminin kütlelerinden kaynaklanan aktif ve pasif yatay statik kuvvetlerin etkisi altındadır. Deprem durumu dikkate alındığında, konsol istinat duvarına etkiyen statik kuvvetlere aktif ve pasif dinamik kuvvetler de eklenmektedir.



Şekil 1: Tipik bir betonarme konsol istinat duvarı kesiti.



Şekil 2: İstinat duvarının kesit boyutları ile dikkate alınan düşey ve yatay yükler.

2.2 İstinat duvarı hesaplarında dikkate alınan yükler

Şekil 2'de betonarme konsol istinat duvarı kesitinde boyutlar ile bu çalışmada dikkate alınan düşey ve yatay yükler verilmiştir. Duvarın temel tabanından itibaren yüksekliği H ve ön kısımda temel üstünden itibaren zemin yüksekliği $H_{ön}$ ile gösterilmiştir. Betonarme duvarın gövde, temel ve dış ile ilgili kesit boyutları $T1 - T7$ ile verilmiştir. Düzgün yayılı dış yükün (sürşarj) şiddeti q_0 ile gösterilmiştir.

Hesaplarda dikkate alınacak düşey yükler: düzgün yayılı dış yük W_q , duvarın üst ve alt gövde kısmının ağırlığı $W_{dü}$ ile W_{da} , duvar temelinin ağırlığı W_{tab} , dış ağırlığı $W_{diş}$, duvarın üst ve alt kısımları hizasında bulunan zeminin ağırlığı $W_{üst}$ ve W_{alt} ile duvarın burun kısmı önündeki zeminin ağırlığı $W_{ön}$. Duvarın arka kısmından duvara doğru etkiyen statik ve dinamik aktif yükler: zemin kütlelerinden oluşan statik yük P_{as} , düzgün yayılı dış yükten oluşan statik yük Q_{as} , zemin kütlelerinden kaynaklanan dinamik yük P_{ad} , dış yükten kaynaklanan dinamik yük Q_{ad} ve duvar gövdesinin kütlelerinden kaynaklanan dinamik yük P_{ed} . Dış tabandan itibaren ön kısımda zemin kütlelerinden kaynaklanan statik ve dinamik yükler P_{ps} ve P_{pd} de dikkate alınmaktadır [32]. Dinamik yüklerin hesabında DBYBHY'te verilen tanımlamalar kullanılmıştır.

Toplam aktif basınç katsayısı K_{at} ve pasif basınç katsayısı K_{pt} , DBYBHY'te, emniyetli yönde kalmak adına zemin kohezyonu ihmal edilerek verilmiştir (Denklem 1). Denklem 1a ve 1b'de, ϕ içsel sürtünme açısı, α zemin ile duvar arakesitinin düşeyle yaptığı açıdır. i pasif ya da aktif basınç tarafındaki zemin yüzeyinin yatay ile yaptığı açı, δ zeminle duvar arasındaki sürtünme açısıdır. Bu çalışmada seçilen örnekler için α , i ve δ sıfır kabul edilmiştir. λ açısı kurudaki zeminlerde Denklem 2 ile hesaplanmaktadır.

$$K_{at} = \frac{(1 \pm C_v) \cos^2(\phi - \lambda - \alpha)}{\cos \lambda (\cos^2 \alpha) \cos(\delta + \alpha + \lambda)} \left[1 + \frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \lambda - i)}{\cos(\delta + \alpha + \lambda) \cos(i - \alpha)} \right]^2 \quad (1a)$$

$$K_{pt} = \frac{(1 \pm C_v) \cos^2(\phi - \lambda + \alpha)}{\cos \lambda (\cos^2 \alpha) \cos(\delta - \alpha + \lambda)} \left[1 + \frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \lambda + i)}{\cos(\delta - \alpha + \lambda) \cos(i - \alpha)} \right]^2 \quad (1b)$$

$$\lambda = \arctan \left[\frac{C_h}{1 \mp C_v} \right] \quad (2)$$

Yatay eşdeğer deprem katsayısı C_h ve düşey eşdeğer deprem katsayısı C_v , Denklem 3'te verilmiştir. Denklem 3'te, I bina önem katsayısı, A_0 ise etkin yer ivmesi katsayısıdır.

$$C_h = 0.2(I + 1)A_0 \quad (3a)$$

$$C_v = 2C_h/3 \quad (3b)$$

Depremden oluşan dinamik aktif basınç katsayısı K_{ad} ve dinamik pasif basınç katsayısı K_{pd} , Denklem 4'te verilmiştir. K_{as} ve K_{ps} , sırası ile aktif ve pasif statik toprak basıncıdır ve Denklem 1'de $\lambda=0$, $C_v=0$ konularak elde edilebilir.

$$K_{ad} = K_{at} - K_{as} \quad (4a)$$

$$K_{pd} = K_{pt} - K_{ps} \quad (4b)$$

Zeminin kuruda ve üniform olması durumunda, zemin kütlesinden kaynaklanan ek aktif ve pasif dinamik toprak basınçlarının, yüzeyden itibaren z derinliği boyunca değişimi Denklem 5'te verilmiştir. Denklemlerde γ zeminin kuru birim hacim ağırlığıdır.

$$p_{ad}(z) = 3K_{ad}(1 - z/H)\gamma z \quad (5a)$$

$$p_{pd}(z) = 3K_{pd}(1 - z/H)\gamma z \quad (5b)$$

Düzgün yayılı dış yükten kaynaklanan ek aktif ve pasif dinamik toprak basınçlarının, yüzeyden itibaren z derinliği boyunca değişimi ise Denklem 6'da verilmiştir.

$$q_{ad}(z) = 2q_0K_{ad}(1 - z/H)\cos\alpha/\cos(\alpha - i) \quad (6a)$$

$$q_{pd}(z) = 2q_0K_{pd}(1 - z/H)\cos\alpha/\cos(\alpha - i) \quad (6b)$$

Basınç katsayıları yardımı ile duvar yüksekliği boyunca aktif ve pasif basınçların değişimi belirlendikten sonra bileşke kuvvetler ve bileşke kuvvetlerin temel alt yüzeyinden itibaren yüksekliği bulunabilir.

Betonarme kesit tasarımı için depremsiz durumda sadece statik yükler dikkate alınmakta ve tasarım için kritik kesitlerdeki iç kuvvetler $1.4G + 1.6Q$ kombinasyonu ile hesaplanmaktadır. Depremlilikte, statik yüklerin yanında dinamik yükler de dikkate alınmakta ve kritik kesitlerdeki iç kuvvetler $G + Q + E$ kombinasyonu ile hesaplanmaktadır. DBYBHY'e göre, istinat duvarlarının betonarme hesabında esas alınacak iç kuvvetler, statik yüklerden kaynaklanan iç kuvvetlere dinamik yüklerden kaynaklanan iç kuvvetlerin $R_{za}=1.50$ katsayısına bölünmesi elde edilen değerler ilave edilerek hesaplanmaktadır.

2.3 Konsol istinat duvarlarında güvenlik kontrolleri

TS-7994'e göre ön tasarım sonucu tipi ve enkesit boyutları ile hesaplarda dikkate alınacak yüklerin belirlendiği duvar için kayma, devrilme, taşıma gücü, toptan göçme ve oturma ile ilgili güvenlik kontrolleri yapılmalıdır. Bu çalışmada duvarın toptan göçmesi ve oturması ile ilgili kontroller dikkate alınmamıştır. Güvenlik kontrolleri hesabında yapılan bazı kabuller ise şöyledir:

Kayma güvenliği kontrolünde güvenli yönde kalmak adına, burun kısmının üzerindeki toprak ağırlığı $W_{\text{ön}}$ ve pasif

dinamik toprak basıncı P_{pd} ihmal edilmiştir. Pasif statik toprak basıncının (P_{ps}) sadece temel alt kotundan itibaren dış yüksekliğine kadar olan kesimi dikkate alınmıştır.

