Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 24(6), 1043-1050, 2018

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Betonarme konsol istinat duvarlarının optimum tasarımı

Optimum design of reinforced concrete cantilever retaining walls

Rasim TEMÜR[1*], *Gebrail BEKDAŞ*[2]

[1,2]İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
temur@istanbul.edu.tr, bekdas@istanbul.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 09.08.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 22.02.2018 doi: 10.5505/pajes.2018.57873
* Yazışılan yazar/Corresponding author Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Mühendislik tasarımlarında, güvenlik koşullarını sağlayacak en düşük maliyete sahip sonuçların elde edilmesi amaçlanmaktadır. Ancak güvenlik koşullarını sağlayan seçenekler içerisinde en düşük maliyetli çözüm, tasarımcının tecrübeli olması durumunda dahi bulunamayabilir. Özellikle mekanik özellikleri ve birim fiyatları birbirinden oldukça farklı iki malzemenin kullanıldığı betonarme yapıların tasarımında bu amacın gerçekleşmesi daha zor olabilir. Bu çalışma kapsamında statik ve dinamik yükler etkisindeki konsol tipi betonarme istinat duvarlarının en uygun (optimum) tasarımın elde edilmesi amacıyla metasezgisel algoritmalardan "Öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon" (ÖÖTO) algoritmasını temel alan bir yöntem önerilmiştir. Optimizasyon sürecinde istinat duvarı stabilitesi (devrilme, kayma ve zemin gerilmesi), kesit kapasiteleri (eğilme momenti, kesme kuvveti) ve betonarme tasarım kurallarını içeren 29 kontrol yapılmıştır. Optimizasyon işleminde 5'i duvar kesiti 12'si betonarme tasarımı ile ilgili olmak üzere toplam 17 değişken kullanılmıştır. İstinat duvarlarının boyutlandırmasında, TS 7994 (Zemin Dayanma Yapıları; Sınıflandırma, Özellikleri ve Projelendirme Esasları) kuralları göz önünde bulundurulmuştur. Betonarme tasarımında ise yürürlükteki ilgili yönetmelikler olan TS 500 (Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları) ve DBYBHY (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik) kuralları uygulanmıştır. Çalışmada önerilen yöntem ile elde edilen sonuçlar mevcut yöntemler ile karşılaştırılmış ve yöntemin konsol tipi betonarme istinat duvarlarının optimum tasarımının bulunmasında uygun olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Optimizasyon, Metasezgisel algoritmalar, Öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon, Konsol istinat duvarı

Abstract

The aim of engineering designs is to obtain results with minimum cost that will provide safety conditions. But the most economical design ensuring security conditions may not be found within the options, even the designer is experienced. Especially in the design of reinforced concrete (RC) structures that consist from two materials with very different mechanical properties and unit costs, it may be more difficult to achieve this purpose. In this study, a methodology based on teaching-learning-based optimization (TLBO) was proposed for optimum design of RC cantilever retaining wall under the static and dynamic loads. During the optimization process, 29 design constraints including retaining wall stabilities (overturning, sliding and soil stress), section capacities (flexure and shear) and RC design rules are checked. In the optimization problem, totally 17 design variables (5 of them related to cross-section dimension and 12 of them related to RC design) are used. In the sizing of retaining wall, the rules of the TS 7994 (Soil Retaining Structures; Properties and Guidelines for Design) are considered. In the RC design, the requirements of the relevant regulations; TS 500 (Requirements for Design and Construction of Reinforced Concrete Structures) and DBYBHY (Specification for Buildings to be Built in Seismic Zones) are considered. The results obtained by the proposed method were compared with the existing methods and the method seems as suitable for the optimum design of the cantilever type RC retaining walls.

Keywords: Optimization, Meta-heuristic algorithms, Teaching-learning-based optimization, Cantilever retaining wall

1 Giriş

Yapısal sistemlerin tasarımında iki önemli amaç vardır. Bunlardan ilki, sistemin tanımlı dış yükler altında gerekli güvenlik kısıtlarının (gerilme, yer değiştirme vb.) sağlanmasıdır. İkincisi ise; yapısal sistemin güvenlik kısıtları açısından uygun tasarımlar kümesi içerisindeki en ekonomik tasarımın bulunmasıdır. Bir başka deyişle, iki amacın eş zamanlı sağlandığı optimum sistem tasarımına ulaşılması amaçlanmaktadır.

Betonarme yapıların tasarımı; kesit seçimi, iç kuvvetlerin bulunması, iç kuvvetlere bağlı donatı alanlarının elde edilmesi, minimum ve maksimum donatı oranlarının kontrolü, donatı çap ve aralığının seçimi, donatı aralığının minimum ve maksimum sınırlarının kontrolü vb. birçok adım ve kontrolden oluşmaktadır. Söz konusu adımlar incelendiğinde ise yapılan her bir seçimin kendisinden önceki ve sonraki adımlar üzerinde etkisi olduğu görülmektedir. Konsol istinat duvarlarının kesit ve boyut seçimleri duvarın devrilme, kayma ile zemin gerilmesi güvenlikleri değerleri yanında iç kuvvetlerin büyüklüğü, donatı alanları, minimum ve maksimum donatı oranları, donatı aralıklarının doğrudan değişmesine neden olmaktadır. Tasarım aşamaları arasındaki doğrusal olmayan bu ilişkiyi ise matematiksel bir denklem ile ifade etmek mümkün olmayabilir. Bu durumda optimum tasarımın elde edilmesinde tekrarlı çözümlemeler yapılması zorunlu olmaktadır. Ancak bütün tasarım olasılıklarının denenmesi ve bunlar içerisinde en uygun olanın bulunması zaman alıcı olmasının yanında oldukça zordur ve uygulanabilir olmaktan uzaktır. Bu sebeple optimum çözümün elde edilmesinde metasezgisel yöntemler gibi alternatif yöntemlerin kullanılmasına gerek duyulmaktadır.

