

## Betonarme konsol istinat duvarlarının parçacık sürü optimizasyonu ile optimum tasarımı

### Optimum design of reinforced concrete cantilever retaining walls with particle swarm optimization

Ali Haydar KAYHAN<sup>1\*</sup>, Ahmet DEMİR<sup>1</sup>

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

Geliş Tarihi/Received: 18.09.2014, Kabul Tarihi/Accepted: 20.01.2015  
\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2015.22590  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Bu çalışmada, betonarme konsol istinat duvarlarının optimum tasarımı için Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) tabanlı bir algoritma kullanılmıştır. Tasarımda düşey yüklerle beraber statik yatay zemin itkileri de dikkate alınmıştır. TS-500'de yer alan betonarme tasarımı ile ilgili koşullar ve TS-7994'te yer alan kayma, devrilme ve taşıma gücü kontrolleri ile ilgili koşullar, optimizasyon probleminin kısıtları olarak ele alınmıştır. Tasarım sonuçlarının PSO çözüm parametrelerine duyarlılığını araştırmak amacıyla bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar PSO tabanlı çözüm algoritmasının, betonarme konsol istinat duvarlarının dikkate alınan kısıtlar sağlanacak şekilde optimum tasarımında etkili bir araç olarak kullanılabilirliğini göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Konsol istinat duvarı, Parçacık sürü optimizasyonu, Optimum tasarım

#### Abstract

In this study, a Particle Swarm Optimization (PSO) based algorithm is used for optimum design of reinforced concrete cantilever retaining walls. Besides vertical loads, both active and static lateral ground pressures are considered for design. Reinforced concrete design rules defined in TS-500 and checking procedures about sliding, overturning and bearing capacity failures defined in TS-7994 are taken into account as constraints of the optimization problem. In order to evaluate the relationship between optimum design results and values of PSO solution parameters, a sensitivity analysis is performed. Results show that, PSO based solution algorithm may be used as an efficient tool for optimum design of reinforced concrete cantilever retaining walls by satisfying all considered constraints.

**Keywords:** Cantilever retaining wall, Particle swarm optimization, Optimum design

## 1 Giriş

İstinat duvarları, farklı düzeydeki iki zeminin dik geçişini sağlayan ve zeminden dolayı oluşan yanıl toprak basıncını istenilen bir güvenlikle karşılayan, zeminin içsel sürtünme açısından daha büyük bir eğimle geçişi sağlayarak dengede tutan yapı elemanlarıdır [1]. Eğimli arazilerde araziden yararlanmak üzere zemini doğal şev açısından daha dik açı ile tutmak için, büyük dolgu ve yarma gerektiren yollarda, köprü ayaklarında, kıyıların erozyondan korunmasında, bina güvenliğinin sağlanmasında, rıhtım yapılarında ve malzeme depolamada kullanılmaktadır [2],[3].

İstinat duvarları yaygın olarak kullanılan mühendislik yapılarındandır. Bu yapılar da meydana gelecek olası hasarların ciddi kayıplara yol açması muhtemeldir. Bu nedenle, istinat duvarlarının öngörülen güvenlik koşulları sağlanacak şekilde tasarımı önemlidir. Öte yandan bir mühendislik yapısı olarak ekonomik olarak tasarlanması da gerekmektedir. İstinat duvarlarının minimum maliyetle ve ele alınan tüm koşullar sağlanacak şekilde tasarımı problemi, kısıtlı optimizasyon problemi olarak formüle edilip çözülebilmektedir. Bu çalışmalardan bazılarında geleneksel optimizasyon tekniklerine dayalı yöntemler kullanılmıştır: Dembicki ve Chi [4], Keskar ve Adidam [5], Basudhar ve Lakshman [6], Sarıbaş ve Erbatur [7].

Geleneksel optimizasyon teknikleri, türev bilgilerine ihtiyaç duyulması ve çözümün başlangıç değerine bağlı olması gibi sebeplerle karmaşık mühendislik optimizasyon problemlerinin çözümünde çoğu zaman etkili olamamaktadır. Bu sebeple, mühendislik optimizasyon problemlerinin çözümünde, sezgisel

optimizasyon algoritmaları yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Genetik algoritmalar [8], yapay arı kolonisi [9], armoni araştırması [10], diferansiyel gelişim algoritması [11] ve tavlama benzetimi [12] mühendislik optimizasyon problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan sezgisel tekniklerdendir. Genetik algoritma [13], tavlama benzetimi [14],[15], armoni araştırması [16], büyük patlama-sıkışma [17], ısın optimizasyonu [18] gibi sezgisel teknikler, betonarme konsol istinat duvarlarının optimum tasarımında da kullanılmıştır.

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Eberhart ve Kennedy tarafından geliştirilmiş olup, sezgisel algoritmaların çoğunda olduğu gibi, popülasyon tabanlı bir algoritmadır [19]. Kuş ve balık sürülerinin yiyecek arama ve/veya tehlikeden kaçma esnasında sergiledikleri sürü davranışından esinlenerek geliştirilmiştir. PSO'da, problemin çözümü için karar değişkenlerinin özel bir başlangıç değeri almasına ihtiyaç yoktur. PSO popülasyon tabanlı olduğundan, birden çok yönde global çözüm araması yapılabilmektedir. Yöntem, günümüze kadar farklı bir çok mühendislik optimizasyon probleminin çözümü için kullanılmıştır [20]-[24]. Betonarme konsol istinat duvarlarının optimum tasarımında PSO tabanlı yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar da literatürde bulunmaktadır [25]-[27].

