Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

SÜREKSİZLİK YERLEŞTİRME OPTİMİZASYONU İLE DURAYLILIK ANALİZLERİ

STABILITY ANALYSIS WITH DISCONTINUITY LAYOUT OPTIMIZATION

Mehmet Berilgen[1], Özgür YILDIZ[2]

ÖZET

Bu çalışmada, geoteknik mühendisliği uygulamalarında karşılaşılan duraylılık problemlerinin değerlendirilmesine yönelik alternatif bir sayısal limit analiz yöntemi olan Süreksizlik Yerleştirme Optimizasyonu (Discontinuity Layout Optimization, DLO) yaklaşımı incelenmiştir. Üst sınır teoremine dayanan DLO yöntemi, önceden tanımlanmış bir kayma yüzeyi varsayımına ihtiyaç duymaksızın olası göçme mekanizmasının ve buna karşılık gelen göçme yükünün belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Çalışma kapsamında, Python programlama dili kullanılarak geliştirilen bir bilgisayar programı ile yüzeysel temel, şev duraylılığı ve kohezyonlu zeminlerde desteksiz kazı problemlerine yönelik DLO analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geleneksel limit denge ve/veya analitik çözümlerle karşılaştırılarak DLO yönteminin farklı geoteknik problem sınıflarındaki uygulanabilirliği, doğruluğu ve hesaplama performansı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Süreksizlik Yerleştirme Optimizasyonu, DLO, duraylılık analizi, sayısal limit analiz,*

ABSTRACT

This study investigates Discontinuity Layout Optimization (DLO), an alternative numerical limit-analysis method for evaluating stability problems in geotechnical engineering applications. Based on the upper-bound theorem, the DLO method enables the determination of potential failure mechanisms and their corresponding collapse loads without assuming a predefined slip surface. Within the scope of the study, DLO analyses were performed for shallow foundation, slope stability, and unsupported excavation problems in cohesive soils using a Python-based computer program. The results obtained were compared with conventional limit-equilibrium and/or analytical solutions to assess the applicability, accuracy, and computational performance of the DLO method across different classes of geotechnical stability problems.

Keywords: *Discontinuity Layout Optimization, DLO, stability analysis, numerical limit analysis, geotechnical engineering.*

1. GİRİŞ

Stabilite, bir cismin veya ortamın kararlı denge durumunu ifade eder. “Stabilite” sözcüğünün Türkçe karşılığı “duraylılık” olup, farklı mühendislik disiplinlerinde çeşitli problemlerin değerlendirilmesinde temel bir kavram olarak ele alınmaktadır. Örneğin, gemi mühendisliğinde stabilite, bir geminin veya yüzer mühendislik yapısının batmadan dengeli

[1] Prof. Dr., YTÜ İnşaat Mühendisliği Böl., berilgen@yildiz.edu.tr (Sorumlu yazar)
[2] Doç. Dr., YTÜ İnşaat Mühendisliği Böl., ozgur.yildiz@yildiz.edu.tr

bir şekilde yüzebilme durumunu ifade ederken, inşaat mühendisliğinde bir yapı veya yapı elemanının kararlı denge durumunu koruyabilme kapasitesini ifade eder. Geoteknik mühendisliğinde ise duraylılık problemleri önemli bir yer tutmakta ve tasarım süreçlerinin temel bileşenlerinden biri olarak ele alınmaktadır. Yüzeysel ve derin temeller, şevler, tüneller ve istinat yapılarının tasarımında duraylılık analizlerinden yararlanılmaktadır.

Geoteknik mühendisliği problemlerinde duraylılık; bir geoteknik yapının zemin veya kaya ortamı ile etkileşimi sonucunda meydana gelebilecek yerel göçme ile jeolojik ortamın kendi ağırlığı ve dış etkiler altında maruz kalabileceği genel göçme mekanizmalarının incelenmesini kapsar. Bu kapsamda, göçmeyi meydana getirmeye çalışan kuvvetler ile göçmeye karşı koyan kuvvetler arasındaki ilişki ve/veya ortamda kayma mukavemetine erişme durumu değerlendirilir. Bu değerlendirme, karşı koyan kuvvetlerin bileşkesinin göçmeye zorlayan kuvvetlerin bileşkesine oranı şeklinde ve/veya olası kayma düzlemindeki kayma mukavemetinin mevcut kayma gerilmesine oranı olarak rakamsal bir değere dönüştürülerek yapılır. Bu oran güvenlik sayısı olarak adlandırılır ve inceleme konusu jeolojik ortamın veya geoteknik yapının göçmeye karşı duraylılık seviyesini gösterir. Güvenlik sayısının 1'e eşit olması limit denge durumunu ifade eder. Tasarımda esas alınacak güvenlik sayısı, problemin niteliğine ve önemine bağlı olarak ilgili yönetmeliklerde belirtilir. Yönetmeliklerde herhangi bir öneri bulunmadığı durumlarda, uygun güvenlik sayısının belirlenmesinde mühendislik deneyimi ve literatürdeki yaklaşımlar dikkate alınır.

Yerel duraylılık problemlerinde göçmeye karşı koyan mekanizmanın temel bileşenlerinden biri yapı ile zemin veya kaya arasındaki sürtünme direnciyken, genel göçme problemlerinde belirleyici unsur çoğunlukla jeolojik ortamın kayma mukavemetidir. Duraylılık analizi prensip olarak göçmeye zorlayan ve karşı koyan etkilerin ve/veya olası göçme düzleminde kayma gerilmesinin kayma mukavemeti ile karşılaştırılmasına dayansa da, ortam içerisindeki en kritik göçme potansiyeline sahip kütlenin ve buna karşılık gelen göçme mekanizmasının belirlenmesi, jeolojik ortamın yükleme, drenaj ve kütlesel özelliklerine bağlı olarak oldukça karmaşık bir işlemdir. Bu nedenle yaygın mühendislik yaklaşımı, en olası göçme yüzeyinin tanımlanması ve bu yüzey boyunca oluşacak kuvvetlerin değerlendirilmesi esasına dayanır. Olası göçme yüzeyi, gerçekleştirilen geoteknik araştırmaların sonuçları ve ortamın özellikleri dikkate alınarak analitik, sayısal veya yarı ampirik yöntemlerle belirlenebilir.

