METAHEURİSTİK OPTİMİZASYON ALGORİTMASI TABANLI BETONARME KONSOL İSTİNAT DUVARI STABİLİTE VE TASARIM OTOMASYONU

Automation of Reinforced Concrete Cantilever Retaining Wall Stability and Design Based on Metaheuristic Optimization Algorithm

Abdulkadir ÖZCAN[1], Esra URAY[2], Vahdettin DEMİR[3]

ÖZET

Betonarme konsol istinat duvarlarının boyutlandırılmasında karşılaşılan çok kısıtlı optimizasyon problemini ele almak amacıyla, Harmoni Arama (HS) meta-sezgisel algoritması bir geoteknik yazılımın grafik kullanıcı arayüzü (GUI) otomasyonuyla bütünleştirilmiştir. Duvar boyutu olarak tanımlanan sekiz geometrik değişken, dört duvar kritik kesitinde donatı alanı ve duvar arkasındaki yeraltı su seviyesi olmak üzere 13 tasarım değişkeni ile tasarım uzayı oluşturulmuştur. Arama uzayı, önceden hesaplanabilen geometrik ve betonarme kısıtların gömüldüğü bağımlı bir uzay olarak kurulmuş; bu kısıtları ihlal eden tasarımlar ceza terimiyle elenmek yerine hiç üretilmemiştir. İstanbul ili referans alınarak üç zemin sınıfı (ZA, ZC, ZE), üç duvar yüksekliği (4, 6, 8 m) ve üç sürşarj düzeyi (0, 10, 20 kPa) birleştirilerek 27 senaryo oluşturulmuş; her senaryoda 5000 duvar tasarımı değerlendirilmiştir. Kayma, devrilme, taşıma gücü ve toptan göçme güvenlik katsayıları ile kritik kesitlerdeki moment ve kesme kapasite oranları, 1,0 sınır değerine göre sınırlayıcı olarak dikkate alınmıştır. İstinat duvarının stabilite kriterlerinin en düşük olduğu kritik denge tasarımı amaç fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. ZA ve ZE sınıflarında tüm senaryolar için geçerli çözümler elde edilirken, spektral ivmesi en yüksek olan ZC sınıfında 6 m ve üzeri yüksekliklerde hiçbir geçerli tasarım bulunamamıştır. Geçerli çözüm oranı en elverişli senaryoda %64,76, en zorlayıcı senaryoda %26,16 düzeyinde kalmıştır.

Anahtar Kelimeler: İstinat duvarı, optimizasyon, harmoni arama algoritması, GUI otomasyonu, yeraltı suyu seviyesi, şev stabilitesi

ABSTRACT

In order to address the highly constrained optimization problem encountered in the sizing of reinforced concrete cantilever retaining walls, the Harmony Search (HS) meta-heuristic algorithm has been integrated with the graphical user interface (GUI) automation of a geotechnical software. Eight geometric variables defined as wall dimensions, four reinforcement areas at critical sections of the wall, and the groundwater level behind the wall were used to create the design space with 13 design variables. The search space was established as a dependent space in which pre-computable geometric and reinforced concrete constraints are embedded; designs violating these constraints were never generated rather than being eliminated by a penalty term. Taking Istanbul province as a reference, three soil classes (ZA, ZC, ZE), three wall heights (4, 6, 8 m), and three surcharge levels (0, 10, 20 kPa) were combined to create 27 scenarios; 5000 wall designs were evaluated in each scenario. The sliding, overturning, bearing capacity, and slope stability safety factors, as well as the moment and shear capacity ratios at the critical sections were considered as constraints with a limit value of 1.0. The critical equilibrium design, where the stability criteria of the retaining wall are at their lowest, has been defined as the objective function. While valid solutions were obtained for all scenarios in the ZA and ZE classes, no valid design was found for heights of 6 m and above in the ZC class, which has the highest spectral

[1] İnşaat Yüksek Mühendisi, KTO Karatay Üniversitesi, a.kdr.ozcn@gmail.com (Sorumlu yazar)
[2] Dr. Öğr. Üyesi, KTO Karatay Üniversitesi, esra.uray@karatay.edu.tr
[3] Doç. Dr., KTO Karatay Üniversitesi, vahdettin.demir@karatay.edu.tr

acceleration. The valid solution rate remained at 64.76% in the most favorable scenario and 26.16% in the most challenging scenario.

Keywords: Retaining wall, optimization, harmony search algorithm, GUI automation, groundwater level, slope stability

1. GİRİŞ

İstinat duvarları; zemin kütlelerindeki kot farklarını güvenli biçimde karşılamak, şev göçmelerini engellemek ve arazi düzenlemesine olanak sağlamak amacıyla inşa edilen temel geoteknik yapılar arasındadır. Karayolu ve demiryolu güzergâhları, köprü kenar ayakları ve derin bodrum kazıları başta olmak üzere pek çok mühendislik uygulamasında bu yapılara gereksinim duyulmaktadır. Bununla birlikte zemin özelliklerinin doğal değişkenliği, yeraltı suyu koşullarındaki belirsizlikler ve sismik etkiler, istinat duvarı tasarımını çok değişkenli ve zorlu bir mühendislik problemi hâline getirmektedir. Betonarme konsol istinat duvarının boyutlandırılması; devrilme, kayma, taşıma gücü ve toptan göçme tahkiklerinin yanı sıra kritik kesitlerde betonarme kesme ve eğilme kapasitesi kontrollerinin de eş zamanlı sağlanmasını gerektirir. Geometrik değişkenlerin birbirine bağımlı olması ve donatı seçiminin ayrık bir yapı taşıması, arama uzayını hem geniş hem de süreksiz kılmaktadır. Tasarım değişkenlerinin olası kombinasyonlarından oluşan tasarım kümesi milyonlarca aday çözüm içerecek büyüklüğe ulaşmakta; bu büyüklükteki bir kümede tüm kısıtları aynı anda sağlayan ve optimum çözüme deneme-yanılma yoluyla ulaşmak pratik olarak mümkün olmamaktadır. Bu yönüyle dayanma duvarı boyutlandırması, çok sayıda kısıt altında amaç fonksiyonunun en iyilendiği tipik bir optimizasyon problemi niteliği taşımaktadır. Bu sebeple, literatürde geoteknik teorilere dayalı olarak kurulan matematiksel modelleri temel alan, güvenli ve hızlı alternatif çözüm yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu ihtiyaca yanıt olarak, en ekonomik ve güvenli tasarıma kısa sürede ulaşmayı mümkün kılan meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları güçlü bir alternatif hâline gelmiştir. Nitekim Afzal vd. (2020), bu tür gerçek mühendislik problemlerinin çözümüne yönelik olarak literatürde yüzlerce istinat duvarı tasarım optimizasyonu çalışmasının yürütüldüğünü raporlamıştır. Kaveh ve Abadi (2011), harmoni arama tabanlı algoritmaları betonarme konsol istinat duvarlarının minimum maliyetli tasarımına uygulayarak yöntemin bu problem sınıfındaki etkinliğini ortaya koymuştur. Uray vd. (2019), Harmoni Arama algoritmasını konsol duvarın ayrık optimum tasarımına uygulamış; minimum duvar ağırlığını amaç fonksiyonu olarak seçerek duvar yüksekliği ve içsel sürtünme açısının tasarım üzerindeki baskın rolünü göstermiştir. Kalemci vd. (2020), Gri Kurt Optimizasyonu algoritmasıyla ACI 318-05 gerekliliklerini gözeterek kayma dişli betonarme konsol duvar tasarımını ele almış; geoteknik kısıtları devrilme, kayma ve taşıma gücü, yapısal kısıtları ise kritik kesit moment ve kesme kapasiteleri olarak tanımlamıştır. Kayabekir vd. (2020), Harmoni Arama algoritmasını kullanarak betonarme istinat duvarlarının maliyet ve CO_2 emisyonunu birlikte minimize eden çok amaçlı bir optimizasyon gerçekleştirmiş; kazı derinliği ve dış yük (surcharge) değişimlerinin temel genişliği üzerindeki etkilerini incelemiştir. Tayfur ve Kamiloğlu (2024) ise iyileştirilmiş Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon yaklaşımını konsol duvar tasarımına uygulayarak, geliştirilen algoritmanın kısıt sınırlarına daha yakın ve dolayısıyla daha ekonomik çözümler ürettiğini raporlamıştır.

