

KOHEZYONSUZ DOLGULARDA PASİF GÖÇME MEKANİZMASININ AYRIK ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF PASSIVE FAILURE MECHANISM FOR COHESIONLESS BACKFILLS WITH DISCRETE ELEMENT METHODS

Adlen ALTUNBAŞ¹, Behzad SOLTANBEİĞİ², Özer ÇİNİCİOĞLU³

ÖZET

Bu çalışma, danecik şeklinin ve başlangıç sıklık oranının istinat duvarları arkasında oluşan kohezyonsuz dolgularda meydana gelen göçme mekanizmasına olan etkisini incelemektedir. Bu amaçla, kohezyonsuz dolgulardaki pasif göçme durumunu modelleyebilmek için ayrik elemanlar yönteminden (DEM) faydalanılmıştır. Küresel geometri, danecik şeklinin DEM kullanılarak modellenmesinde kullanılan en basit formudur. Fakat, danecikler arasındaki gözlenen kilitlenme davranışı, küresel daneler kullanılarak yapılan modellerde göz ardı edilebilmektedir ve dolayısıyla bölgesel deformasyonların karmaşık davranışı (kayma bantlarındaki gibi) tam olarak anlaşılamamaktadır. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırabilmek amacıyla, birden fazla kürenin birbirleri üstüne binmesiyle oluşturulan çoklu küre yaklaşımı kullanılmaktadır. Böylelikle, değişik karmaşık özelliklere sahip danecikler oluşturulabilmektedir (köşeli daneler). Bu çalışmada, aynı başlangıç sıklık özelliklerine sahip, küresel ve çoklu küre yöntemi ile oluşturulmuş daneciklerden (köşeli) oluşan dolgular modellenmiştir. Böylelikle, göreceli sıklık parametresi ortadan kaldırılarak, danecik şeklinin kohezyonsuz dolgularda oluşan pasif göçme mekanizması üzerine olan etkisi incelenebilmiştir. Buna ek olarak, çoklu küre yöntemi ile oluşturulan daneciklerle sıkı dolguların göçme karakteristikleri de incelenmiştir. Buna göre, aynı sıklık oranına sahip olan dolguların göçme yüzeylerinin ve duvar arkasında oluşan toplam kuvvetlerinin neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Ayrıca, çoklu küre yöntemi ile oluşturulmuş sıkı dolgulardaki makro davranışı incelendiğinde, danecik şeklinin göreceli sıklık oranından etkilendiği ve sıklık oranı arttıkça etkisinin daha fazla ortaya çıktığı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dane şekli, pasif göçme, istinat duvarı, DEM

¹ Dr. Öğr. Üyesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Medipol Üniversitesi, aaltunbas@medipol.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Dr., AR-GE Mühendisi, Van Oord, Rotterdam, Hollanda soltanbeigi.behzad@gmail.com

³ Prof. Dr., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Boğaziçi Üniversitesi, ozercinicioglu@boun.edu.tr

ABSTRACT

This study investigates the effects of grain shape and initial density on the failure mechanism of cohesionless backfills behind the retaining walls. For this purpose, Discrete Element Modelling (DEM) is employed to simulate the development of passive in a cohesionless soil. Spheres are the simplest form of geometries that can be employed to address the particle shape in DEM. However, the geometrical interlocking is underestimated for spheres, and thus, it is not possible to predict the complex patterns of localized deformations (i.e. shear bands) in granular material. To overcome this shortcoming, multispherical approach can be employed, where multiple spheres are overlapping to create a single particle (angular particle). This enables generating particles with different complexity levels. In this study, granular backfills with similar densities are modelled using both spherical and multispherical particles (angular particle), which helped to cancel out the density effect and highlight the influence of the shape parameter on the failure mechanism at passive state. Additionally, the failure characteristics of the granular backfill are also evaluated for multispheres in a densely packed backfill. The results suggest that for backfills with similar densities, both the failure surface and the total forces acting on the wall are approximately similar. Moreover, assessing the macro behaviour of densely packed multispheres reveal that the particle shape effect depends on the initial density and is only enhanced once particles are in a dense state.

