

AYRIK ELEMENLAR YÖNTEMİ HESAPLAMA SÜRESİNİ AZALTMA TEKNİKLERİ: GRANÜLER ZEMİNLERDE PENETRASYON MODELLEMESİ

TECHNIQUES TO REDUCE COMPUTATIONAL TIME IN DISCRETE ELEMENT METHOD: PENETRATION MODELLING IN GRANULAR SOILS

Ahmet Talha GEZGİN¹, Behzad SOLTANBEIGI², Özer ÇİNİCİOĞLU³

ÖZET

Ayrık elemanlar yöntemi (DEM) ile zeminler, doğaları gereği sahip oldukları tanecikli yapıda modellenmektedir. Böylece geoteknik problemler tanecik boyutunda incelenebilmektedir. Bununla birlikte, DEM yüksek analiz süresi gibi büyük bir dezavantaja da sahiptir. Oldukça fazla sayıda taneciğin modellenmesi ve belirli bir süre boyunca etkileşimlerinin gözlemlenmesi, korkutucu boyutta hesaplama zamanı gerektirebilir. Bu hesaplama sürelerinin sonuçlara etki etmeden azaltılması amacıyla bu çalışmada granüler zemine penetrasyon problemi üç farklı teknik kullanılarak modellenmiş ve bu tekniklerin geçerlilikleri irdelenmiştir. Bu kapsamda, ilk olarak kullanılacak model parametreleri, literatürde yer alan deneysel bir çalışmanın sonuçları kullanılarak belirlenmiştir. Ardından, önerilen süre azaltma tekniklerinin geçerliliğini değerlendirmek için, bu teknikler kullanılarak bir dizi model hazırlanmıştır. Hazırlanan modellerin her birinin sonuçları, herhangi bir optimizasyon tekniği olmadan hazırlanmış benzer bir modele ait sonuçla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda önerilen üç yöntemin de hesaplama süresinin azaltılması amacıyla kullanılabileceği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ayrık elemanlar yöntemi, granüler zeminler, penetrasyon mekanizması

ABSTRACT

Discrete element method (DEM) allows modelling soils by preserving their granular nature. This way it becomes possible to investigate geotechnical problems at particle scale. However, DEM suffers from high computational demand. Modeling great number of particles and observing their interactions over a period of time requires a dauntingly significant amount of computational time. In order to reduce calculation times without affecting results, this study attempts to investigate the feasibility of three different techniques. This is done by considering the problem of penetration into granular media

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

² Dr., Van Oord, soltanbeigi.behzad@gmail.com

³ Doç Dr., Boğaziçi Üniversitesi, ozercinicioglu@boun.edu.tr

and modelling it by employing these optimization techniques. Accordingly, firstly, suitable model parameters for a validated DEM model were determined using the experimental results of a study in literature. Following, a series of models were prepared using the proposed techniques to evaluate their validity. The results of each of the prepared models were compared with the result of a similar model prepared without any optimization technique. As a result of the comparisons, it has been seen that all three proposed methods can be used for the purpose of reducing the calculation time.