Literatürdeki optimizasyon odaklı çalışmalar incelendiğinde, amaç fonksiyonunun çoğunlukla minimum maliyet ya da minimum ağırlık olarak seçildiği (Akin ve Saka, 2010; Khajehzadeh vd., 2010; Uray vd., 2019), toptan göçme tahkikinin ise hesaplama yükü nedeniyle sıklıkla kapsam dışında bırakıldığı görülmektedir (Gandomi vd., 2015; Ghazavi ve Bazzazian Bonab, 2011). Ayrıca yaygın ticari geoteknik yazılımların uygulama

programlama arayüzü (API) sunmaması, bu araçların optimizasyon döngülerine doğrudan bağlanmasını güçleştirmektedir. Benzer şekilde, duvar arkasındaki yeraltı su seviyesinin optimizasyon sürecine bir tasarım değişkeni olarak dâhil edildiği çalışmalar da oldukça sınırlıdır. İklim değişikliğinin neden olduğu aşırı ve yoğun yağışlar; Etiyopya, Mısır, Avrupa ve Brezilya gibi dünyanın birçok bölgesinde taşkın kaynaklı can ve mal kayıplarını artırmıştır (Yaman vd., 2024). Yoğun yağışların tasarımda dikkate alınmaması ve drenaj kanallarındaki tıkanıklıklar nedeniyle duvar arkasında yükselen suyun tahliye edilememesi, istinat duvarı stabilitesini olumsuz etkileyen başlıca etkenlerdendir (Yenginar ve Özkan, 2023). Literatürde, farklı yeraltı su seviyeleri için istinat duvarının sismik yükler altındaki davranışı incelenmiştir (Köktan vd., 2019). Barbakan boruları ve drenaj gövdelerini içeren uygun bir drenaj tasarımının duvara etkiyen basınçları önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir (Lu vd., 2021). Bu çalışmada optimizasyon analizlerinde duvar arkasındaki yeraltı su seviyesi bir tasarım değişkeni olarak dikkate alınmış ve yeraltı su seviyesindeki değişimin istinat duvarının tüm stabilite tahkiklerine etkisi araştırılmıştır.

Bu çalışmada, betonarme konsol istinat duvarlarının boyutlandırılmasındaki çok kısıtlı optimizasyon problemi ele alınmış; Harmoni Arama (HS) algoritması bir geoteknik yazılımın GUI otomasyonu ile bütünleştirilerek, duvar arkasındaki yeraltı su seviyesinin de tasarım değişkeni olarak yer aldığı 13 değişkenli bir arama uzayı kurulmuştur. İstanbul ili referans alınarak üç zemin sınıfı, üç duvar yüksekliği ve üç sürşarj düzeyinin birleşiminden oluşturulan 27 senaryoda kritik denge tasarımları belirlenmiş; baskın göçme mekanizmaları incelenerek konsol duvar tipinin sismik talebe bağlı uygulanabilirlik sınırları nicel olarak ortaya konulmuştur.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Tasarım Senaryoları

Gerçekçi sismik koşulları temsil etmek üzere İstanbul ili referans alınmış ve Türkiye Deprem Tehlike Haritası (TDTH, 2018) verileri esas alınarak kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS}), ZA, ZC ve ZE zemin sınıfları için sırasıyla 0,97, 1,46 ve 1,13 olarak belirlenmiştir. Duvar yüksekliği (4, 6, 8 m), sürşarj yükü (0, 10, 20 kPa) ve zemin sınıfının (ZA, ZC, ZE) üçer kademeli kombinasyonundan 27 özgün tasarım senaryosu elde edilmiştir. Analizlerde kullanılan zemin parametreleri ve sismik tasarım parametresi Tablo 1'de verilmiştir. Statik itkiler Coulomb teorisi (Coulomb, 1776) ile, dinamik ek itkiler ise Mononobe-Okabe (Mononobe ve Matsuo, 1929; Okabe, 1924) yöntemiyle hesaplanmıştır (TBDY, 2018). Duvar-zemin sürtünme açısı $\delta = 2\varphi/3$ olarak alınmış; yatay ve düşey statik-eşdeğer deprem katsayıları, TBDY (2018) Denklem 16.22 uyarınca yer değiştirmesine izin verilen duvar kabulüyle r = 2 alınarak Eşitlik 1 ile belirlenmiştir.

$$k_h = 0{,}4\, S_{DS}/r = 0{,}2\, S_{DS}\,, \quad k_v = \pm 0{,}5\, k_h \tag{1}$$