Canlıların beslenme, üreme ve korunma faaliyetleri incelendiğinde içgüdüsel olarak çeşitli davranışlar sergiledikleri görülür. Örnek olarak bir karınca kolonisinin, yuvası ile besin kaynağı arasındaki en kısa yolu takip etmesi, canlı sürülerinin göç veya başka bir neden ile yer değiştirirken belirli bir düzen ve yolu takip etmesi veya yarasaların sesle yer belirleme özelliklerini kullanarak avlanmaları gösterilebilir. Söz konusu faaliyetleri incelendiğinde ise canlıların hareketlerinin temelinde yaşamsal süreçleri sürdürebilmeleri

açısından en uygun yolları kullandıkları veya geliştirdikleri anlaşılmaktadır. Canlıların bu davranışları biyologların olduğu kadar, matematik ve mühendislik dalları ile ilgilenen insanların araştırmalarına da konu olmuştur. Bir amaç fonksiyonunun belirli kısıtlar altında en uygun (optimum) değerinin bulunmasında kullanılan metasezgisel algoritmalar, bu araştırmaların kapsamında geliştirilmiştir. Genellikle, ilham alınan olayın ismi ile adlandırılan bu algoritmalara örnek olarak; genetik mutasyondan ilham alınan "Genetik Algoritma" (GA) [1], kuş ve balık sürülerinin besin bulma davranışlarından ilham alınan "Parçacık Sürüsü Optimizasyonu" (PSO) [2], metallerin tavlama işleminden ilham alınan "Tavlama benzetimi" (TB) [3], karıncaların besinlere ulaşmak için güzergâh belirlemelerinden ilham alınan "Karınca Kolonisi Optimizasyonu" (KKA) [4], evrenin oluşumundan ilham alınan "Büyük Patlama-Büyük Çöküş Optimizasyonu" (BP-BÇ) [5], müzikten ilham alınan "Harmoni Arama Algoritması" (HA) [6], ateş böceklerinin sosyal davranışlarından ilham alınan "Ateş Böceği Algoritması" (ABA) [7], yarasaların yön ve uzaklık belirleme davranışından ilham alınan "Yarasa Algoritması" (YA) [8], çiçeklerdeki tozlaşma sürecinden ilham alınan "Çiçek Tozlaşma Algoritması" (ÇTA) [9] ve bir sınıftaki öğrencilerin eğitiminden ilham alınan "Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon Algoritması" (ÖÖTO) [10] gösterilebilir.

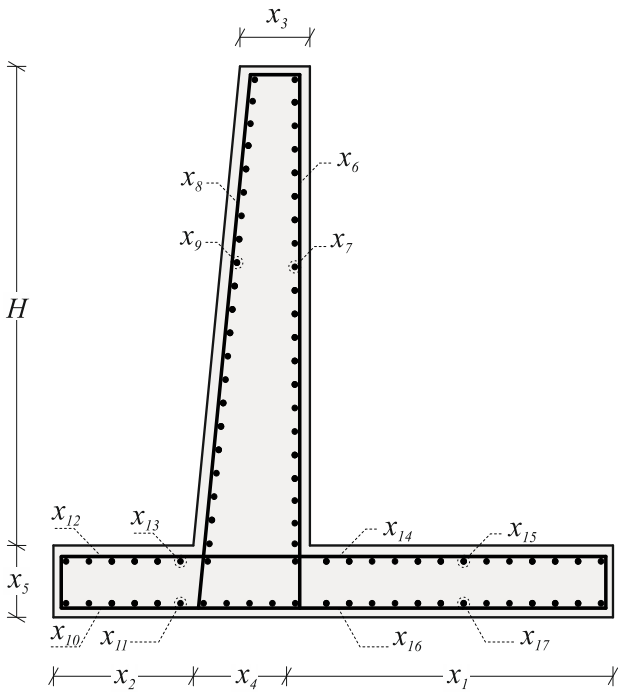
Betonarme konsol istinat duvarlarının optimum tasarımı ile ilgili çalışmalar 1980'li yıllara dayanmaktadır. Bu çalışmalar en uygun duvar şekli, duvar stabilitesi, duvar eğilme momentinin minimize edilmesi, optimum yerleşim konu başlıkları altında toplanabilir. Özellikle 2000'li yıllardan sonra optimizasyon işleminde geliştirilen metasezgisel algoritmalar yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Çalışmalarda; TB [11],[12], PSO [13],[14], HA [15], BP-BÇ [16], GA [17], ABA [18], ÖÖTO [19], Sosyal Örümcek Algoritması [20], Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon Algoritması [21] gibi birçok algoritma kullanılmış ve genellikle minimum maliyet kısıtına bağlı optimum tasarım üzerinde yoğunlaşmıştır. Yapı zemin etkileşimi ve betonarme tasarımındaki birçok etken de göz önünde bulundurulduğunda, betonarme istinat duvarların optimum tasarımı üzerinde özellikle metasezgisel algoritmaları temel alan çalışmaların araştırmacılar için aktif bir alan olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada, literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak, Türk mevzuatında belirtilen statik ve dinamik yükler etkisindeki betonarme konsol istinat duvarlarının düşük maliyetli (optimum) tasarımının elde edilmesi amacıyla bir yöntem önerilmektedir. Ayrıca ön ampatman ve duvar gövde kalınlığı kısıtlarının, istinat duvarı maliyetine etkisi de incelenmiştir. Çalışma kapsamında incelenen istinat duvarları TS 500 [22] ile DBYBHY [23] yönetmeliklerinde belirtilen kurallara göre tasarlanmıştır. Optimizasyon işleminde ise ÖÖTO algoritması kullanılmıştır. Literatürde, ÖÖTO algoritması kullanılarak, düzlem çelik çerçeve sistemler [24], kafes sistemler [25],[26], ızgara sistemler [27] ve statik yükler altındaki istinat duvarları [19] gibi bazı yapısal sistemlerin optimizasyonu konusunda çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Önerilen yöntemin uygunluğu ve başarımının belirlenmesi amacıyla sonuçlar literatürde sıkça kullanılan yüksek başarımlı yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Çalışma, deprem bölgelerinde inşa edilecek betonarme konsol istinat duvarlarının gerekli güvenlik koşullarını sağlayan en düşük maliyetli tasarımı konusunda uygulanabilir bir yöntem önermenin yanı sıra, ön ampatmanın, gövde kalınlıklarının ve farklı deprem yüklerinin maliyet üzerindeki etkisini de incelemektedir.