Devrilme güvenliğinin kontrolü için güvenli yönde kalmak adına, burun kısmının üzerindeki toprak ağırlığı ($W_{\text{ön}}$) ile pasif aktif ve dinamik toprak basıncı kuvvetleri (P_{ps} ve P_{pd}) ihmal edilmiştir.

Taşıma gücü ile ilgili kontrolde, temel altında doğrusal olarak değişen gerilmeye etki eden momentin hesabında, pasif aktif ve dinamik toprak basıncı kuvvetlerinin (P_{ps} ve P_{pd}) katkısı ihmal edilmiştir.

Kayma güvenliği kontrolü: kaymaya karşı direnen toplam kuvvetlerin duvarı itmeye çalışan toplam kuvvetlere oranı, kayma güvenliği katsayısına (GS_{kay}) eşit ya da büyük olmalıdır (Denklem 7). GS_{kay} , kum zeminler için 1.50 iken DBYBHY'e göre depremlilikte 1.00 alınmaktadır.

$$\sum F_{dir} / \sum F_{itici} \geq GS_{kay} \quad (7)$$

Devrilme güvenliği kontrolü: devrilmeye karşı koyan toplam momentlerin duvarı devirmeye çalışan toplam momentlere oranı, devrilme güvenliği katsayısına (GS_{dev}) eşit ya da büyük olmalıdır (Denklem 8). GS_{dev} , TS-7994'te 1.50 iken DBYBHY'e göre depremlilikte 1.20 alınmaktadır.

$$\sum M_{karşı} / \sum M_{dev} \geq GS_{dev} \quad (8)$$

Taşıma gücü kontrolü: temel tabanında hesaplanacak maksimum zemin gerilmesi, izin verilen zemin gerilmesini ($\sigma_{z,em}$) aşmamalı, minimum zemin gerilmesi ise negatif olmamalıdır (Denklem 9).

$$0 \leq \sigma_z \leq \sigma_{z,em} \quad (9)$$

2.4 Konsol istinat duvarlarında betonarme hesabı

Betonarme plakların donatı hesabında TS-500'de öngörülen koşullar dikkate alınmıştır. Konsol istinat duvarlarının gövde ve temelinde asal çekme donatısı, tek doğrultuda çalışan dikdörtgen kesitli plaklardaki gibi hesaplanmaktadır.

Gövde ve temeldeki konsol plaklar için TS-500'de ve TS-7994'te verilen minimum kalınlık koşulları dikkate alınmıştır. Ayrıca Denklem 10 ve Denklem 11'de verilen koşullar sağlanacak şekilde plak kalınlıkları belirlenmiştir. Çekme bölgesindeki donatı alanının hesabında ise Denklem 12 kullanılmıştır [33]. Denklemlerde b ve d , dikkate alınan betonarme kesitin genişliğini ve faydalı yüksekliğini, f_{cta} betonun eğik çekme dayanımını, V_d hesap kesme kuvvetini, V_{cr} betonun kesmede çatlama dayanımını, f_{yd} donatının hesap akma dayanımını, M_d hesap momentini ve A_s çekme donatısı alanını ifade etmektedir.

$$K = \frac{bd^2}{M_d} \geq K_t \quad (10)$$

$$V_{cr} = 0.65f_{cta}bd \geq V_d \quad (11)$$

$$A_s = M_d / (0.86f_{yd}d) \quad (12)$$

Şekil 3'te, bu çalışmada dikkate alınan konsol istinat duvarı kesiti görülmektedir. T1 ve T2 sırası ile duvarın alt ve üst

kısımının kalınlığı, $T6$ ve $T7$ sırası ile temel plağı kalınlığı ve dış yüksekliğidir.

Topuk uzunluğu $T4$, burun uzunluğu $T3$ ile gösterilmiştir. Duvarın üst kısmının yüksekliği $T5$ 'tir. Kritik kesitler, duvarın üst kısmı için 1-1, duvarın alt kısmı için 2-2, burun kısmı için 3-3 ve topuk kısmı için 4-4 ile gösterilmiştir.

Duvar için belirlenecek donatı alanlarını temsil eden değişkenler de Şekil 3'te verilmiştir. Her bir kısımda çekme ve basınç bölgesindeki enine donatılar için sırasıyla 1 ve 2 indisi kullanılırken, basınç bölgesindeki boyuna donatı için 3, çekme bölgesindeki boyuna donatı için 4 indisi kullanılmıştır. Donatılar iki indis ile ifade edilmiştir. Birinci indis donatının nerede olduğunu (alt duvar, üst duvar, burun ya da topuk), diğer indis de donatının bulunduğu bölgeyi (basınç veya çekme) ve yönünü (enine ya da boyuna) temsil etmektedir. Örneğin As12 için 1 indisi donatının duvarın üst kısmında bulunduğunu, 2 indisi ise donatının basınç bölgesindeki enine donatı olduğunu göstermekte iken, As34 için 3 indisi donatının burun kısmında bulunduğunu, 4 indisi ise donatının çekme bölgesindeki boyuna donatı olduğunu göstermektedir.

Duvar kısmında, çekme bölgesinde boyuna doğrultuda (yatay), basınç bölgesinde ise boyuna ve enine doğrultuda (düşey) rötne ve sıcaklık donatısı bulundurulmalıdır. Yatay rötne ve sıcaklık donatılarının toplam oranı 0.0025 olup, bunun üçte biri çekme bölgesinde, üçte ikisi ise basınç bölgesinde

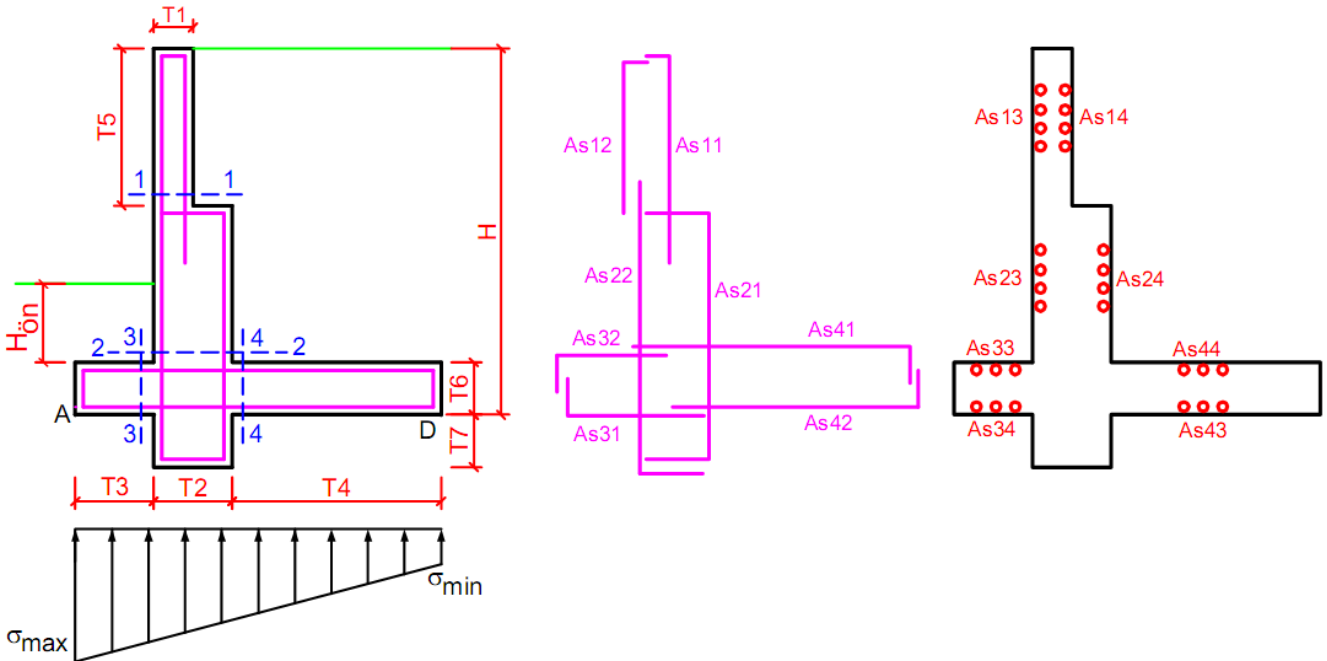
bulundurulmalıdır. Basınç bölgesindeki düşey rötne ve sıcaklık donatısı oranı da 0.0015 olmalıdır. Temelde, çekme bölgesinde boyuna doğrultuda dağıtma donatısı bulundurulmalıdır. Basınç bölgesinde ise enine ve boyuna doğrultuda $\Phi 8/20$ cm donatı kullanılabilir.