Bu çalışmada, Türkiye'de yapılacak betonarme konsol istinat duvarlarının optimum tasarımı için PSO tabanlı bir çözüm algoritması kullanılmıştır. İstinat duvarların tasarımında düşey yükler ile beraber statik yatay zemin itkileri de göz önüne alınmış, depremden kaynaklanacak dinamik itkiler ise kapsam dışı bırakılmıştır. TS-500'de [28] yer alan betonarme tasarımı ile ilgili koşullar ve TS-7994'te [1] yer alan kayma, devrilme ve

zemin taşıma gücü ile ilgili güvenlik koşulları, optimizasyon probleminin kısıtları olarak dikkate alınmıştır. Örnek olarak seçilen, arkasında tek tabakalı ve kumlu zemin bulunan istinat duvarı, farklı zemin özellikleri ve dış yükler dikkate alınarak optimum şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, PSO çözüm parametrelerinin değerlerinin yöntemin çözüm performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacı ile bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, PSO tabanlı çözüm algoritmasının, Türkiye’de inşa edilecek betonarme konsol istinat duvarlarının optimum tasarımında etkin bir araç olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

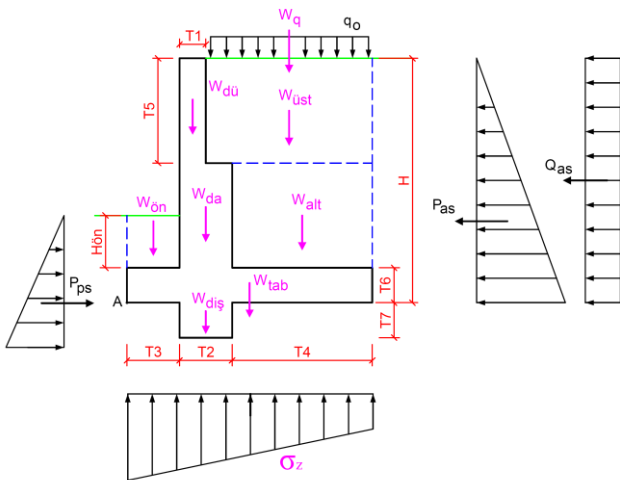
## 2 Betonarme konsol istinat duvarları

### 2.1 Genel bilgiler ve dikkate alınan yükler

Betonarme konsol istinat duvarları, betonun basınç donatısının ise çekme dayanımlarının yüksekliğinden yararlanarak 20 m’ye varan yüksekliklerde yapılabilir. Ancak ekonomik yükseklik 7.5 m civarındadır. Temel plağı ve bu temele ankastre olarak bağlanan konsol duvar gövdesinden oluşmaktadır. Konsol istinat duvarlarında temelin arka kısmının (topuk) üzerindeki zeminin ağırlığı devrilme ve kaymaya karşı büyük yarar sağlamaktadır. Gerekli durumlarda kayma güvenliğini arttırmak için temele dış yapılarak duvarın kaymaya karşı direncinin artırılması sağlanmaktadır [3],[29].

TS-7994’te, zemin, çevre şartları ve mimari dikkate alınarak seçilen duvar tipi ve yüksekliği belirlendikten sonra gelen yüklerle bağlı olarak güvenlik kontrollerinin yapılması öngörülmektedir. Güvenlik koşullarının gerektirdiği duvar boyutları ile beraber donatıların da belirlenmesi ile duvar tasarımı tamamlanmaktadır. Bu çalışmada, TS-7994’te öngörülen güvenlik koşullarından kayma, devrilme ve zemin taşıma gücü dikkate alınmış, toptan göçme ve oturma ile ilgili güvenlik koşulları kapsam dışı bırakılmıştır.

Çalışmada dikkate alınan betonarme konsol istinat duvarının kesiti, hesaplarda kullanılacak yükler ve temel altında oluşacak tipik zemin gerilmesi dağılımı Şekil 1’de verilmiştir. Duvarın arkasında  $H$  ve önünde  $H_{\delta n}$  yüksekliğinde zemin, arka kısımdaki zemin üzerinde ise  $q_0$  ile gösterilen dış yük bulunmaktadır. Duvarın kesit boyutları  $T_1 - T_7$  ile gösterilmiştir ve bu boyutlar tasarım probleminin karar değişkenleridir. Temelin ön kısmı burun, arka kısmı ise topuk olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 1: İstinat duvarının kesiti ve dikkate alınan yükler.

Konsol istinat duvarlarının tasarımında ele alınan düşey yükler: dış yükler, duvar ağırlığı ve duvarın ön ve arka kısmındaki zemin ağırlığıdır. Yatay yükler ise: duvarın ön ve arka kısmındaki zeminden kaynaklanan aktif ve pasif statik yüklerdir. Toplam dış yük  $W_a$ , duvar gövdesinin üst ve alt kısmının ağırlıkları  $W_{dü}$  ve  $W_{da}$ , zemin kütlesinden kaynaklanan aktif statik yük  $P_{as}$  ve dış yüklerden kaynaklanan aktif statik yük  $Q_{as}$  ile gösterilmiştir. Duvarın ön kısmında, zeminden kaynaklanan pasif statik yük  $P_{ps}$  bulunmaktadır. Yatay yükler, yükseklik boyunca dağılımı Şekil 1’de verilen basınçların ilgili yükseklik boyunca entegre edilmesi ile bulunmaktadır.

Deprem Yönetmeliği’ne göre [30], dinamik etkiler ihmal edilerek sadece statik etkiler dikkate alınmak istenirse, emniyetli yönde kalmak adına kohezyon ihmal edilerek aktif statik toprak basıncı  $K_{as}$  ve pasif toprak basıncı katsayısı  $K_{ps}$  sırası ile Denklem (1) ve Denklem (2) ile hesaplanmaktadır. Denklemlerde,  $\phi$  zeminin içsel sürtünme açısı,  $\alpha$  duvar ile zemin arakesitinin düşeyle yaptığı açı,  $\delta$  zeminle duvar arasındaki sürtünme açısı,  $i$  ise aktif veya pasif basınç tarafındaki zemin yüzeyinin yatayla yaptığı açıdır.

$$K_{as} = \frac{\frac{\cos^2(\phi - \alpha)}{\cos^2\alpha \cos(\delta + \alpha)}}{1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta)\sin(\phi - i)}{\cos(\delta + \alpha)\cos(i - \alpha)}}} \quad (1)$$

$$K_{ps} = \frac{\frac{\cos^2(\phi + \alpha)}{\cos^2\alpha \cos(\delta - \alpha)}}{1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta)\sin(\phi + i)}{\cos(\delta - \alpha)\cos(i - \alpha)}}} \quad (2)$$

Gerekli güvenlik kontrollerinin yapılması ve betonarme donatılarının belirlenmesi için Şekil 1’de belirtilen yükler dikkate alınmıştır. Betonarme kesit tasarımı için 1.4G+1.6Q kombinasyonu kullanılmıştır. Beton gövdesinden oluşan yükler sabit yük olarak, zeminden kaynaklanan yükler ve dış yük ise hareketli yük olarak alınmıştır.