2 Optimizasyon yöntemi

Metasezgisel algoritmalardan biri olan "Öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon" (ÖÖTO) yöntemi, öğrenim sürecinden ilham alınarak geliştirilmiştir [10]. Öğrenim süreci sınıf içi ve dışı çalışmaları olmak üzere iki önemli kısımdan oluşmaktadır. Sınıf içi süreçte, öğretmen ders anlatımı, örnek çözümü, soru-cevap gibi çeşitli aktiviteler ile öğrencilerin konu ile ilgili bilgilerinin geliştirilmesini sağlamaya çalışır. Bu süreçte ana rol öğretmendedir. Sınıf dışı çalışma ise ödevler, birlikte çalışma, tartışma, araştırma, bilgi paylaşımı gibi yöntemler ile öğrencinin bilgilendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu süreçte ise esas rol öğrenciye düşer. Bu süreçlerin matematiksel denklemlerle ifade edilmesiyle geliştirilen ÖÖTO algoritmasında optimizasyon işlemleri ana rollerden hareketle isimlendirilen "öğretmen fazı" ve "öğrenci fazı" iki fazlı süreçleri döngüsel olarak tekrar ederek gerçekleştirilir.

Birinci adımda probleme ait veriler tanımlanır. Bunlar tasarım sabitleri, tasarım değişkenleri alt ve üst sınırları ile ÖÖTO parametreleri olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Tasarım sabitlerinin içerisine duvarın yüksekliği, zemine ait parametreler (zeminin taşıma kapasitesi, özgül ağırlığı, içsel sürtünme açısı, kohezyon, dolgu eğimi, güvenlik katsayıları), duvar malzeme özelikleri (beton basınç dayanımı, donatı akma dayanımı, özgül ağrılıkları), malzeme ve işçilik birim maliyetleri girmektedir. Tasarım değişkenleri ise duvarın geometrik özellikleri (ön ve arka ampatman genişliği, gövde ve taban plağı kalınlıkları) ve betonarme tasarımını (donatı çap ve aralıkları) içerir. Şekil 1'de ve Tablo 1'de gösterilen değişkenler toplam 17 adettir. Tablo 1'de yer alan donatı tasarımına ait değişkenler (X_6- X_{17}), ihtiyaç duyulan donatı alanına karşılık gelecek en uygun donatı çapı/donatı aralığı değerlerini *mm* cinsinden ifade etmektedir. ÖÖTO parametreleri ise sınıf mevcudu (*sm*) ve durdurma kriteri olarak kullanılan maksimum döngü sayısıdır.



Şekil 1: Konsol istinat duvarları için tasarım değişkenleri.

Tablo 1: Tasarım değişkenleri.

	Açıklama	Tasarım Değişkeni
Kesit boyutlarına ait değişkenler	Arka ampatman genişliği	X_1
	Ön ampatman genişliği	X_2
	Gövde üst kalınlığı	X_3
	Gövde alt kalınlığı	X_4
	Taban plağı kalınlığı	X_5
Donatı tasarımına ait değişkenler	Gövde eğilme donatısı	X_6
	Gövde yatay donatısı - Arka yüz	X_7
	Gövde düşey donatısı - Ön yüz	X_8
	Gövde yatay donatısı - Ön yüz	X_9
	Ön ampatman eğilme donatısı	X_{10}
	Ön ampatman yatay donatısı - Alt yüz	X_{11}
	Ön ampatman düşey donatısı - Alt yüz	X_{12}
	Ön ampatman yatay donatısı - Üst yüz	X_{13}
	Arka ampatman eğilme donatısı	X_{14}
	Arka ampatman yatay donatısı - Üst yüz	X_{15}
	Arka ampatman düşey donatısı - Üst yüz	X_{16}
	Arka ampatman yatay donatısı - Alt yüz	X_{17}

ÖÖTO algoritması ile gerçekleşen konsol istinat duvarları optimizasyonu beş adımda özetlenebilir:

İkinci adımda ilk çözüm matrisi (SI) oluşturulur. Matrisin her bir satırı çözüm vektörü olarak tanımlanır ve vektörler üst (X_i^{mak}) ve alt limitleri (X_i^{min}) arasında rassal bir fonksiyon (rnd) kullanılarak türetilen (Denklem 1) toplam 17 adet tasarım değişkenini içerir.

$$X_i = X_i^{min} + rnd(0,1) \cdot \left(X_i^{mak} - X_i^{min}\right) \quad i = 1,17 \tag{1}$$

Çözüm vektörlerinin sayısı birinci adımda tanımlanan sınıf mevcuduna (sm) eşit olmak üzere ilk çözüm matrisi

$$SI = \begin{bmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \cdots & X_{1,17} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \cdots & X_{2,17} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ X_{sm-1,1} & X_{sm-1,2} & \cdots & X_{sm-1,17} \\ X_{sm,1} & X_{sm,2} & \cdots & X_{sm,17} \end{bmatrix} \tag{2}$$

şeklinde yazılır. Çözüm vektörlerinde depolanan tasarım değişkenleri kullanılarak konsol duvar geometrisi oluşturulur (Şekil 1). İlgili yönetmeliklere göre, istinat duvarına etkiyen statik ve dinamik yüklere ait dağılımların elde edilmesinin ardından, duvar için stabilite ve betonarme kesit hesapları yapılarak tasarımın güvenlik kontrolleri yapılır (Şekil 2).

$$f(X) = \begin{bmatrix} f(X_1) \\ f(X_2) \\ \vdots \\ f(X_{sm-1}) \\ f(X_{sm}) \end{bmatrix} \tag{3}$$

Tasarımın güvenlik koşullarını sağlaması durumunda maliyet hesaplanarak, karşılaştırmalarda kullanılmak üzere amaç fonksiyonu vektörünün (Denklem 3) ilgili satırına kaydedilir. Güvenlik şartlarını sağlamayan tasarımlarsa amaç fonksiyonu vektörünün ilgili satırına bir ceza değeri (yüksek bir maliyet değeri) atanır ve bu sayede tasarımın elenmesi sağlanır.