1-1 ve 2-2 kritik kesitlerinde iç kuvvetlerin belirlenmesi için Şekil 2'de gösterilen düşey ve yatay etkilerin, yüzeyden itibaren kritik kesit derinliğine kadar olan kısmı dikkate alınarak hesaplanan değerleri kullanılmıştır. Örneğin, 1-1 kesiti iç kuvvetlerinin belirlenmesinde, $T5$ derinliği için dikkate alınan etkiler Şekil 4'te verilmiştir.

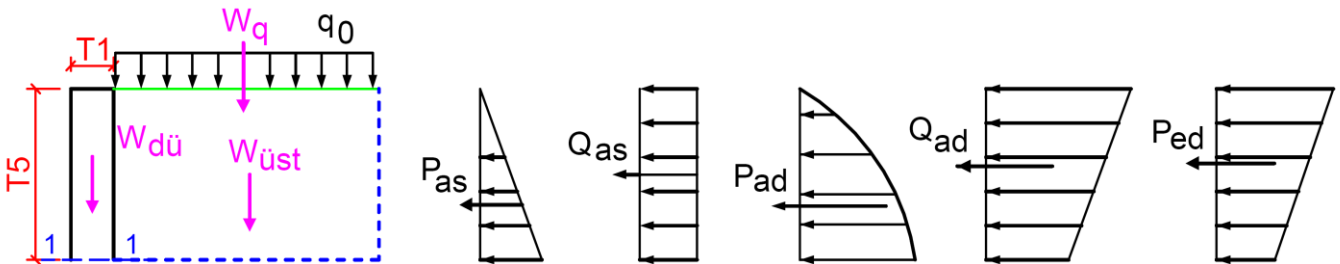
3 Optimizasyon probleminin formülasyonu

Bir optimizasyon probleminin formülasyonu, amaç fonksiyonunun, karar değişkenlerinin ve tasarımda ele alınacak koşulları ifade eden kısıtları belirlemesini gerektirir.

Duvar yüksekliği, duvarın bulunduğu bölgenin depremselliği ve zemin özellikleri ile yapıya etkileyen yükler, problemin başlangıcında bilinmektedir. Optimum tasarım ile belirlenmek istenen, duvarın kesit boyutları ($T1 - T7$) ile gerekli donatı alanlarıdır. Konsol istinat duvarının optimum kesit boyutlarının ve donatısının belirlenmesi problemi, Denklem 13 ile verilen amaç fonksiyonunun minimize edilmesi şeklinde ifade edilmiştir.



Şekil 3: İstinat duvarının kesitinde tasarım değişkenleri.



Şekil 4: 1-1 kesitinde iç kuvvetlerin hesabı için dikkate alınan etkiler.

$$F(\mathbf{x}) = V_b(\mathbf{x})C_b + \gamma_s \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (l_{ij}(\mathbf{x})A_{s,ij}(\mathbf{x})) C_s + \sum_{k=1}^{15} g_k(\mathbf{x}) \quad (13)$$

Denklem 13'te \mathbf{x} , duvar kesitine ait boyutların, yani problemdeki karar değişkenlerinin yer aldığı vektördür. $V_b(\mathbf{x})$ duvarın toplam hacmini, C_b betonun birim hacim fiyatını, γ_s donatının birim hacim ağırlığını, $A_{s,ij}(\mathbf{x})$ çekme ve basınç bölgesindeki enine ve boyuna donatuların kesit alanını, $l_{ij}(\mathbf{x})$ çekme ve basınç bölgesindeki enine ve boyuna donatuların uzunluğunu ve C_s donatının birim ağırlığının fiyatını ifade etmektedir. $g_k(\mathbf{x})$ ise tasarım kısıtlarının problemin çözümünde ele alınabilmesi için kullanılan penaltı fonksiyonlarını temsil etmektedir.

Mühendislik optimizasyon problemlerindeki kısıtların sezgisel algoritmaların çözümünde dikkate alınabilmesi amacı en yaygın olarak kullanılan teknik, penaltı fonksiyonları kullanmaktır [34]. Bu çalışmada, dikkate alınan güvenlik ve tasarım koşulları penaltı fonksiyonları yardımı ile amaç fonksiyonunda temsil edilmişlerdir. Penaltı fonksiyonlarındaki penaltı katsayısı (PK) için literatürde sistematik bir öneri bulunmamakta ve deneme yanılma yöntemi ile belirlenmektedir. Bu çalışmada, birçok denemeden sonra tüm kısıtlar için sabit $PK=1000$ değerini kullanmanın, çözüm elde edebilmek için yeterli olduğu görülmüştür.

Denklem 14 ile verilen $g_1(\mathbf{x})$, istinat duvarının kayma güvenliği ile ilgili koşula bağlı penaltı fonksiyonudur. Eğer, kaymaya direnen kuvvetlerin itici kuvvetlere oranı, kayma güvenliği sayısından daha büyük ise, TS-7994'e göre kayma güvenliği sağlanmış demektir. Aksi durumda, aradaki farka bağlı olarak penaltı değeri hesaplanmakta ve amaç fonksiyonuna eklenmektedir.

$$g_1(\mathbf{x}) = (GS_{kay} - \sum F_{dir} / \sum F_{itici}) * PK \geq 0 \quad (14)$$

$g_2(\mathbf{x})$, istinat duvarının devrilme güvenliği ile ilgili koşula bağlı olan penaltı fonksiyonudur (Denklem 15).

$$g_2(\mathbf{x}) = (GS_{dev} - \sum M_{karşı} / \sum M_{dev}) * PK \geq 0 \quad (15)$$

Zemin taşıma gücü ile ilgili koşullar Denklem 16 ile ele alınmaktadır.

$$g_3(\mathbf{x}) = \begin{cases} (\sigma_z / \sigma_{z,em} - 1) * PK \geq 0 \\ -\sigma_z * PK \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

Denklem 17 ile verilen ifade eğilme ile ilgili koşulu temsil etmektedir. Denklem 18 ve 19 ise, kritik kesitlerdeki kesme ve minimum donatı ile ilgili koşulları ifade etmektedir.

$$g_{4-7}(\mathbf{x}) = (K_l / K - 1) * PK \geq 0 \quad (17)$$

$$g_{8-11}(\mathbf{x}) = (V_d / V_{cr} - 1) * PK \geq 0 \quad (18)$$

$$g_{12-15}(\mathbf{x}) = (\rho_{min} / \rho - 1) * PK \geq 0 \quad (19)$$

4 Diferansiyel gelişim algoritması

Price ve Storn tarafından geliştirilmiş olan DGA, popülasyon tabanlı diğer sezgisel algoritmalarda olduğu gibi, karar

değişkenlerinin tanımlandığı çok boyutlu arama uzayında rastgele üretilmiş olan başlangıç popülasyonunun geliştirilmesine ve böylece optimum çözümün aranmasına dayanan bir çözüm tekniğidir [13],[14]. DGA ile ilgili temel bilgiler, algoritma için önerilen önemli değişiklikler, teorik ve pratik çalışmalar ile ilgili detaylar Das ve Suganthan [35] tarafından yapılan derleme çalışmasında bulunabilir.

DGA, işleyişi ve kullanılan operatörler dikkate alındığında Genetik Algoritma'ya (GA) [9] büyük oranda benzerlik göstermektedir. Popülasyonun iterasyonlar boyunca geliştirilmesi için, GA'daki mutasyon, çaprazlama, değerlendirme ve seçim operatörleri kullanılmaktadır. Farklı olarak klasik GA'da değişkenler ikili sayı sistemi ile kodlanırken, DGA'da değişkenler gerçek değerleri ile kullanılabilen, ayrıca her bir operatör popülasyondaki tüm bireylere sırası ile uygulanmaktadır.