Genel göçme problemlerinin analizinde limit analiz veya limit dengeye dayalı yaklaşımların kullanılması durumunda olası göçme yüzeyleri önceden varsayılarak veya farklı yüzeyler araştırılarak en kritik göçme mekanizması belirlenmeye çalışılır. Buna karşılık, temel duraylılığının değerlendirilmesinde çoğunlukla belirli bir göçme yüzeyinin tanımlanmasına gerek duyulmaz. Tek tabakalı ve basit zemin koşulları için literatürde yer alan taşıma gücü bağıntılarından yararlanılarak nihai taşıma gücü belirlenir. Temelin tabakalı bir zemine veya karmaşık bir yeraltı geometrisine sahip olması durumunda, mühendisin çeşitli kabuller yaparak yaklaşık bir tasarım gerçekleştirmesi ya da doğrusal olmayan sayısal analiz yöntemlerine başvurması gerekir.

Sayısal analiz yöntemleri, önceden belirlenmiş bir göçme yüzeyine ihtiyaç duymaksızın gerilme–şekil değiştirme davranışını dikkate alarak güvenlik sayısının belirlenmesine olanak sağlar. Bununla birlikte, bu yöntemlerin uygulanması geleneksel yaklaşımlara kıyasla daha karmaşık, zaman alıcı ve maliyetlidir. Sayısal analizlerin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle zemin ve kaya ortamlarının doğrusal olmayan davranışını uygun biçimde temsil edebilen yazılımlara ihtiyaç vardır. Bu tür bir yazılımın geliştirilmesi önemli ölçüde zaman

ve teknik uzmanlık gerektirirken, ticari yazılım paketleri yüksek lisans maliyetlerinin yanı sıra özel donanım gereksinimleri ve çeşitli teknik kısıtlamalar da içerebilmektedir. Gelişmiş bir sayısal analiz yazılımının mevcut olması durumunda dahi, güvenilir bir duraylılık analizi için öncelikle yeterli büyüklükte bir geometri ve uygun sınır koşulları oluşturularak saha koşullarını mümkün olduğunca gerçekçi biçimde temsil eden bir sayısal model hazırlanmalıdır. Bu model üzerinde mevcut gerilme–şekil değiştirme durumunu temsil eden başlangıç analizi gerçekleştirildikten sonra duraylılık analizine geçilmelidir. Duraylılık analizinde, güvenlik sayısının belirli bir değere yakınsayarak kararlı hale gelmesine kadar iteratif çözüm sürdürülür. Ancak sayısal modelin özelliklerine bağlı olarak gerekli iterasyon sayısı oldukça fazla olabilir. Ayrıca elde edilen göçme bölgesi beklenen konum veya göçme mekanizmasıyla uyumlu olmayabilir. Böyle durumlarda modelin geometrisi, malzeme parametreleri veya sınır koşulları yeniden değerlendirilerek model güncellenir ve beklenen göçme mekanizmasını temsil eden güvenlik sayısı elde edilmeye çalışılır. Bu süreç, özellikle karmaşık zemin koşulları ve göçme mekanizmalarında önemli ölçüde hesaplama süresi ve mühendislik deneyimi gerektirdiğinden, sayısal analiz yaklaşımının maliyetini artırmaktadır.

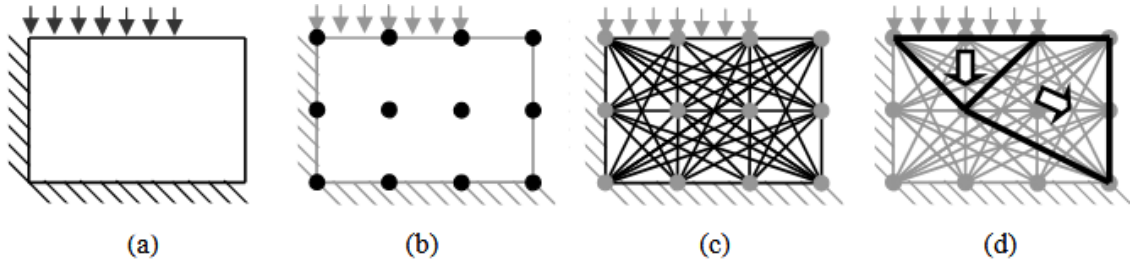
Alışılagelmiş limit denge, limit analiz ve doğrudan gerilme–şekil değiştirme esaslı sayısal analiz yöntemlerine alternatif olarak Süreksizlik Yerleştirme Optimizasyonu (Discontinuity Layout Optimization, DLO) yöntemi geliştirilmiştir. Adından da anlaşılacağı üzere DLO yöntemi, göçme anında oluşan süreksizliklerin konumlarını belirlemek amacıyla matematiksel optimizasyon tekniklerinden yararlanır. Çözüm ortamına yerleştirilen noktalar arasında oluşturulan süreksizlik çizgileri, göçme mekanizmasını oluşturan rijit malzeme blokları arasındaki sınırları tanımlar. Bu şekilde oluşturulan göçme mekanizmasıyla ilişkili bir güvenlik sayısı elde edilir. Plastisite teorisine göre güvenlik sayısının mevcut yük ile çarpımı gerçek göçme yükünün üst sınırını temsil eder. Dolayısıyla DLO yaklaşımı, geoteknik mühendisliğinde uzun yıllardır kullanılan üst sınır limit analiz prensibini otomatikleştirerek olası göçme mekanizmasının belirlenmesine ve buna karşılık gelen güvenlik sayısının hesaplanmasına olanak sağlar.