DD-2 deprem düzeyinde (50 yılda aşılma olasılığı %10) toplam aktif itki (P_{AE}) Mononobe-Okabe yöntemiyle hesaplanmış; statik itkiye (P_A) eklenen dinamik ek itki (Eşitlik 2) analiz yazılımında dinamik basınç artışı diyagramının ağırlık merkezinde (üçgen dağılımda tabandan H/3 yüksekliğinde) etkitilmiş, pasif direncin azalması K_{PE} ile dikkate alınmıştır. Duvar arkasındaki su, zemin boşluklarında zeminle birlikte hareket eden sınırlı su olarak kabul edilmiş; su tablası altındaki zeminde doygun/batık birim hacim ağırlıklara göre değiştirilmiş sismik açı kullanılmıştır. Bu kabulde ayrı bir hidrodinamik su basıncı oluşmadığından su etkisi, hidrostatik basınç ve zeminin efektif ağırlığı üzerinden dikkate alınmıştır.

$$\Delta P_{AE} = P_{AE} - P_A\,, \quad P_{AE} = \tfrac{1}{2}\,\gamma\,H^2\,(1 - k_v)\,K_{AE} \tag{2}$$

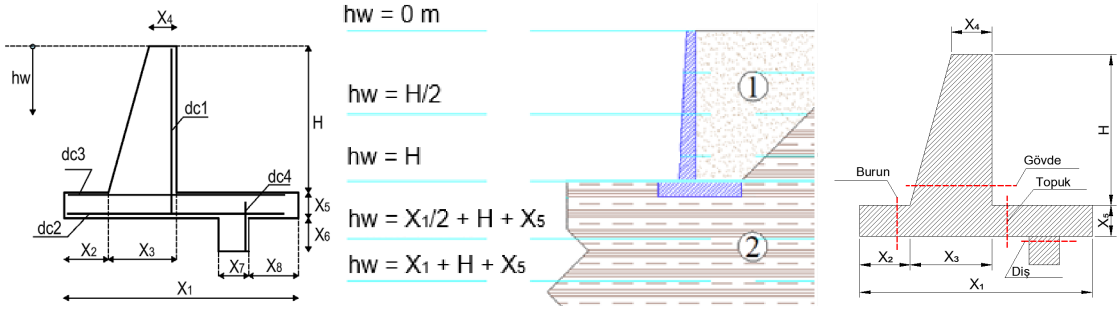
Zemin sınıfları TBDY (2018) Tablo 16.1 tanımlarına karşılık gelmektedir (ZA: $V_{S30} > 1500$ m/s; ZC: $V_{S30} = 360$–760 m/s, $(N_{60})_{30} > 50$, $(c_u)_{30} > 250$ kPa; ZE: $V_{S30} < 180$ m/s, $(N_{60})_{30} < 15$, $(c_u)_{30} < 70$ kPa). Parametreler ilgili zemin grupları için önerilen tipik değerlere dayanmaktadır; NAVFAC (1986), GW için $\varphi > 38°$, SW için $\varphi \approx 38°$, CL için $\varphi = 28°$ ve $c \approx 13$ kPa (doygun) – 86 kPa (sıkıştırılmış) vermektedir. ZC için seçilen $\varphi = 34°$ SW için verilen değerin altında olup güvenli taraftadır. ZE için seçilen $c = 40$ kPa bu aralıkta ve $(c_u)_{30} < 70$ kPa sınırının altında olmakla birlikte üst bölgeye yakın olması sebebiyle ZE zemin sınıfı için elde edilen sonuçlar bu kabul gözetilerek yorumlanmıştır.

Tablo 1. Analizlerde kullanılan zemin ve sismik tasarım parametreleri (NAVFAC, 1986; TBDY, 2018; TDTH, 2018)

Parametre	ZA	ZC	ZE	Geri dolgu
Kohezyon, c (kPa)	0	0	40	0
İçsel sürtünme açısı, φ (°)	38	34	28	40
Birim ağırlık, γ (kN/m³)	26	20,4	17,4	21
Doygun birim ağırlık, γ_{sat} (kN/m³)	26	20,4	18,2	21
Zemin/kaya türü (USCS)	Kaya	SW	CL	GW
S_{DS} (TDTH, 2018)	0,97	1,46	1,13	sınıfa göre
$k_h = 0{,}2 \cdot S_{DS}$	0,194	0,292	0,226	sınıfa göre

2.2. Tasarım Değişkenleri ve Arama Uzayı

Optimizasyon probleminde toplam 13 tasarım değişkeni tanımlanmıştır: toplam temel genişliği (X_1), ön çıkma genişliği (X_2), alt gövde kalınlığı (X_3), üst gövde kalınlığı (X_4), temel kalınlığı (X_5), diş kalınlığı (X_6), diş genişliği (X_7), dişin duvar arkasına mesafesi (X_8), dört kritik kesitteki donatıyı temsil eden ayrık donatı kodları (dc_1–dc_4) ve zemin yüzeyinden ölçülen yeraltı su seviyesi derinliği (h_w). Tanımlanan tasarım değişkenleri Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir. Tüm geometrik değişkenler metre cinsinden olup X_7 ve X_8 yalnızca dişli tasarımlarda ($X_6 > 0$) etkindir. Her değişken, alt sınırdan artış miktarıyla ilerleyen ayrık bir değerler kümesinden seçilmekte; üst sınırlar diğer değişkenlere bağımlı olduğundan bu kümeler her aday tasarım için yeniden oluşturulmaktadır.



Şekil 1. Optimizasyon probleminde kullanılan tasarım değişkenleri

Geometrik değişkenler birbirinden bağımsız olmayıp, mühendislik açısından tutarsız geometrilerin üretilmesini engellemek amacıyla birbirine bağlı alt ve üst sınırlarla tanımlanmıştır (Uray vd., 2021). Bu bağımlılıklar özel örnekleyici sınıfları aracılığıyla önceden filtrelenmiş ayrık değer kümelerine dönüştürülmüş; böylece algoritma hiçbir iterasyonda fiziksel olarak uygulanamaz bir duvar tasarımı önermemiştir. Arama uzayının tanımı Tablo 2'de özetlenmektedir.