Keywords: *Discrete element method, granular soils, penetration mechanism*

1. GİRİŞ

Zeminlerin farklı şartlarda davranışları ve yapılarla etkileşimleri çok farklı ölçeklerde mekanizmalara bağlı olarak gelişen ve mikrodan makroya araştırılması gereken geoteknik problemlerdir. Daneli ortam mekaniğinin ve pratiğe etkilerinin anlaşılması ve çözüme kavuşturulması amacıyla yapılan çalışmalar genellikle tam/küçük ölçekli deneysel yaklaşımlar veya sürekli ortam kabulüne dayanan sayısal modelleme çalışmaları içermektedir. Bunlar arasında; gerilme dağılımı, tanecik şekli, boyutu ve sayısı gibi tüm olası faktörler hesaba katılabildiği için saha deneylerinin en doğru sonucu sundukları kabul edilmektedir. Bununla birlikte, saha deneyleri yüksek maliyetlidirler ve zeminlerin tanecik ölçeğinde davranışlarının gözlemlenmesine imkân sağlayamazlar. Küçük ölçekli modelleme, özellikle santrifüj modelleri, tam ölçekli deneylere göre daha ekonomik bir alternatiftir. Fakat küçük ölçekli modellerde de davranışa hakim olan tanecik düzeyindeki mekanizmaları incelemek mümkün olamamaktadır. Sürekli ortam mekaniğine dayanan sayısal modeller ise zeminlerin davranışlarını ve yapılarla etkileşimini incelemek için olası bir alternatif sunmaktadır. Bu tip yöntemlerde zemin davranışı ve zemin-yapı etkileşimi, seçilen bünye modellerine ve bir dizi deney sonucu elde edilen zemine ait parametrelere bağlı olarak tanımlanmaktadır. Bu şekilde mikro etkilerin sonucunda elde edilen davranış makro seviyede, deney sisteminin özelliklerine bağlı gözlenebilmekte ve sınırlı durumlara uygun parametreler ile sayısallaştırılmaktadır. Dolayısıyla, en güvenilir bünye modellerinde bile zemin davranışı ve zemin-yapı etkileşimi tanecik düzeyinde tanımlanamamaktadır.

Diğer taraftan, ayrık elemanlar yöntemi (DEM) zeminlerin doğaları gereği sahip oldukları tanecikli yapıya uygun olarak sayısal modellenmesini mümkün kılmaktadır. Ayrık elemanlar yöntemi Cundall ve Strack (1979) tarafından geliştirilmiş olup, temel prensibi iki ayrık tanecik arasındaki etkileşime dayanan sayısal bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda zeminlerin davranış mekanizmasının modellenmesi için bünye modellerinden ziyade yalnızca temel fizik yasalarından yararlanılmaktadır. Bu sayede, DEM ile en karmaşık mekanizmalar bile küçük bir dizi temel fiziksel ve mekanik kuraldan faydalanılarak modellenenilmektedir. Ayrıca, zeminin tanecikli yapıda modellenebilmesi neticesinde, zemin-yapı etkileşimi mekanizmasının mikro ölçekte de yorumlanabilmesi mümkün hale gelmektedir. Bu etkileşime en iyi örneklerden biri zemine çubuk itilmesi problemidir. Çakma kazık imalatı, penetrometer deneyi gibi karşılıklı olan problem sürekli gelişen bir zemin-yapı etkileşim mekanizmasına karşılık gelmekte, mikro ölçekte etkileşimler makro davranışı kontrol etmektedir.

DEM yöntemi, granüler ortamlardaki penetrasyon problemlerini modellemede sahip olduğu üstünlüğe rağmen, yüksek analiz süresi gerektirebilmesi gibi büyük bir dezavantaja da sahiptir. Oldukça fazla sayıda taneciğin modellenmesi ile bu taneciklerin birbirleriyle ve temas halinde oldukları yapısal elemanlarla aralarında oluşan etkileşimlerin analiz süresince gözlemlenmesi, göz korkutucu derecede önemli miktarda hesaplama zamanı gerektirmektedir. DEM yönteminde maruz kalınan bu sınırlama, araştırmacıları hesaplama zamanını düşürmenin yollarını aramaya zorlamaktadır. Akla ilk gelen seçenek, iki boyutlu modelleri kullanmaktır (Jiang vd., 2006; Lobo-Guerrero ve Vallejo, 2007; Tran vd., 2016; Duan Nuo vd., 2018). Fakat, bu yaklaşım hesaplama süresini düşürmek için başarılı olsa bile, sistem gerçek granüler malzemelerden çok farklı kinematik kısıtlamalara sahip sonsuz uzunlukta çubuklardan oluştuğundan, granüler davranışı anlamak için kullanılabilirliği tartışılmalıdır. Ancak üç boyutlu DEM kullanan araştırmacılar (Arroyo vd., 2011; McDowell vd., 2012; Butlanska vd., 2014; Zhao vd., 2019), model kalitesinden önemli ölçüde taviz vermeden analiz sürelerini düşürmek gibi önemli bir optimizasyon problemiyle karşı karşıya kalmaktadırlar. Bu optimizasyon problemiyle başa çıkmak için sunulan çözümlerin çoğu genellikle tanecik sayısının azaltılmasını veya zaman adımının artırılması odaklıdır. Bu tekniklerden bazıları simülasyon sonuçları üzerinde istenmeyen etkilere neden olabilir. Örneğin, küçük kesme modülü olan gereğinden fazla yumuşak tanecikler, gerçekçi zemin davranışından sapmaya neden olabilmektedir (Gezgin vd., 2020). Sistemdeki tane sayısını düşürmek için dane boyutları artırılması işleminde gerekli kalibrasyon çalışması yapılmazsa gerçekçi zemin davranışının yakalanması mümkün olmamaktadır (Coetzee, 2019). Dolayısıyla, hesaplama maliyetinden tasarruf etmek için kullanılan tekniklerin sonuçlar üzerindeki olası etkilerinin gözlemlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada ayırık elemanlar yönteminin hesaplama süresini azaltmak için kullanılan üç farklı optimizasyon tekniğinin doğru uygulama yapılırsa sonuçlara olumsuz etki etmediğinin gösterilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, ilk olarak bu çalışmada kullanılacak uygun model parametreleri literatürdeki bir çalışmanın deneysel sonuçları kullanılarak belirlenmiştir. Sonraki adımda önerilen süre azaltma tekniklerinin geçerliliklerini değerlendirmek için, teknikler kullanılarak optimize edilmiş modellerin sonuçları, herhangi bir optimizasyon tekniği olmadan hazırlanmış modelin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

