

TANECİK BOYUTU VE ŞEKLİNİN AÇIK UÇLU KAZIK PENETRASYONU ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN AYRIK ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

ANALYSIS OF THE EFFECT OF PARTICLE SIZE AND SHAPE ON OPEN-ENDED PILE PENETRATION USING DISCRETE ELEMENT METHOD

Ahmet Talha GEZGİN¹, Özer ÇİNİCİOĞLU², S. Feyza ÇİNİCİOĞLU³

ÖZET

Sürdürülebilir enerji kaynaklarının başında gelen rüzgâr türbinlerinin inşası sırasında en sık kullanılan temel sistemi açık uçlu tekil kazıkların yerleşim sırasındaki davranışlarını yorumlamak çok önemlidir. Açık uçlu kazıklar, kurulum aşamasında kapalı uçlu kazıklara kıyasla önemli ölçüde farklı davranışlar sergilemektedir. Bu nedenle penetrasyon mekanizması açık uçlu kazıklar için özel olarak araştırılmalıdır. Açık uçlu kazık davranışını ve kazık-zemin etkileşimini etkileyen birçok faktör vardır. Tanecik boyutu ve tanecik şekli bu faktörlerden üzerine fazla çalışma gerçekleştirilmemişlerden bazılarıdır. Bu çalışma kapsamında, granüler zeminlerin tanecik boyutları ve şekillerinin açık uçlu kazık penetrasyonu üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu etkilerin incelenmesi için ayrik elemanlar yönteminden (DEM) yararlanılmıştır. DEM zemin gibi granüler malzemelerin doğaları gereği oldukları gibi tanecikli yapıda modellenebilmesine olanak sağlayan güçlü bir araçtır. Zemin modellerinin taneciklerin bir araya getirilerek oluşturulması, zemin-kazık etkileşimlerinin çok ölçekli araştırılmasını mümkün kılmaktadır. Bu doğrultuda, tanecik boyutu ve şeklinin etkisi makro açıdan penetrasyon direncinin; mikro açıdan ise penetrasyon boyunca kazık içerisine yerleşen taneciklerin ortalama koordinasyon sayılarının üzerinden değerlendirilmiştir. DEM analiz sonuçlarına göre; tanecik boyutunun azalması penetrasyon direncinde azalmaya, ortalama koordinasyon sayısında ise artışa sebep olmaktadır. Tanecik şeklinin bir parametresi olan en-boy oranındaki (AR) azalmayla birlikte ise hem penetrasyon direncinde hem de ortalama koordinasyon sayısında artış gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Açık uçlu kazıklar, ayrik eleman modellemesi, tanecik boyutu, tanecik şekli, kazık penetrasyon direnci, koordinasyon sayısı

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, ahmettalhagezgin@uludag.edu.tr (Sorumlu Yazar)

² Prof. Dr., Boğaziçi Üniversitesi, ozercinicioglu@bogazici.edu.tr

³ Prof. Dr., Özyeğin Üniversitesi, feyza.cinicioglu@ozyegin.edu.tr



ABSTRACT

It is very important to interpret the behavior of open-ended single piles, the most used foundation system during the construction of wind turbines, which are one of the most sustainable energy sources. Open-ended piles behave significantly differently compared to closed-ended piles during the installation phase. Therefore, the penetration mechanism should be investigated specifically for open-ended piles. Many factors influence open-ended pile behavior and pile-soil interaction. Particle size and particle shape are some factors that have not been studied extensively. This study investigates the effects of particle size and particle shape of granular soils on open-ended pile penetration. The discrete element method (DEM) was used to investigate these effects. DEM is a powerful tool that allows granular materials such as soils to be modeled as granular. The fact that soil models are generated by assembling particles makes it possible to investigate soil-pile interactions multi-scale. Accordingly, the effect of particle size and shape was evaluated in terms of penetration resistance from a macro perspective and the average coordination number of particles in the pile during penetration from a micro perspective. According to the DEM analysis results, a decrease in particle size causes a decrease in penetration resistance and an increase in the average coordination number. With the decrease in aspect ratio (AR), which is a parameter of particle shape, an increase in both penetration resistance and average number of coordination was observed.