DLO, genel amaçlı bir yöntem olup kohezyonlu ve/veya kohezyonsuz zeminler ile kayaları içeren geniş bir yelpazedeki geoteknik duraylılık problemlerine uygulanabilmektedir. Bu çalışmada, DLO yönteminin geoteknik duraylılık analizlerinde kullanılan mevcut yöntemlere alternatif bir yaklaşım olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, Python programlama dili ve ekosisteminin sunduğu olanaklardan yararlanılarak geliştirilen bir bilgisayar programı kullanılmış; yüzeysel temel, şev ve kohezyonlu zeminde desteksiz kazı problemleri için DLO tabanlı duraylılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, alışılagelmiş duraylılık analizi yöntemleriyle karşılaştırılarak DLO yönteminin geoteknik mühendisliği problemlerindeki uygulanabilirliği ve performansı değerlendirilmiştir.

2. SÜREKSİZLİK YERLEŞTİRME OPTİMİZASYONU

Süreksizlik Yerleştirme Optimizasyonu (DLO), potansiyel süreksizlik ağlarını kullanarak olası göçme mekanizmalarını doğrudan optimize eden üst sınır limit analizine dayalı bir yöntemdir. Bu duraylılık analiz tekniği, göçme eğilimindeki bir zemin kütlesi içerisinde oluşabilecek süreksizliklerin (kayma yüzeylerinin) kritik konumlarını belirlemek amacıyla matematiksel optimizasyon tekniklerinden yararlanan, nispeten yeni bir hesaplamalı limit analiz yöntemidir (Smith & Gilbert, 2007). DLO yaklaşımı temel, tünel ve dayanma yapıları gibi farklı geometri ve yükleme koşullarına sahip çok çeşitli geoteknik problemlerde kritik

kayma yüzeyinin ve buna karşılık gelen göçme mekanizmasının belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 1'de, DLO yöntemi kullanılarak bir geoteknik problemin nasıl tanımlandığı, potansiyel süreksizlik ağının nasıl oluşturulduğu ve göçme mekanizmasının nasıl belirlendiği şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. DLO aşamaları: (a) problem geometrisi; (b) düğüm noktalarının tanımlanması; (c) düğüm noktalarının olası süreksizliklerle birbirine bağlanması; (d) bir optimizasyon tekniği kullanılarak olası süreksizlikler arasından kritik (göçme) yüzeyin belirlenmesi.

Şekil 1'de gösterildiği üzere, bir yüzeysel temelin taşıma gücünü ve buna karşılık gelen zemin göçme mekanizmasını belirlemek amacıyla öncelikle çözüm bölgesi içerisinde bir düğüm noktaları ağı tanımlanır ve bu düğüm noktalarını birbirine bağlayan potansiyel süreksizlikler oluşturulur. Genel yaklaşımda, her bir düğüm noktası diğer tüm düğüm noktalarıyla potansiyel bir süreksizlik aracılığıyla ilişkilendirilir. Kinematik formülasyonda, uyumlu bir göçme mekanizmasının elde edilebilmesi için uyumluluk koşullarının yalnızca düğüm noktalarında sağlanması yeterlidir (Smith ve Gilbert, 2013). Süreksizliklerin birbirleriyle kesişmesi durumunda, kesişim noktalarındaki uyumluluk koşullarının doğal olarak sağlandığı gösterilebilmektedir. Bu yaklaşımda optimizasyon probleminin temel amacı, minimum üst sınır çözümünün belirlenmesidir. Başka bir ifadeyle, optimizasyon işlemi sonucunda, başlangıçta tanımlanan tüm potansiyel süreksizliklerden oluşan küme içerisinden kritik göçme mekanizmasını meydana getiren süreksizlik alt kümesi belirlenir. Çözüm bölgesindeki düğüm noktası sayısının artırılması, potansiyel göçme mekanizmasının daha ayrıntılı biçimde temsil edilmesini sağlayarak elde edilen çözümün doğruluğunu artırmaktadır. Bu ölçekteki bir optimizasyon probleminin çözümü için bilgisayar programlarından yararlanılması kaçınılmazdır. Bu amaçla, lineer programlama tabanlı açık kaynaklı optimizasyon kütüphanelerinden yararlanılabilir. Python, C ve Julia gibi güncel programlama dilleri için geliştirilen açık kaynaklı optimizasyon modülleri, DLO algoritmasına kolaylıkla entegre edilerek göçme mekanizmasının ve buna karşılık gelen üst sınır çözümünün otomatik olarak belirlenmesinde kullanılabilir.

2.1 Süreksizlik Yerleştirme Optimizasyonu Analiz Aşamaları

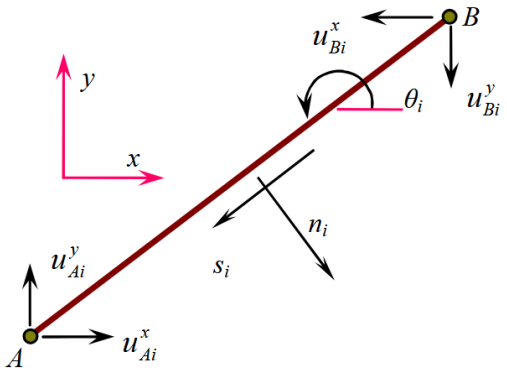
Ele alınan yapı kapsamında Süreksizlik Yerleştirme Optimizasyonu (DLO), her biri potansiyel bir göçme süreksizliği olabilen ve dolayısıyla göçme moduna katkıda bulunabilen, m adet süreksizlikle birbirine bağlanmış n adet düğüm noktasının oluşturulmasını gerektirir. Süreksizlikler düğüm noktalarının birleştirilmesiyle geometrik olarak oluşturulur. Her bir süreksizliğe, dikkate alınan göçme kriterine göre malzeme özellikleri atanarak sınır koşulları tanımlanır ve iç enerjiyi en aza indirme hedefi doğrultusunda göçme mekanizmasına katkıda bulunan süreksizlikler belirlenir. Bu süreç, aşağıdaki doğrusal programlama (LP) problemini içeren bir üst sınır formülasyonuyla gerçekleştirilir.

$$\min_{d} \lambda \boldsymbol{f}_L^T d = \boldsymbol{g}^T \boldsymbol{p}, \tag{1}$$

$$\boldsymbol{B}\boldsymbol{d} = \boldsymbol{u}, \tag{2a}$$
$$\boldsymbol{N}\boldsymbol{p} - \boldsymbol{d} = \boldsymbol{0}, \tag{2b}$$
$$\boldsymbol{f}_L^T d = 1, \tag{2c}$$
$$\boldsymbol{p} \geq \boldsymbol{0}, \tag{2d}$$