### 2.2 Güvenlik kontrolleri ve betonarme hesabı

TS-7994’te öngörülen ve bu çalışmada ele alınan kayma, devrilme ve taşıma gücü güvenlik kontrollerinin yapılması için aşağıda belirtilen kabuller yapılmıştır.

Duvarın burun kısmında bulunan  $H_{\delta n}$  yüksekliğindeki zeminin çeşitli sebeplerden dolayı azalma ihtimali vardır. Bu durum, hesaplarda güvenli yönde kalmak için şu şekilde dikkate alınmıştır. Kayma güvenliği kontrolünde, burun kısmındaki zemin ağırlığı ( $W_{\delta n}$ ) ihmal edilmiş ve pasif statik toprak itkisinin ( $P_{as}$ ) sadece dış yüksekliğine denk gelen kısmı kullanılmıştır. Devrilme güvenliği kontrolünde,  $W_{\delta n}$  ve  $P_{as}$  ihmal edilmiştir. Taşıma gücü kontrolünde  $P_{as}$ ’nin etkisi ihmal edilmiştir.

Kayma güvenliği kontrolünde, duvarı itmeye çalışan kuvvetlerin ( $P_{as}$  ve  $Q_{as}$ ) toplamı ile bu etkiye karşı gelen kuvvetlerin (düşey yüklerin toplamının temel tabanında oluşturduğu sürtünme kuvveti,  $P_{as}$  daha önce belirtildiği gibi ihmal edilmiştir) toplamı karşılaştırılır. Eğer itmeye karşı gelen kuvvetlerin, itmeye çalışan kuvvetlere oranı 1.50’den büyük ise, kumlu zeminler için kayma güvenliği koşulu sağlanıyor demektir (Denklem (3)).

$$\sum F_{karşı} / \sum F_{itici} \geq 1.50 \quad (3)$$

Devrilme güvenliğinin sağlanabilmesi için, duvarın devrilmesine karşı koyan kuvvetlerin (burun kısmındaki zeminin ağırlığı hariç tüm düşey yükler) Şekil 1'de görülen A noktasına göre toplam momentinin, duvarı devirmeye çalışan kuvvetlerin ( $P_{as}$  ve  $Q_{as}$ ) aynı noktaya göre toplam momentine oranının 1.50'den büyük olması gerekmektedir (Denklem (4)).

$$\sum M_{karşı} / \sum M_{devirici} \geq 1.50 \quad (4)$$

Zemin taşıma gücü ile ilgili koşul, dikkate alınan yüklerden dolayı temel altında oluşacak zemin gerilmesi dağılımı için, en büyük zemin gerilmesinin zemin emniyet gerilmesinden küçük olması ve temel altında herhangi bir noktada negatif zemin gerilmesi oluşmamasıdır (Denklem (5)).

$$0 \leq \sigma_z \leq \sigma_{zem} \quad (5)$$

İstinat duvarının optimum tasarım süreci, duvar kesit boyutlarının yanında, betonarme donatısının da belirlenmesini gerektirmektedir. Dolayısıyla güvenlik kontrolleri ile beraber betonarme donatı hesabı ile ilgili koşullar da optimizasyon sürecinde aynı anda ele alınmalıdır.

Duvarın gövde ve temel kısımlarının donatı hesabı, TS-500'de öngörülen koşullar dikkate alınarak tek donatılı dikdörtgen kesitlerdeki gibi yapılmaktadır. Gövde ve temel kısmında, Şekil 2'de 1-1, 2-2, 3-3 ve 4-4 ile gösterilen kritik kesitlerde kesme kuvveti  $V_d$  ve eğilme momenti  $M_d$  değerleri hesaplanıp, hem gerekli kontroller için hem de donatı hesabı için kullanılmaktadır. TS-500'e göre, kritik kesitlerde, eğilme ile ilgili olarak Denklem (6) ve kesme ile ilgili olarak Denklem (7) ile verilen koşulların sağlanması gerekmektedir. Eğilme donatısı hesabı için ise Denklem (8) kullanılabilir.

$$K = \frac{bd^2}{M_d} \geq K_l \quad (6)$$

$$V_{cr} = 0.65f_{ctd}bd \geq V_d \quad (7)$$

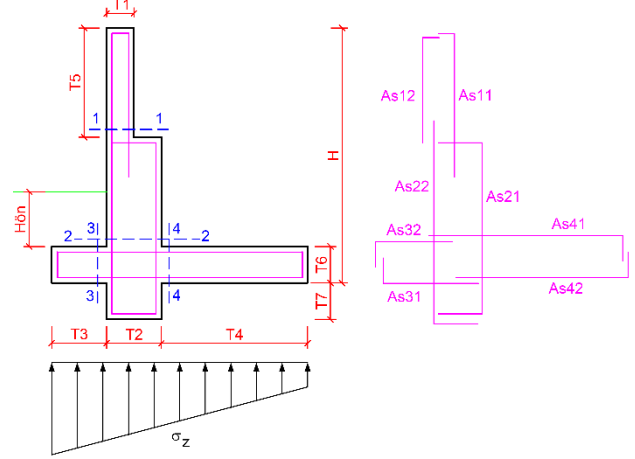
$$A_s = \frac{M_d}{0.86f_yd} \quad (8)$$

Denklemlerde ele alınan betonarme kesitin genişliği ve faydalı yüksekliği sırasıyla  $b$  ve  $d$  ile temsil edilirken,  $K_l$  eğilme etkisindeki betonarme elemanlarda sehim kontrolü gerektirmeyen sınırı ifade etmektedir.  $f_{ctd}$  betonun eğik çekme dayanımını,  $f_yd$  donatının hesap akma dayanımını ve  $V_{cr}$  betonun kesmede çatlama dayanımını belirtmektedir.

Şekil 2'de duvar kesit boyutları verilmiştir.  $T_1$  ve  $T_2$  duvarın üst ve alt kısımlarının kalınlığını,  $T_3$  ve  $T_4$  temelin burun ve topuk kısmının uzunluklarını ifade etmektedir. Dış yüksekliği  $T_7$ , temel kalınlığı  $T_6$  ile belirtilmiştir.  $T_5$  ise gövdenin üst kısmının yüksekliğidir.