Tablo 2. Tasarım değişkenleri ve arama uzayı tanımları

Değişken	Alt sınır	Artış	Üst sınır
X_1	0,30H	0,05H	10,00 m
X_2	0,15X_1	0,05X_1	min (X_1 − 0,30 m; 0,45X_1)
X_3	0,30 m	0,05 m	min (X_1 − X_2; 0,90 m)
X_4	0,30 m	0,05 m	X_3
X_5	maks (0,06H; X_3)	0,01H	0,15H
X_6	0	0,05X_5	1,20X_5
X_7	maks (0,05X_1; 0,30 m)	0,05X_1	0,30X_1
X_8	0	0,05X_1	min (X_1 − X_7 − 0,01 m; 0,70X_1)
dc_1–dc_4	0	1	455
h_w	0, H/2, H, X_1/2+H+X_5, X_1+H+X_5	—	—

Duvar arkasındaki yeraltı su seviyesi, hidrostatik basınçları ve efektif gerilmeleri doğrudan etkilediğinden ayrı bir tasarım parametresi olarak ele alınmıştır. Her senaryoda beş farklı su derinliği taranmıştır: su tablasının zemin yüzeyinde bulunduğu en olumsuz durum ($h_w = 0$), duvar yarı yüksekliğinde ($h_w = H/2$) ve duvar temel kotu seviyesinde ($h_w = H$) bulunduğu durumlar ile iki derin seviye ($h_w = X_1/2 + H + X_5$ ve $h_w = X_1 + H + X_5$). Betonarme değişkenleri, kritik kesitlerdeki donatı çapı (ϕ_b) ve donatı adedi (n) kombinasyonlarını temsil eden dört ayrık kod (dc_1–dc_4) ile tanımlanmıştır. Bu kodlar sırasıyla gövde ana donatısını, ön çıkma (ayak) ek donatısını, arka çıkma (topuk) ek donatısını ve kayma dişi donatısını ifade etmektedir. Gövde donatısı her tasarımda etkin iken, ön çıkma ve arka çıkma bölgelerinde yükün gövdeden temele 45° açıyla yayılabildiği kısa çıkıntı durumlarında ek donatıya gerek kalmamaktadır; bu nedenle dc_2 yalnızca $X_2 > X_5/2$, dc_3 yalnızca $X_1 − X_2 − X_3 > X_5/2$ ve dc_4 yalnızca $X_6 > 0$ koşulu sağlandığında devreye girmekte, aksi hâlde ilgili kod sıfır değerini almaktadır. Donatı çapı için 6,30–57,30 mm aralığında on iki ayrık değer, metre başına donatı adedi için ise 4–41 aralığındaki tamsayı değerler kullanılmış; böylece $12 × 38 = 456$ kombinasyonluk bir donatı havuzu oluşturulmuştur. Donatı kodları; alt sınırı 0, artış miktarı 1 ve üst sınırı 455 olan ayrık tamsayı değişkenler olarak tanımlanmıştır.

2.3. Bağımlı Tasarım Uzayı Yaklaşımı

Meta-sezgisel optimizasyonda sınırlayıcılar (kısıtlar) geleneksel olarak ceza fonksiyonu yaklaşımıyla ele alınır: algoritma değişkenlerin tüm tanım aralığından serbestçe örnekleme yapar, üretilen aday değerlendirildikten sonra kısıtları ihlal ediyorsa cezalandırılır veya elenir. Uygulanabilir bölgenin tanım uzayı içinde küçük bir alt küme oluşturduğu problemlerde bu yaklaşım, hesaplama bütçesinin büyük bölümünün baştan kabul edilemeyecek tasarımlara harcanmasına yol açar. Ayrıca ceza terimlerinin oluşturduğu süreksizlikler arama yüzeyinde yapay platolar meydana getirerek erken yakınsamaya neden olabilir. Bu çalışmada, önceden hesaplanabilen kısıtların ceza terimi yerine doğrudan tasarım uzayının tanımına gömüldüğü bir yaklaşım benimsenmiştir. Değişkenler tanım sırasına göre örneklenmekte ve her değişkenin alt-üst sınırları, kendisinden önce atanmış değişkenlerin değerlerine bağlı fonksiyonlar olarak tanımlanmaktadır. Tablo 2'de verilen bağımlılıklar bu şekilde kodlanmıştır; örneğin ön çıkma genişliği X_2 hiçbir zaman temel genişliği X_1 ile uyumsuz bir değer alamaz, çünkü bu değer örnekleme aşamasında zaten üretilmemektedir. Aynı ilke donatı kodları için de geçerlidir: ACI esaslı oran, süneklik ve aralık koşulları örnekleyici sınıfların içine gömülmüş olup, bu koşulları sağlamayan kombinasyonlar hiçbir iterasyonda seçilmemektedir. Böylece kısıt ihlali sonradan cezalandırılan bir durum olmaktan çıkıp, yapısal olarak imkânsız hâle gelmektedir. Ceza terimi yalnızca önceden hesaplanamayan, yani ancak stabilite analizi sonrasında bilinebilen kriterler için kullanılmaktadır. Bu mimari, geliştirilen ve açık erişimle yayımlanan HSDS kütüphanesinde genelleştirilmiş biçimde uygulanmıştır (Özcan, 2026).

2.4. Kısıt Sistemi ve Amaç Fonksiyonu

Kısıt sistemi; kayma (F_s), devrilme (F_o), taşıma gücü (F_{bc}) ve toptan göçme (F_{ss}) güvenlik katsayıları ile gövde, ön çıkma (burun), arka çıkma (topuk) ve diş kritik kesitlerindeki moment ve kesme kapasite oranları olmak üzere on farklı stabilite kriterinden (N_g) oluşmaktadır. Geoteknik ve yapısal sınırlayıcılara ait matematiksel modeller, literatürdeki çalışmalar esas alınarak tanımlanmış (Özcan, 2025; Uray vd., 2022) ve kısıtların genel gösterimi Eşitlik 3'te verilmiştir.

$$g_j = maks(1 - \psi_i, 0), \qquad i = 1,2,3, \dots, N_g \tag{3}$$

Burada ψ_i, i'inci stabilite kriterine ait değeri göstermekte olup; geoteknik tahkiklerde güvenlik katsayısına (F_s, F_o, F_{ss}, F_{bc}), betonarme kesit kontrollerinde ise kapasite oranına ($\mu_{M,k}$, $\mu_{V,k}$) karşılık gelmektedir. Buna göre $\psi \geq 1{,}0$ koşulu ilgili kriterin sağlandığını gösterir. Kriter seti; dört geoteknik tahkik (kayma, devrilme, taşıma gücü, toptan göçme) ile gövde, burun ve topuk kesitlerindeki moment ve kesme kontrollerinden oluşmakta ($N_g = 10$) olup dişli tasarımlarda ($X_6 > 0$) diş kesitine ait moment ve kesme kontrolleri de sisteme eklenmektedir ($N_g = 12$). $\mu_{M,k}$, k kesitindeki moment kapasite oranını ($\phi M_{n,k}/M_{u,k}$), $\mu_{V,k}$ ise kesme kapasite oranını ($\phi V_{n,k}/V_{u,k}$) ifade etmektedir. Burada M_n ve V_n nominal dayanımları, ϕ ACI 318 (2005) uyarınca eğilme için 0,90 ve kesme için 0,75 alınan dayanım azaltma katsayısını, M_u ve V_u ise faktörlü yüklerden elde edilen tasarım etkilerini göstermektedir. k alt simgesi gövde, burun, topuk, diş kesitlerini belirtmektedir. Her bir sınırlayıcı için ihlal değeri Eşitlik 4 ile hesaplanmaktadır:

$$P(\vec{X}) = \sum_{j=1}^{N_g} g_j(\vec{X}), \qquad x_j^{min} \leq x_j \leq x_j^{maks}, \forall x_j \in \vec{X} \tag{4}$$