Burada $\mathbf{f}_l$ (2m), dış yüke ait kayma ve normal bileşenlerini; λ, güvenlik sayısını; **g** (2m), süreksizliklerin *l* [m] uzunluğu ile *c* [N/m] kohezyonlu kayma mukavemetinin çarpımını; **B** (2n × 2m), uyumluluk matrisini ve **N** (2m × 2m) plastik akma fonksiyonuna ait matrisi ifade etmektedir. Denklem (2)'de **d** ve **p**, LP (Lineer Programlama) probleminin bilinmeyenlerini temsil etmektedir. Burada **d**, süreksizliklerdeki yer değiştirme sıçramalarından oluşan (2m) boyutlu bir vektör iken, **p**, plastik çarpanlardan oluşan (2m) boyutlu bir vektördür.

Kinematik formülasyon, çok sayıda potansiyel göçme mekanizması arasından kritik olanı belirlemeyi mümkün kılar. Bu mekanizmalar, süreksizliklerle birbirinden ayrılan rijit bloklardan oluşmaktadır (Şekil 2). Şekil 2'de gösterilen her bir süreksizlik boyunca, *i* noktasında yer değiştirmeye ilişkin bir kayma sıçraması (s_i) ve bir normal sıçrama (n_i) meydana gelmesine izin verilir. Göçme mekanizmasının kinematik uyumluluğu ise her bir düğüm noktasında tanımlanan kısıtlar aracılığıyla sağlanır.



Şekil 2. A ve B düğümlerini birleştiren *i* numaralı süreksizlik

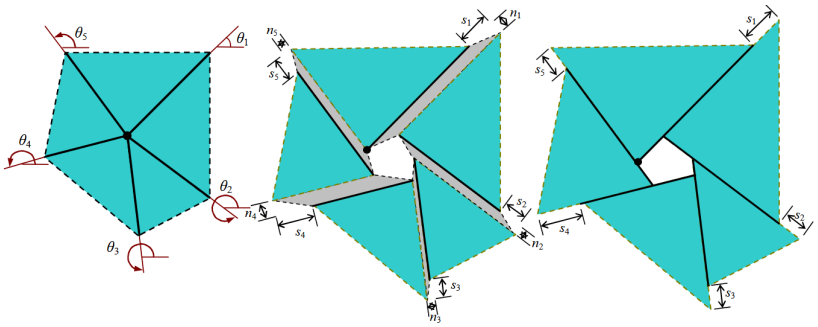
Şekil 3 yardımıyla, tüm süreksizliklerin tek bir düğümde birleştiği açıkça görülmektedir. Bir düğüm noktasında birleşen tüm süreksizlikler için Şekil 3'ten yararlanılarak her düğüm noktasında uyumluluk koşulunun sağlandığı dikkate alınarak aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$\sum_{i=1}^{5} \alpha_i s_i - \beta_i n_i = 0 \tag{3a}$$

$$\sum_{i=1}^{5} \beta_i s_i + \alpha_i n_i = 0 \tag{3b}$$

Burada $\alpha_i = cos\ \theta_i$ ve $\beta_i = sin\ \theta_i$ olup, θ_i değeri i. süreksizlik ile x-ekseni arasındaki saat yönüne zıt açıyı ifade eder. (3a) ve (3b) toplamları her bir düğüm noktasında tekrarlanarak Denklem (2) oluşturulur; burada **B**, doğrultman kosinüslerini içeren 2n×2m boyutlu bir global uyumluluk matrisidir; $\mathbf{d}^T = \{s_1, n_1, s_2, ..., n_m\}$ vektörü tanımlanmıştır; n ve m ise sırasıyla toplam düğüm noktası sayısı ve süreksizlik sayısını temsil eder.

DLO'da, potansiyel süreksizlikler arasındaki kesişimler veya geçişler, orijinal düğüm noktaları dışındaki konumlarda kendiliğinden ortaya çıkar. Bu geçiş noktalarında uyumluluk açıkça zorunlu kılınmasa da, örtük bir şekilde korunur.



Şekil 3. Bir düğümdeki uyumluluk koşulları: (a) Düğüm i (b) kayma mekanizması için düğümdeki uyumluluk (öteleme ve genleşme) (c) Kayma mekanizması için düğümdeki uyumluluk (yalnızca öteleme) (Jia vd., 2014)

2.2 Model ve Algoritma

Çok sayıda düğüm noktasının tanımlandığı problemlerde, her bir düğüm noktasının diğer tüm düğüm noktalarıyla potansiyel süreksizlikler aracılığıyla bağlanması, hesaplama maliyetinin önemli ölçüde artmasına neden olur. Bu nedenle, düğüm noktalarının yalnızca belirli bir ölçütü sağlayan komşu düğüm noktalarıyla kısmen bağlanması tercih edilebilir. Örneğin, her düğüm noktası yalnızca en yakın komşularına veya doğrudan bitişik düğüm noktalarına bağlanabilir. Alternatif olarak, mevcut düğüm noktasına belirli bir mesafe içerisinde bulunan ve/veya belirli bir göreli doğrultuyu sağlayan diğer düğüm noktalarıyla bağlantı kurulabilir. Ancak bu tür problemler çözülürken, tanımlanabilecek göçme mekanizması geometrilerinin çeşitliliği ciddi ölçüde sınırlı kalacak ve bu çözümün gerçek göçme yükü katsayısını önemli ölçüde yüksek tahmin etmesi muhtemel olacaktır. Bu aşamada ihtiyaç duyulan şey, çözümü iyileştirmek amacıyla optimizasyon problemine hangi ek düğüm bağlantılarının veya süreksizliklerin dahil edilebileceğini belirleyecek bir yöntemdir. Smith ve Gilbert (2007), akma sınırını aşma olasılığı en yüksek olan potansiyel süreksizliklerin belirli bir yüzdesinin orijinal LP (Doğrusal Programlama) problemine eklendiği, "uyarlanabilir düğüm bağlantısı" (adaptive nodal connection) adı verilen bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yeni yaklaşım, daha sonra yeni bir LP çözümüyle tekrarlanır. Söz konusu yaklaşım şu şekilde özetlenebilir:

1) Olası süreksizliklerden oluşan bir başlangıç alt kümesi seçilir,

2) Bu küme dikkate alınarak bir LP problemi oluşturulur ve çözülür,

3) Çözülen probleme dahil edilmemiş süreksizliklerde akma koşulu kontrol edilir,

4) Akma koşulunu sağlamayan süreksizlikler LP problemine eklenir ve 3. adıma dönülerek işlem tekrarlanır ya da sonlandırılır.