Üçüncü adımda ise çözüm matrisine öğretmen fazı uygulanır. ÖÖTO algoritmasında kurulan benzeşime göre çözüm matrisi sınıfı, her bir vektör ise öğrencileri temsil eder. Bu fazda öncelikle sınıftaki öğretmen vektör tanımlanır. Öğretmen popülasyon içerisinde bilgi düzeyi en iyi olan kişi olduğundan amaç fonksiyonları (Denklem 3) bakımından en iyi değere sahip (en düşük maliyete sahip) vektör,

$$X_{\text{öğretmen}} = X_{minf(X)} \tag{4}$$

olarak belirlenmesinin ardından çözüm matrisindeki mevcut tasarım değişkenlerinden (X_{eski}),

$$X_{yeni}^t = X_{eski} + rnd(0,1) \cdot \left(X_{\text{öğretmen}} - T_F \cdot X_{ort}\right) \tag{5}$$

bağıntısı kullanılarak yeni değerler (X_{yeni}^t) elde edilir. Denklem 5'te (X_{ort}) değerlerin aritmetik ortalaması, T_F değeri ise öğretim faktörü olarak adlandırılan rassal bir fonksiyona bağlı olarak 1 veya 2 değerini alan bir değişkendir (Denklem 6).

$$T_F = yuvarla[1 + rnd(0,1)] \rightarrow \{1 - 2\} \tag{6}$$

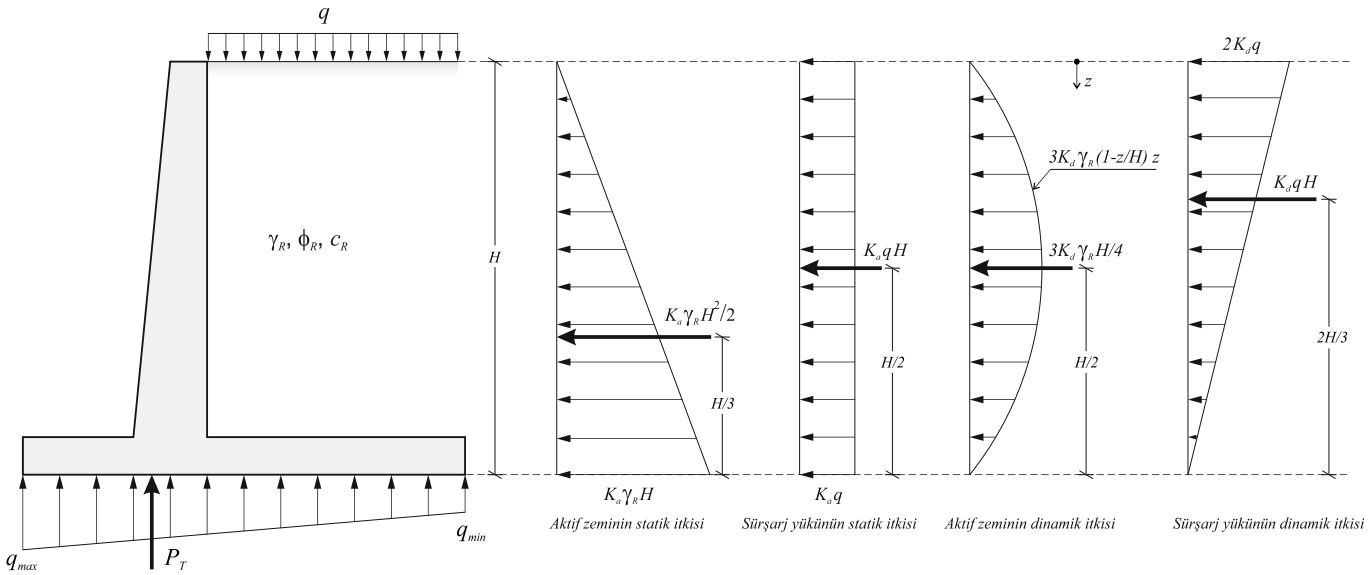
Yeni değerlerin elde edilmesinin ardından her çözüm vektörünün tasarımı yapılarak maliyetleri elde edilir. Yeni elde edilen çözümün daha iyi (daha düşük bir maliyete sahip) olması durumunda, çözüm matrisinde mevcut vektöre ait değerlerin yerine yeni vektörün değeri kayıt edilerek matris güncelleştirilir.

Öğrenci fazı optimizasyon işleminin dördüncü adımıdır. Bu fazda öğrencilerin birbiri arasındaki etkileşimini matematiksel olarak

$$X_{yeni}^l = \begin{cases} X_{eski} + rnd(0,1) \cdot \left(X_i - X_j\right); & f(X_i) > f\left(X_j\right) \\ X_{eski} + rnd(0,1) \cdot \left(X_j - X_i\right); & f(X_i) < f\left(X_j\right) \end{cases} \tag{7}$$

ifade edilerek çözüm matrisindeki mevcut tasarım değişkenlerinden yeni değerler üretilir. Denklem 7'de X_i ve X_j rassal olarak popülasyon içerisinden seçilen vektörü ifade eder. Yeni çözüm vektörleri için tasarım ve maliyet hesaplarının yapılmasının ardından, çözümlerin eskilerden daha iyi olması durumunda çözüm matrisinde eskilerin yerine yeni çözüm vektörleri yazılır.

Beşinci adımda ise durdurma kriterinin sağlaması koşulu kontrol edilir. Üçüncü adıma gidilerek döngüsel sürece kriter sağlanıncaya kadar devam edilir.



Şekil 2: Konsol istinat duvarlara etkiyen statik ve dinamik yükler.

3 Sayısal örnekler

Önerilen yöntemin güvenilirliği, performansı ve başarımını incelemek amacıyla konsol betonarme istinat duvarının optimum sonuçları elde edilerek, literatürde daha önce konuyla ilgili olarak çalışılmış ve probleme uygun parametreleri belirlenmiş yöntemler olan BP-BÇ [16], PSO [13] ve HA [15] ile karşılaştırılmıştır. ÖÖTO ile yapılan optimizasyon işlemleri için sınıf mevcudu (popülasyon sayısı) 20 olarak tercih edilmiştir [19].