DGA ile optimizasyon işlemine ait hesap adımları aşağıda verilmiştir.

Adım 1. Problemin kurulması ve algoritmanın çözüm parametrelerinin tanımlanması:

Bu adımda, amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve algoritmanın parametreleri tanımlanır. Optimizasyon problemi, kısıtlara bağlı penaltıların da dikkate alındığı ve Denklem 13 ile verilen $F(\mathbf{x})$ fonksiyonunun minimize edilmesi olarak tanımlanmıştır.

$$\min F(\mathbf{x}) \quad x_{i,j}^k = x_j^{min} + r(x_j^{mak} - x_j^{min}) \quad (20)$$

$$i = 1,2,3, \dots, NP; j = 1,2,3, \dots, ND$$

Denklem 20'de, i popülasyondaki her bir bireyin numarasını, j her bir bireydeki karar değişkeninin numarasını, k jenerasyon numarasını, r rastgele olarak 0-1 arasında türetilmiş üniform dağılıma sahip sayıyı, NP popülasyondaki birey sayısını ve ND karar değişkenlerinin toplam sayısını temsil etmektedir. $x_{i,j}^k$, başlangıç popülasyonu için ($k=0$) her bir bireye ait karar değişkenlerinin, alt ve üst sınırlar dikkate alınarak rastgele elde edilmiş değerlerini göstermektedir. DGA'da çözüm sürecini temsil eden parametreler: mutasyon oranı (MR), çaprazlama oranı (CR) ve maksimum iterasyon sayısı da bu adımda tanımlanmaktadır.

Adım 2. Başlangıç popülasyonunun oluşturulması:

Bu adımda, her bir bireye ait karar değişkenlerinin değerleri, arama uzayında belirlenmiş en düşük ve en yüksek sınırlar gözönüne alınarak elde edilir. Karar değişkeni değerleri ve ilgili amaç fonksiyonu değerleri ile başlangıç popülasyonu matrisi \mathbf{PM} doldurulur (Denklem 21). Matrisin son sütunu bireylere ait amaç fonksiyonu değerlerinin, diğer sütunları ise bireylere ait karar değişkenlerinin değerlerin saklanması için kullanılmaktadır.

$$\mathbf{PM} = \begin{bmatrix} x_{1,1}^0 & x_{1,2}^0 & \dots & x_{1,ND}^0 \\ x_{2,1}^0 & x_{2,2}^0 & \dots & x_{2,ND}^0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{NP,1}^0 & x_{NP,2}^0 & \dots & x_{NP,ND}^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1(\mathbf{x}) \\ F_2(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ F_{NP}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (21)$$

Adım 3. Yeni bir bireyin mutasyon ve çaprazlama operatörleri yardımı ile oluşturulması:

Bu adımda, mevcut popülasyon içinden sırası ile seçilen bir bireyi temsil eden \mathbf{x}_i^k vektörü ile bu birey dışında rastgele olarak seçilen 3 bireyin mutasyonu sonucu oluşacak bireyi

temsil eden \mathbf{v}_i^{k+1} vektörü çaprazlanacaktır. Böylece, bir sonraki jenerasyonda yer almaya aday yeni deneme bireyini temsil eden \mathbf{u}_i^{k+1} vektörü oluşturulacaktır. \mathbf{x}_i^k bireyi ile \mathbf{u}_i^{k+1} bireyinden birisi, Adım 4'te anlatılacak olan seçim yaklaşımı ile bir sonraki jenerasyonun bireyi \mathbf{x}_i^{k+1} olarak seçilecektir. Sırası ile tüm bireyler için bu işlemler yapılacaktır.

Mutasyon, seçilen bir bireyin (kromozomun) bir kısım elemanları (genleri) üzerinde, rastgele belirlenmiş sayıda değişiklik yapılması olarak tanımlanabilir. DGA'nın optimizasyon problemlerinin çözümündeki etkinliğini arttırmak amacıyla literatürde farklı mutasyon operatörü önerileri bulunmaktadır [35]-[37]. Bu çalışmada, DGA'nın orijinal şeklinde yer alan mutasyon operatörü ile \mathbf{v}_i^{k+1} vektörü elde edilmektedir (Denklem 22).

$$\mathbf{v}_i^{k+1} = \mathbf{x}_{r_3}^k + MR(\mathbf{x}_{r_1}^k - \mathbf{x}_{r_2}^k) \quad i \neq r_1 \neq r_2 \neq r_3 \quad (22)$$

Denklem 22'de r_1 , r_2 ve r_3 değerleri $\{1, 2, 3, \dots, i-1, i+1, \dots, NP\}$ setinden rastgele seçilen tamsayılar olup mutasyon için kullanılacak üç bireyin popülasyondaki yerini temsil eder. Seçilen bireylerden ilk ikisinin ($\mathbf{x}_{r_1}^k$ ve $\mathbf{x}_{r_2}^k$) farkı alınır ve elde edilen fark bireyi, MR ile ölçeklendirilir. Ölçeklendirilen fark bireyi ile rastgele seçilen üçüncü birey $\mathbf{x}_{r_3}^k$ toplanarak \mathbf{v}_i^{k+1} bireyi elde edilmektedir.

Mutasyon sonucu elde edilen \mathbf{v}_i^{k+1} bireyinin $v_{i,j}^{k+1}$ elemanları ile \mathbf{x}_i^k bireyinin $x_{i,j}^k$ elemanları kullanılarak Denklem 23'te verilen şekilde çaprazlama gerçekleştirilir ve yeni deneme bireyi \mathbf{u}_i^{k+1} 'nin elemanları $u_{i,j}^{k+1}$ elde edilir. Yeni deneme bireyine ait her bir eleman CR olasılığı ile mutasyon sonucu oluşan \mathbf{v}_i^{k+1} bireyinden $(1 - CR)$ olasılığı ile mevcut \mathbf{x}_i^k bireyinden seçilir.

$$u_{i,j}^{k+1} = \begin{cases} v_{i,j}^{k+1}, & CR \text{ olasılığı ile} \\ x_{i,j}^k, & (1 - CR) \text{ olasılığı ile} \end{cases} \quad j = 1, 2, 3, \dots, ND \quad (23)$$

Adım 4. Yeni jenerasyona aktarılacak bireyin seçimi:

Popülasyondan sıra ile seçilen her bir mevcut birey \mathbf{x}_i^k ile yeni deneme bireyi \mathbf{u}_i^{k+1} , amaç fonksiyonlarının değerleri bakımından karşılaştırılır. Hangi bireyin amaç fonksiyonu daha uygun değere sahip ise (minimizasyon problemi için daha düşük değere sahip ise), o birey seçilerek bir sonraki jenerasyona aktarılır (Denklem 24).

$$\mathbf{x}_i^{k+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_i^{k+1}, & F(\mathbf{u}_i^{k+1}) < F(\mathbf{x}_i^k) \text{ ise} \\ \mathbf{x}_i^k, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (24)$$

Adım 5: Durma koşulunun kontrolü:

Optimizasyon sürecinin durma koşulu bu adımda kontrol edilmektedir. Eğer durma koşulu sağlanmıyorsa Adım 3 ve Adım 4 ile tanımlanan işlemler tekrar edilmektedir. Bu çalışmada, algoritmanın durdurulması kriteri olarak, popülasyondaki en iyi birey ile en kötü bireye ait amaç fonksiyonu değerleri arasındaki farkın izin verilen bir tolerans değerinden küçük olması seçilmiştir [38]. Tolerans değeri 10^{-4} alınmıştır.

Konsol istinat duvarlarının optimum tasarımı amacıyla kullanılan çözüm algoritması, Visual Basic programlama dili kullanılarak MS Excel ortamında [39] kodlanmıştır.