2.3 Doğrulama ve Uygulama

DLO'nun geliştirilmesi için çalışan ve bu çözüm yaklaşımını kullanan araştırmacılar yaptıkları yayınlarda farklı geoteknik problemler için bu yaklaşım ile problemin doğasına göre gerçekçi sonuçlara ulaşıldığını ispatlamışlardır. Smith ve Gilbert (2007), yüzeysel temelin farklı kayma mukavemeti açılarında ve drenajsız kile oturması durumları için yaptıkları DLO analizlerinde, gerçekçi bir göçme kaması ile geleneksel çözüme göre kayma mukavemeti açıları için %0,03 - %0,71 hata ile sonuçlar elde etmişlerdir.

Smith ve Cubrinovsli (2011) istinat yapılarının sismik analizi için yaptıkları çalışmada DLO'nun Mononobe–Okabe toprak basıncı çözümleriyle doğrulanmıştır.

Jia vd. (2014) tarafından DLO'nun şev stabilitesi için kullanılması üzerine yapılan çalışmada, Giam'ın (1992) tarafından önerilen yöntem kullanılarak çeşitli şev duraylılık problemleri çözülmüş ve Morgenstern-Price Dilim Yöntemi ile Sonlu Elemanlar Yöntemi çözümleriyle karşılaştırılmıştır. İnce ve zayıf bir tabaka içeren, drenajsız koşullardaki killi bir şev örneği için üç farklı düğüm noktası yoğunluğu dikkate alınarak yapılan bu karşılaştırmalarda yeterli hassasiyette güvenlik sayıları hesaplanmış ve sonlu elemanlar yöntemiyle uyumlu bir göçme mekanizması elde edilmiştir. Analizler, zeminin sabit bir drenajsız kayma mukavemeti değeri (c_{u1}) ve ince tabakanın beş farklı drenajsız kayma mukavemeti değeri (c_{u2}) kullanılarak; c_{u2}/c_{u1} oranları 0,8, 0,6, 0,4 ve 0,2 olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Wang vd. (2017) DLO ve optimize edilmiş sonlu elemanlar (FEM-SOCP) yöntemleri ile yaptıkları şev duraylılık analizlerini karşılaştırmıştır. Homojen ve tabakalı zemin şevleri için hem DLO hem de FEM-SOCP yöntemlerinin, mukavemet azaltma tekniğiyle birlikte bir deneme süreci (iterasyon) yoluyla kritik durumun veya güvenlik katsayısının belirlenmesinde kullanılabileceği sonucuna ulaşmışlar; ancak DLO'da, kayma yüzeyinin süreksizliklerin yerleşiminin içine gömülü olması nedeniyle analiz sonuçlarının ve hesaplama maliyetinin büyük ölçüde düğüm noktalarının ve süreksizliklerin yerleşimine bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Zhang vd. (2018) DLO'yu kullanarak püskürtme beton destekli bir tünel tacının duraylılığını analiz etmişlerdir. Sayısal modelde süreksizlik sayıları optimize edilmiş ve 3 boyutlu etkiler ile püskürtme betonun hidratasyon süreci dikkate alınarak, zamana ve mekana bağlı duraylılık analizi için bir yaklaşım önerilmiştir.

Millan vd. (2021), Hoek & Brown göçme kriterini gerektiren kaya kütleleri üzerindeki sığ temellerin taşıma gücünü tahmin etmek için DLO yönteminin etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Ağırlıksız kaya kütleleri için DLO yöntemiyle elde edilen sonuçlar, sonlu farklar yöntemiyle hesaplananlara kıyasla analitik çözüme daha yakın bulunmuştur.

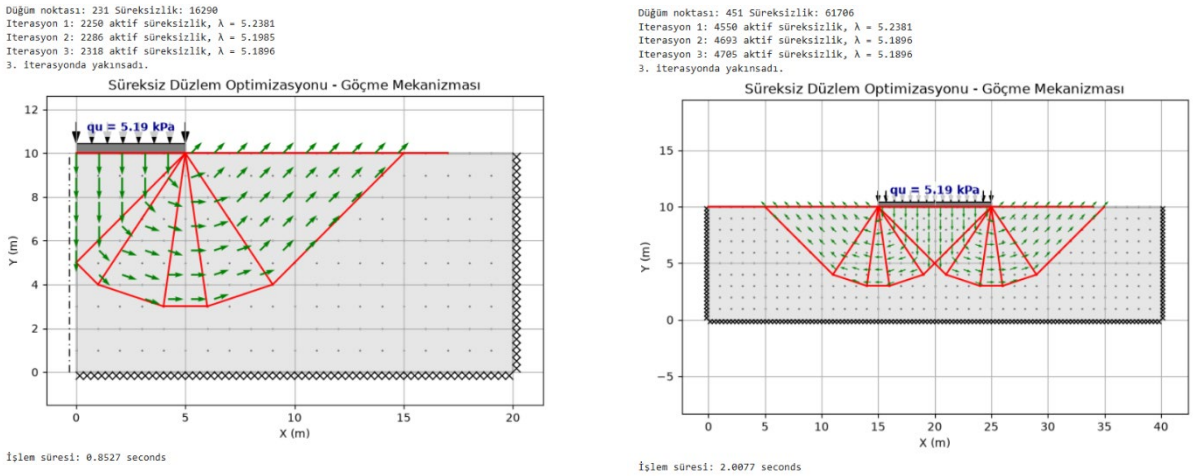
Susiyanti ve Lim (2026)yumuşak kildeki derin kazıların taban kabarması stabilitesini DLO ile incelemiş ve yöntemin performansını Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlar, hesaplanan güvenlik katsayılarının FEM ile elde edilenlerle büyük ölçüde örtüştüğü homojen zemin koşullarında DLO'nun etkili ve güvenilir olduğunu göstermiştir. Bu durum, DLO'nun ön stabilite değerlendirmeleri için hızlı ve aydınlatıcı bir araç olma değerini teyit etmektedir.