Keywords: Grain shape, passive failure, retaining wall, DEM

1. GİRİŞ

İstinat duvarlarının arkasında meydana gelen göçme yüzeylerinin, göçme mekanizmasının anlaşılmasında son derece etkili olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, dolgu içerisinde oluşan deformasyon bölgelerinin belirlenmesi, zemin deformasyonlarından kaynaklanan birçok geoteknik problemin anlaşılmasına olanak sağlamaktadır. Literatür incelendiğinde, dolgu içerisinde meydana gelen göçme davranışına etki eden başlıca parametreler arasında danecikler arasındaki içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri, duvar ve dolgu arasındaki sürtünme, duvar hareketinin şekli ve duvar geometrisi olduğu sonucuna varılmıştır (Hanna ve Al Khoury, 2005; Nadukuru ve Michalowski, 2012; Niedostatkiewicz vd., 2011; Rechenmacher vd., 2011; Soltanbeigi vd., 2018; Tejchman vd., 2007; Toyosawa vd., 2006). Bu çalışmalara ilave olarak, son yıllarda danecik şeklinin de dolgu arkasından meydana gelen göçme mekanizması üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Danecik dağılımının ve danecik şeklinin duvar arkasındaki dolgularda meydana gelen göçme davranışına olan bu etkisi, model deneyler (Altunbas vd., 2017; Keshavarz ve Pooresmaeil, 2016; Lee, 2019; Niedostatkiewicz, vd., 2011; Cinicioglu vd., 2015) ve nümerik çalışmalar (Altunbas vd., 2019; Altunbas vd., 2021, Gezin vd., 2021, Jiang vd., 2014; Widuliński vd., 2011; Soltanbeigi vd. 2020;) yapılarak anlaşılmaya çalışılmıştır. Fakat, yapılan bu model deneyler ve sonlu elemanlar programları ile yapılan bu çalışmalar danecik şeklinin etkisini mikro düzeyde incelenmesine olanak sağlayamamıştır.

Bu nedenle, bu çalışma kapsamında, kohezyonsuz dolgularda gerilmeler sonucu meydana gelen göçme yüzeylerine, danecik şekillerinin ve başlangıç sıklık oranlarının etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, rijit bir istinat duvarı modeli ve bu duvarın arkasındaki dolguyu meydana getiren danecikler Ayırık Elemanlar Yöntemi (DEM) kullanılarak modellenmeye

çalışılmıştır. Literatür incelendiğinde, dane şeklinin, göçme davranışı üzerindeki etkisi DEM analizlerinde iki farklı teknik kullanılarak modellenenilmektedir: küresel danelerin dönme özgürlüğünün kısıtlanması (yuvarlanma direnci atayarak) ve küresel daneleri birleştirilmesi (çoklu küre yöntemi) (Soltanbeigi vd., 2018, Soltanbeigi vd., 2021b). Küresel olmayan daneler için şekil etkisi, dane köşelilik faktörü (AF) kullanılarak hesaplanır. Yapılan modellemelerde öncelikli olarak aynı göreceli sıklık oranına olan sahip sıkı dolgular hazırlanarak, dane şekil etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, dane köşelilik faktörünün (AF) göçme yüzeylerinin geometrisi ve duvara etkiyen toplam kuvvet üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Fakat, danecik şekil etkisinin kendisini gösterebilmesinin başlangıç sıklık oranının değerine bağlı olduğu görülmüştür. Ek olarak, aynı danecik şekline sahip, fakat farklı sıklık oranına sahip olan dolguların göçme mekanizmalarının da incelenmiştir. Buna göre, başlangıç sıklık oranı yüksek olan dolgularda daha belirgin kayma bantlarının olduğu, görece daha gevşek dolgularda ise kayma bandının daha geniş bir alan içerisinde ve daha dağınık bir şekilde olduğu görülmüştür.

2. YÖNTEM

2.1. DEM

DEM modeli oluşturulurken ilk adım model geometrisini doğru bir şekilde tanımlamaktır. Belirtilen bu nümerik modelde, tekrarlanan hesaplamalar dinamiğin temel yasasını oluşturan Newton'un ikinci yasasına dayanmaktadır. Buna göre bir parçacık üzerindeki net kuvvet, onun çizgisel momentumunun zamanla değişimi ile orantılı olması üzerine kuruludur. Kuvvet-yer değiştirme kanunu, taneler arası kuvvetler ile ortaya çıkan yer değiştirmeler arasında bağlantıyı hesaplamak için kullanılır. Her bir parçacık üzerine etkiyen toplam normal ve kesme kuvvetleri, parçacıklar arası kuvvetler ve parçacık üzerine etki eden kuvvetlerin her bir zaman aralığı için hesap edilmesiyle elde edilir. Taneler arası temas kuvvetleri belirlendikten sonra Newton'un ikinci hareket kanunu uygulanır. Belirlenen iki başarılı zaman adımı arasında, ivme, hız ve her parçacığın yer değiştirmesi elde edilir. *i* parçacığı için hareket denklemi Denklem (1) ile verilmektedir:

$$m_i (d^2x_i/dt^2) = f_i + m_i g \quad (1)$$

Burada m_i parçacığın kütlesi, t zaman, x_i konumu, g yerçekimine bağlı ivme ve f_i parçacık temaslarından dolayı parçacığa etkiyen kuvvettir ve Denklem (2) ile tanımlanır:

$$f_i = \sum f_i^c \quad (2)$$

i parçacığı için dönme hareketi denklemi şu şekilde verilir:

$$I_i (d\omega_i/dt) = T_i \quad (3)$$

Bu eşitlikte I_i , *i* parçacığı için eylemsizlik momentidir, ω_i onun açısal hızıdır ve T_i , Denklem (4) ile tanımlanan, ona etki eden toplam torktur:

$$T_i = \sum I_i^c \cdot f_i^c \quad (4)$$

burada l_i , Denklem (5) ile tanımlanan i parçacığının dal vektörüdür:

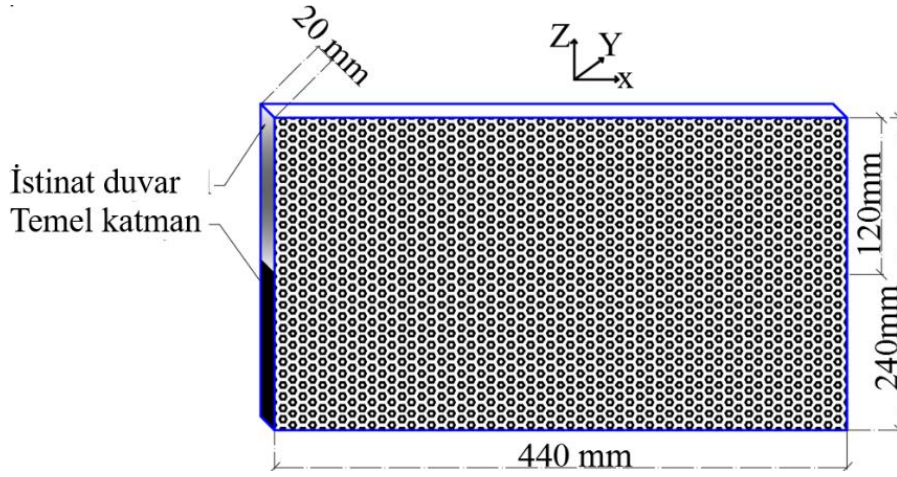
$$l_i = r_i - r \quad (5)$$

DEM teorisi ve bireysel parçacıklar için konum ve kuvveti hesaplamaya yönelik ayrıntılı bilgi O'Sullivan (2014) tarafından yapılan çalışmada anlatılmaktadır. DEM teorisi ve her bir tekil parçacık için kuvvet ve pozisyon hesabının çalışma prosesi literatürde ayrıntılı olarak mevcuttur ve burada yer verilmemiştir.

2.2. Nümerik Model

Bu çalışma kapsamında, kohezyonsuz dolguların pasif göçme durumundaki davranışını modelleyebilmek için EDEM parçacık simulasyon yazılımı kullanılmıştır (DEM Solutions Ltd. 2014). Düzlem sınır koşulu altında deforme olabilen kohezyonsuz bir dolgu, Şekil 1'de gösterildiği gibi DEM kullanılarak modellenmiştir. Modellenen istinat duvarı rijit olup, pürüzlü bir yüzeye sahiptir ve yatay yönde hareket ettirilerek dolgu yönünde itilerek pasif göçme durumu modelleyebilmektedir. Oluşturulan model dolgu derinliği boyunca (y yönünde) periodik sınır koşulu ile sınırlandırılmıştır. Bunun yanında, yatak sınır etkisini ortadan kaldırabilmek amacıyla modelin alt kısmında danelerden oluşan bir tabaka oluşturulmuştur. Bu amaçla Tablo 1'de gösterildiği gibi küresel ve köşeli olmak üzere iki farklı danecik şekli EDEM programı kullanılarak modellenmiştir. Bu tabakadaki tanelerin özellikleri dolguyu oluşturan taneler ile aynıdır ve yükseklikleri ortalama tane çapının 10 katıdır. Tablo 2, DEM modelinde kullanılan değişkenlerin listesi sunulmaktadır.

Dane şekil faktörünü inceleyebilmek amacıyla, öncelikli olarak aynı başlangıç sıklık oranına sahip dolgular elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla küresel danelerin oluşturduğu dolgu hazırlanırken danecikler arasında sürtünmedin olmadığı kabul edilerek en sıkı biçimde doldurularak göreceli sıklık oranı yüksek bir dolgu elde edilmeye çalışılmıştır. Bu koşullardaki doluluk oranı (Do) 0.73'tür. Fakat, köşeli danecikler arasında sürtünme verilmediği takdirde elde edilen sıklık oranı, küresel danelerin oluşturduğu sıklık oranının sıklık değerine ulaşamamıştır. Aynı sıklık oranına sahip olabilmeleri için küresel danelerin arasına da bir miktar sürtünme verilip aynı göreceli sıklık oranına getirilmesi sağlanmıştır. Doluluk oranı (Do), her iki tip danecik ile oluşturulan farklı dolgularda yaklaşık olarak aynı değerlerin elde edilmesiyle bu koşul sağlanmıştır. Bu oran yaklaşık olarak 0.66 civarındadır. Bu koşullar sağlandığında, göreceli sıklık oranından bağımsız olarak danecik şekil etkisinin incelenmesi mümkün olmuştur. Buna ek olarak, köşeli danelerin arasındaki sürtünmeyi sıfır kabul ederek alabileceği en sıkı başlangıç sıklık oranı elde edilmiştir. Böylelikle, ilk durumda aralarına sürtünme verilerek hazırlanan dolgu ile son durumda elde edilen sıkı dolgunun göçme mekanizmaları arasındaki farklar ortaya konulmuştur. Bu doğrultuda, kayma yüzeyi geometrisi ve duvar arkasında oluşan toplam kuvvetler incelenmiştir. Her durum için rijit duvar 2 mm/sn hız ile dolguya doğru sabit bir hızla itilerek gerilmelerden kaynaklı meydana gelen deformasyon incelenmeye çalışılmıştır.