Kritik kesitlerde çekme bölgesinde momente bağlı olarak hesaplanacak donatı alanları ile basınç bölgesinde teşkil edilecek donatılar da Şekil 2'de verilmiştir. Gövdenin basınç bölgesi donatıları rötre ve sıcaklık ile ilgili koşullara bağlı olarak, temelin basınç bölgesi donatıları ise konstrüktif kurallara bağlı olarak belirlenmektedir. Şekil 2'de donatı alanları iki indisle gösterilmiştir. İlk indis kritik kesitlerin numarası ile uyumlu olacak şekilde donatının hangi kısımda olduğunu (üst gövde, alt gövde, burun, topuk) ikinci indis ise

çekme ya da basınç bölgesinde olduğunu belirtmektedir. Örneğin,  $As_{11}$  gövdenin üst kısmında çekme bölgesindeki donatıyı,  $As_{42}$  ise temelin topuk kısmında basınç bölgesindeki donatıyı temsil etmektedir.



Şekil 2: Kesit boyutları ve eğilme donatıları.

Duvar kesitine dik yöndeki dağıtma donatıları ile rötre ve sıcaklık donatıları da ilgili koşullar dikkate alınarak belirlenmiştir. TS-500'e göre, çekme bölgesinde minimum donatı oranı S220 için 0.003 ve S420 için 0.002 olmalıdır. Çekme bölgesinde dağıtma donatısı, asal donatının 1/5'inden az olmamalıdır. Gövde kısmında, rötre ve sıcaklık donatılarının toplam oranı yatay donatılar için 0.0025 ve düşey donatılar için 0.0015 olmalıdır. Yatay rötre ve sıcaklık donatılarının 1/3'ü çekme bölgesine, 2/3'ü basınç bölgesine konulmalıdır. Temel kısmında, çekme bölgesinde duvar kesitine dik yönde dağıtma donatısı, basınç bölgesinde ise her iki yönde konstrüktif olarak  $\Phi 8/20$  cm donatı kullanılmıştır.

### 3 Optimizasyon probleminin formülasyonu

İstinat duvarının optimum tasarımı problemi, Denklem (9)'da verilen amaç (maliyet) fonksiyonunun minimum edilmesi olarak formüle edilmiştir.

$$F(\mathbf{x}) = V_b(\mathbf{x})C_b + W_s(\mathbf{x})C_s + \sum_{k=1}^{15} g_k(\mathbf{x}) \quad (9)$$

Denklem 9'da  $\mathbf{x}$ , istinat duvarının kesit boyutlarının, yani optimizasyon probleminin karar değişkenlerinin saklandığı vektördür.  $V_b(\mathbf{x})$  istinat duvarının toplam hacmini,  $C_b$  betonun birim hacminin fiyatını,  $W_s(\mathbf{x})$  toplam donatı ağırlığını,  $C_s$  donatının birim ağırlığının fiyatını ifade etmektedir. Amaç fonksiyonunun değeri 1m uzunluğundaki istinat duvarının maliyetini ifade etmektedir. Betonun toplam hacmi ve donatının toplam ağırlığı da 1 m duvar uzunluğu için hesaplanmaktadır. Denklem 9'da verilen  $g_k(\mathbf{x})$  ise problemin güvenlik kontrolleri ve betonarme hesabı ile ilgili kısıtlarının, çözümde ele alınabilmesi için kullanılan ceza fonksiyonlarını temsil etmektedir.

TS-7994'te yer alan kayma, devrilme ve taşıma gücü ile ilgili güvenlik koşullarına bağlı ceza fonksiyonları sırası ile Denklem (10), (11) ve (12)'de verilmiştir. Öngörülen güvenlik koşulları sağlandığında ceza fonksiyonları sıfır değerini almakta, aksi durumda hesaplanan pozitif ceza değeri amaç fonksiyonuna eklenmektedir. Çalışma kapsamında ceza fonksiyonlarında yer alan PK katsayısının farklı değerleri için optimizasyon

algoritması çalıştırılmış ve elde edilen tasarım sonuçları kontrol edilmiştir. Tüm ceza fonksiyonları için sabit  $PK = 1000$  katsayısının kullanılmasının, tasarımın tüm kısıtları sağlayacak şekilde elde edilmesi için yeterli olacağı belirlenmiştir.

$$g_1(\mathbf{x}) = \left(1.50 - \frac{\sum F_{karşı}}{\sum F_{itici}}\right) PK \geq 0 \quad (10)$$

$$g_2(\mathbf{x}) = \left(1.50 - \frac{\sum M_{karşı}}{\sum M_{devirici}}\right) PK \geq 0 \quad (11)$$

$$g_3(\mathbf{x}) = \begin{cases} (\sigma_z/\sigma_{zem} - 1)PK \geq 0 \\ -\sigma_z PK \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

Denklem (13) ve (14)'te sırası ile Denklem (6) ve (7)'de ifade edilen eğilme ve kesme ile ilgili koşulların ele alınabilmesi için kullanılan ceza fonksiyonları verilmiştir. Koşullar dört kritik kesitte de sağlanmalıdır. Bu sebeple, eğilme ve kesme koşullarının her biri için dört fonksiyon kullanılmıştır. Benzer durum betonarme elemanlarda minimum donatı ile ilgili  $\rho \geq \rho_{min}$  koşulu için de geçerlidir (Denklem (15)).

$$g_{4-7}(\mathbf{x}) = (K_l/K - 1)PK \geq 0 \quad (13)$$

$$g_{8-11}(\mathbf{x}) = (V_d/V_{cr} - 1)PK \geq 0 \quad (14)$$

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

TS-7994'te optimizasyon probleminin karar değişkenleri olan duvar kesit boyutları için, ön tasarım aşamasında kullanılmak üzere alt ve üst sınırlar önerilmekle beraber bunların bağlayıcı nitelikte olmadığı ifade edilmektedir. Öte yandan incelenen problemdeki duvar yüksekliği, zemin özellikleri, dış yük vb. değerlere bağlı olarak duvar kesit boyutları değişmektedir. Bu çalışmada, karar değişkenleri için alt ve üst sınırlar Tablo 1'de verilen şekilde seçilmiştir.

Tablo 1: Karar değişkenlerinin alt ve üst sınırları (m).