Bu bildiri kapsamında Süreksizlik Yerleştirme Optimizasyonu (DLO) ile geoteknik duraylılık problemlerini çözmek için Python programlama dilinde geliştirilmiş bir yazılım

kullanılmıştır. Bu yazılım, karmaşık zemin profilleri için kritik kayma çizgilerini ve güvenlik sayısını (λ) hesaplamaktadır. Yazılımın geliştirilmesinde He vd. (2023) tarafından geliştirilen koddan (https://colab.research.google.com/drive/1qgXhlD2JSC_pKU_PF0p3kECFiM9gXTYd) yola çıkılarak bazı modüller yeniden yazılmış ve konveks optimizasyon modülü CVXPY, CLARABEL ve HIGHS gibi daha güncel açık kaynak çözücülere dönüştürülmüştür. CVXPY, gelişmiş sonlu ayrıştırmayı dışbükey(convex) optimizasyon rutinleriyle entegre eden açık kaynaklı bir Python modülüdür (Diamond ve Boyd, 2016). Güncel yazılım, kullanıcı tarafından tanımlanan düğüm aralığında titiz kinematik ayrıştırma yaparak, belirtilen çokgen problem alanları üzerinde düğüm dağılımlarını ve potansiyel kayma süreksizliklerini otomatik olarak oluşturabilen bir mimariye sahiptir. Bu sayede şevler, yüzeysel temeller ve kazılar gibi geometriler kolayca modellenir. Ayrıca Çift Modlu Optimizasyon Motoru (solveLP) ile dış yük odaklı veya yerçekimi odaklı olarak duraylılık problemini *Mohr-Coulomb* göçme kriterine göre nihai taşıma gücü veya güvenlik sayısı şeklinde hesaplayabilir. Bir yeraltı su yüzeyi tanımlanarak efektif gerilmeler ile duraylılık analizleri yapılabilir. Göz önüne alınan model geometrisi, DLO ağı ve analiz sonucunda elde edilen kayma yüzeyleri ile yer değiştirme vektörleri çizdirilebilir. GeoDLO olarak isimlendirilen bu yazılım, He vd. (2023)'te sunulan açık kaynak Python kodundan farklı olarak, temel taşıma gücü ve yanal toprak basıncı gibi nihai yükün hesaplandığı problemlerde limit yükü, öz ağırlığın etkili olduğu şev stabilitesi gibi problemlerde ise güvenlik sayısını sonuç olarak vermektedir. GeoDLO ile yapılan örnek analizler ve analitik sonuçlarla doğrulamalar aşağıda verilmiştir.

Örnek 1: Temel Taşıma Gücü Problemi Çözümü

Şekil 4, iyi bilinen Prandtl zımbalama probleminin (Hill 1950) GeoDLO ile çözüm sonuçlarını göstermektedir. Simetri koşulları dikkate alınarak, 21 × 11 düğüm noktası (Şekil 4a); alınmadığı durumda ise 21 × 81 düğüm noktasına sahip dikdörtgen bir alan kullanılmıştır (Şekil 4b). Kohezyonun c_u=1 kPa alındığı bu problemde hesaplanan nihai taşıma gücü q_u = 5,19 olup, bu değer 2 + π analitik çözümünün sadece %1,0 üzerindedir. Problemin çözümünde simetriden yararlanılması durumunda bilgisayar işlem hızı 2 saniyeden 0,85 saniyeye inmiştir.



(a) (b)

Şekil 4. Temel taşıma gücü problemi: (a) Simetrik çözüm, (b) Simetrinin olmadığı çözüm

DLO yönteminin sonlu elemanlar ve sonlu farklar gibi sayısal analiz yöntemlerine kıyasla önemli bir avantajı, zımbalama kenarındaki yer değiştirmelerde meydana gelen

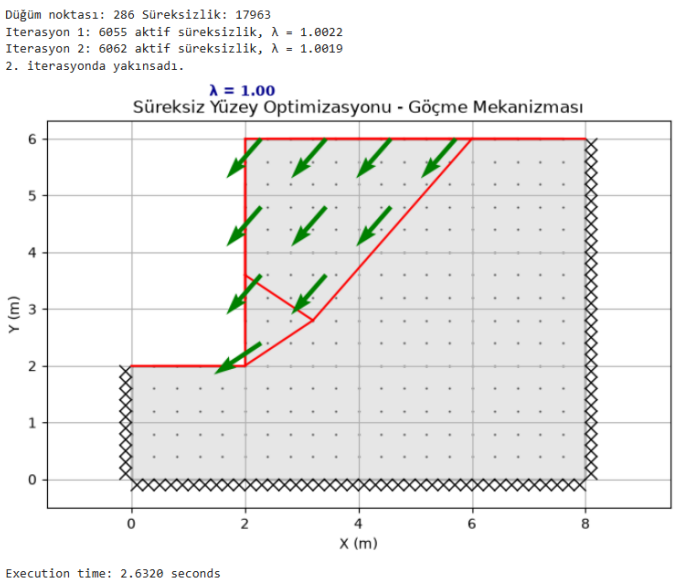
singüleritenin özel tasarlanmış ağlara veya ağ sıkılaştırmasına gerek kalmaksızın otomatik olarak belirlenebilmesidir.

Örnek 2: Drenajsız kilde dik kazı

Bu örnekte, Tablo 2'de verilen malzeme özellikleri verilen kilde maksimum dik kazı derinliği DLO ile incelenmiştir. Şekil 5'te DLO modeli ile elde edilen kayma yüzeyi ve yer değiştirme vektörleri gösterilmektedir.