Şekil 1. Nümerik istinat duvarı model geometrisi

Tablo 1. Danecik şekil özellikleri ve dolgu doluluk oranları

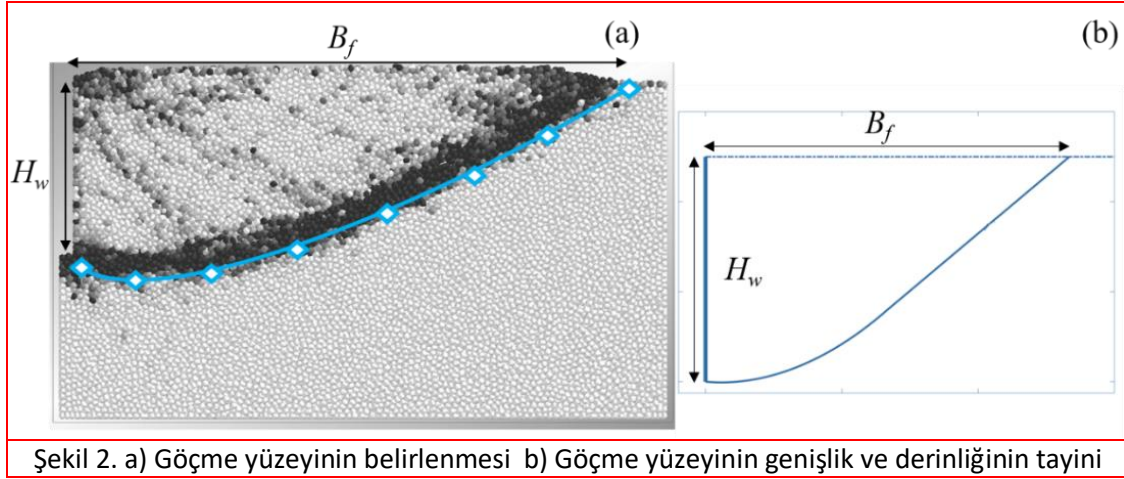
Parametre	S ₁	S ₂
Dane Şekli		
Köşelilik faktörü	0	3.44
Doluluk oranı *	0.66	0.732

* Sıkı hazırlanmış numuneler

Tablo 1. DEM malzeme özellikleri

Parametre	Birim	Değer
Eşdeğer çap	mm	5
Yoğunluk	kg/m ³	2650
Model ile danecikler arasındaki sürtünme	-	0.45
Daneler arası sürtünme	-	0 – 0.68
Poisson oranı	-	0.25
Kayma modülü	Pa	2.8e10
DEM zaman adımı	s	2e-6

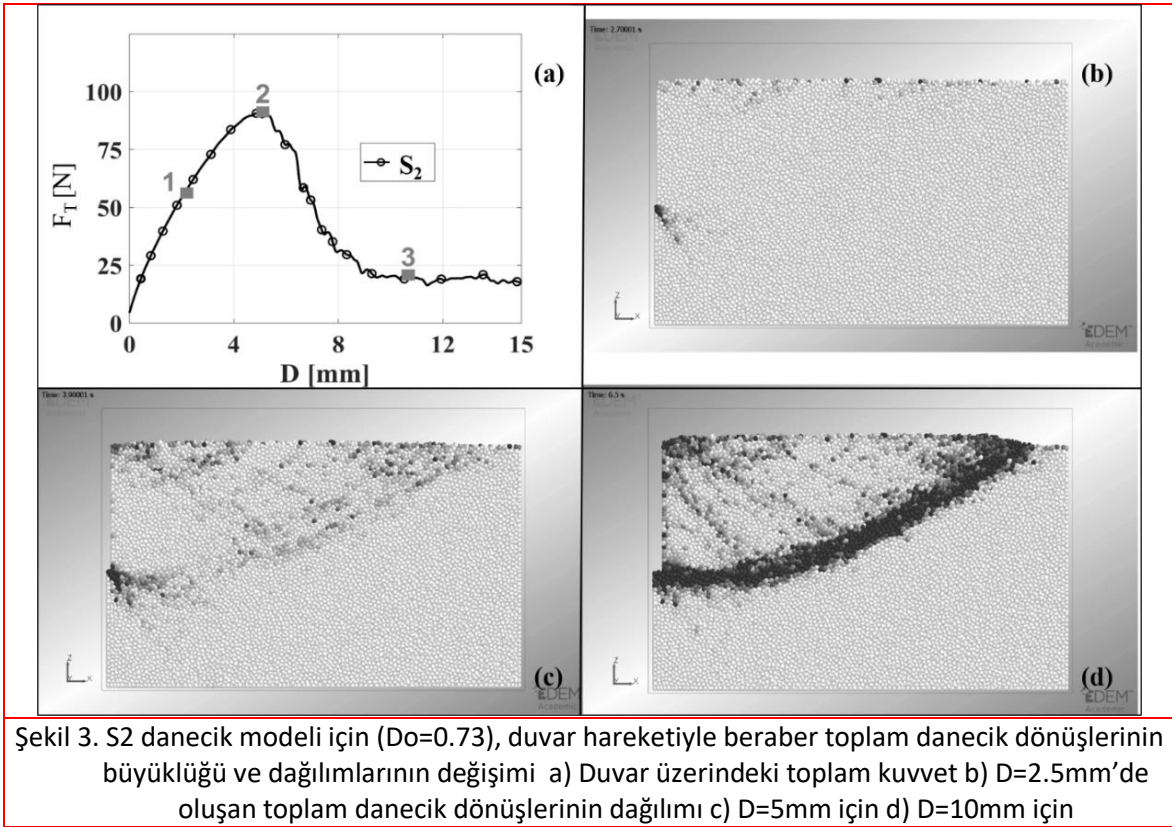
Analizlerden elde edilen sonuçlara dayalı olarak kayma yüzeyi geometrisi elde edilmiştir. Bu amaçla, toplam tanecik dönme değerleri kullanılarak elde edilen kayma bandının Şekil 2a'da gösterildiği gibi, dış yüzeyinin koordinatları belirlenerek dolgu içerisinde meydana gelen pasif göçme yüzeyi elde edilebilmiştir. Belirlenen göçme kamasının derinliği ve genişliği Şekil 1b'de gösterildiği gibi dikkate alınmıştır.



3. ANALİZLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Pasif göçme mekanizması üzerinde parçacık şekil etkisini görebilmek amacıyla iki ayrı dane şekli modellenmiştir. İlk adımda, sıkı bir dolgu hazırlayabilmek için, daneler arasındaki sürtünme etkisi, dolgu oluşturulurken ortadan kaldırılmıştır. Dolgu oluşturulduktan sonra, duvarın üstünden kalan daneler nümerik modelden çıkarılarak, danecikler arası sürtünme istenen değere getirilmiştir. Bu aşamadan sonra rijit duvar 2 mm/sn hız ile dolguya doğru sabit bir hızla itilerek, gerilmelerden kaynaklı meydana gelen deformasyon incelenmeye çalışılmıştır. Bu aşamalar için detaylı bilgiler Soltanbeigi vd. (2021a) verilmiştir.

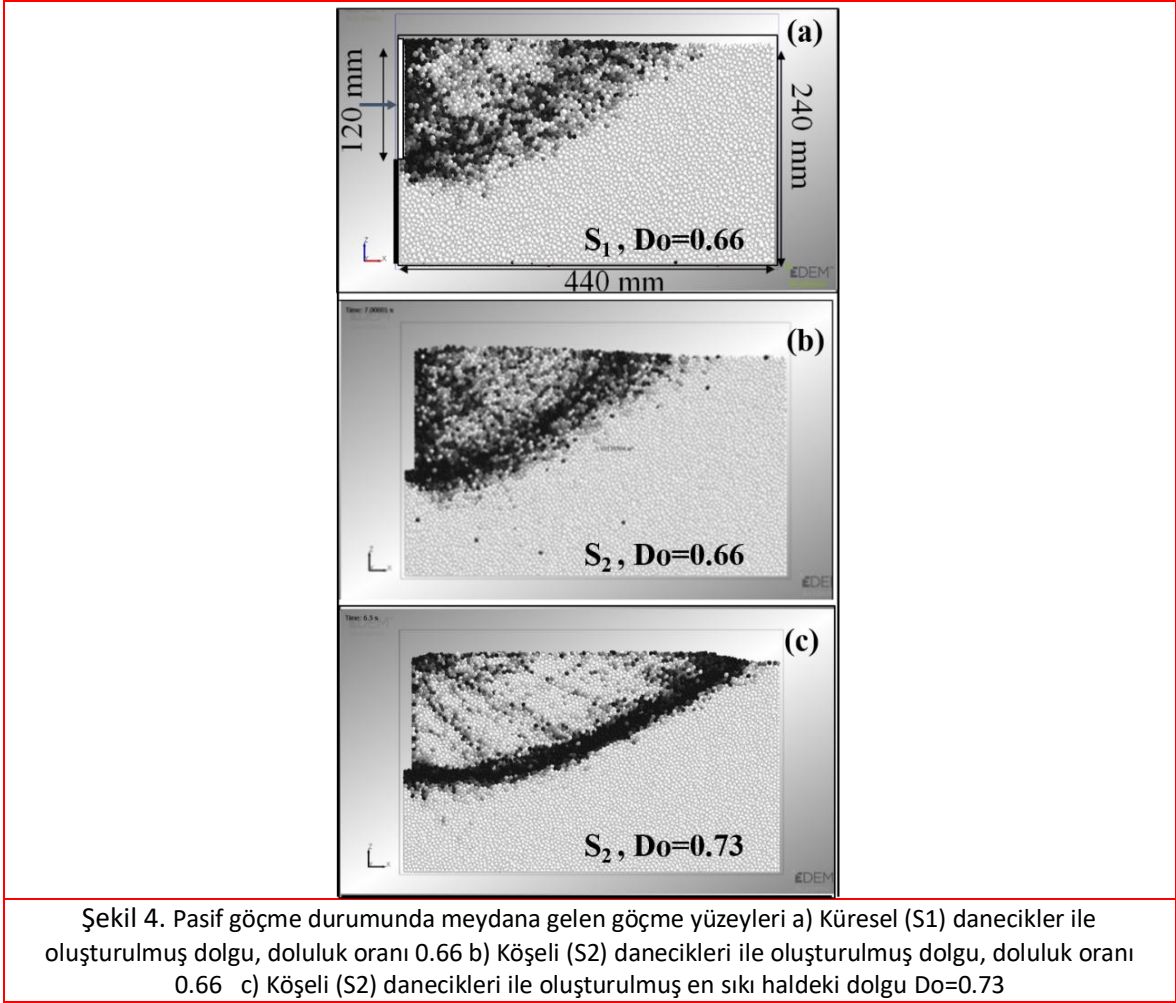
Dolgu arkasında meydana gelen göçme yüzeyinin tanımlanabilmesi için, her bir tanenin toplam dönme değeri hesaplanıp ve dolgu içindeki dağılımları elde edilerek göçme kaması belirlenmiştir. Şekil 3'te gösterildiği gibi toplam dönme değerleri duvarın hareketiyle beraber değişkenlik göstermektedir. Bu dağılımlar göz önüne alınarak başlangıç anından kritik duruma ulaşıncaya kadar olan değişimler izlenebilmiştir. Şekil 2b'de görüldüğü üzere duvar hareket etmeye başladığı andaki ilk durumda, belirgin bir göçme yüzeyi elde edilememiştir. Fakat, duvar hareketi devam ettirildiğinde kayma yüzeyi boyunca toplam dönme hareket değerlerinin, sabit bölgelerden kolaylıkla ayrılması, göçme yüzeyinin tanımlanmasına olanak sağlamıştır.