Değişkenler	Alt sınır	Üst sınır
$T_1$	0.30	0.50
$T_2$	0.40	0.80
$T_3$	0.50	1.00
$T_4$	0.50	(3H/4)
$T_5$	1.00	(3H/4)
$T_6$	0.30	1.00
$T_7$	0.20	0.80

#### 4 Parçacık sürü optimizasyonu

Parçacık sürü optimizasyonu, Eberhart ve Kennedy tarafından, balık ve kuş sürülerinin yiyecek ararken ve/veya bir tehlikeden kaçarken sergiledikleri sürü davranışı dikkate alınarak geliştirilmiş popülasyon tabanlı bir optimizasyon tekniğidir [19]. Popülasyon tabanlı diğer sezgisel algoritmalarda olduğu gibi PSO'da da, birden çok yönde global çözüm araması yapılabilmektedir. Ayrıca, problemin çözümü için karar değişkenlerinin özel bir başlangıç değeri almasına ihtiyaç yoktur. Yöntem, günümüze kadar farklı bir çok mühendislik optimizasyon probleminin çözümü için kullanılmıştır [20]-[24].

Algoritmanın çalışma prensibi, bir kuş sürüsünün yiyecek araması örneği ile tanımlanabilir. Kuşlar yiyecek ararken yiyeceğe en yakın kuşu takip etmektedirler. Algoritmada, her kuş (parçacık) konum ve hız vektörü olmak üzere iki farklı

vektörel bileşene sahiptir. Burada konum vektörü parçacığın bulunduğu konumu, hız vektörü ise bireyin yer değiştirme miktarını ve yönünü belirtmektedir. Her parçacık konumunu ve hızını değiştirerek hareket etmekte ve yerini bilmedikleri yiyeceği aramaktadır. Bu bir optimizasyon probleminde bilinmeyen optimum çözümün aranmasına benzemektedir. Sürüdeki parçacıkların konumları, buldukları konuma ait amaç fonksiyonu (yiyeceğe ne kadar uzak olduğu) hesaplanarak değerlendirilmektedir. Kuşlar hareket ettiğinde yeni konumlarına ait amaç fonksiyonu değeri de hesaplanmaktadır. Her parçacığın o ana kadar bulunduğu kendi en iyi konumu ( $p_{best}$ ) ile sürü içinde o ana kadar elde edilen en iyi konum ( $g_{best}$ ) saklanmaktadır. Bu bilgiler, parçacığın mevcut konumundan bir sonraki konumuna geçmesi için kullanılmaktadır. O halde, parçacıkların konumlarının sürü içinde paylaşılması gerekmektedir. Parçacıkların, arama uzayında tanımlanmış alt ve üst sınırlar dikkate alınarak rastgele belirlenmiş konumları sürünün başlangıç durumunu ifade etmektedir. İterasyonlar boyunca sürüdeki parçacıkların konumları değiştirilerek en iyi konum yani optimizasyon probleminin çözümü araştırılmaktadır. İterasyonlar bittiğinde, sürü içindeki en iyi konuma sahip parçacığın konumu optimizasyon probleminin çözümünü temsil etmektedir.

Parçacığın bir sonraki konumunun belirlenmesi amacıyla, hız vektörü ve yeni konum vektörü, parçacığın o ana kadar ki konumları ile ilgili tecrübeden ve sürünün o ana kadar ki konumları ile ilgili genel tecrübeden faydalanarak sırasıyla Denklem (16) ve Denklem (17) ile elde edilmektedir.

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1r_1(p_{id} - x_{id}^k) + c_2r_2(p_{gd} - x_{id}^k) \quad (16)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}, i = 1,2,3, \dots, n, d = 1,2,3, \dots, m \quad (17)$$

Denklem (16) ve (17)'de,  $w$  algoritmanın lokal ve global arama yeteneklerinin dengelenmesi için kullanılan atalet sabitini temsil etmekte olup  $w$ 'nin büyük değerleri için global arama küçük değerleri için ise lokal arama öne çıkmaktadır.  $c_1$  ve  $c_2$  öğrenme davranışlarını temsil eden ivme katsayılarıdır.  $c_1$  parçacığın kendi tecrübelerinden faydalanmasını,  $c_2$  ise sürüdeki diğer parçacıkların tecrübelerinden faydalanmasını kontrol eder.  $r_1$  ve  $r_2$  üniform olarak 0 ile 1 arasında değişen rastgele sayıları,  $k$  iterasyon sayısını,  $n$  popülasyon büyüklüğünü,  $m$  karar değişkenlerinin sayısını,  $p_{id}$  parçacığın o ana kadar ki en iyi konumunu,  $p_{gd}$  sürüde o ana kadar elde edilen en iyi konumu ifade etmektedir.

Sezgisel optimizasyon algoritmalarının çözümleri, parametre değerlerine bağlı olarak değişebilmektedir. PSO algoritmasında da uygun  $w$ ,  $c_1$  ve  $c_2$  değerleri seçilerek lokal ve global arama arasındaki dengenin sağlanması önemlidir. Hu ve Eberhart [31] tarafından  $c_1 = c_2 = 2.0$  ve  $w = (c_3 + r_3/2)$  olarak önerilmiştir.  $r_3$ , yine 0-1 arasında değişen üniform rastgele sayı iken  $c_3 = 0.50$  olarak önerilmiştir. Parçacıkların konum değiştirirken sahip olacakları maksimum hız, karar değişkenlerinin alt ve üst sınır değerlerine bağlı olarak Denklem (18) ile sınırlandırılmıştır [32]. Denklem (18)'de  $\gamma$ , 0-1 arasında değişen üniform rastgele sayıdır.

$$\mathbf{v}_{max} = \gamma(\mathbf{x}_{max} - \mathbf{x}_{min}) \quad (18)$$

PSO algoritması şu şekilde ifade edilebilir:

Başlangıç parametrelerini belirle  
Başlangıç popülasyonunu oluştur  
Parçacıklara ait amaç fonksiyonu değerlerini bul  
Yap {

Global en iyiyi bul  
Lokal en iyiyi bul  
Parçacığın hız vektörünü güncelle  
Parçacığın konum vektörünü güncelle  
Parçacığın yeni konumunu değerlendir  
} Durma kriterini kontrol et

Bu çalışmada, durma koşulu olarak maksimum iterasyon sayısının 10000'e ulaşması seçilmiştir. PSO tabanlı çözüm algoritması Visual Basic [33] programlama dili ile kodlanmıştır.