Optimizasyon analizlerinde, tüm sınırlayıcıların sağlandığı ve amaç fonksiyonu değerinin minimum olduğu tasarım, kritik denge noktasındaki optimum duvar tasarımı olarak araştırılmıştır. Amaç fonksiyonu Eşitlik 5'te verilmiştir:

$$f(\vec{X}) = \sum_{j=1}^{N_g} \psi_i \,/\, N_g \tag{5}$$

Bunlara ek olarak dışmerkezliğin çekirdek sınırını aşmaması ($e \leq X_1/6$) ve tüm kritik kesitlerde donatı oranının minimum değeri sağlaması ($\rho \geq \%0{,}13$) aranmaktadır. Toptan göçme güvenlik katsayısı (F_{ss}), dairesel kayma yüzeyleri üzerinde Bishop basitleştirilmiş dilim yöntemiyle hesaplanmıştır (Bishop, 1955). Taşıma gücü tahkikinde nihai taşıma gücü Meyerhof (1963) genel bağıntısıyla (şekil, derinlik ve yük eğikliği katsayıları dâhil) hesaplanmıştır. Toptan göçme analizinin hesaplama maliyetini azaltmak amacıyla, GUI otomasyonuyla üretilen veri seti üzerinde eğitilen makine öğrenmesi tabanlı bir vekil (surrogate) model kullanılmıştır.

2.5. Harmoni Arama Algoritması ve GUI Otomasyonu

Harmoni Arama, müzisyenlerin doğaçlama sürecinden esinlenen ve birçok gerçek mühendislik tasarım probleminde başarıyla uygulanmış popülasyon tabanlı bir meta-sezgisel yöntemdir (Geem vd., 2001). Algoritmada tasarım değişkeni değerleri, müzisyenin zihnindeki nota havuzuna karşılık gelen tasarım uzayından seçilmekte ve harmoni belleği (HM) matrisinde saklanmaktadır. Yeni çözüm üretimi; harmoni belleğinden seçim, perde ayarı ve rastgele seçim mekanizmalarına dayanmaktadır. Yöntem; parametrelerin

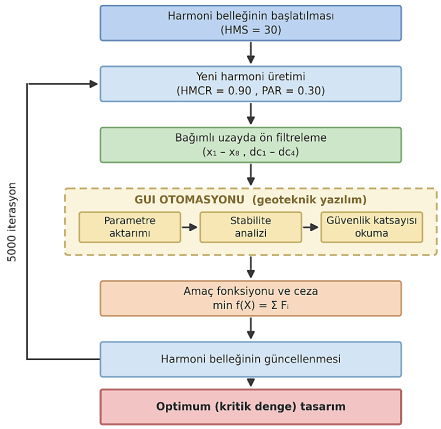
belirlenmesi ve HM matrisinin rastgele oluşturulması, bu mekanizmalarla yeni harmonilerin üretilmesi, daha iyi çözüm bulunduğunda bellekteki en kötü çözümün yenisiyle değiştirilmesi ve maksimum iterasyon sayısına ulaşılana kadar bu döngünün yinelenmesi adımlarıyla işlemektedir (Uray vd., 2022). Bu çalışmada algoritma parametreleri, literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak harmoni bellek boyutu HMS = 30, harmoni bellek değerlendirme oranı HMCR = 0,90, perde ayarlama oranı PAR = 0,30 ve maksimum iterasyon sayısı 5000 olarak seçilmiştir. Böylece her senaryoda 5000 eşsiz tasarım değerlendirilmiştir.

Çalışmanın özgün katkılarından biri, API altyapısı bulunmayan geoteknik yazılımın masaüstü GUI otomasyonu ile optimizasyon döngüsüne bağlanmasıdır. Python otomasyon kütüphaneleri kullanılarak geliştirilen sistem; aday tasarım parametrelerini yazılım giriş alanlarına aktarmakta, stabilite analizlerini başlatmakta, güvenlik katsayılarını sonuç ekranından okumakta ve bu değerleri optimizasyon döngüsüne geri beslemektedir. Tekrarlanan tasarımların yeniden hesaplanmasını önlemek amacıyla sonuçlar bellekte önbelleğe alınmaktadır. Sürecin bütününe ait akış şeması Şekil 2'de verilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

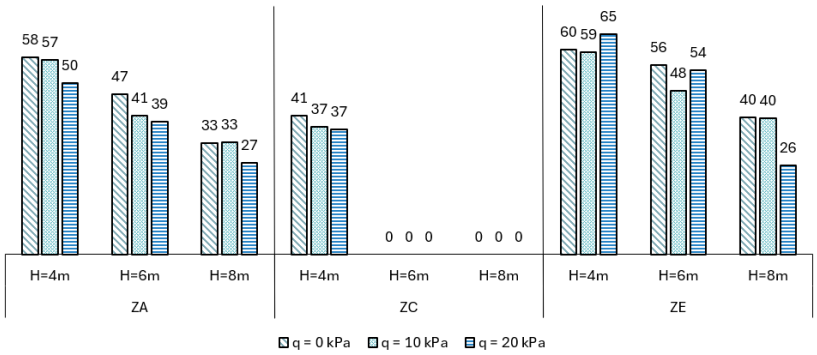
3.1. Optimizasyon Analizlerinde Geçerli Çözüm Oranları

Her senaryoda değerlendirilen 5000 tasarım içinde stabilite kriterlerinin tamamını sağlayan çözümlerin oranı Şekil 3'te verilmiştir. Bu oran, tasarım uzayının kullanılabilir bölümünü nitelendiren bir uygulanabilirlik ölçütüdür; düşük değerler, tüm stabilite kriterlerini eş zamanlı sağlayan duvar tasarımlarının ilgili senaryoda azaldığını göstermektedir.