Şekil 3. S2 danecik modeli için ($D_o=0.73$), duvar hareketiyle beraber toplam danecik dönüşlerinin büyüklüğü ve dağılımlarının değişimi a) Duvar üzerindeki toplam kuvvet b) $D=2.5$ mm’de oluşan toplam danecik dönüşlerinin dağılımı c) $D=5$ mm için d) $D=10$ mm için

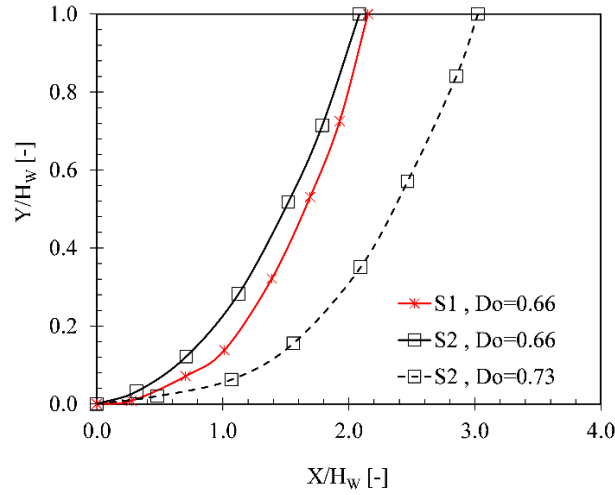
Danecik şeklinin göçme yüzeyine olan etkisini anlayabilmek amacıyla hazırlanan iki farklı dane ile oluşturulmuş ve başlangıç sıklık oranı sıkı olacak şekilde hazırlanan dolguların toplam dönme büyüklüğü dağılımları Şekil 4’te verilmiştir. Görüldüğü üzere, S1 olarak tanımlanan küresel daneciklerin olduğu dolgu içerisinde belirgin olmayan ve kayma kaması içerisine doğru dağılım gösteren bir göçme modeli elde edilmiştir (Şekil 4a). Bunun aksine, S2’nin temsil ettiği köşeli daneciklerle elde edilmiş dolguda ise daha belirgin bir şekilde göçme bandının oluştuğu görülmüştür (Şekil 4b).

Bilindiği üzere göçme mekanizması üzerine etki eden diğer önemli parametrelerden biri de başlangıç sıklık oranıdır. Başlangıç sıklık oranının etkisini köşeli daneler için (S2) değerlendirebilmek amacıyla, ilave olarak Şekil 4c’de gösterildiği gibi danecikler arası sürtünmenin sıfır olduğu bir dolgu modeli de oluşturulmuştur. Bu sonuçlar incelendiğinde, birbirlerine göre göreceli olarak gevşek ve sıkı olarak hazırlanan dolguların göçme mekanizmalarında farklılıklar olduğu görülmüştür. Diğer bir ifade ile birbirlerine göre göreceli olarak sıkı dolgularda belirgin bir şekilde oluşan kayma bantları, gevşek dolgularda görülmemekle beraber daha dağınık bir oluşum göstermektedir.