2. DEM MODELİNİN DOĞRULANMASI

2.1. DEM Model Parametrelerinin Elde Edilmesi için Kullanılan Deneylerin Genel Tanıtımı

Doğrulanmış bir DEM penetrasyon modeli elde edilmesi amacıyla, Feng vd. (2019) tarafından gerçekleştirilmiş deneylerin sonuçları kullanılmıştır. Feng vd. (2019) tarafından kullanılan deney sistemi, silindirik bir nesne (5 cm çapında ve 7 cm uzunluğunda) ve 6 mm çapında küresel cam boncuklar ile doldurulmuş silindirik bir hazneden (45 cm çapında ve 21 cm derinliğinde) oluşmaktadır. Numunenin hazırlanması sırasında numune porozitesi yaklaşık 0,425 ($\pm 0,002$) olarak ayarlanmıştır. Silindirik nesnenin granüler ortama penetrasyonu ortalama 0,5 mm/s'lik bir hızla gerçekleştirilmiştir ve bu deney beş kez tekrarlanmıştır. Direnç kuvvetleri ve penetrasyon derinlikleri sırasıyla Eşitlik (1) ve Eşitlik (2) kullanılarak normalize edilmiştir (Kang vd., 2018).

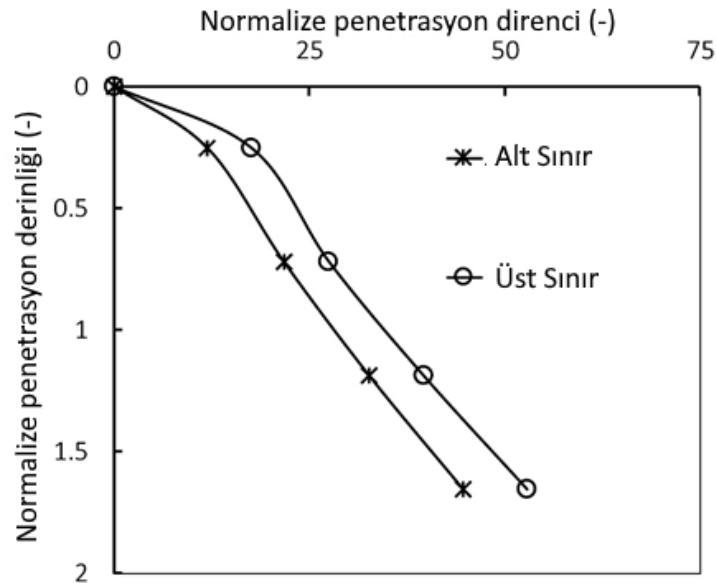
$$p_n \equiv \frac{F}{\rho_p \times (1 - n) \times g \times S_o \times R_o} \quad (1)$$