5 Sayısal uygulamalar

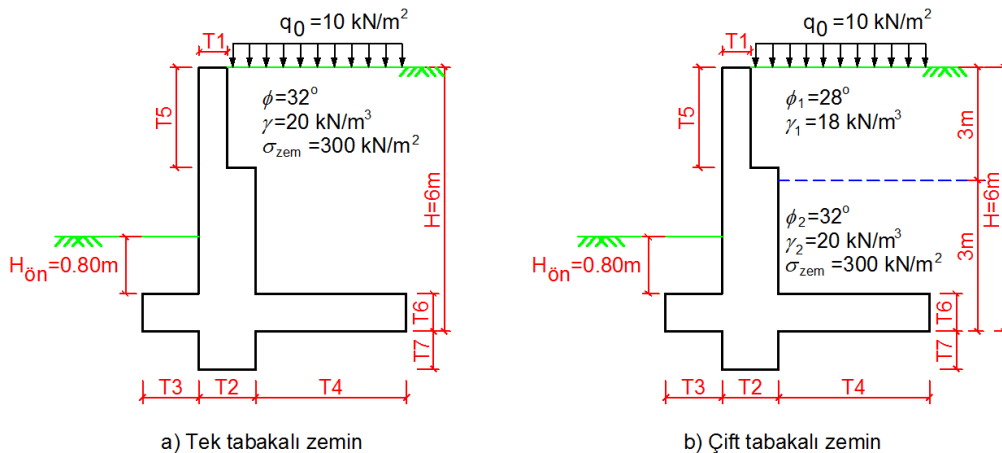
Bölüm 3'te formülasyonu verilen problemin çözümü için DGA tabanlı çözüm algoritması kullanılmıştır. Gürarslan tarafından yapılan doktora çalışmasında [40] önerilen DGA parametreleri: popülasyon sayısı $NP=20$, mutasyon oranı $MR=0.80$ ve çaprazlama oranı $CR=0.80$ kullanılarak ele alınan örnek problemler çözülmüştür. Duvarın kesit boyutları için TS-7994'te öneriler bulunmakla birlikte tasarım için bağlayıcı sınırlar yoktur. Bu sebeple, sürekli değişken olduğu varsayılan karar değişkenlerinin arama uzayı içindeki alt ve üst sınır değerleri Tablo 1'de verildiği gibi kabul edilmiştir.

Tablo 1: Karar değişkenlerine ait sınırlar (m).

Değişken	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Alt Sınır	0.3	0.4	0.5	1.5	1.5	0.3	0.2
Üst Sınır	0.5	1.5	1.5	3H/4	3H/4	1.0	0.8

5.1 Örnek olarak seçilen duvar ve zemin özellikleri

Çözüm modelinin uygulanması amacı ile, arkasında tek ve çift tabakalı zemin (kumlu) olan iki konsol istinat duvarı örnek olarak seçilmiştir (Şekil 5). İstinat duvarları birinci derece deprem bölgesinde ($A_0=0.40$) ve C sınıfı zemin üzerinde bulunmaktadır. Dinamik yüklerin hesabında bina önem katsayısı $I=1.0$ ve deprem yükü azaltma katsayısı $R_{za}=1.50$ alınmıştır. Duvarın arka kısmındaki zemin $H=6.0$ m ve ön kısmındaki zemin $H_{ön}=0.80$ m alınmıştır. Duvarın arkasındaki düzgün yayılı yükün değeri $q_0=10$ kN/m²'dir.



Şekil 5: Optimizasyon probleminin çözümüne ait örnek olarak seçilen istinat duvarları.

Şekil 5a'da görülen tek tabakalı zemin için içsel sürtünme açısı $\phi=32^\circ$, kuru birim hacim ağırlığı $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$ ve zemin emniyet gerilmesi $\sigma_{z,em}=300 \text{ kN/m}^2$ alınmıştır. Şekil 5b'de iki tabakalı zemin verilmiştir. Alt tabakanın özellikleri Şekil 5a'daki zemin ile aynıdır. Üst tabakadaki zeminin içsel sürtünme açısı $\phi=28^\circ$, kuru birim hacim ağırlığı $\gamma_1=18 \text{ kN/m}^3$ kabul edilmiştir. Tabakaların her birinin yüksekliği 3.0 m'dir.

Duvarın tasarımında C20 sınıfı beton ve S420 sınıfı donatı ($K_1=380 \text{ mm}^2/\text{kN}$) seçilmiştir. Duvarın maliyet hesabı için betonun birim hacminin fiyatı $C_b=195.00 \text{ TL/m}^3$ ve donatının birim ağırlığının fiyatı $C_s=2.10 \text{ TL/kg}$ kabul edilmiştir. Betonun birim hacim ağırlığı $\gamma_b=25 \text{ kN/m}^3$ ve donatının birim hacim ağırlığı $\gamma_s=78 \text{ kN/m}^3$ alınmıştır. Minimum donatı oranı $\rho_{\min}=0.002$ ve paspayı 5cm'dir

5.2 Örnekler için optimum tasarım sonuçları

Optimum kesit boyutları ve donatıları, ele alınan tüm kısıtlar sağlanacak şekilde elde edilmiştir. Optimum maliyet tek tabakalı zemin için 1445.63 TL/m, çift tabakalı zemin için 1482.59 TL/m bulunmuştur. Tablo 2'de duvarların optimum çözümüne ait kesit boyutları verilmiştir. Görüldüğü gibi, karar değişkenleri, alt ve üst sınırlar arasında değerler almıştır.

Tablo 2: Örneklerde optimum tasarım için kesit boyutları (m).

Tabaka	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Tek	0.30	0.43	1.50	2.44	3.22	0.39	0.20
Çift	0.30	0.44	1.50	2.59	3.18	0.39	0.20

Ele alınan güvenlik kontrollerinin sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Görüldüğü gibi, çözülen örnekler için TS-7994'te öngörülen güvenlik koşulları sağlanmaktadır.

Tablo 3: TS-7994'te öngörülen güvenlik kontrolleri için elde edilen sonuçlar.

	Sınır Değerler		Sonuçlar	
	Depremli durum		Tek Tabakalı	Çift Tabakalı
GS_{dev}	1.2		2.13	2.16
GS_{kay}	1.0		1.31	1.33
$\sigma_{z,min}$ (kN/m ²)	0		0	0
$\sigma_{z,max}$ (kN/m ²)	300		195	190

Betonarme kesitlerde kesme ve eğilme ile ilgili koşullarının kontrolüne ait sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir. Elde edilen optimum çözümlerin, kesme ve eğilme ile ilgili koşulları da sağladığı anlaşılmaktadır.

Tablo 4: Kesme ve eğilme ile ilgili koşullar için sonuçlar.

Kritik kesit	Tek tabakalı			Çift tabakalı		
	V_d (kN)	V_r (kN)	K (mm ² /kN)	V_d (kN)	V_r (kN)	K (mm ² /kN)
1 - 1	74.8	169.6	627	76.9	169.6	611
2 - 2	182.5	258.7	380	179.8	261.4	380
3 - 3	224.5	227.2	648	221.4	229.0	667
4 - 4	161.2	227.2	479	158.0	229.0	463

Tablo 5'te duvarın alt ve üst kısmı ile topuk ve burun kısmı için bulunan toplam donatı alanları verilmiştir.

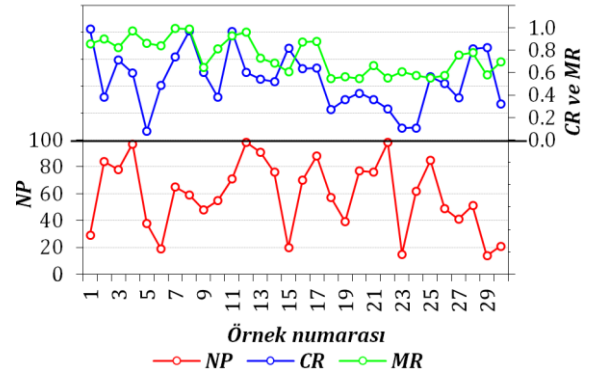
Tablo 5: Optimum tasarımlar için donatı alanları (cm²).