Daneciklerin toplam dönme değerleri kullanılarak elde edilen bu göçme modellerinden faydalanarak pasif göçme yüzeyi geometrileri de elde edilmiş ve Şekil 5'te görüldüğü gibi birbirleri ile kıyaslanmıştır. Buna göre, aynı göreceli sıkılık değeri için ($Do=0.66$), küresel daneleri temsil eden S1 danelerinin göçme yüzeyi, köşeli daneleri temsil eden S2 danelerinin oluşturduğu göçme yüzeyinden çok az bir değerde farklılık göstermektedir. Fakat, yukarıda belirtildiği üzere, köşeli danelerin oluşturduğu kayma bandı daha belirgin bir şekilde oluşmaktadır.

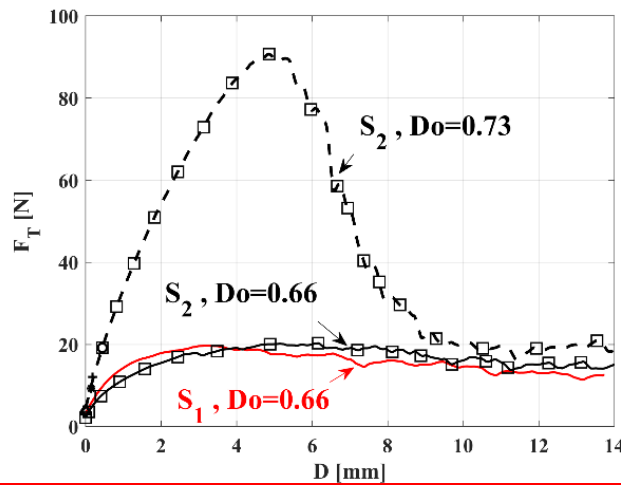
Aynı şekle sahip danecikler kullanılarak danecik şekil etkisi bertaraf edildiğinde ve başlangıç sıkılık oranlarının etkisi incelendiğinde ise sıkı dolgunun ($Do=0.73$) göçme kamasının belirgin bir şekilde büyüdüğü görülmüştür.



Şekil 5. Pasif göçme durumunda S1 ve S2 danecikleri ile oluşan göçme yüzeyleri ve gevşek ve sıkı durumda S2 için elde edilen göçme yüzeyleri

Pasif göçmeye giderken, rijit duvar üzerine etki eden toplam kuvvetler hesaplanmış ve duvar hareketi ile değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Aynı doluluk oranına sahip S1 ve S2 numunelerinde, dane şekil özellikleri farklı olmasına rağmen duvar üzerine etkiyen toplam kuvvetler (F_T) yaklaşık olarak aynı elde edilmiştir. Bu sonuç, yukarıda Şekil 5 de elde edilen göçme geometrisiyle doğru orantılıdır. Diğer bir ifade ile, benzer kayma yüzeyine sahip dolguların yine duvar üzerine etkiyen toplam kuvvetlerinin de benzer olması beklenmektedir. Fakat, köşeli daneye (S2) sahip sıkı numunede ($Do=0.73$) duvar arakasında oluşan toplam kuvvet (F_T), $Do=0.66$ olarak hem köşeli hem de küresel danelerin oluşturduğu toplam kuvvetten yaklaşık olarak dört kat daha fazladır.

Elde edilen bu sonuçlara bağlı olarak, dane şekil etkisinin başlangıç sıklık oranına bağlı olarak etkisini gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 6. Duvar üzerinde meydana gelen toplam kuvvetin danecik şekline (S1-S2) ve sıklık oranına bağlı olarak değişimi

4. SONUÇLAR

Bu çalışma, granüler dolgularda pasif göçme mekanizmasına danecik şeklinin ve bununla birlikte sıklık oranının etkisini anlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, ayırık elemanlar yöntemi (DEM) kullanılarak, küresel ve köşeli olmak üzere iki farklı danecik şekli belirlenmiş ve göçme sırasında meydana gelen deformasyonlar üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Buna göre, granüler dolgu içinde oluşan kayma kamasının danecik şeklinden etkilendiği görülmüştür. Diğer bir ifade ile aynı sıklık oranına sahip küresel danelerden oluşan dolgu içerisinde meydana gelen kayma yüzeyinin dağınık bir şekilde oluştuğu, fakat köşeli danelerden oluşan dolguda ise meydana gelen göçme yüzeyinin çok daha belirgin oluştuğu ve kayma kamasının içinde yine bazı göçme bantlarının meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Fakat, danecik şekil etkisinin kendisini gösterebilmesinin başlangıç sıklık oranının değerine bağlı olduğu sonucuna varılmıştır. Ek olarak, aynı danecik şekline sahip, fakat farklı sıklık oranına sahip olan dolguların göçme mekanizmalarından farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, başlangıç sıklık oranı yüksek olan dolgularda belirgin bir şekilde oluşan kayma bantları, gevşek dolgularda görülmemekle beraber daha dağınık bir oluşum göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Altunbas, A., Soltanbeigi, B. ve Cinicioglu, O. (2017) "Determination of Active Failure Surface Geometry for Cohesionless Backfills" *Geomechanics and Engineering*, 12(6), pp.983-1001.
- Altunbaş, A., Soltanbeigi, B. and Çiniciöğlü, O. (2019) "DEM analysis of passive failure state behind a rigid retaining wall: effect of boundary conditions" In 7th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, IS-Glasgow 2019. EDP Sciences.
- Altunbas, A., Soltanbeigi, B. ve Cinicioglu, O. (2021) "DEM modelling of retained backfill: Influence of particle shape for different stress paths and densities" *Geomechanics and Engineering*, 27(3), pp.273-290.
- Cinicioglu, O., Altunbas, A., Soltanbeigi B., ve Gezgin, A.T. (2015), "Characterization of Active Failure Wedge for Cohesionless Soils", In *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development* (pp. 3135–3140).
- Gezgin, A.T., Soltanbeigi, B., Altunbas, A. and Cinicioglu, O., (2021) "Multi-scale investigation of active failure for various modes of wall movement" *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 15(4), pp.961-979.
- Hanna, A., ve Al Khoury, I. (2005) "Passive Earth Pressure of Overconsolidated Cohesionless Backfill", *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 131(8), 978–986.
- Jiang, M. J., Yu, H. S., ve Harris, D. (2005), "A Novel Discrete Model for Granular Material Incorporating Rolling Resistance", *Comput. Geotech.*, 32(5), 340–357.
- Keshavarz, A., ve Pooresmaeil, Z. (2016) "Static and Seismic Active Lateral Earth Pressure Coefficients for c-φ Soils", *Geomech. Eng.*, 10(5), 657–676.