3.1 Bir betonarme konsol istinat duvarının dinamik yükler altındaki optimum tasarımı

İlk sayısal örnekte kullanılan istinat duvarına ait tasarım sabitleri Tablo 2'de verilmiştir [28]. Tasarım değişkenlerinde kullanılan üst ve alt limitler genişlik için 0.0 m-10.0 m, kalınlıklar için 0.2 m-3.0 m, donatı çapları için 16 mm-50 mm olarak tanımlanmıştır. Tasarımda dinamik kuvvetler, etkin yer ivmesi katsayısı (A_0) 0.4 kullanılmıştır.

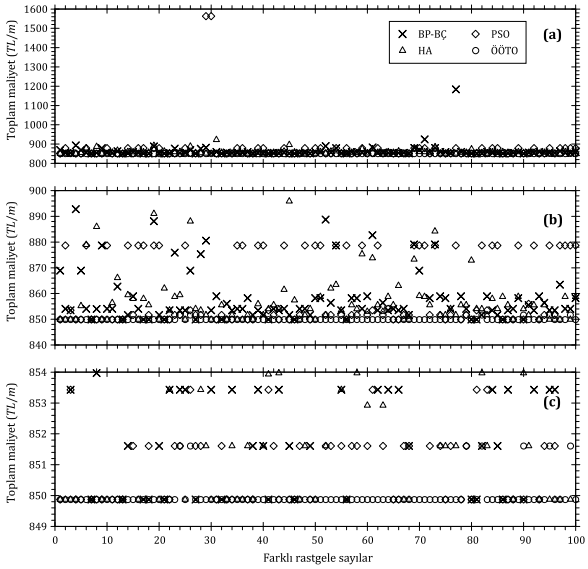
Tablo 3'te tasarım değişkenleri için optimizasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 3'te 100 bağımsız analizin sonucunda farklı algoritmalarla elde edilen minimum maliyet değerleri görülmektedir. Analiz sonuçlarına ait istatiksel veriler (en düşük maliyet, en yüksek maliyet, ortalama maliyet ve standart sapma değeri) ise Tablo 3'te özetlenmiştir. Optimizasyon sonuçlarına göre bütün algoritmalar ile benzer optimum (849.87 TL/m) değerler elde edilmesine karşın, standart sapma değerleri göz önüne alındığında ÖÖTO yönteminin hemen her analizde birbirine oldukça yakın değerler verdiği, özellikle BP-BÇ ve PSO algoritmalarının bağımsız bazı analizlerinde oldukça yüksek maliyetli tasarımların elde edildiği (sırasıyla yaklaşık 1183 TL/m ve 1562 TL/m) görülmektedir. Harmoni Arama algoritması ile elde edilen değerler nispeten kabul edilebilir olsa da ÖÖTO algoritmasına üstünlük sağlayamamaktadır. Metasezgisel algoritmaların güvenilirliği ve başarımının karşılaştırılmasında sıklıkla kullanılan bu istatiksel verilere göre ÖÖTO algoritması problemin çözümü için çalışmada kullanılan diğer algoritmalardan daha uygundur.

Tablo 2: Tasarım sabitleri.

Tanım	Simge	Birim	Değer
Gövde yüksekliği	H	m	5
Donatı akma dayanımı	f_y	MPa	420
Beton basınç dayanımı	f'_c	MPa	25
Beton örtüsü	c_c	mm	60
En büyük agrega çapı	D_{max}	mm	16
Donatı çeliğinin elastisite modülü	E_s	GPa	200
Donatı çeliğinin özkütlesi	γ_s	t/m³	7.85
Betonun özgül ağırlığı	γ_c	kN/m³	23.5
Beton birim maliyeti	C_c	TL/m³	111
Donatı çeliği birim maliyeti	C_s	TL/ton	1400
Kalıp birim maliyeti	C_f	TL/m²	14.05
Sürşarj yükü	q	kN/m²	10
Etkin yer ivmesi katsayısı	A_0	-	0.4
Dolgu eğimi	β	°	0
Dolgu zemininin içsel sürtünme açısı	ϕ_R	°	30
Taban zemininin içsel sürtünme açısı	ϕ_B	°	0
Dolgu zemininin özgül ağırlığı	γ_R	kN/m³	18
Dolgu zemininin kohezyonu	c_R	kPa	0
Taban zemininin kohezyonu	c_B	kPa	125
Duvar ön yüzündeki zeminin derinliği	D	m	0
Taban zemininin taşıma kapasitesi	q_U	kPa	250
Devrilme güvenliği katsayısı	$SF_{O,design}$	-	1.5
Kayma güvenliği katsayısı	$SF_{S,design}$	-	1.5
Deprem durumunda devrilme güvenliği katsayısı	$SF_{O,design}$	-	1.3
Deprem durumunda kayma güvenliği katsayısı	$SF_{S,design}$	-	1.1
Zemin taşıma kapasitesi katsayısı	$SF_{B,design}$	-	1.0

Tablo 3: Optimum tasarım sonuçları.

		BP-BÇ	HA	PSO	ÖÖTO
Kesit boyutları (m)	X_1	2.1	2.1	2.1	2.1
	X_2	1.2	1.2	1.2	1.2
	X_3	0.2	0.2	0.2	0.2
	X_4	0.5	0.5	0.5	0.5
	X_5	0.3	0.3	0.3	0.3
Donatı tasarımı (mm/mm)	X_6	ϕ18/145	ϕ18/145	ϕ18/145	ϕ18/145
	X_7	ϕ14/200	ϕ14/200	ϕ14/200	ϕ14/200
	X_8	ϕ14/205	ϕ14/205	ϕ14/205	ϕ14/205
	X_9	ϕ12/135	ϕ12/135	ϕ12/135	ϕ12/135
	X_{10}	ϕ12/185	ϕ12/185	ϕ12/185	ϕ12/185
	X_{11}	ϕ10/300	ϕ10/300	ϕ10/300	ϕ10/300
	X_{12}	ϕ10/200	ϕ10/200	ϕ10/200	ϕ10/200
	X_{13}	ϕ10/300	ϕ10/300	ϕ10/300	ϕ10/300
	X_{14}	ϕ14/80	ϕ14/80	ϕ14/80	ϕ14/80
	X_{15}	ϕ12/290	ϕ12/290	ϕ12/290	ϕ12/290
	X_{16}	ϕ10/200	ϕ10/200	ϕ10/200	ϕ10/200
	X_{17}	ϕ10/300	ϕ10/300	ϕ10/300	ϕ10/300
Toplam maliyet (TL/m)	*En düşük*	849.87	849.87	849.87	849.87
	En yüksek	1183.82	921.40	1562.76	851.61
	Ortalama	861.76	857.51	875.22	849.99
	Standart sapma	34.38	11.44	99.11	0.44