$$h_n \equiv \frac{h}{R_o} \quad (2)$$

Eşitlik (1) ve Eşitlik (2)'de bulunan F , ρ_p , n , g , S , R ve h parametreleri sırasıyla penetrasyon direnç kuvveti, tanecik yoğunluğu, numune porozitesi, yerçekimi ivmesi, nesnenin kesit alanı, nesne yarıçapı ve penetrasyon derinliğidir.

Direnç eğilimini penetrasyon derinliği ile birlikte açıkça göstermek için penetrasyon boyunca elde edilen veriler üzerinde geçici bir ortalama alınmıştır. Ortalama alınması işleminde, taneciklerin ortalama çapının 3.5 katı büyüklüğündeki her bir penetrasyon derinliği için bir ortalama penetrasyon direnci belirlenmesi önerilmektedir (Janda ve Ooi, 2016). Bu deneylerin sonuçlarının değerlendirilmesinde, boncuk çapı 6 mm olduğundan, penetrasyon verilerinin her 21 mm'lik yer değiştirmede bir ortalaması alınmıştır.

Tüm direnç kuvvetleri, normalize edilmiş biçimde sunulmuştur. Buna göre Feng vd. (2019) tarafından yapılan deneylerdeki direnç kuvvetlerinin sınırları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Feng vd. (2019) tarafından elde edilen deney sonuçlarının normalize değerlerinin sınırları

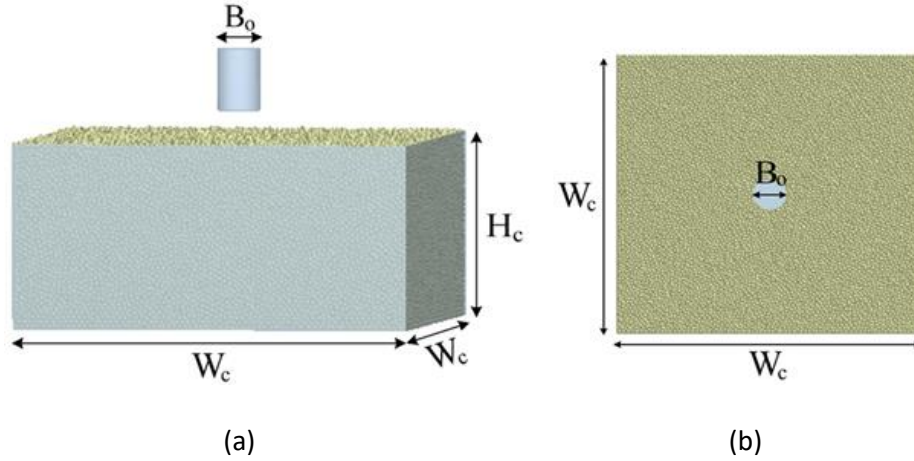
2.2. Doğrulanmış DEM Modelinin Elde Edilmesi

Bu çalışmada, penetrasyon probleminin modellenmesi için ticari bir DEM yazılımı olan EDEM (2018) kullanılmıştır. Çalışmanın ilk amacı, Feng vd. (2019) tarafından yürütülen deney serisindekilerle uyumlu penetrasyon direnç kuvvetleri veren bir DEM modeli oluşturmaktır. Bu modellerde; tanecikler arası sürtünme, tanecik şekli, tanecik boyutu, tanecik yoğunluğu ve taneciklerin geri dönüş katsayısı gibi tanecik özellikleri Feng vd. (2019)'nin çalışmasında kullanılanlar ile aynı seçilmiştir. Tanecikler için kayma modülü için ise Gezgin vd. (2020)'nin çalışmasında tercih edilen değer tanımlanmıştır. Doğrulanmış model elde etme sürecinde kullanılan malzeme parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Doğrulanmış DEM modeli için kullanılan malzeme parametreleri