Keywords: Open-ended piles, discrete element modeling, particle size, particle shape, pile penetration resistance, coordination number

1. GİRİŞ

Rüzgâr türbinleri yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanmak için son derece kullanışlıdır. Rüzgâr türbinleri hizmet ömürleri boyunca birçok statik ve dinamik yüke maruz kalırlar. Bu nedenle, türbin temel sistemleri rüzgâr türbini stabilitesi için çok önemlidir. Açık deniz rüzgâr türbinleri için en çok kullanılan temel sistemi açık uçlu kazıklardır (O'Kelly ve Arshad, 2016). Bu nedenle, rüzgâr türbinleri için kullanılan tek açık uçlu kazıkların kurulum sırasında ve sonrasındaki davranışlarını yorumlamak önemlidir. Açık uçlu kazıkların davranışı, kapalı uçlu kazıklarınkinden önemli ölçüde farklıdır (Fattah ve Al-Soudani, 2016; Lee vd., 2003). Bu nedenle araştırmada davranışı incelenen kazıkların açık uçlu olması gerekmektedir. Açık uçlu tekil kazıkların davranışlarının incelenmesinde bazı araştırmacılar arazi ve laboratuvar deneylerinden faydalanırken (Fattah ve Al-Soudani, 2016; Ko ve Jeong, 2015), bir diğer kısmı ise sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak gerçekleştirilen sayısal modellemeleri kullanmayı tercih etmişlerdir (Haiderali vd., 2013). Bununla birlikte, arazi ve laboratuvar deneyleri zeminin gerilim ve deformasyon durumlarının ölçümünde yetersiz kalabilmektedir. FEM yöntemi ise araştırmacılara büyük kolaylıklar sağlamasına rağmen, özellikle büyük deformasyonları ve süreksiz problemleri analiz etmede sınırlı kalmaktadır. Her iki farklı yöntemin de kendine has bazı eksiklikleri olması, açık uçlu kazıkların davranışının gözlemlenebilmesi için alternatif bir yöntem ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Ayrık elemanlar yöntemi (DEM) bu açıdan diğer yöntemlerin eksiklerini giderebilecek bir yöntem olarak dikkat çekmektedir.



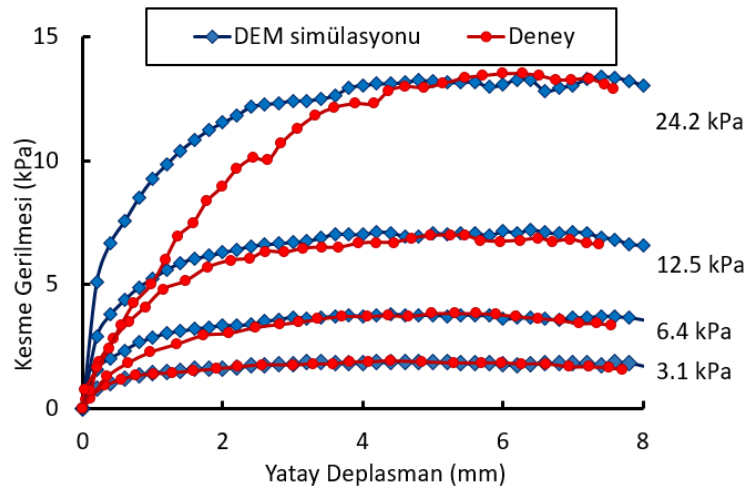
DEM, Cundall ve Strack (1979) tarafından geliştirilmiş, temel prensibi iki ayrı tanecik arasındaki etkileşime dayanan sayısal bir yöntemdir. DEM, zeminlerin doğada var oldukları gibi granüler bir yapıda modellenmesini sağlamaktadır. DEM yönteminin bu avantajı, kazık-zemin etkileşimi problemlerinin çok ölçekli olarak ele alınabilmesini mümkün kılmaktadır (Gezgin ve diğ., 2022). Bu nedenle, birçok araştırmacı rüzgâr türbini temel sistemi olarak açık uçlu kazıklar üzerine yaptıkları çalışmalarda DEM yöntemini kullanmışlardır (Guo vd., 2020; Li vd., 2019; Liu vd., 2019).