## 5 Sayısal uygulamalar

Betonarme konsol istinat duvarlarının optimum tasarımı için önerilen çözüm algoritmasının uygulanması ile ilgili örnek olarak iki farklı istinat duvarı tasarımı problemi seçilmiştir. Örnek istinat duvarları için kumlu zemine ait bazı özellikler ve dış yük değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Duvarların arka kısmında  $H = 6$  m ve ön kısmında  $H_{ön} = 0.8$  m zemin bulunmaktadır. İki zeminin de kuru birim hacim ağırlığı  $\gamma = 20$  kN/m<sup>3</sup> alınmıştır. Duvar ile zemin arakesitinin düşeyle yaptığı açı ( $\alpha$ ), zeminle duvar arasındaki sürtünme açısı ( $\delta$ ) ile aktif ve pasif basınç tarafındaki zemin yüzeyinin yatayla yaptığı açı ( $i$ ) sıfır kabul edilmiştir.

Duvarların tasarımı için C20 sınıfı beton ve S420 sınıfı donatı seçilmiştir ( $f_{ck} = 20$  MPa,  $f_{yk} = 420$  MPa ve  $K_l = 380$  mm<sup>2</sup>/kN). Duvar maliyetinin hesabı için 2014 birim fiyatları kataloğu kullanılarak beton ve çeliğin birim fiyatları sırası ile 137.50 TL/m<sup>3</sup> ve 1.18 TL/kg alınmıştır [34].

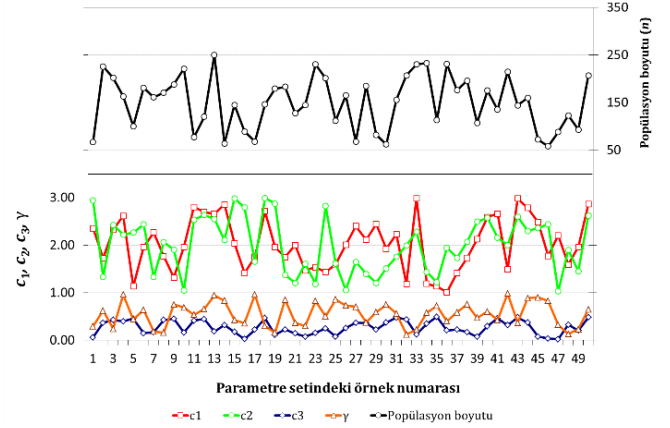
Tablo 2: Örnek istinat duvarları için bazı zemin verileri.

	$\phi$	$q_0$	$\sigma_{zem}$
Örnek 1	35°	10 kN/m <sup>2</sup>	300 kN/m <sup>2</sup>
Örnek 2	25°	0	150 kN/m <sup>2</sup>

Optimum çözümün, PSO çözüm parametrelerinin ( $n, c_1, c_2, c_3, \gamma$ ) değerlerine bağlılığının değerlendirilmesi amacıyla bir duyarlılık analizi yapılmıştır.  $w$  ve  $r_3$  parametreleri için ise Hu ve Eberhart [31] tarafından önerilen değerler kullanılmıştır. Duyarlılık analizi için her defasında parametrelerden birisinin değiştirilmesinin sakıncaları gözönüne alınarak [35], PSO parametrelerinin eş zamanlı olarak üniform dağılıma uygun şekilde değişen değerleri kullanılmıştır. Ayvaz [24], üniform olarak eş zamanlı değişen parametre değerlerinden oluşan ve 50 adet örneğe sahip PSO parametre seti kullandığı çalışmasında parametrelerin alt ve üst sınırlarını şu şekilde seçmiştir:  $50 \leq n \leq 250$ ,  $1.0 \leq c_1, c_2 \leq 3.0$ ,  $0.0 \leq c_3 \leq 0.5$ ,  $0.1 \leq \gamma \leq 1.0$  [24]. Bu çalışmada, Ayvaz tarafından oluşturulan PSO parametre seti kullanılmıştır. Şekil 3'te PSO setinde yer alan parametre değerlerinin değişimi görülmektedir. Tablo 3'te ise parametre değerlerine ait istatistiksel bilgiler verilmiştir.

Ele alınan iki farklı örneğin her biri için, çözüm algoritması PSO çözüm parametrelerinin farklı değerleri kullanılarak 50 kez çalıştırılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Optimum çözümün araştırılması için gerekli iterasyonlar her defasında farklı başlangıç değerleri kullanılarak başlatılmıştır.

Bilindiği gibi, hesaplar 1 m duvar uzunluğu için elde edilmiştir. Dolayısıyla optimum çözüm sonrası elde edilen amaç fonksiyonu değerleri de 1 m uzunluğundaki duvarın maliyetini temsil etmektedir.



Şekil 3: Duyarlılık analizi için kullanılan PSO parametre değerlerinin değişimi.

Tablo 3: PSO parametre setine ait istatistiksel bilgiler.

	$n$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$\gamma$
Minimum	58.00	1.010	1.032	0.021	0.122
Maksimum	250.00	2.985	2.992	0.492	0.983
Ortalama	149.94	2.028	2.002	0.271	0.556
Ortanca	158.00	1.983	2.033	0.253	0.583
Std. sapma	55.99	0.553	0.584	0.150	0.254

Elde edilen sonuçlara ilişkin dikkat çeken ilk bulgu, tüm sonuçların ele alınan bütün kısıtlar sağlanacak şekilde elde edildiğidir.

Duyarlılık analizi için yapılan çözümlemeler sonucu elde edilen duvar maliyetlerine ilişkin istatistiksel veriler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4: Duvar maliyetlerine ait istatistiksel bilgiler (TL/m).

	Örnek 1	Örnek 2
Minimum	741.88	925.86
Maksimum	761.81	946.11
Ortalama	746.05	930.19
Standart sapma	4.43	3.57
Varyasyon katsayısı	5.94E-3	3.84E-3

Örnek 1 ile ifade edilen zemin, Örnek 2 ile ifade edilen zemine göre içsel sürtünme açısı ve zemin emniyet gerilmesi değerleri açısından daha iyi bir zemini temsil etmektedir (Tablo 2). Bu durum, elde edilen duvar maliyetlerine yansımıştır. Örnek 1 için ortalama duvar maliyeti 746.05 TL/m iken ve Örnek 2 için ortalama duvar maliyeti 930.19 TL/m'dir. Her örnek için 50 adet çözümden elde edilen minimum duvar maliyeti Örnek 1 ve Örnek 2 için sırası ile 741.88 TL/m ve 925.86 TL/m'dir. Standart sapma ve dolayısıyla varyasyon katsayısının düşük olması, elde edilen çözümlerin oldukça düşük bir saçılıma sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 5'te minimum maliyete sahip tasarım ile elde edilen duvar kesit boyutları verilmiştir. Görüldüğü gibi, kesit boyutları öngörülen sınırlar içerisinde yer almaktadır.