Şekil 2. Harmoni Arama algoritması ve GUI otomasyonunun bütünleşik akış şeması

Önerilen yaklaşımın temel avantajı, tüm stabilite kriterlerinin her aday tasarım için otomatik kontrol edilerek geçerli çözümlerin elle ulaşılması güç bir tarama hacmi içinden sistematik biçimde elde edilebilmesidir. Şekil 3 genelinde duvar yüksekliğinin artması geçerli çözüm oranını belirgin biçimde düşürmektedir. ZA sınıfında oran 4 m için %58 iken 8 m için %27'ye inmekte; ZE sınıfında ise %60'tan %26'ya gerilemektedir. Sürşarj yükünün etkisi yükseklik kadar baskın olmamakla birlikte, çoğu durumda artan sürşarj oranı azaltmaktadır. ZE sınıfının 4 m senaryolarında sürşarjın oranı yükseltmesi ise, bu sınıfta düşey yükün kayma ve devrilme dengesine yaptığı olumlu katkının hidrostatik ve sismik etkilerin önüne geçmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



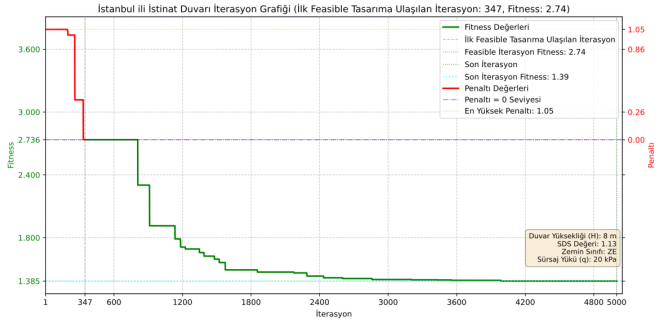
Şekil 3. Senaryolara göre geçerli çözüm oranları (%)

Zemin sınıfları arasındaki sıralama ilk bakışta beklenenin dışındadır. Gevşek ve düşük dayanımlı bir profili temsil eden ZE sınıfı, sağlam kaya niteliğindeki ZA sınıfından daha yüksek geçerli çözüm oranları vermektedir; 4 m duvarlarda ZE için %60-65 aralığındaki oranlar, ZA için %50-58 düzeyinde kalmaktadır. Bu durumun iki nedeni bulunmaktadır. Birincisi, ZE sınıfı için hesaplanan spektral ivme katsayısının (1,13) ZA sınıfına göre yalnızca sınırlı ölçüde yüksek olması ve dolayısıyla dinamik talep farkının belirleyici olmamasıdır. İkincisi ve daha etkili olanı, ZE profilinin 40 kPa kohezyona sahip olmasıdır; kohezyon, dairesel kayma yüzeyleri boyunca doğrudan direnç sağladığından toptan göçme güvenlik katsayısını belirgin biçimde yükseltmektedir; bu nedenle ZE sınıfındaki oranlar kohezyon kabulüne duyarlıdır (Bölüm 2.1). Kohezyonsuz ZA ve ZC profillerinde ise bu katkı bulunmamakta, direnç yalnızca sürtünmeden sağlanmaktadır.

Bulgular, tasarımın kritikliğini zemin sınıfının kendisinden çok, o sınıfa karşılık gelen spektral ivme ile dayanım parametrelerinin birlikte oluşturduğu dengenin belirlediğini göstermektedir. Nitekim en olumsuz sonuçlar, düşük dayanımlı ZE profilinde değil, S_{DS} = 1,46 ile en yüksek spektral ivmeye sahip ZC sınıfında elde edilmiştir. Bu sınıfta yalnızca 4 m yükseklikteki duvarlar için geçerli tasarımlar bulunabilmiş; 6 m ve 8 m yükseklikteki altı senaryonun tamamında değerlendirilen 5000 tasarımın hiçbiri, artan dinamik yükleme altında toptan göçme ve gövde kesme dayanımı kısıtlarını eş zamanlı sağlayamamıştır. Bu sonuç, ZC sınıfında belirli bir yükseklik aşıldığında konsol duvar tipinin tek başına yetersiz kaldığını ve zemin iyileştirmesi, ankrajlı sistemler veya payandalı duvarlar gibi alternatiflerin gerekli hâle geldiğini nicel olarak ortaya koymaktadır. Baskın göçme mekanizması zemin sınıfına göre farklılaşmaktadır: ZA sınıfında toptan göçme ve gövde eğilme momenti, ZC sınıfında toptan göçme ve gövde kesme dayanımı, ZE sınıfında ise kohezyonun toptan göçmeye katkısı nedeniyle taşıma gücü ve gövde eğilme momenti belirleyici olmuştur. Bu dağılım, kohezyonsuz profillerde toptan göçme tahkikinin geometriyi yönlendiren birincil kontrol olduğunu; kohezyonlu profillerde ise temel boyutlandırmasının taşıma gücü üzerinden şekillendiğini göstermektedir. Dolayısıyla toptan göçme tahkikinin son aşamaya bırakıldığı geleneksel tasarım pratiği, kohezyonsuz zeminlerde tasarımın büyük ölçüde yeniden ele alınmasına yol açabilmektedir.

3.2. Optimizasyon Algoritmasının Yakınsama Davranışı

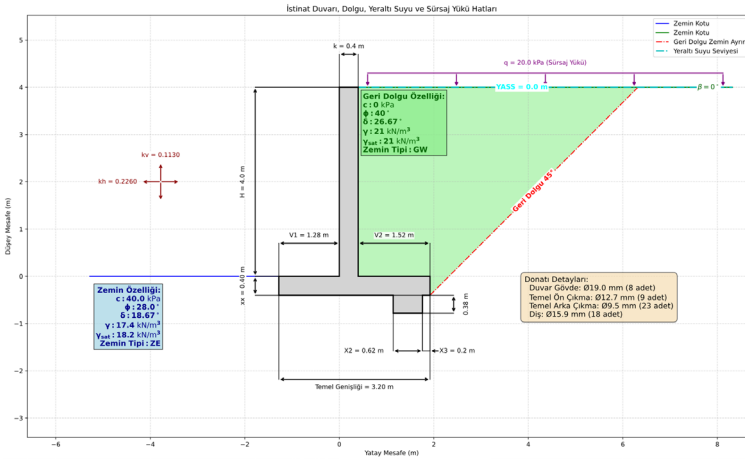
Optimizasyon sürecinin iterasyonlara göre değişimi Şekil 4'te, en zorlayıcı geçerli senaryo olan ZE sınıfı 8 m yükseklik ve 20 kPa sürşarj durumu için verilmektedir. Algoritmanın ilk iterasyonlarda geniş bir çözüm bandını taradığı, ilerleyen iterasyonlarda ise amaç fonksiyonu değerinin kısıt sınırlarına yaklaşarak daraldığı görülmektedir. Bu davranış, harmoni belleğinin giderek kritik denge bölgesindeki tasarımlarla dolduğunu ve aramanın bu bölgeye odaklandığını göstermektedir.