Bununla birlikte, literatürde yer alan çalışmaların hiçbirinde zemin tanecik özelliklerinin (boyut ve şekil) etkisi açık uçlu kazıkların davranışı üzerindeki etkisi incelenmemiştir. Zeminlerin taneciklerinde gözlemlenen bu farklılıkların kazık – zemin etkileşimi ve kazık davranışları üzerinde önemli bir etkisinin olduğu bilinmektedir (Gezgin vd., 2020). Dolayısıyla, bu çalışma DEM modellemesinde tanecik boyutu ve şeklinin açık uçlu kazık penetrasyonu üzerindeki çok ölçekli etkisini DEM yönteminden yararlanarak göstermeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, açık uçlu kazık penetrasyonunun makro etkisi için kazık penetrasyon dirençleri, mikro etkisi için ise penetrasyon boyunca kazık içerisine konumlanan taneciklerin ortalama koordinasyon sayısı göz önüne alınmıştır.

2. AÇIK UÇLU KAZIK PENETRASYONUNUN DEM MODELLEMESİ

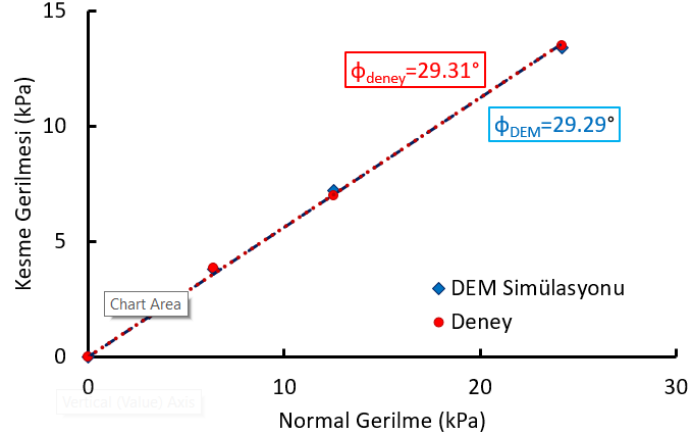
2.1. Doğrulanmış DEM Modeli

DEM yönteminde ilk adım olarak, parametreleri doğrulanmış bir model elde etmek gerekmektedir. Söz konusu doğrulamanın yapılması için daha önce yapılmış deney veya sayısal analiz sonuçları kullanılmaktadır (Müller vd., 2009; Mack vd., 2011; Gezgin vd., 2021). Bu doğrultuda, açık uçlu kazık penetrasyonu için doğrulanmış bir DEM modeli elde etmek amacıyla Härtl ve Ooi (2008) tarafından gerçekleştirilen Jenike kesme deneylerinin sonuçları kullanılmıştır. Doğrulama aşamasının ayrıntıları Gezgin vd. (2023) tarafından açıklanmıştır. Deneyler ile DEM simülasyonlarının sonuçlarının karşılaştırması Şekil 1 ve Şekil 2’de; doğrulanmış DEM modelinin parametreleri ise Tablo 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Deneyler ile DEM simülasyonları için kesme tepkisi karşılaştırmaları (Gezgin vd., 2023)