	Tek Tabakalı				Çift Tabakalı			
	Çekme		Basınç		Çekme		Basınç	
	En	Boy	En	Boy	En	Boy	En	Boy
Üst	12.69	8.18	4.50	16.12	13.03	8.30	4.50	15.92
Alt	31.96	15.28	6.47	17.19	32.29	15.68	6.53	17.62
Burun	16.47	4.94	2.50	3.75	16.13	4.84	2.50	3.75
Topuk	22.26	10.87	2.50	6.10	23.23	12.01	2.50	6.46

5.3 Duyarlılık analizi

Optimizasyon problemlerinin çözümü, kullanılan algoritmanın çözüm parametreleri değerine bağlı olarak değişebilmektedir. Sonuçların DGA parametreleri ile ilişkisini değerlendirmek amacı ile bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Duyarlılık analizi için, DGA çözüm parametrelerinin üniform dağılıma göre eşzamanlı olarak değişen değerleri kullanılmıştır [41].

Üniform olarak rastgele üretilecek DGA çözüm parametrelerinin sınır değerleri önceki çalışmalarda şu şekilde önerilmiştir: $10 \leq NP \leq 100$, $0.50 \leq MR \leq 1.00$ ve $0.00 \leq CR \leq 1.00$ [42],[43]. Elçi ve Ayvaz tarafından yapılan çalışmada [44], bu öneriler dikkate alınarak 30 adet örnekten oluşan DGA çözüm parametresi seti üretilmiş ve kullanılmıştır. Şekil 6'da, 30 adet örneğe ait DGA çözüm parametresi değerleri grafik olarak verilmiştir.



Şekil 6: Duyarlılık analizinde ele alınan DGA çözüm parametrelerinin değerleri.

Tablo 6'da ise dikkate alınan DGA çözüm parametrelerinin değerlerine ait istatistiksel bilgiler verilmiştir. Üniform dağılımın önemli özelliklerinden birisi, ortalama ve ortancanın birbirine yakın olmasıdır. Üç parametre için de bu koşulun sağlandığı görülmektedir.

Tablo 6: DGA parametre seti ile ilgili istatistiksel veriler.

	NP	MR	CR
Minimum	14	0.55	0.08
Maksimum	98	1.00	0.99
Ortalama	59.03	0.75	0.53
Ortanca	60.50	0.74	0.53
Standart	26.34	0.15	0.25

Çözüm algoritması, DGA parametre setindeki her bir örnek için ayrı ayrı çalıştırılarak hem tek tabakalı hem de çift tabakalı zemin durumunu temsil eden istinat duvarına ait çözümler elde edilmiştir. Her bir çözüm için farklı rastgele sayı üretme çekirdeği kullanılmıştır. Duyarlılık analizi için yapılan

çözümler ile hesaplanan maliyet değerlerine ait istatistiksel değerler Tablo 7'de görülmektedir.

Tek tabakalı zemin durumu için bulunan 30 amaç fonksiyonu değerinin yani duvar maliyetinin ortalaması 1445.84 TL/m'dir. Elde edilen en düşük maliyet 1445.63 TL/m ve en yüksek maliyet 1451.59 TL/m'dir. Çözümlerden 28'inde en düşük maliyet değeri elde edilebilmiştir. Diğer iki çözüm ise 1451.59 TL/m ve 1445.92 TL/m'dir. 30 çözüme ait varyasyon katsayısı 7.5E-04'tür.

Tek tabakalı zemin durumunda, en iyi sonucun elde edildiği 28 çözümün her biri için, durma kriteri sağlanıncaya kadarki jenerasyon sayısı ve Şekil 6'da verilen NP değerine bağlı olarak optimizasyon sürecindeki analiz sayısı elde edilebilir. 28 çözüme ait analiz sayılarının en düşüğü 11060, en yükseği 87612 ve ortalaması 51670 olarak belirlenmiştir.

Çift tabakalı zemin durumu için elde edilen duvar maliyetlerinin ortalaması 1482.65 TL/m iken en düşük maliyet 1482.59 TL/m ve en yüksek maliyet 1483.56 TL/m bulunmuştur. Çözümlerden 27'sinde en düşük maliyet değeri elde edilebilmiştir. Diğer üç çözüm ise 1483.56 TL/m, 1482.96 TL/m ve 1482.84 TL/m'dir. Çözümlere ait varyasyon katsayısı 1.3E-04'tür.

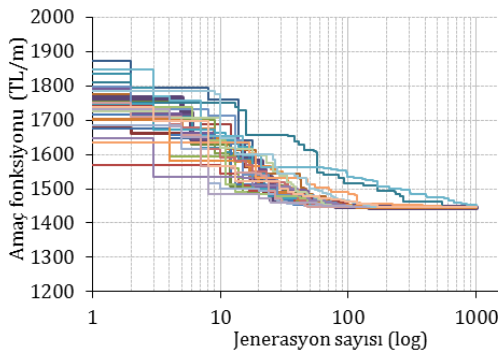
Çift tabakalı zemin durumunda, en iyi sonucun elde edildiği 27 çözümün her biri için de, optimizasyon sürecindeki analiz sayıları belirlenmiştir. 27 çözüme ait analiz sayılarının en düşüğü 10388, en yükseği 87220 ve ortalaması 51920 olarak belirlenmiştir.

Her iki örnekte de tüm çözümler, tüm kısıtlar sağlanacak şekilde elde edilmiştir. Varyasyon katsayısının da çok düşük olduğu gözönüne alındığında, DGA çözüm parametrelerinin farklı değerleri için elde edilen optimum maliyetlerin oldukça düşük bir saçılıma sahip olduğu söylenebilir.

Tablo 7: Duyarlılık analizi için elde edilen duvar maliyetlerine ait istatistiksel veriler.

	Tek Tabakalı	Çift Tabakalı
Minimum (TL/m)	1445.63	1482.59
Maksimum (TL/m)	1451.59	1483.56
Ortalama (TL/m)	1445.84	1482.65
Standart sapma (TL/m)	1.09	0.19
Varyasyon katsayısı	7.5E-04	1.3E-04

Şekil 7'de, tek tabakalı zemin durumu için yapılan 30 adet çözümün yakınsama grafikleri örnek olarak verilmiştir. Görüldüğü gibi, farklı başlangıç değerleri ile optimizasyon süreci başlasa da, her bir çözümün aynı optimum değere yaklaştığı söylenebilir.



Şekil 7: Tek tabakalı zemin durumu için yapılan 30 adet çözüme ait yakınsama grafikleri.

5.4 Deprem etkisinin ve içsel sürtünme açısının en düşük maliyete etkisi

Bu çalışmada, gözönüne alınacak deprem düzeyinin ve tasarımda önemli bir parametre olan zemin içsel sürtünme açısının (ϕ) optimum tasarım maliyetine etkisi de değerlendirilmiştir.

Bu amaçla, istinat duvarının dört farklı deprem bölgesinde olduğu kabul edilmiştir (1., 2., 3., ve 4. derece). Her bir deprem bölgesi için zemin içsel sürtünme açısının farklı değerleri kullanılarak (28°, 30°, 32° ve 34°) ayrı ayrı optimum tasarım maliyetleri belirlenmiştir. Çözümler duvar arkasında tek tabakalı ve çift tabakalı zemin durumu için ayrı ayrı elde edilmiştir. Çift tabakalı zemin durumu için içsel sürtünme açısının farklı değerleri altta bulunan tabaka için ele alınmıştır (Şekil 5b).

Tablo 8'de, statik durum ile beraber dört farklı deprem bölgesini temsil eden etkin yer ivmesi katsayısı (A_0) değerleri için elde edilen optimum tasarım maliyetleri verilmiştir. Statik durum $A_0=0.0$ olarak ifade edilmiştir. Tablo 8'de ayrıca, statik duruma göre maksimum A_0 değeri için elde edilen maliyetteki fark da belirtilmiştir. Tek tabakalı zemin durumu için, deprem etkisi dikkate alınmadığında 1241.50 TL/m olan optimum maliyet, etkin yer ivmesi değerinin artması ile artmakta ve $A_0=0.4$ için 1445.63 TL/m değerine ulaşmaktadır. Yani statik duruma göre %16.4'lük bir maliyet artışı meydana gelmektedir. Çift tabakalı zemin durumu için de benzer bir durum gözlenmiştir. Optimum maliyet statik durum için 1271.97 TL/m iken $A_0=0.40$ için 1482.59 TL/m olmuştur. Aradaki fark statik durum maliyetinin %16.6'sıdır.