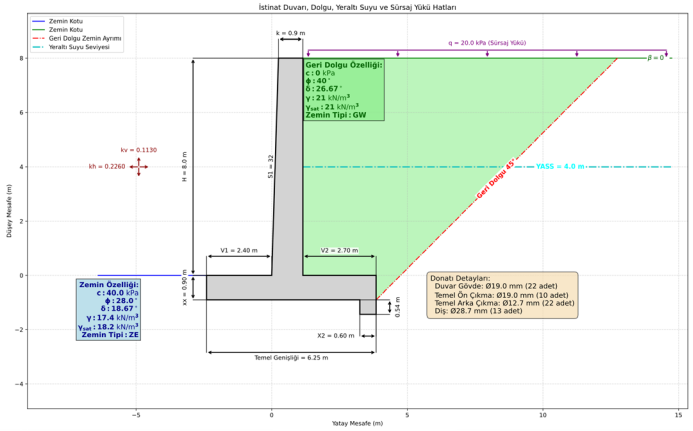
Şekil 4. Optimizasyon süreci iterasyon grafiği (ZE, H = 8 m, q = 20 kPa)

3.3. Optimum Betonarme İstinat Duvar Tasarımları

Geçerli çözüm oranı bakımından en elverişli senaryo (%65) (ZE sınıfı 4 m yükseklik ve 20 kPa sürşarj yük) ve en zorlayıcı senaryo (%26) (ZE sınıfı 8 m yükseklik ve 20 kPa sürşarj yük) için optimum duvar geometrileri sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5. Optimum istinat duvarı tasarımı ve geometrisi (ZE, H = 4 m, q = 20 kPa)



Şekil 6. En zorlayıcı senaryoda optimum duvar geometrisi (ZE, H = 8 m, q = 20 kPa)

Su seviyesinin bir tasarım değişkeni olarak en olumsuz konuma yönlendirildiği analizlerde, 4 m yükseklikteki duvarlar için kritik denge tasarımı su tablasının zemin yüzeyinde bulunduğu en elverişsiz koşulda ($h_w = 0$) dahi elde edilebilmiş; 8 m yükseklikte ise tolere edilebilir su seviyesi ancak H/2 derinliğine ($h_w = 4$ m) kadar inebilmiştir. Bu bulgu, duvar

yüksekliği arttıkça tam doygun koşulun konsol duvar tipi için taşınamaz hâle geldiğini ve yüksek duvarlarda drenaj sisteminin işlevselliğinin tasarımın örtük bir ön koşulu olduğunu nicel olarak ortaya koymaktadır.

Kritik denge tasarımlarında temel genişliğinin duvar yüksekliğine oranı her iki yükseklikte de yaklaşık B/H ≈ 0,8 olarak elde edilmiş; bu değer, literatürde statik koşullar için önerilen 0,4–0,7 aralığının üzerindedir. Duvar yüksekliği iki katına çıkarken gövde ve temel kalınlıkları 2,25 kat, gövde donatısı ise 8 adetten 22 adede yükselmiştir. Bunun nedeni, duvara etkiyen momentin yükseklikle birlikte çok daha hızlı (yaklaşık karesel) artmasıdır. Ayrıca her iki tasarımda da kayma dişinin gerekli olması ve diş yüksekliğinin 0,38 m'den 0,54 m'ye artması, yatay itkinin yalnızca taban sürtünmesiyle karşılanamadığını göstermektedir. Tüm bu bulgular, duvar yüksekliği arttıkça ortaya çıkan ek talebin, boyutları büyütmekle tek başına karşılanamadığını ortaya koymaktadır.

3.4. Bulguların Tasarım Açısından Değerlendirilmesi

Elde edilen sonuçlar, sismik zemin sınıfının tek başına bir tasarım girdisi değil, uygulanabilirlik sınırını belirleyen bir eşik olduğunu göstermektedir. ZC sınıfında 6 m ve üzeri yüksekliklerde hiçbir geçerli çözümün bulunamaması, proje aşamasında duvar tipi seçiminin sismik talep değerlendirilmeden yapılmasının ciddi bir risk oluşturduğuna işaret etmektedir.

Yeraltı suyuna ilişkin bulgular da uygulama açısından dikkat çekicidir. Minimum stabilitenin çoğu senaryoda ara su seviyelerinde ortaya çıkması, tasarımda yalnızca en yüksek su seviyesinin dikkate alınmasının her zaman en olumsuz durumu temsil etmediğini göstermektedir. Bu nedenle su seviyesinin bir aralık boyunca taranması, tekil bir tasarım su seviyesi kabulüne kıyasla daha güvenli sonuçlar vermektedir. Ayrıca drenaj sisteminin ve barbakanların işlevselliğini uzun dönemde koruması, hesapta kabul edilen su seviyesinin sahada geçerliliğini sürdürebilmesi bakımından belirleyicidir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada betonarme konsol istinat duvarı tasarımı için Harmoni Arama algoritması ile GUI otomasyonunu bütünleştiren bir optimizasyon çerçevesi sunulmuştur. Arama uzayı, önceden hesaplanabilen kısıtların değişken sınırlarına gömüldüğü bağımlı uzay yaklaşımıyla kurulmuş; ceza terimi yalnızca analiz sonrasında bilinebilen kriterlerle sınırlandırılmıştır. Toptan göçme dâhil on stabilite kriteri eş zamanlı olarak kısıt sistemine dâhil edilmiştir.

Yirmi yedi senaryoda elde edilen başlıca bulgular şunlardır:

- Duvar yüksekliği geçerli çözüm oranını belirleyen en baskın parametredir; oran ZA ve ZE sınıflarında 4 m duvarlarda %50-65 düzeyindeyken 8 m duvarlarda %26-40 aralığına inmektedir,
- Spektral ivmesi en yüksek olan ZC zemin sınıfında 6 m ve üzeri yüksekliklerde hiçbir geçerli tasarım bulunamamış, konsol duvar tipinin uygulanabilirlik sınırı nicel olarak belirlenmiştir,
- Minimum stabilite çoğu senaryoda ara yeraltı su seviyelerinde ortaya çıkmakta, dolayısıyla tekil su seviyesi kabulü en olumsuz durumu temsil etmemektedir.