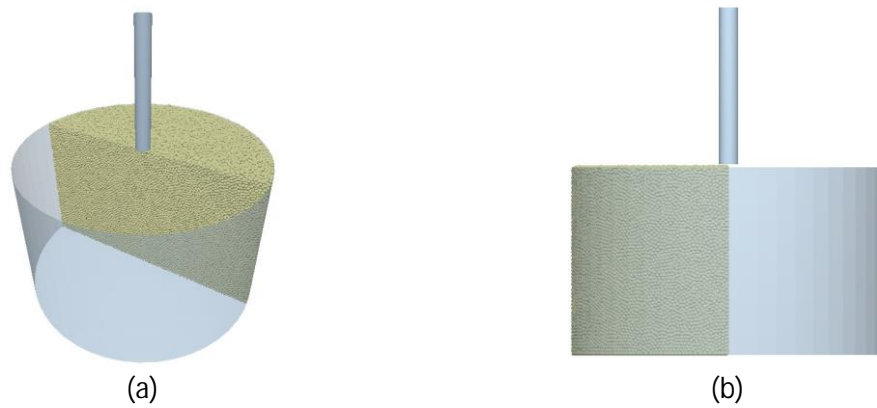
Şekil 2. Deneysel sonuçlar ile DEM simülasyonları için sürtünme açısı karşılaştırmaları (Gezgin vd., 2023)

Tablo 1. Doğrulanmış DEM model parametreleri (Gezgin vd., 2023)

Tanecik özellikleri	Değer
Tanecik yoğunluğu (kg/m^3)	2550
Tanecik kesme modülü (MPa)	167
Tanecik Poisson oranı (-)	0,22
Tanecikler arası sürtünme katsayısı (-)	0,2
Tanecik ve hücre halkaları arasındaki sürtünme katsayısı (-)	0,13
Sıçrama katsayısı (-)	0,87
Yuvarlanma katsayısı (-)	0

2.2. Açık Uçlu Kazık Penetrasyonu DEM Modelinin Oluşturulması

Oluşum sürecinin detaylarının Gezgin vd. (2023) tarafından verildiği açık uçlu kazık penetrasyonu DEM modelinin görünümü Şekil 3'te verilmiştir. Buna göre, DEM modeli tanecikler içeren silindirik bir hazne (500 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde) ve kazığı simüle eden açık uçlu bir çubuk eleman (iç çapı 15 mm ve gömülme derinliği 150 mm) içermektedir. Haznenin sadece yarısının doldurulmuş olması, hesaplama süresini azaltmak için uygulanmıştır. Taneciklerin kayma modülü için sonuçlar üzerinde etkisi olmadığı belirlenen 500 MPa değeri seçilmiştir. Çubuk elemanın hazne içerisindeki penetrasyon hızı olarak ise, sonuçları etkilemeyecek olan 25 mm/s değeri belirlenmiştir (Gezgin vd., 2023).



Şekil 3. Açık uçlu kazık penetrasyonu DEM modelinin görünümü (a) üç boyutlu (b) iki boyutlu