Tablo 2. Malzeme özellikleri

γ	c	ϕ
kN/m^2	(kPa)	(°)
19,15	20	0



Şekil 5. DLO kazı modeli ve göçme mekanizması

Bu DLO derin kazı modelinde 286 düğüm noktası dikkate alınarak Tablo 2'de verilen malzeme özellikleri ve geometri için maksimum kazı derinliği 4 m olarak hesaplanmıştır. Böylesi bir kazı için Coulomb ve Rankine toprak basıncı teorilerine göre maksimum kazı derinliği şu eşitlikle .

$$\frac{\gamma H_{max}}{c} = 4 \tag{4}$$

düzlemsel kayma kaması varsayımıyla elde edilmektedir. Gerçekte Taylor (1948) tarafından gösterildiği şekilde göçme yüzeyinin eğrisel olması durumunda maksimum kazı derinliği

$$\frac{\gamma H_{max}}{c} = 3{,}83 \tag{5}$$

olmaktadır. Bu oranın DLO modellemesinden elde edilen değeri (19,15 × 4)/(20)=3,83 olup eğrisel kayma yüzeyi varsayımına eşit çıkmıştır. Şekil 5'ten görüldüğü gibi, DLO'dan elde edilen kayma yüzeyi tek eğimli bir düzlem olmayıp gerçek göçme mekanizmasına analitik çözümlerden daha yakındır.

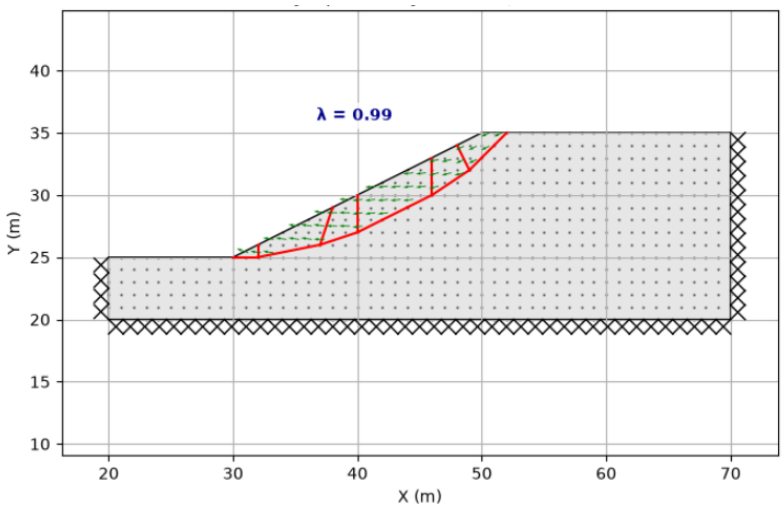
Örnek 3: Şev Duraylılık Analizi

DLO ile şev dayanıklılık analizine örnek olarak Şekil 6'da geometrisi verilen model oluşturulmuştur. 606 düğüm noktasına sahip bu model ilk olarak Avustralya'daki ACADS çalışmasından alınmıştır (Donald ve Giam, 1989). Söz konusu çalışmada, bir dizi referans örneği sunulmuş ve farklı yazılım paketleri kullanan çeşitli danışmanların bu modelleri çözmesine olanak tanınmıştır. Daha sonra elde edilen sonuçlar uzman bir inceleme heyeti

tarafından değerlendirilmiş ve bir çözüm önerisi ortaya konmuştur. Burada dikkate alınan model, boşluk suyu basınçları dikkate alınmaksızın gerçekleştirilen homojen bir şevde toplam gerilme analizidir. Malzeme özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

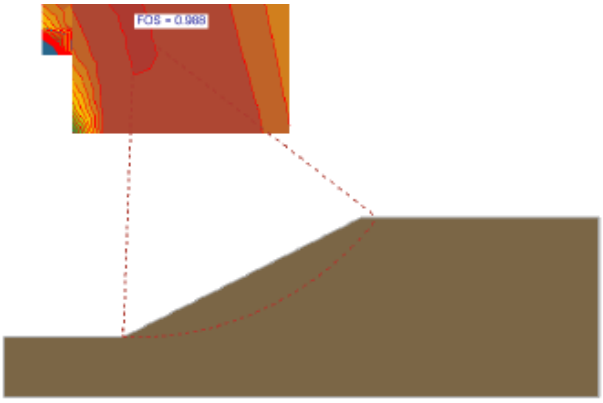
Tablo 3. Şev malzeme özellikleri

γ	c	ϕ
kN/m^2	(kPa)	(°)
3.0	19,6	20



Şekil 6. DLO şev modeli ve göçme mekanizması

DLO analizi sonucunda elde edilen güvenlik sayısının değeri 0,988 olup elde edilen kayma yüzeyi dilim yöntemleri ile uyumludur. Plaxis LE'de GLE Yöntemi'ne göre elde edilen güvenlik sayısı (FOS) ve göçme yüzeyi Şekil 7'de verilmiş olup DLO analizinden elde edilenle eşdeğerdir (Şekil 6)



Şekil 7. GLE yönteminden elde edilen kayma yüzeyi ve güvenlik sayısı (FOS) (The Bentley Systems Team, 2024)

Tablo 4'te dilim yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. DLO ile yapılan şev duyarlılık analizinde elde edilen 0,988 sayısı, güvenlik sayısı, moment ve kuvvet dengesini dikkate alan GLE (General Limit Equilibrium) ve Spencer dilim yöntemlerinde Slide yazılımının sonucundan %0,203 farklı, Plaxis LE yazılımının sonucuna ise eşit bulunmuştur.