Tablo 6'ya göre, devrilme ve kayma için hesaplanan güvenlik

katsayıları sınır değerlerin üzerindedir. Ayrıca, minimum zemin gerilmesi her iki örnek için de sıfırın üzerinde iken maksimum zemin gerilmesi de zemin emniyet gerilmesinden daha düşüktür.

Tablo 5: Minimum maliyetli tasarıma ait kesit boyutları (m).

	Alt sınır	Üst sınır	Örnek 1	Örnek 2
$T_1$	0.30	0.50	0.30	0.30
$T_2$	0.40	0.80	0.40	0.44
$T_3$	0.50	1.00	0.97	1.00
$T_4$	0.50	(3H/4)	1.58	2.87
$T_5$	1.00	(3H/4)	3.42	3.44
$T_6$	0.30	1.00	0.40	0.40
$T_7$	0.20	0.80	0.20	0.30

Tablo 6: Güvenlik kontrolleri ile ilgili veriler.

	Sınır değerler	Örnek 1	Örnek 2
Devrilme	1.50	2.16	3.74
Kayma	1.50	1.89	1.50
$\sigma_{zmin}$ (kN/m <sup>2</sup> )	0.00	0.17	55.66
$\sigma_{zmax}$ (kN/m <sup>2</sup> )	300.00	199.62	
$\sigma_{zmax}$ (kN/m <sup>2</sup> )	150.00		149.87

Tablo 7'de ve Tablo 8'de, sırası ile Örnek 1 ve Örnek 2 ile ifade edilen zemin durumu için hesaplanan donatı alanları verilmiştir. Duvarın üst ve alt gövdesinde çekme bölgesi, zeminin bulunduğu arka kısımdır. Temelde topuk kısmında çekme bölgesi üst kısım iken burun kısmında çekme bölgesi alt kısımdır.

Tablo 7: Örnek 1 için hesaplanan donatı alanları (cm<sup>2</sup>).

	Çekme bölgesi		Basınç bölgesi	
	Enine	Boyuna	Enine	Boyuna
Üst duvar	10.59	8.55	4.50	17.10
Alt duvar	29.26	12.76	6.00	14.53
Burun	11.26	2.19	2.50	2.43
Topuk	17.14	5.40	2.50	3.94

Tablo 8: Örnek 2 için hesaplanan donatı alanları (cm<sup>2</sup>).

	Çekme bölgesi		Basınç bölgesi	
	Enine	Boyuna	Enine	Boyuna
Üst duvar	11.19	8.59	4.50	17.19
Alt duvar	31.22	13.51	6.57	15.79
Burun	9.21	1.84	2.50	2.50
Topuk	27.91	16.03	2.50	7.18

Tablo 7 ve Tablo 8'de, boyuna donatı olarak ifade edilen donatılar duvar kesitine dik yönde uzanan donatılardır. Bu donatılar, gerekli rötre-sıcaklık donatıları, dağıtma donatıları ve konstrüktif donatılar dikkate alınarak belirlenmiştir. Enine donatılar ise dikkate alınan yüklerle bağlı olarak hesaplanan eğilme momentlerinin gerektirdiği donatılardır.

Bu kısımda özetlenen sonuçlar, bu çalışmada dikkate alınan güvenlik koşulları ve betonarme hesabı ile ilgili koşullar sağlanacak şekilde, betonarme konsol istinat duvarlarının

optimum olarak tasarlanabileceğini göstermektedir.

## 6 Sonuçlar

Bu çalışmada, Türkiye'de yapılacak betonarme konsol istinat duvarlarının optimum tasarımı için PSO algoritması tabanlı bir çözüm yöntemi uygulanmıştır.

Çalışmada, betonarme konsol istinat duvarları için TS-7994'te yer alan devrilme, kayma ve zemin taşıma gücü ile ilgili güvenlik kontrolleri ile TS-500'de yer alan betonarme hesabı ile ilgili koşullar dikkate alınmıştır. İstinat duvarlarına etkiyen düşey yükler yanında statik aktif ve pasif zemin itkileri de dikkate alınırken deprem etkisi ile oluşacak dinamik itkiler kapsam dışı bırakılmıştır.

Örnek olarak seçilen iki farklı zemin durumu için, PSO tabanlı çözüm yöntemi kullanılarak, dikkate alınan tüm kısıtlar sağlanacak şekilde optimum tasarım yapılabileceği görülmüştür. Optimum çözümün PSO çözüm parametrelerine duyarlılığının araştırılması amacıyla bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu amaçla her bir zemin örneği için, her defasında PSO parametrelerinin eşzamanlı olarak değişen farklı değerleri kullanılarak 50 ayrı çözüm yapılmış ve tasarım sonuçları elde edilmiştir. Çözümlerin tamamı, tüm kısıtlar sağlanacak şekilde elde edilmiştir. Nispeten iyi özelliklere sahip ilk zemin örneği için ortalama duvar maliyeti 746.05 TL/m iken ikinci zemin örneği için ortalama maliyet 930.19 TL/m bulunmuştur. Çözümler incelendiğinde, minimum maliyete sahip çözümün ilk zemin örneği için 741.88 TL/m ve ikinci zemin örneği için 925.86 TL/m olduğu görülmüştür. Çözümlerin ortalama etrafındaki saçılımının bir ölçüsü olan varyasyon katsayısının ilk zemin örneği için 0.006 ve ikinci zemin örneği için 0.004 gibi çok düşük değerlere sahip olduğu saptanmıştır. Buna göre, PSO çözüm parametrelerinin değerlerine bağlı olarak elde edilen çözümlerin çok düşük bir saçılma sahip olduğu söylenebilir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, dikkate alınan yüklemeye ve tasarım koşullarının yanında, örnek olarak seçilen zeminlerin özellikleri, amaç fonksiyonu ve karar değişkenleri ile ilgili kabullere bağlıdır. Önerilen yöntem kullanılarak, tasarım amaçları doğrultusunda farklı zemin özellikleri, farklı yüklemeye durumları, farklı amaç fonksiyonu ve karar değişkeni kabulleri vb. dikkate alınarak betonarme konsol istinat duvarlarının optimum tasarımının elde edilmesi mümkündür.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre, PSO tabanlı çözüm algoritmasının, Türkiye'deki betonarme konsol istinat duvarlarının optimum tasarımında etkin bir araç olarak kullanılabilirliği söylenebilir.