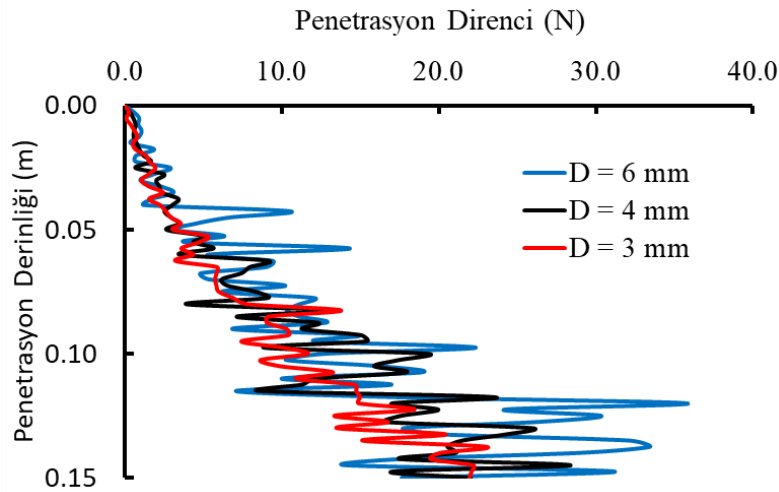


3. FARKLI TANECİK BOYUTU VE ŞEKLİNİN PENETRASYON ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ

Bu çalışma kapsamında, tanecik boyutu ve şeklinin açık uçlu kazıkların penetrasyonu üzerindeki etkisini çoklu ölçekli belirlemek amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, etkinin makro ölçekte gözlemlenebilmesi için penetrasyon boyunca kazık üzerinde oluşan toplam direnç dağılımı kullanılmıştır. Mikro ölçek olarak ise açık uçlu kazık içerisine yerleşen taneciklerin ortalama koordinasyon sayısının penetrasyon boyunca değişiminden yararlanılmıştır. Koordinasyon sayısı, tanecikli bir numune içindeki temas yoğunluğu hakkında bilgi veren mikro ölçekli bir göstergedir. Partikül başına ortalama temas sayısı olarak tanımlanmaktadır (Gezgin vd., 2022).

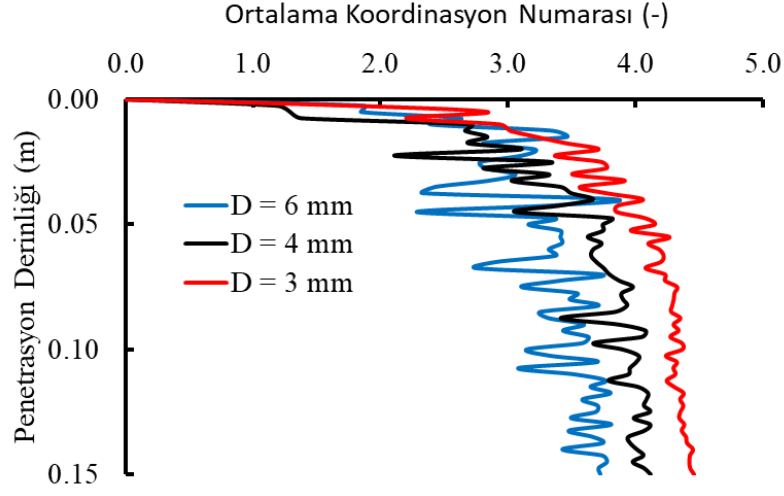
3.1. Tanecik Boyutunun Etkisinin Belirlenmesi

DEM yönteminin en önemli dezavantajlarından birisi uzun hesaplama süreleridir. Bu sürenin sonuçları etkilemeyecek seviyede azaltılması yöntemin uygulanabilirliği açısından büyük önem taşımaktadır (Gezgin vd., 2022). En yaygın kullanılan tekniklerden biri daha büyük tanecikler kullanmaktır. Bununla birlikte, daha büyük taneciklerin kullanılması gerçekçi sonuçların elde edilmesini engelleyebilmektedir. Modelin doğruluğunu önemli ölçüde etkilemeyecek maksimum tanecik boyutunun belirlenmesi DEM'deki önemli adımlardan biridir. Bu çalışma kapsamında ilk olarak tanecik boyutunun açık uçlu kazık penetrasyonu üzerinde etkisi incelenmiştir. Bu doğrultuda, aynı şartlar altında üç farklı tanecik boyutu (6mm, 4mm ve 3mm) ile hazırlanmış üç tekdüze granüler malzeme üzerinde penetrasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen penetrasyon direnç ve ortalama koordinasyon sayısı dağılımları sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 4 numuneyi oluşturan taneciklerin boyutları küçüldükçe penetrasyona karşı sergilenen direncin de asgari ölçüde azaldığını göstermektedir. Özellikle penetrasyon derinliği arttıkça tanecik boyutu makro ölçekli etkisini daha fazla göstermektedir. Şekil 5 ise tanecik boyutunun penetrasyona etkisinin mikro ölçekli değerlendirmesinde aradaki farkın çok daha net bir şekilde görüldüğünü göstermektedir. Şekil 4'te verilen karşılaştırma sonuçlarına göre, tanecik boyutu azaldıkça kazık iç kısmını dolduran taneciklerin ortalama koordinasyon sayısı artmaktadır.