Çalışmanın kapsamı homojen dolgu, tek bir bölge ve üç zemin sınıfı ile sınırlıdır; tabakalı zemin profilleri, farklı duvar tipleri, güvenilirlik tabanlı yaklaşımlar ve c–φ duyarlılık analizleri gelecek çalışmalar için önerilmektedir. Sunulan çerçeve, geoteknik yazılımların optimizasyon süreçlerine API gerektirmeksizin bağlanabileceğini göstermesi bakımından farklı geoteknik problemlere de uyarlanabilir bir altyapı niteliği taşımaktadır.

KAYNAKLAR

ACI Committee (2005), "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05)", Farmington Hills, Mich.

Afzal, M., Liu, Y., Cheng, J.C.P. ve Gan, V.J.L. (2020), "Reinforced concrete structural design optimization: A critical review", Journal of Cleaner Production, Vol 260, 120623.

Akin, A. ve Saka, M.P. (2010), "Optimum design of concrete cantilever retaining walls using the harmony search algorithm", Civil-Comp Proceedings, Vol 93, 1-21.

Bishop, A.W. (1955), "The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes", Geotechnique, Vol 5, 7-17.

Coulomb, C. (1776), "Essai sur une application des règles de maximis et minimis a quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture (essay on maximums and minimums of rules to some static problems relating to architecture)".

Gandomi, A.H., Kashani, A.R., Roke, D.A. ve Mousavi, M. (2015), "Optimization of retaining wall design using recent swarm intelligence techniques", Engineering Structures, Vol 103, 72-84.

Geem, Z.W., Kim, J.H. ve Loganathan, G.V. (2001), "A new heuristic optimization algorithm: harmony search", Simulation, Vol 76, 60-68.

Ghazavi, M. ve Bazzazian Bonab, S. (2011), "Learning From Ant Society in Optimizing Concrete Retaining Walls", Technology of Education, Vol 5, 205-212.

Kalemci, E.N., İkizler, S.B., Dede, T. ve Angın, Z. (2020), "Design of reinforced concrete cantilever retaining wall using Grey wolf optimization algorithm", Structures, Vol 23, 245-253.

Kaveh, A. ve Abadi, A.S.M. (2011), "Harmony search based algorithms for the optimum cost design of reinforced concrete cantilever retaining walls", International Journal of Civil Engineering, Vol 9, 1-8.

Kayabekir, A.E., Arama, Z.A., Bekdaş, G., Nigdeli, S.M. ve Geem, Z.W. (2020), "Eco-Friendly Design of Reinforced Concrete Retaining Walls: Multi-objective Optimization with Harmony Search Applications", Sustainability, Vol 12, 6087.

Khajehzadeh, M., Taha, M.R., El-Shafie, A. ve Eslami, M. (2010), "Economic design of retaining wall using particle swarm optimization with passive congregation", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, Vol 4, 5500-5507.

Köktan, U., Demir, G. ve Ertek, M. (2019), "Bir Konsol İstinat Duvarının Sismik Davranışına Yeraltı Su Seviyesindeki Değişimlerin Etkisinin İncelenmesi", Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Vol 9, 307-317.

Lu, H., Yin, Y. ve Liu, Y. (2021), "Force analysis and design of backfill retaining wall in large complex Goaf", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol 768, 012094.

Meyerhof, G.G. (1963), "Some recent research on the bearing capacity of foundations", Canadian Geotechnical Journal, Vol 1, 16-26.

Mononobe, N. ve Matsuo, H. (1929), "On the Determination of Earth Pressure during Earthquakes", Proceedings of the World Engineering Congress, 177-185.

NAVFAC (1986), "Foundations and Earth Structures, Design Manual 7.02", Naval Facilities Engineering Command, Alexandria, VA, Chapter 2, Table 1, 7.2-39.
Okabe, S. (1924), "General theory on earth pressure and seismic stability of retaining wall", J. of Japan Soci. of Civil Engineers, Vol 10, 1277-1323.
Özcan, A. (2025), "Yapay Zekâ Destekli GUI ile İstinat Duvarı Tasarımında Optimum Çözüm Arayışı", Yüksek Lisans Tezi, KTO Karatay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği, Konya, Türkiye.
Özcan, A. (2026), "HSDS: Harmony Search Optimization with Dependent Variable Spaces", Zenodo, https://doi.org/10.5281/zenodo.19240009
Tayfur, B. ve Kamiloğlu, H.A. (2024), "Optimization of Cantilever Retaining Wall Design Using Improved Teaching-Learning-Based Optimization Algorithms", Firat University Journal of Experimental and Computational Engineering, Vol 3, 134-150.
TBDY (2018), "Türkiye bina deprem yönetmeliği", Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
TDTH (2018), "Türkiye Deprem Tehlike Haritası", İnteraktif Web Uygulaması, Ankara.
Uray, E., Carbas, S., Erkan, I.H. ve Tan, O. (2019), "Parametric investigation for discrete optimal design of a cantilever retaining wall", Challenge Journal of Structural Mechanics, Vol 5, 108.
Uray, E., Carbas, S., Geem, Z.W. ve Kim, S. (2022), "Parameters Optimization of Taguchi Method Integrated Hybrid Harmony Search Algorithm for Engineering Design Problems", Mathematics, Vol 10, 327.
Uray, E., Tan, Ö., Çarbaş, S. ve Erkan, H. (2021), "Metaheuristics-based pre-design guide for cantilever retaining walls", Teknik Dergi, Vol 32, 10967-10993.
Yaman, İ., Özcan, A. ve Uray, E. (2024), "Effect of groundwater level change on retaining wall design", Advanced Engineering Days, Mersin University, Tabriz, Iran, 700-702.
Yenginar, Y. ve Özkan, İ. (2023), "Local site conditions and hydromechanical effects in service life of cantilever retaining walls", Engineering Failure Analysis, Vol 153, 107536.

SEMBOL LİSTESİ

$X_1 - X_8$	Geometrik tasarım değişkenleri	$dc_1 - dc_4$	Donatı kombinasyon kodları
H	Duvar yüksekliği	q	Sürşarj yükü
h_w	Yeraltı su seviyesi derinliği (zemin yüzeyinden)	n	Donatı adedi
F_s	Kayma güvenlik katsayısı	F_o	Devrilme güvenlik katsayısı
F_{bc}	Taşıma gücü güvenlik katsayısı	F_{ss}	Toptan göçme güvenlik katsayısı
S_{DS}	Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı	e	Dışmerkezlik
HMS	Harmoni bellek boyutu	HMCR	Harmoni bellek değerlendirme oranı
PAR	Perde ayarlama oranı	ρ	Donatı oranı
c	Kohezyon	φ	İçsel sürtünme açısı
γ	Birim hacim ağırlık	ϕ_b	Donatı çapı