Parametre	Değer	Birim	Kaynak
Tanecik yoğunluğu, ρ_p	2650	kg/m ³	Feng vd. (2019)
Tanecik Poisson oranı, ν_p	0.3	-	Feng vd. (2019)
Tanecik kayma modülü, G_p	5×10^8	Pa	Gezgin vd. (2020)
Tanecikler arası statik sürtünme katsayısı, $\mu_{s,p}$	0.5	-	Feng vd. (2019)
Tanecik geri dönüş katsayısı, e_r	0.8	-	Feng vd. (2019)
Tanecikler ile penetre eden nesne arasındaki statik sürtünme katsayısı, $\mu_{s,o}$	0.3	-	Feng vd. (2019)

Şekil 2'de gösterildiği üzere, DEM modellerindeki test hazneleri Feng vd. (2019)'nin deneylerinde kullanılan silindir şeklin aksine kutu olarak oluşturulmuştur. Bu tercih ile, ilerleyen kısımlarda da açıklanacağı üzere, hesaplama süresinin azaltılması için düşünülen yöntemlerden birinin uygulanmasını kolaylaştırmak amaçlanmıştır. Bununla birlikte tanecik çapı, granüler ortamın yüksekliği, hazne genişliği ve penetre eden silindirik nesnenin çapı, Tablo 2'de gösterildiği üzere, Feng vd. (2019) tarafından yürütülen deneyler ile aynı büyüklükte ayarlanmışlardır. Ayrıca granüler malzemelerin porozitelerinin ($n \cong 0.42$) de deneyler ile aynı seviyede olmasına büyük hassasiyet gösterilmiştir.



Şekil 2. Silindirik bir objenin granular ortamda penetrasyonunun DEM modeli (a) normal görünüm (b) yukarıdan görünüm

Tablo 2. Doğrulama aşamasında kullanılan DEM modeli özellikleri

Parametre	Değer	Birim	Kaynak
Hazne yüksekliği, H_c	210	mm	Feng vd. (2019)
Hazne genişliği, W_c	450	mm	Feng vd. (2019)
Silindirik nesne çapı, B_o	50	mm	Feng vd. (2019)
Penetrasyon hızı, ϑ_o	30	mm/s	-
Tanecik çapı, d_p	6	mm	Feng vd. (2019)

Simülasyonlarda nesnenin penetrasyon hızı, hesaplama süresi dikkate alınarak optimize edilmiştir. Belli bir seviyeden hızlı penetrasyonlarda zeminin penetrasyona karşı gösterdiği direnç büyüklüğü etkilenebilmektedir. Bu etkinin gözlemlenmediği penetrasyon mekanizması, yarı-statik penetrasyon olarak adlandırılır. Yarı-statik penetrasyonun gerçekleşebilmesi için izin verilebilir maksimum penetrasyon hızı (ϑ_c) Eşitlik 3 kullanılarak hesaplanmaktadır (Feng vd., 2019).

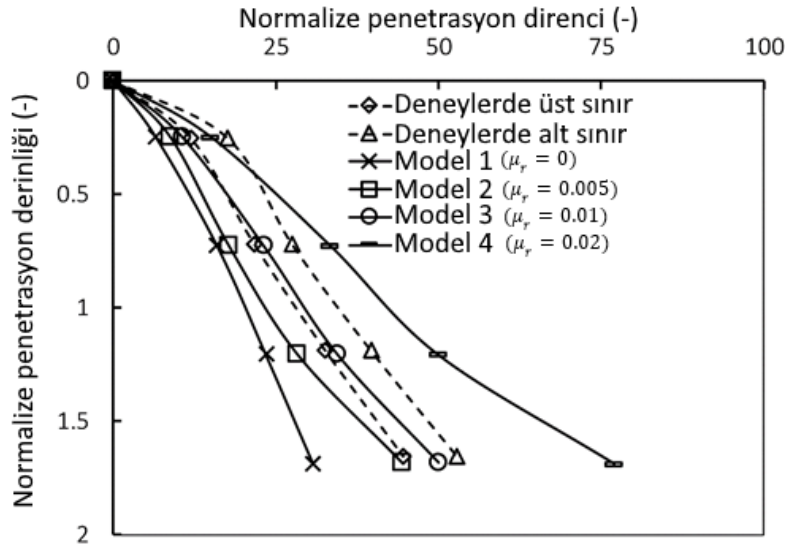
$$\vartheta_c = \sqrt{2gd_p}/10 \quad (3)$$