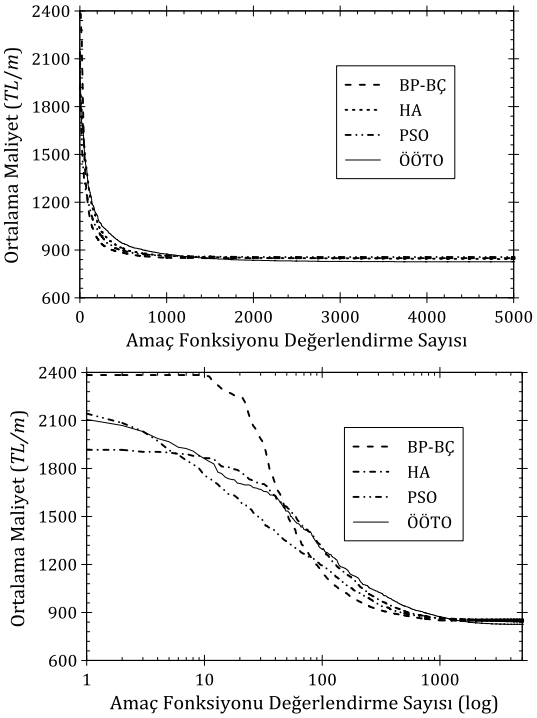


Şekil 3: 100 bağımsız optimizasyon işlemi ile elde edilen toplam maliyetlerin karşılaştırması.

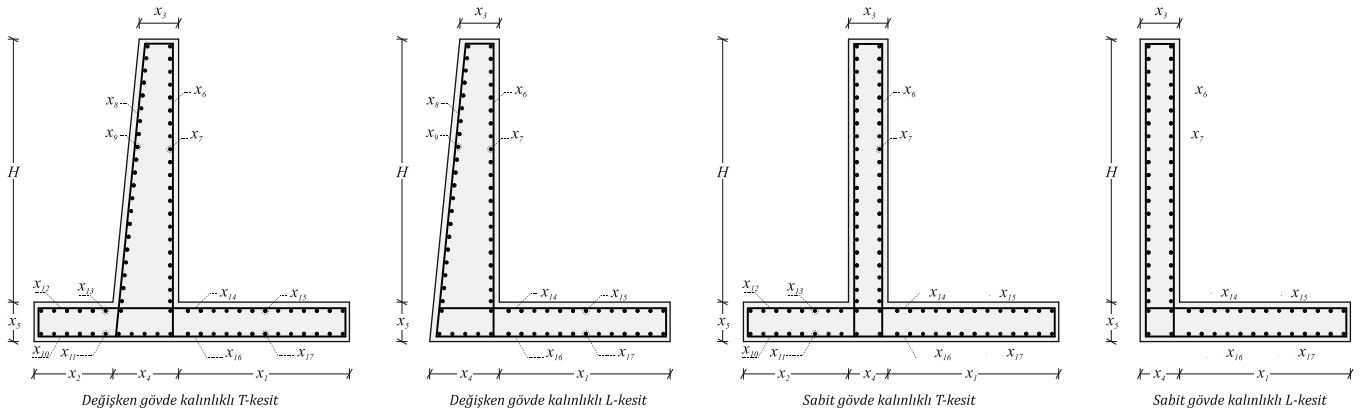
Yöntemlerin performanslarının karşılaştırılması amacıyla, maliyetin amaç fonksiyonu değerlendirme sayısına göre değişim grafikleri Şekil 4'te verilmiştir. Sonuçlara göre analizlerin başlangıcında mevcut yöntemlerde daha hızlı bir düşüş eğilimi olmasına rağmen ÖÖTO algoritmasının optimum sonuçları elde etmek için daha düşük amaç fonksiyonu değerlendirme sayısına ihtiyaç duyduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda önerilen yöntemin performans açısından da diğer yöntemlere kıyasla daha uygun olduğu söylenebilir.

3.2 Gövde kalınlığı ve ön ampatmanın toplam maliyete etkisi

İkinci örnekte, ön ampatmanın yapılabildiği durumların yanı sıra yapılamadığı durumları da göz önünde bulundurmak için T ve L olarak adlandırılan iki farklı duvar kesiti kullanılmıştır. Bu kesitler, duvar üst kalınlığı ile alt kalınlığının eşit (sabit kalınlıklı) ve farklı (değişken kalınlıklı) olması durumlarına göre modellenmiş, oluşturulan toplam dört farklı model için analizler yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır (Şekil 5). Optimizasyon sonuçlarına göre; T kesitli duvar tasarımları, L kesitli duvar tasarımlarına göre, değişken gövde kalınlıklı olmaları durumunda %18.2, sabit gövde kalınlıklı olmaları durumunda ise %21.7 daha düşük maliyetli sonuçlar vermektedir (Tablo 4).



Şekil 4: Maliyetin amaç fonksiyonu değerlendirme sayısına göre değişimi grafiği.



Şekil 5: Duvar kesitleri ve gövde kalınlıklarına göre oluşturulan modeller.

Tablo 4: Farklı modeller için optimum tasarım sonuçları.