Tablo 4. Şev modeli sonuçlarının karşılaştırılması

Yöntem	Güvenlik sayısı (λ)		
	Slide	Plaxis LE	DLO
Fellenius	0,947	0,945	0,988
Basitleştirilmiş Bishop	0,987	0,989	
Basitleştirilmiş Janbu	0,939	0,939	
Spencer	0,986	0,988	
GLE	0,986	0,988	

3. SONUÇ

Bu bildiride, DLO yönteminin 2 boyutlu geoteknik problemler için geliştirilmiş bir Python uygulaması sunulmuş ve yöntemin üç farklı geoteknik problem için yeterli doğrulukta sonuçlar üretebildiği gösterilmiştir. Elde edilen bulgular, göçme mekanizmalarını süreksizlik ağları üzerinden tanımlayan modern bir üst sınır limit analiz yaklaşımı olan DLO'nun otomatik limit analiz yaklaşımı için güçlü ve güvenilir bir araç olduğunu ortaya koymaktadır. DLO'nun temel kenarındaki singülariteler, ayrık kayma yüzeyleri ve karmaşık göçme mekanizmaları gibi davranışları özel ağ yapılarının tanımlanmasına gerek duyulmadan modelleyebilmesi, yöntemin geleneksel yaklaşımlara kıyasla önemli avantajlarından biridir. Bununla birlikte, DLO sonuçları düğüm noktalarının dağılımına ve ağ yapısına duyarlıdır ve yöntem zemin blokları içerisindeki gerilme ve deformasyon değerlerini sonuç olarak vermez. DLO, lineer programlama ve dışbükey optimizasyon teknikleri aracılığıyla optimum çözümü arayarak, farklı geometri ve yükleme koşulları için üst sınır niteliğinde bir çözüm sunmaktadır. Karmaşık, parçalı doğrusal veya eğrisel kayma yüzeylerini herhangi bir ön kabul gerektirmeden belirleyebilmesi, özellikle olası göçme mekanizmasının önceden bilinmediği geoteknik problemlerde yöntemi önemli bir alternatif haline getirmektedir. Bu özellikleriyle DLO, önceden tanımlanmış kayma yüzeylerine dayanan limit denge yöntemlerine ve çözüm bölgesindeki gerilme yığılmalarının ayrıntılı biçimde değerlendirilmesini gerektiren geleneksel sayısal analiz yaklaşımlarına alternatif bir yaklaşım sunmaktadır. Hesaplama algoritmaları ve çözüm şemalarındaki gelişmelerle birlikte, DLO yönteminin daha büyük ölçekli ve üç boyutlu geoteknik problemlere yüksek doğrulukla uygulanma potansiyeli bulunmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen DLO uygulamasının başlıca özellikleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Kararlı ve yeterli doğrulukta göçme mekanizmaları üretebilmektedir.
- Önceden tanımlanmış kayma yüzeylerine ihtiyaç duymadan karmaşık geometrileri ve göçme mekanizmalarını çözebilmektedir.
- Temel taşıma gücü ve yanal toprak basıncı gibi nihai yükün hesaplandığı problemlerde, limit yükü ve öz ağırlığın etkili olduğu şev stabilitesi gibi problemlerde ise güvenlik sayısını sonuç olarak vermektedir.
- Farklı geoteknik duraylılık problemlerine uygulanabilecek güçlü bir mühendislik aracı olma potansiyeli taşımaktadır.

KAYNAKLAR

Diamond S, Boyd S (2016). CVXPY: a Python-embedded modeling language for convex optimization. J Mach Learn Res 17(83):1–5

Giam, P.S.K. and I.B. Donald (1989), "Example problems for testing soil slope stability programs", Civil Engineering Research Report No. 8/1989, Monash University, ISBN 0867469218, ISSN 01556282.

He, L., Schiantella, M., Gilbert, M., & Smith, C. C. (2023). A Python script for discontinuity layout optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization, 66(7), 152. https://doi.org/10.1007/s00158-023-03583-z

Jia, C. Q., Huang, Q. W., & Xia, B. R. (2014). Stability Analysis of Soil Slope Using Discontinuity Layout Optimization. *Advanced Materials Research*, *1065–1069*, 190–198. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1065-1069.190

Millán, M. A., Galindo, R., & Alencar, A. (2021). Application of discontinuity layout optimization method to bearing capacity of shallow foundations on rock masses. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift Für Angewandte Mathematik und Mechanik*, *101*(10), e201900192. https://doi.org/10.1002/zamm.201900192

Smith, C., & Gilbert, M. (2007). Application of discontinuity layout optimization to plane plasticity problems. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *463*(2086), 2461-2484. https://doi.org/10.1098/rspa.2006.1788

Smith, C. C., & Cubrinovski, M. (2011). Pseudo-static limit analysis by discontinuity layout optimization: Application to seismic analysis of retaining walls. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *31*(10), 1311–1323. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.03.014

Smith, C. C., & Gilbert, M. (2013). Identification of rotational failure mechanisms in cohesive media using discontinuity layout optimization. *Géotechnique*, *63*(14), 1194–1208. https://doi.org/10.1680/geot.12.P.082

Susiyanti, A. D. M., & Lim, A. (2026). Evaluation of Basal Heave Stability for Deep Excavations in Clay using the Discontinuity Layout Optimization Method. *Civil Engineering Dimension*, *28*(1), 83-100. https://doi.org/10.9744/ced.28.1.83-100

Taylor, D. W. (1948). Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley.

The Bentley Systems Team (2024). Plaxis LE Slope Stability 2D/3D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis Verification Manual

Wang, D., Chen, X., Fan, Q., & Yu, Y. (2017). Comparison of Discontinuity Layout Optimization and Finite Element Optimization for Plane Plasticity Problems. The 15th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (15th IACMAG), 19-23 Ekim 2017, Wuhan, China

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
$\boldsymbol{\lambda}$	Güvenlik sayısı	θ_i	Süreksizliğin yatayla yaptığı açı
$\mathbf{f}_L$	Dış yük kayma ve normal bileşenleri	s_i, n_i	Süreksizlik yer değiştirmesinin kayma ve normal sıçraması
l	Süreksizlik uzunluğu		Doğrultman kosinüsleri
$\mathbf{g}$	Kohezyon direnci [F]	α_i, β_i	Kohezyon
$\mathbf{B}$	Uyumluluk matrisi	c	Birim hacim ağırlık
$\mathbf{d}$	Yer değiştirme vektörü	γ	Max. Kazı yüksekliği
$\mathbf{p}$	Plastik çarpan vektörü	H_{max}	
$\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{Ai}}^{\boldsymbol{x}}$	Düğüm yer değ. yatay bileşeni		