Şekil 4. Tanecik boyutunun penetrasyon direnci üzerindeki etkisi







Şekil 5. Tanecik boyutunun kazık içindeki taneciklerin ortalama koordinasyon sayısı üzerindeki etkisi

3.2. Tanecik Şeklinin Etkisinin Belirlenmesi

Doğal bir zemin özelliği olan tanecik şekli, zemin davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Granüler malzemelerin morfolojisi, en-boy oranı, dışbükeylik, küresellik, yuvarlaklık ve açısallık gibi şekil parametreleri kullanılarak ölçülebilmektedir (Soltanbeigi vd., 2017). Bu çalışmada, tanecik şeklini temsil etmesi için seçilen parametre en-boy oranıdır. En-boy oranı (AR), küçük eksen uzunluğunun büyük eksen uzunluğuna oranı olarak tanımlanmaktadır (Jiang vd., 2018). 1'den farklı en-boy oranlarına ulaşmak için tanecikler birbirlerine kümelenmektedir. Bu çalışmada, farklı en-boy oranına sahip tanecik elde etmek için üst üste binmiş iki küre tanımlanarak kümelenmiş tanecikler oluşturulmuştur. Bu şekilde Tablo 2'de belirtildiği gibi farklı en-boy oranına sahip tanecik oluşturulmuştur. Kümelenmiş tanecikteki kürelerin çapları, bir araya gelerek oluşturdukları taneciğin küresel tanecik ile aynı hacimde olacağı şekilde ayarlanmıştır.