	Tasarım Değişkenleri	Değişken Gövde Kalınlığı		Sabit Gövde Kalınlığı	
		T-kesit	L-kesit	T-kesit	L-kesit
Kesit boyutları (m)	X_1	2.1	3.65	1.95	3.95
	X_2	1.2	0	1.35	0
	X_3	0.2	0.2	0.45	0.45
	X_4	0.5	0.55	0.45	0.45
	X_5	0.3	0.4	0.3	0.45
Donatı tasarımı (*mm/mm*)	X_6	ϕ18/145	ϕ24/290	ϕ16/100	ϕ16/100
	X_7	ϕ14/200	ϕ14/200	ϕ12/145	ϕ12/145
	X_8	ϕ14/205	ϕ10/95	ϕ16/295	ϕ16/295
	X_9	ϕ12/135	ϕ10/85	ϕ14/205	ϕ14/205
	X_{10}	ϕ12/185	ϕ18/295	ϕ12/185	ϕ12/115
	X_{11}	ϕ10/300	ϕ10/300	ϕ10/300	ϕ10/300
	X_{12}	ϕ10/200	ϕ10/200	ϕ10/200	ϕ10/200
	X_{13}	ϕ10/300	ϕ10/300	ϕ10/300	ϕ10/300
	X_{14}	ϕ14/80	ϕ16/70	ϕ14/95	ϕ18/100
	X_{15}	ϕ12/290	ϕ12/195	ϕ10/240	ϕ14/300
	X_{16}	ϕ10/200	ϕ10/200	ϕ10/200	ϕ10/200
	X_{17}	ϕ10/300	ϕ10/300	ϕ10/300	ϕ10/300
Toplam maliyet (TL/m)	*En düşük*	849.87	1004.81	907.69	1104.61
En düşük maliyetli model ile arasındaki maliyet farkı		-	%18.2	%6.8	%29.9

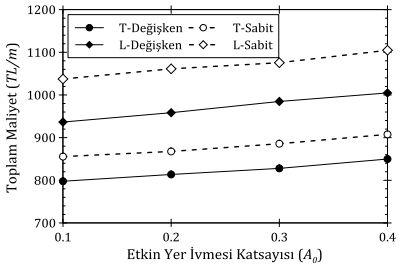
Kesitlerin gövde kalınlığı durumuna göre karşılaştırılması hâlinde, T kesitli duvarın alt ve üst kalınlıklarının farklı olması durumunda sabit kesite göre %6.8 daha düşük maliyet elde edilmektedir. Bu maliyet farkı L kesit için %9.9 olmaktadır.

3.3 Deprem bölgelerinin toplam maliyete etkisi

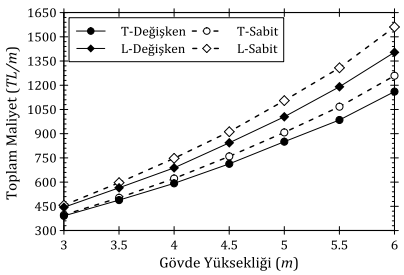
Üçüncü örnekte dört farklı etkin yer ivmesi katsayısı (0.1-0.4), T ve L kesit ile sabit ve değişken kalınlığa sahip kesitlere bağlı optimum sonuçlar elde edilmiştir (Tablo 5). Sonuçlar değerlendirdiğinde etkin yer ivmesi katsayının (deprem bölgesinin), optimum maliyetlere yaklaşık olarak %1.4 ilâ %7 arasında etkisi olduğu görülmektedir (Şekil 6). Çalışmada kullanılan modeller arasındaki maliyet farkı incelendiğinde, etkin yer ivmesi değişmesine rağmen oluşan maliyet farkı oranlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür.

3.4 Duvar yüksekliğinin toplam maliyete etkisi

Dördüncü örnekte ise yedi farklı duvar yüksekliğinin (3.5 m - 6.0 m) optimum sonuçlara etkisi önceki durumlara benzer şekilde T ve L kesitler ile sabit ve değişken kalınlığa sahip duvarlar için elde edilmiştir (Tablo 6). Optimizasyon sonuçları incelendiğinde, duvar yüksekliğinin artmasının toplam maliyete yansımasının %25 - %241 (3 m duvar yüksekliği referans alınmıştır) arasında parabolik (Şekil 7) arttığını ve artım miktarının L tipinde (6 m için %241) T'ye (6 m için %197) göre daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 6: Etkin yer ivmesi katsayısının toplam maliyete etkisi.



Şekil 7: Gövde yüksekliğinin toplam maliyete etkisi.

Tablo 5: Etkin yer ivmesi katsayısına göre optimum sonuçlar.

	Değişken Gövde Kalınlığı		Sabit Gövde Kalınlığı		
	T-kesit	L-kesit	T-kesit	L-kesit	
0.1	797.65	936.39	855.4	1037.58	Toplam maliyet (TL/m)
0.2	813.58	958.51	867.5	1061.18	
0.3	827.95	984.84	885.87	1075.41	
0.4	849.87	1004.81	907.69	1104.61	
0.1	-	%17.4	%7.2	%30.1	En düşük maliyetli model ile arasındaki maliyet farkı
0.2	-	%17.8	%6.6	%30.4	
0.3	-	%18.9	%7.0	%29.9	
0.4	-	%18.2	%6.8	%29.9	
0.1	-	-	-	-	Etkin yer ivmesi katsayısının maliyete etkisi
0.2	%2.0	%2.4	%1.4	%2.3	
0.3	%3.8	%5.2	%3.6	%3.7	
0.4	%6.6	%7.3	%6.1	%6.5	

Tablo 6: Farklı gövde yükseklikleri göre optimum sonuçlar.

	Değişken Gövde Kalınlığı		Sabit Gövde Kalınlığı		
	T-kesit	L-kesit	T-kesit	L-kesit	
3.0	390.85	443.66	396.68	456.90	Toplam maliyet (TL/m)
3.5	488.69	564.52	503.15	596.41	
4.0	592.46	687.87	622.52	747.17	
4.5	713.20	843.81	759.76	912.05	
5.0	849.87	1004.81	907.69	1104.61	
5.5	984.78	1190.54	1066.95	1307.89	
6.0	1160.79	1403.94	1258.73	1560.49	
3.0	-	%13.5	%1.5	%16.9	En düşük maliyetli model ile arasındaki maliyet farkı
3.5	-	%15.5	%3.0	%22.0	
4.0	-	%16.1	%5.1	%26.1	
4.5	-	%18.3	%6.5	%27.9	
5.0	-	%18.2	%6.8	%30.0	
5.5	-	%20.9	%8.3	%32.8	
6.0	-	%20.9	%8.4	%34.4	
3.0	-	-	-	-	Duvar yüksekliğinin maliyete etkisi
3.5	%25.0	%27.2	%26.8	%30.5	
4.0	%51.6	%55.0	%56.9	%63.5	
4.5	%82.5	%90.2	%91.5	%99.6	
5.0	%117.4	%126.5	%128.8	%141.8	
5.5	%152.0	%168.3	%169.0	%186.3	
6.0	%197.0	%216.4	%217.3	%241.5	

4 Sonuçlar

Çalışmada ÖÖTO algoritmasını temel alarak deprem yükleri etkisindeki konsol betonarme istinat duvarının optimum tasarımı incelenmiştir. Yöntemin güvenilirliği, performansı ve başarımını test etmek amacıyla, önerilen yöntem kullanılarak sayısal analizler yapılmış ve sonuçlar mevcut yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Optimizasyon sonuçlarına göre; ÖÖTO algoritmasının seçilen algoritmalara oranla daha güvenilir sonuçlar verdiği görülmüştür. Benzer şekilde, seçilen algoritmaların tamamı aynı minimum maliyet değerlerini elde

etmekle beraber, yakınsama açısından ÖÖTO algoritması daha uygun sonuçlar vermektedir.