Burada; g ve d_p sırasıyla yerçekimi ivmesi ve tanecik çapıdır. Doğrulanmış DEM modeli elde etmek için kullanılan modellerde tanecik çapı 6 mm olduğuna göre, zeminin penetrasyona karşı direncini etkilemeyecek en yüksek hız 34.3 mm/s olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla, yarı-statik durumun minimum hesaplama süresinde sağlanması için simülasyonlarda penetrasyon 30 mm/s'lik bir hız ile gerçekleştirilmiştir.

Deneylerle doğrulanmış bir model elde etmek için kullanılacak değişken olarak taneciklerin yuvarlanma sürtünme katsayısı (μ_r) seçilmiştir, çünkü bu aynı zamanda taneciklerin penetrasyona karşı direnç kuvvetini de etkileyen bir parametredir. Yuvarlanma sürtünmesi, penetrasyon sırasında taneciklerin dönmesini zorlaştırır, bu zorlanma da penetrasyon direncinde artışa sebep olur. Buna göre Feng vd. (2019)'nin deneyleri ile uyumlu sonuçlar sağlayacak tanecik yuvarlanma sürtünme katsayısının (μ_r) belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, Tablo 3'te detayları verilen DEM modelleri, farklı μ_r değerleri kullanılarak hazırlanmıştır. Bu modellerden elde edilen penetrasyon direnç eğrileri arasındaki karşılaştırma Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3'e göre, 3 numaralı modelde kullanılan katsayı ($\mu_r = 0.01$) deneysel sonuçlarla uyumlu bir penetrasyon direnci sağladığı görülmektedir. Dolayısıyla Model 3, "doğrulanmış model" olarak tanımlanabilmektedir.

Tablo 3. Doğrulama aşamasında kullanılan DEM modellerine ait μ_r değerleri

Model No	Yuvarlanma sürtünme katsayısı, μ_r
1	0
2	0.005
3	0.01
4	0.02



Şekil 3. Farklı tanecik yuvarlanma sürtünme katsayıları ile oluşturulmuş modellerden elde edilen penetrasyon direnç eğrilerinin deneysel sınırlar çerçevesinde karşılaştırılması

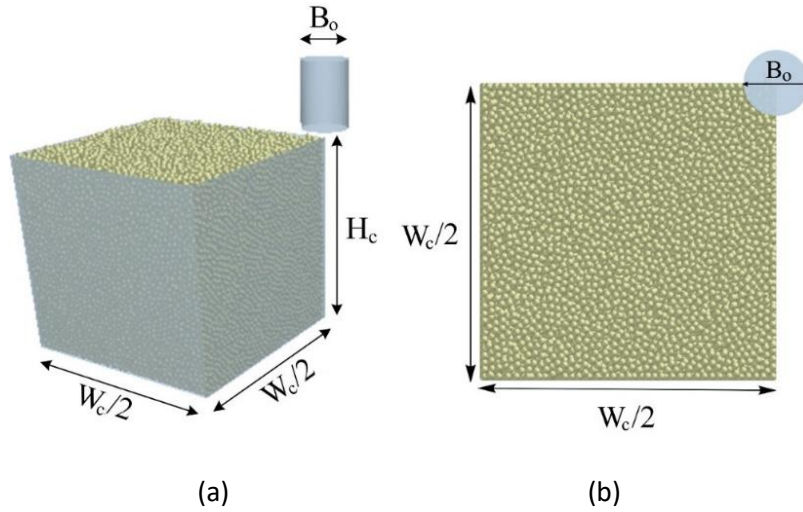
3. HESAPLAMA SÜRESİNİ AZALTMAK İÇİN ÖNERİLEN YÖNTEMLER