Tablo 8: Gözönüne alınan deprem etkisinin optimum tasarım maliyetine etkisi (TL/m).

A_0	Tek Tabakalı	Çift Tabakalı
0.0	1241.50	1271.97
0.1	1287.85	1320.07
0.2	1328.85	1362.72
0.3	1373.46	1407.43
0.4	1445.63	1482.59
Fark (%)	16.4	16.6

Tablo 9'da, etkin yer ivmesi katsayısı ve zemin içsel sürtünme açısındaki değişimin optimum maliyet üzerindeki etkisi birlikte verilmiştir. Tablo 9'da verilen sonuçlar, duvar arkasında tek tabakalı zemin durumu içindir. Görüldüğü gibi, etkin yer ivmesindeki artış ya da içsel sürtünme açısındaki azalma duvarın optimum maliyetinin artmasına sebep olmaktadır. Örneğin $\phi=34^\circ$ olduğunda, statik durumu temsil eden $A_0=0.0$ için 1187.72 TL/m olan optimum maliyet $A_0=0.4$ için 1389.77 TL/m olmaktadır. Buna göre, son sütunda belirtildiği gibi, statik duruma göre maliyet farkı %17.0 olarak hesaplanmaktadır. Deprem etkisinin maliyet üzerindeki artış etkisi, içsel sürtünme açısı azaldıkça azalmaktadır. Örneğin $\phi=28^\circ$ olduğunda statik duruma göre $A_0=0.4$ için maliyet farkı %10.9'dur. Tablo 9'da deprem etkisi sabit tutulduğunda, içsel sürtünme açısının değişiminin maliyet üzerinde etkisi de görülmektedir. Örneğin $A_0=0.1$ iken $\phi=34^\circ$ için 1232.43 TL/m olan maliyet $\phi=28^\circ$ olduğunda 1406.22 TL/m olarak hesaplanmaktadır. Bu durumda, bu iki tasarım arasındaki maliyet farkı %14.1'dir. Tablo 9'un son satırında görüldüğü gibi, içsel sürtünme açısının maliyet üzerindeki etkisi A_0 değeri arttıkça azalmaktadır. Tablo 9'daki en küçük maliyet ($A_0=0.0$ ve $\phi=34^\circ$ için) ile en büyük maliyet ($A_0=0.4$ ve $\phi=28^\circ$ için) farkı ise %31.9'dur.

Tablo 9: Tek tabakalı zemin durumu için A_0 ve ϕ değerinin optimum tasarım maliyetine etkisi (TL/m).

ϕ	A_0					Fark (%)
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	
34	1187.72	1232.43	1271.89	1316.37	1389.77	17.0
32	1241.50	1287.85	1328.85	1373.46	1445.63	16.4
30	1311.51	1345.70	1388.29	1434.00	1504.49	14.7
28	1412.97	1406.22	1450.58	1498.19	1566.51	10.9
Fark (%)	19.0	14.1	14.0	13.8	12.7	

Tablo 10'da, A_0 ve ϕ değerlerinin optimum maliyet üzerindeki etkisi, çift tabakalı zemin durumunu temsil eden örnek için verilmiştir. Bu örnek için de, A_0 değerindeki artış ya da ϕ değerindeki azalma optimum maliyetin artmasına sebep olmaktadır. Tablo 9'da özetlenen sonuçlar ile benzer şekilde, ϕ değerindeki değişimin optimum maliyet farkı üzerindeki etkisi A_0 değeri arttıkça azalmakta, A_0 değerindeki değişimin maliyet farkı üzerindeki etkisi ϕ değeri arttıkça azalmaktadır.

Özet olarak, bu çalışma kapsamında ele alınan örnekler için elde edilen ve Tablo 9 ve Tablo 10'da özetlenen sonuçlar, hem gözönüne alınan deprem etkisinin hem de içsel sürtünme açısının, istinat duvarının optimum maliyetini dikkate değer biçimde değiştirdiği söylenebilir.

Tablo 10: Çift tabakalı zemin durumu için A_0 ve ϕ değerinin optimum tasarım maliyetine etkisi (TL/m).

ϕ	A_0					Fark (%)
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	
34	1252.78	1300.39	1342.59	1386.50	1463.34	16.8
32	1271.97	1320.07	1362.72	1407.43	1482.59	16.6
30	1303.23	1340.77	1383.91	1429.59	1502.92	15.3
28	1362.36	1362.56	1406.21	1453.03	1524.39	11.9
Fark (%)	8.70	4.80	4.70	4.80	4.20	

6 Sonuçlar

Bu çalışmada, Türkiye'de yapılacak betonarme istinat duvarlarının optimum tasarımı amacıyla kullanılacak DGA algoritmasına dayanan bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Yöntemin uygulanması için, tek tabakalı ve çift tabakalı zemin bulunan örneklerin tasarımı, yürürlükteki TS-7994, TS-500 ve DBYBHY dikkate alınarak yapılmıştır. Analizlerde, statik etkilerin yanı sıra depremden kaynaklanacak dinamik etkiler de dikkate alınmıştır. Duvarların optimum tasarım maliyeti üzerinde, deprem düzeyinin ve zemin içsel sürtünme açısının etkisi de değerlendirilmiştir. Ele alınan örnekler için duvar yüksekliği, zemin özellikleri ve dış yükler vb. başlangıç verileri dikkate alınarak, tüm kriterler sağlanacak biçimde, kesit boyutlarının ve donatısının belirlenebildiği görülmüştür.

İstinat duvarının maliyetinin belirlenmesinde beton ve donatının miktarı ve birim fiyatları dikkate alınmıştır. Kesit boyutları ve betonarme donatı alanları, problemin çözümünde sürekli değişken olarak kabul edilmiştir. Eğer istenirse, işçilik, kalıp vb. faktörlerin de maliyet hesabında dikkate alınabilmesi, malzemenin ve malzeme birim fiyatlarının farklı seçilmesi ve/veya kesit boyutlarının ve donatı alanlarının kesikli değişken olarak kabul edilmesi mümkündür.

DGA çözüm parametrelerinin, optimum tasarım üzerindeki etkisini değerlendir için duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu amaçla, uniform dağılıma sahip, eş zamanlı olarak değişen ve 30 örnekten oluşan çözüm parametresi seti kullanılmıştır.

Çözümlerin tümünde, dikkate alınan tüm kısıtlar sağlanmıştır. Tek tabakalı zemin durumu için analizlerin 28'inde, çift tabakalı zemin için ise analizlerin 27'sinde optimum çözüm elde edilirken diğer çözümler ise optimuma çok yakın olarak elde edilmiştir. Çözüm sonuçlarına ait varyasyon katsayısının çok düşük olduğu da dikkate alındığında, DGA çözüm parametrelerinin değerinden bağımsız olarak optimum çözümün elde edilebileceğini söylemek mümkündür.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre, deprem düzeyini ifade eden etkin yer ivmesi katsayısı ve zemin içsel sürtünme açısındaki değişimin, istinat duvarlarının optimum maliyetini dikkate değer şekilde değiştirdiği söylenebilir.

Sonuçlar, değişik mühendislik optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan DGA'nın, betonarme istinat duvarlarının optimum tasarımı amacıyla etkin olarak kullanılabilirliğini göstermiştir. Bu yöntem ile farklı zemin ve yük etkilerine maruz konsol istinat duvarlarının, öngörülen kısıtlar sağlanacak şekilde tasarlanması mümkün olacaktır.