Analizlerde ayrıca T ve L gibi farklı duvar tipleri, konsol duvar sabit ve değişken kesitli olması durumları, etkin yer ivmesi katsayısı ile konsol yüksekliği durumları altında analizler yapılmış ve problemin optimum tasarımı için sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre; en düşük maliyetli betonarme konsol istinat duvarı tasarımı, gövde kalınlığının değişken olması ve ön ampatmanla ilgili kısıtlama bulunmaması durumunda elde edilebilmektedir. Ön ampatmanla ilgili kısıtın, gövde kalınlığı ile ilgili kısıta göre maliyet üzerinde daha etkili olduğu söylenebilmektedir. Ancak ön ampatman yapmanın mümkün olmadığı durumlarda, maliyeti düşürmek için gövde kalınlığının değişken yapılması önerilmektedir. Etkin yer ivmesi katsayının değişmesinin ise her bir durum kendi içerisinde değerlendirildiğinde en fazla %7'lik bir maliyet artışına neden olduğu anlaşılmıştır. İstinat duvarı gövde yüksekliği arttıkça, duvar maliyetinin de parabolik olarak arttığı gözlenmiştir.

5 Kaynaklar

[1] Goldberg DE. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Boston, USA, Addion-Wesley, 1989.

[2] Kennedy J, Eberhart R. "Particle swarm optimization". *IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, WA, Australia, 27 November-1 December 1995.

[3] Kirkpatrick S, Gelatt CD Jr, Vecchi MP. "Optimization by simulated annealing". *Science*, 220(4598), 671-80, 1983.

[4] Dorigo M, Maniezzo V, Colorni A. "Ant system: Optimization by a colony of cooperation agents". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, 26(1), 29-41, 1996.

[5] Erol OK, Eksin I. "A new optimization method: Big Bang Big Crunch". *Advances in Engineering Software*, 37(2), 106-111, 2006.

[6] Geem ZW, Kim JH, Loganathan GV. "A new heuristic optimization algorithm: Harmony search". *Simulation*, 76(2), 60-68, 2001.

[7] Yang XS. "Firefly algorithms for multimodal optimization". *5th international conference on Stochastic algorithms*, Sapporo, Japan, 26-28 October 2009.

[8] Yang XS. "A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm". Editors: González JR, Pelta DA, Cruz C, Terrazas G, Krasnogor N, Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010), 65-74, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.

[9] Yang XS. "Flower pollination algorithm for global optimization". *11th International Conference on Unconventional Computing and Natural Computation*, Orléan, France, 3-7 September 2012.

[10] Rao RV, Savsani VJ, Vakharia DP. "Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems". *Computer-Aided Design*, 43(3), 303-315, 2011.

[11] Yepes V, Alcala J, Perea C, Gonzalez-Vidosa F. "A parametric study of optimum earth-retaining walls by simulated annealing". *Engineering Structures*, 30(3), 821-830, 2008.

[12] Ceranic B, Fryer C, Baines RW. "An application of simulated annealing to the optimum design of reinforced concrete retaining structures". *Computers & Structures*, 79(17), 1569-1581, 2001.

[13] Ahmadi-Nedushan B, Varaee H. "Optimal design of reinforced concrete retaining walls using a swarm ıntelligence technique". *The first International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering,* Stirlingshire, Scotland, 1-4 September 2009.

[14] Kayhan AH, Demir A. "Betonarme konsol istinat duvarlarının parçacık sürü optimizasyonu ile optimum tasarımı". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(3), 129-135, 2016.

[15] 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.

[16] Camp CV, Akin A. "Design of retaining walls using big bang-big crunch optimization". *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 138(3), 438-448, 2012.

[17] Chau KW, Albermani F. "Knowledge-based system on optimum design of liquid retaining structures with genetic algorithms". *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 129(10), 1312-1321, 2003.

[18] Sheikholeslami R, Gholipour Khalili B, Zahrai SM. "Optimum cost design of reinforced concrete retaining walls using hybrid firefly algorithm". *International Journal of Engineering and Technology*, 6(6), 465-470, 2014.

[19] Temur R, Bekdaş G. "Teaching learning-based optimization for design of cantilever retaining walls". *Structural Engineering and Mechanics*, 57(4), 763-783, 2016.

[20] Aydoğdu İ. "Comparison of metaheuristics on multi objective (Cost & C02) optimization of RC cantilever retaining walls". *Pamukkale Universitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(3), 221-231, 2017.

[21] 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.

[22] Türk Standartları Enstitüsü. "Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları", Ankara, Türkiye, TS500, 2000.

[23] Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. "Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik", Ankara, Türkiye, 2007.

[24] Togan V. "Design of planar steel frames using Teaching-Learning Based Optimization". *Engineering Structures*, 34(225-232, 2012.

[25] Degertekin SO, Hayalioglu MS. "Sizing truss structures using teaching-learning-based optimization". *Computers & Structures*, 119, 177-188, 2013.

[26] Dede T, Togan V. "A teaching learning based optimization for truss structures with frequency constraints". *Structural Engineering and Mechanics*, 53(4), 833-845, 2015.

[27] Dede T. "Optimum design of grillage structures to LRFD-AISC with teaching-learning based optimization". *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48(5), 955-964, 2013.

[28] Sarıbaş A, Erbatur F. "Optimization and Sensitivity of Retaining Structures". *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(8), 649-656, 1996.