## 7 Kaynaklar

- [1] Türk Standartları Enstitüsü. "TS-7994 Zemin Dayanma Yapıları: Sınıflandırma, Özellikleri ve Projelendirme Esasları". Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 1990.
- [2] Öztürk T, Öztürk Z. "Deprem bölgelerinde yapılacak prefabrike 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, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, 1995.
- [4] Dembicki E, Chi T. "System analysis in calculation of cantilever retaining wall". *International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, 13(6), 599-610, 1989.

- [5] Keskar AV, Adidam SR. "Minimum cost design of a cantilever retaining wall". *The Indian Concrete Journal*, 63(8), 401-405, 1989.
- [6] Basudhar PK, Lakshman B, Dey A. "Optimal cost design of cantilever retaining walls". *IGC-2006 Indian Geotechnical Conference*, Chennai, India, 14-16 December 2006.
- [7] Saribaş A, Erbatır F. "Optimization and sensitivity of retaining walls". *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(8), 649-656, 1996.
- [8] Goldberg DE. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. 1st ed. Boston, Massachusetts, USA Addison Wesley Pub., 1989.
- [9] Karaboga D, Basturk B. "A Powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC)". *Journal of Global Optimization*, 39(3), 459-471, 2007.
- [10] Geem ZW, Kim JH, Loganathan GV. "A new heuristic optimization algorithm: Harmony search". *Journal of Simulation*, 76(2), 60-68, 2001.
- [11] Storn R, Price K. "Differential Evolution-A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces". ICSI, Muenchen, Germany, Technical Report TR-95-012 1995.
- [12] Kirkpatrick S, Gelatt C, Vecchi M. "Optimization by simulated annealing". *Journal of Science*, 220(4598), 671-680, 1983.
- [13] Bazaz JB, Fahmideh A. "Optimum cost design of reinforced concrete cantilever retaining wall using genetic algorithm". *9th International Congress on Civil Engineering*, Isfahan, Iran, 8-10 May 2012.
- [14] Ceranic B, Fryer C, Baines RW. "An application of simulated annealing to the optimum design of reinforced concrete retaining structures". *Journal of Computers Structures*, 79(17), 1569-1581, 2001.
- [15] Yepes V, Alcalá J, Perea C, González-Vidosa F. "A parametric study of optimum earth-retaining walls by simulated annealing". *Journal of Engineering Structures*, 30(3), 821-830, 2008.
- [16] 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.
- [17] Camp VC, Akin A. "Design of retaining walls using big bang-crunch optimization". *Journal of Structural Engineering*, 138(3), 438-448, 2012.
- [18] Kaveh A, Khayatad M. "Optimal design of cantilever retaining walls using ray optimization method". *Transactions of Civil Engineering*, 38(1), 261-274, 2014.
- [19] Kennedy J, Eberhart R. "Particle swarm optimization". *IEEE International Conference on Neural Networks*, Piscataway, NJ, 27 November-1 December 1995.
- [20] Perez RE, Behdinan K. "Particle swarm approach for structural design optimization". *Journal of Computers and Structures*, 85(16-20), 1579-1588, 2007.
- [21] Salerno J. "Using particle swarm optimization technique to train a recurrent neural model". *9th IEEE International Conference Tools and Artificial Intelligence*, Newport, Beach, California, USA, 3-8 November 1997.
- [22] Salman A, Ahmad I, Al-Madani S. "Particle swarm optimization for task assignment problem". *Microprocessors and Microsystems*, 26(8), 363-371, 2002.
- [23] Slade WH, Ransom HW, Musavi MT, Miller RL. "Inversion of ocean color observations using particle swarm optimization". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(9), 1915-1923, 2004.
- [24] Ayvaz MT. "A Linked simulation-optimization model for simultaneously estimating the manning's surface roughness values and their parameter structures in shallow water flows". *Journal of Hydrology*, 500, 183-199, 2013.
- [25] Khajehzadeh M, Taha MR, El-Shafie A, Eslami M. "Modified particle swarm optimization for optimum design of spread footing and retaining wall". *Journal of Zhejiang University-Science A*, 12(6), 415-427.
- [26] Ahmadi-Nedushan B, Varae H. "Optimal design of reinforced concrete retaining walls using a swarm intelligence technique". *1st International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering*, Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK, 1-4 September 2009.
- [27] Pei Y, Xia Y. "Design of Reinforced cantilever retaining walls using heuristic optimization algorithms". *SCGM-2012 International Conference on Structural Computation and Geotechnical Mechanics*, Yunnan, China, 24-25 March, 2012.
- [28] Türk Standartları Enstitüsü. "TS-500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları". Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2000.
- [29] Özden K, Öztürk T. "Bazı özel durumlarda yalnız depremden oluşan basınç ve itkiler". *3. Ulusal Deprem Mühendisliği Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 27-31 Mart 1995.
- [30] TC. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik". Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, 2007.
- [31] Hu X, Eberhart RC. "Tracking Dynamic Systems With PSO: Where's the Cheese?". *Proceedings of the Workshop on Particle Swarm Optimization*, Purdue School of Engineering and Technology, Indianapolis, 2001.
- [32] Shi Y, Eberhart RC. "Parameter Selection in Particle Swarm Optimization". *Evolutionary Programming VII. Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Berlin, 1447, 1998.
- [33] Microsoft. "Microsoft Excel-Visual Basic for Applications". Microsoft Press, Washington, USA, 1995.
- [34] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. "Birim Fiyat". TC. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, Türkiye, 2014.
- [35] Saltelli A, Annoni P. "How to avoid a perfunctory sensitivity analysis". *Journal of Environmental Modelling & Software*, 25(12), 1508-1517, 2010.