Bilindiği gibi optimizasyon algoritmaları olası çözümler içindeki en uygun çözümü bulmak amacıyla geliştirilmişlerdir. Ancak bulunan çözümün, en uygun, en düşük maliyetli çözüm olduğunu söyleyebilmek için farklı algoritmalar kullanarak bir sağlama yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, sadece DGA algoritması kullanılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu sebeple, bu çalışmada ele alınan örnekler için bulunan çözümlerin en düşük maliyetli çözümler olmayabileceği dikkate alınmalıdır. Sonuç olarak, farklı çözüm algoritmaları da kullanılarak benzer çalışmalar yapılarak, bulunan sonuçların karşılaştırılması faydalı olacaktır.

7 Kaynaklar

- [1] Türk Standartları Enstitüsü. "Zemin Dayanma Yapıları: Sınıflandırma, Özellikleri ve Projelendirme Esasları". Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 7994, 1990.
- [2] Öztürk T, Öztürk Z. "Deprem bölgelerinde yapılacak prefabrik betonarme istinat duvarlarının tasarımı". *Kocaeli Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Mart 2005.
- [3] Özden K, Trupia AL, Eren İ, Öztürk T. *Betonarme İstinat Duvarları ve Perdeleri*. İstanbul, Türkiye, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, 1995.
- [4] Keskar AV, Adidam SR. "Minimum cost design of a cantilever retaining wall". *Indian Concrete Journal*, 63(8), 401-405, 1989.
- [5] Saribas A, Erbatur F. "Optimization and sensitivity of retaining structures". *Journal Geotech Engineering*, 122(8), 649-656, 1996.
- [6] Basudhar PK, Vashistha A, Deb K, Dey A. "Cost optimization of reinforced earth walls". *Geotechnical and Geological Engineering*, 26(1), 1-12, 2008.
- [7] Babu GLS, Basha BM. "Optimal design of cantilever retaining walls using target reliability approach". *International Journal of Geomechanics*, 8(4), 240-252, 2008.
- [8] Das SK, Das MR. "Optimum design of RCC cantilever retaining wall using a simple optimization tool". *Indian Roads Congr*, 3(2), 47-58, 2011.
- [9] Goldberg DE. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. 1st ed. Boston, MA, USA, Addison Wesley, 1989.
- [10] Geem ZW, Kim JH, Loganathan GV. "A new heuristic optimization algorithm: harmony search". *Simulation*, 76(2), 60-68, 2001.

- [11] Kennedy J, Eberhart R. "Particle swarm optimization". *IEEE International Conference on Neural Networks*, Piscataway, NJ, 27 November-1 December 1995.
- [12] Karaboğa D, Basturk B. "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC)". *Journal of Global Optimization*, 39, 459-471, 2007.
- [13] Storn R, Price K. "Differential Evolution—A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces". *Journal of Global Optimization*, 11(4), 341-359, 1997.
- [14] Karaboğa D. *Yapay Zekâ Optimizasyonu Algoritmaları*. 1. Baskı, İstanbul, Türkiye, Atlas, 2004.
- [15] Khajehzadeh M, Taha MR, El-Shafie A, Eslami M. "Modified particle swarm optimization for optimum design of spread footing and retaining wall". *Journal Zhejiang Univ-Sci A (Appl Phys Eng)*, 12(6), 415-427, 2011.
- [16] Khajehzadeh M, Eslami M. "Gravitational search algorithm for optimization of retaining structures". *Indian Journal of Science and Technology*, 5(1), 1821-1827, 2012.
- [17] Ceranic B, Fryer C, Baines RW. "An application of simulate annealing to the optimum design of reinforced concrete retaining structures". *Comput Struct*, 79(17), 1569-1581, 2001.
- [18] Kaveh A, Abadi ASM. "Harmony search based algorithm for the optimum cost design of reinforced concrete cantilever retaining walls". *International Journal of Civil Engineering*, 9(1), 1-8, 2010.
- [19] Sheikholeslami R, Gholipour Khalili B, Zahrai SM. "Optimum cost design of reinforced concrete retaining walls using hybrid firefly algorithm". *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, 6(6), 465-470, 2014.
- [20] Camp CV, Akin C. "Design of retaining walls using big bang-big crunch optimization optimum design of cantilever retaining walls". *Journal Struct Eng*, 138, 438-448, 2012.
- [21] Kaveh A, Kalateh-Ahani M, Fahimi-Farzam M. "Constructability optimal design of reinforced concrete retaining walls using a multi-objective genetic algorithm". *Structural Engineering and Mechanics*, 47(2), 227-245, 2013.
- [22] Yepes V, Alcalá J, Perea C, Gonzalez-Vidosa F. "A parametric study of optimum earth-retaining walls by simulated annealing". *Engineering Structures*, 30(3), 821-830, 2008.
- [23] Talatahari S, Sheikholeslami R. "Optimum design of gravity and reinforced retaining walls using enhanced charged system search algorithm". *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 18(5), 1464-1469, 2014.
- [24] Temur R, Bekdas G. "Teaching learning-based optimization for design of cantilever retaining walls". *Structural Engineering and Mechanics*, 57(4), 763-783, 2016.
- [25] Nandha Kumar V, Suribabu CR. "Optimal design of cantilever retaining wall using differential evolution algorithm". *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, 7(3), 433-449, 2017.
- [26] 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.
- [27] Kaveh A, Soleimani N. "CBO and DPSO for optimum design of reinforced concrete cantilever retaining walls". *Asian J Civil Eng*, 16(6), 751-774, 2015.
- [28] Kayabekir AE, Bekdaş G, Niğdeli SM, Temür R. "Statik ve dinamik yükler altında istinat duvarlarının optimum tasarımı". *Engineering Sciences (NWSAENS)*, 12(1), 46-56, 2017.
- [29] Bayındırlık ve İskân Bakanlığı. "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik". Ankara, Türkiye, 2007.
- [30] Türk Standartları Enstitüsü. "Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları". Ankara, Türkiye, 2000.
- [31] Özden K, Öztürk T. "Bazı Özel Durumlarda Yalnız Depremden Oluşan Basınç ve İtkiler". 3. *Ulusal Deprem Mühendisliği Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 27-31 Mart 1995.
- [32] Kumbasar V, Kip F. *Zemin Mekaniği Problemleri*. Altıncı baskı. İstanbul, Türkiye, Çağlayan, 1999.
- [33] Ersoy U, Özcebe G. *Betonarme*. Birinci baskı, İstanbul, Türkiye, Evrim 2001.
- [34] Coello CAC. "Theoretical and numerical constraint handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191, 1245-1287, 2002.
- [35] Das S, Suganthan NP. "Differential Evolution: a survey of the state-of-the-art". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 15(1), 4-31, 2011.
- [36] Price KV. *An Introduction to Differential Evolution*. Editors: Corne D, M. Dorigo M, Glover F. New Ideas in Optimization, 79-108, London, UK, McGraw-Hill, 1999.
- [37] Reddy MJ, Kumar DN. "Multiobjective differential evolution with application to reservoir system optimization". *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2, 136-146, 2007.
- [38] Ali MM, Torn A. "Population set-based global optimization algorithms: some modifications and numerical studies". *Computer & Operations Research*, 31, 1703-1725, 2004.
- [39] Microsoft, *Microsoft Excel-Visual Basic for Applications*. Washington, USA, Microsoft Press, 1995.
- [40] Gürarlan G. Yeraltısuyu Kirletici Kaynak Yerlerinin ve Boşalmı Geçmişlerinin Diferansiyel Gelişim Algoritması Kullanılarak Belirlenmesi. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, 2011.
- [41] Saltelli A, Annoni P. "How to avoid a perfunctory sensitivity analysis". *Environmental Modeling and Software*, 25(12), 1508-1517, 2010.
- [42] Storn R, Price K. "Differential Evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces". *Journal of Global Optim*, 11(4), 341-359, 1997.
- [43] Tvrdik J. "Differential Evolution: Competitive Setting of Control Parameters". *International Multiconference on Computer Science and Information Technology*, Wista, Poland, 6-10 October 2006.
- [44] 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.