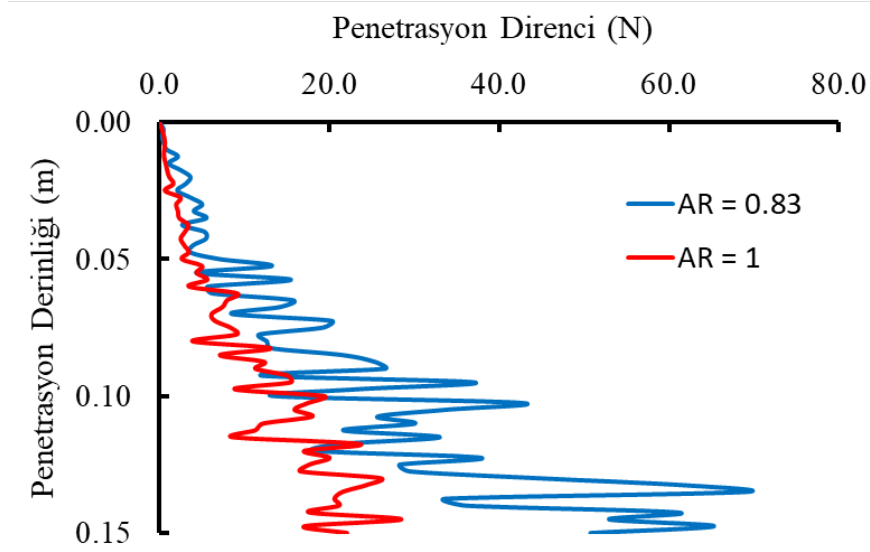
Tablo 2. Tanecik en-boy oranı

Tanecik Şekli	En-boy oranı (AR)
	1
	0,83

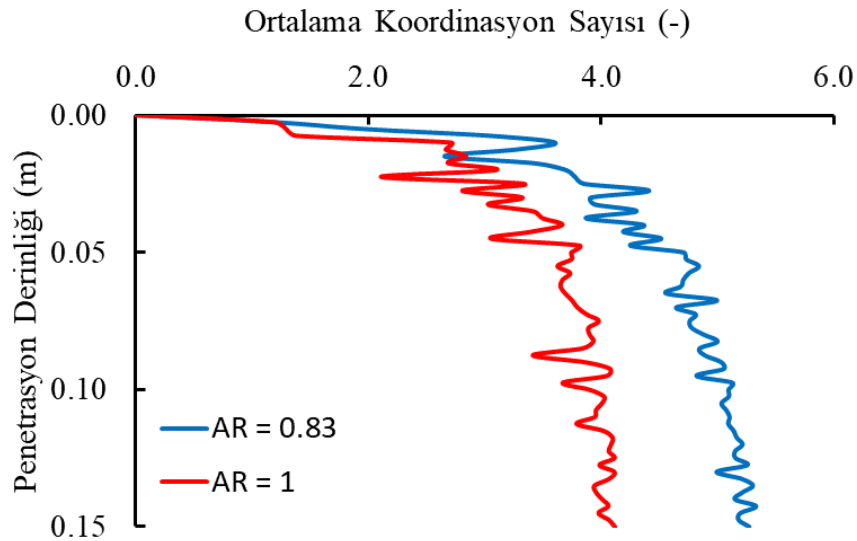
Bu çalışma kapsamında hedeflenen konulardan birisi de tanecik şekli etkisinin açık uçlu kazıkların penetrasyonuna etkisini gözlemlemektir. Bu doğrultuda, Tablo 2'de gösterilen tanecikler ile aynı şartlar altında hazırlanmış iki numunede penetrasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Penetrasyon sırasında elde edilen direnç eğrileri (makro ölçekli) ve



penetrasyon süresince kazık iç kısmını dolduran taneciklerin ortalama koordinasyon sayıları (mikro ölçekli) karşılaştırılarak tanecik şeklinin etkisi gözlemlenmiştir. Şekil 6'da karşılaştırılan direnç eğrileri, küresel olmayan taneciklerin küresel olanlara oranla çok daha yüksek bir direnç oluşturduğunu göstermektedir. Mikro ölçekte bir değerlendirme amacıyla karşılaştırılan ortalama koordinasyon sayıları ise küresel olmayan taneciklerin penetrasyon süresince taneciklerin birbirleri ile çok daha fazla temasta bulduklarını göstermektedir (Şekil 7).



Şekil 6. Tanecik şeklinin penetrasyon direnci üzerindeki etkisi



Şekil 7. Tanecik şeklinin kazık içindeki taneciklerin ortalama koordinasyon sayısı üzerindeki etkisi

4. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, granüler malzemelerin tanecik boyutu ve şekil özelliklerinin açık uçlu kazıkların penetrasyon davranışı üzerindeki etkisinin çoklu ölçekte ortaya koyulması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, zeminlerin tanecikli yapıda modellenmesine olanak sağlayan ayrık elemanlar yöntemi (DEM) kullanılmıştır. Bu yöntemin kullanılabilmesi için Gezgin vd. (2023) tarafından detaylıca açıklandığı üzere doğrulanmış parametreler kullanılarak bir açık uçlu kazık penetrasyonu modeli oluşturulmuştur. Bu model üzerinde tanecik boyutu ve şekline değişiklikler yaparak farklı penetrasyon modelleri geliştirilmiştir. Bu modellerden elde edilen penetrasyon direnç eğrileri karşılaştırılarak tanecikboyutu ve şeklinin etkileri makro ölçekli olarak belirlenmiştir. Penetrasyon boyunca kazık içerisindeki taneciklerin ortalama koordinasyon sayılarındaki değişimler ise mikro ölçekli değerlendirmeye olanak sağlamıştır. Buna göre, tanecik boyutundaki azalma penetrasyon direncinde de bir azalmaya sebep olurken, ortalama koordinasyon sayısında artışı beraberinde getirmektedir. Tanecik şeklinin küresellikten uzaklaşması ise hem penetrasyon direncinde hem de kazık içerisine yerleşen taneciklerin ortalama koordinasyon sayısında artışa neden olmaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmayı 118C564 numaralı proje ile destekleyen Türkiye Bilimsel ve Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'na teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Arshad, M. ve O'Kelly, B.C. (2016), "Analysis and Design of Monopile Foundations for Offshore Wind-Turbine Structures", Marine Georesources & Geotechnology, Vol 34(6), 503-525.
- Cundall, P.A. ve Strack, O.D. (1979), "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies", Geotechnique, Vol 29(1), 47-65.
- Fattah, M.Y. ve Al-Soudani, W.H. (2016), "Bearing Capacity of Open-Ended Pipe Piles with Restricted Soil Plug", Ships and Offshore Structures, Vol 11(5), 501-516.
- Gezgin, A.T., Soltanbeigi, B., Altunbas, A. ve Cinicioglu, O. (2021), "Multi-Scale investigation of Active Failure for Various Modes of Wall Movement", Frontiers of Structural and Civil Engineering, Vol 15, 961-979.
- Gezgin, A.T., Soltanbeigi, B. ve Cinicioglu, O. (2022), "Discrete-Element Modelling of Pile Penetration to Reveal Influence of Soil Characteristics". Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, Vol 175(4), 365-382.
- Gezgin A.T., Çinicioglu, S.F., Çinicioglu, Ö. (2023), "Granüler Ortamda Açık Uçlu Kazık Penetrasyonunun Ayrık Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi", 9. Geoteknik Sempozyumu, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Guo, Y., Dong, S., Li, J. ve Yu, X. (2020), "Numerical and Experimental Study on Soil Plug Resistance of Open-Ended Pipe Pile with a Restriction Plate", Advances in Civil Engineering, Vol 2020(1), 9415904.



- Haiderali, A., Cilingir, U. ve Madabhushi, G. (2013), "Lateral and Axial Capacity of Monopiles for Offshore Wind Turbines", Indian Geotechnical Journal, Vol 43(3), 181-194.
- Härtl, J. ve Ooi, J.Y. (2008), "Experiments and Simulations of Direct Shear Tests: Porosity, Contact Friction and Bulk Friction", Granular Matter, Vol 10, 263-271.
- Jiang, M.D., Yang, Z.X., Barreto, D., ve Xie, Y.H. (2018), "The influence of particle-size distribution on critical state behavior of spherical and non-spherical particle assemblies", Granular Matter, Vol 20, 1-15.
- Ko, J. ve Jeong, S. (2015), "Plugging Effect of Open-Ended Piles in Sandy Soil", Canadian Geotechnical Journal, Vol 52(5), 535-547.
- Lee, J., Salgado, R. ve Paik, K. (2003), "Estimation of Load Capacity of Pipe Piles in Sand Based on Cone Penetration Test Results", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 129(5), 391-403.
- Li, L., Wu, W., El Naggar, M. H., Mei, G. ve Liang, R. (2019), "DEM Analysis of the Sand Plug Behavior During the Installation Process of Open-Ended Pile", Computers and Geotechnics, Vol 109, 23-33.
- Liu, J., Duan, N., Cui, L. ve Zhu, N. (2019), "DEM Investigation of Installation Responses of Jacked Open-Ended Piles", Acta Geotechnica, Vol 14, 1805-1819.
- Mack, S., Langston, P., Webb, C., ve York, T. (2011), "Experimental Validation of Polyhedral Discrete Element Model", Powder Technology, Vol 214(3), 431-442.
- Müller, C.R., Scott, S.A., Holland, D.J., Clarke, B.C., Sederman, A. J., Dennis, J. S. ve Gladden, L.F. (2009), "Validation of a Discrete Element Model Using Magnetic Resonance Measurements", Particuology, Vol 7(4), 297-306.
- Soltanbeigi, B., Podlozhnyuk, A., Ooi, J.Y., Kloss, C. ve Papanicolopoulos, S.A., (2017), "Comparison of multi-sphere and superquadric particle representation for modelling shearing and flow characteristics of granular assemblies", EPJ Web of Conferences, Vol 140, 06015.