- Lee, S. W. (2019) "Experimental Study on Effect of Underground Excavation Distance on the Behavior of Retaining Wall", *Geomech. Eng.*, 17(5), 413–420.
- Nadukuru, S. S. ve Michalowski, R. L. (2012) "Arching in Distribution of Active Load on Retaining Walls", *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 138(5), 575–584.
- Niedostatkiwicz, M., Lesniewska, D. ve Tejchman, J. (2011) "Experimental Analysis of Shear Zone Patterns in Cohesionless for Earth Pressure Problems Using Particle Image Velocimetry", *Strain*, 47(SUPPL. 2), 218–231.
- O'Sullivan, C. (2011) "Particulate Discrete Element Modelling: A Geomechanics Perspective" CRC Press.
- Rechenmacher, A. L., Abedi, S., Chupin, O. ve Orlando, A. D. (2011) "Characterization of Mesoscale Instabilities in Localized Granular Shear Using Digital Image Correlation", *Acta Geotech.*, 6(4), 205–217.
- Soltanbeigi, B., Podlozhnyuk, A., Papanicolopoulos, S.A., Kloss, C., Pirker, S. ve Ooi, J.Y. (2018) "DEM Study of Mechanical Characteristics of Multi-spherical and Superquadric Particles at Micro and Macro Scales" *Powder Technology*, 329, pp.288-303.
- Soltanbeigi, B., Altunbaş, A., Gezgin, A.T. ve Çinicioglu, O. (2020) "Determination of Passive Failure Surface Geometry for Cohesionless Backfills" *Periodica Polytechnica Civil Engineering*.
- Soltanbeigi, B., Altunbaş, A., Cinicioglu, O. (2021a), "Influence of Dilatancy on Shear Band Characteristics of Granular Backfills" *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 25(7), 1201-1218.
- Soltanbeigi, B., Podlozhnyuk, A., Kloss, C., Pirker, S., Ooi, J.Y. ve Papanicolopoulos, S.A. (2021b) "Influence of Various DEM Shape Representation Methods on Packing and Shearing of Granular Assemblies" *Granular Matter*, 23(2), pp.1-16.
- Tejchman, J., Bauer, E., ve Tantonio, S. F. (2007) "Influence of Initial Density of Cohesionless Soil on Evolution of Passive Earth Pressure", *Acta Geotech.*, 2(1), 53–63.
- Toyosawa, Y., Itoh, K., Tamrakar, S. B., ve Suemasa, N. (2006), "Redistribution of Active Earth Pressures Using Movable Earth Support Apparatus in Centrifuge", *Proc. 6th Int. Conf. Phys. Model. Geotech. - Phys. Model. Geotech. - 6th ICPMG '06*, 2(4), 1113–1118.
- Widuliński, Ł., Tejchman, J., Kozicki, J., ve Leśniewska, D. (2011) "Discrete Simulations of Shear Zone Patterning in Sand in Earth pressure problems of a retaining wall", *Int. J. Solids Struct.*, 48(7), 1191–1209.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
S_1	Küresel danecik	m_i	Parçacığın kütlesi
S_2	Köşeli danecik	t	Zaman
AF	Köşellilik faktörü	I_i	Eylemsizlik moment
g	Yerçekimine bağlı ivme	ω_i	Açılma hızı
x_i	Konum	T_i	Toplam tork
f_i	Parçacığa etkiyen kuvvet	l_i	Dal vektörü
F_T	Duvara etkiyen toplam kuvvet	B_f	Kayma yüzeyinin genişliği
Do	Doluluk oranı	H_w	Duvar yüksekliği