3.1. Numunenin Dörtte Birinin Kullanılması

Hesaplama maliyetini azaltmak için ilk teknik olarak, McDowell vd. (2012)'nin çalışmasında olduğu gibi, granüler malzemenin ve silindirik nesnenin sadece 90°'lik bir segmentindeki taneciklerin etkileşiminin dikkate alınması planlanmıştır. Numunenin ve silindirik nesnenin sadece dörtte birini hesaba katmayı kolaylaştırmak için test haznesi için silindir yerine kutu şekli tercih edilmiştir. Böylelikle, toplam tanecik sayısı da dörtte bir seviyesine düştüğü için hesaplama süresi ciddi derecede azaltılabilmektedir. Bu tekniğin geçerli kabul edilebilmesi için, numune ve nesnenin sadece 90°'lik kısımlarının kullanımının analiz sonuçları üzerinde etkisinin olmadığını gösterilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, Model 3 olarak isimlendirilen modele alternatif olarak sistemin sadece dörtte birinin hesaba katıldığı Model 5 üretilmiştir. Model 5'teki diğer tüm parametreler, Tablo 4'te gösterildiği gibi Model 3'te yer alanlarla aynı tutulmuştur. Model 5 için oluşturulan çeyrek numune ve silindirik nesnenin penetrasyondan önceki durumu Şekil 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Birinci yöntem geçerliliğini göstermek için oluşturulan modellerin özellikleri

Model No	ρ_p (kg/m ³)	v_p (-)	G_p (Pa)	d_p (mm)	$\mu_{s,p}$ (-)	e_r (-)	$\mu_{s,p}$ (-)	H_c (mm)	W_c (mm)	B_o (mm)	ϑ_o (mm/s)	Yöntem I Kullanımı
3	2650	0.3	5×10^8	6	0.5	0.8	0.3	210	450	50	30	Hayır
5	2650	0.3	5×10^8	6	0.5	0.8	0.3	210	450	50	30	Evet

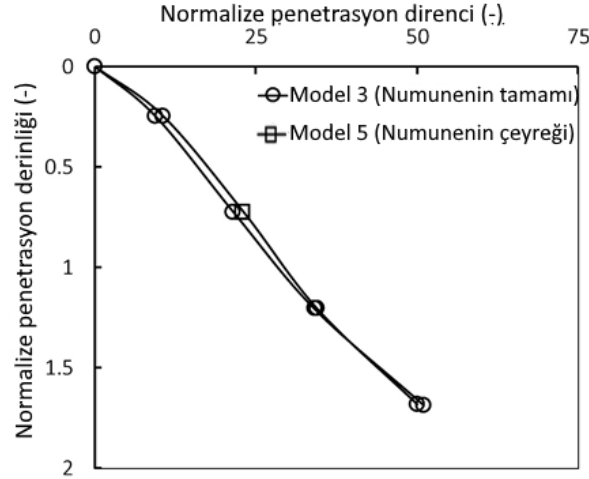


Şekil 4. Silindirik obje penetrasyonunun granüler numunenin dörtte birinin kullanılması ile oluşturulan DEM modeli (a) normal görünüm (b) yukarıdan görünüm

Model 5 gibi numunenin sadece 90°'lik bir kısmını içeren modellerde, simülasyon sonuçları penetre olan nesnenin sadece dörtte birine etki eden kuvveti vermektedir. Nesnenin penetrasyonu eksenel simetrik bir problem olduğu için, toplam direnç kuvvetini hesaplamak için elde edilen kuvvet değerinin dört ile çarpılması gerekmektedir.

Model 3 ve Model 5 üzerinde yapılan penetrasyon deneyi sonuçları, numune silindirik nesne çiftinin sadece dörtte birinin dikkate alınmasının penetrasyon direnci üzerindeki etkisini araştırmak için karşılaştırılmıştır. Şekil 5'te gösterildiği üzere, söz konusu yöntemin

uygulandığı modelde gözlemlenen zemin direncinin yöntemin uygulanmadığı modeldeki ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Böylelikle, penetrasyon sırasında sistemin sadece dörtte birinde oluşan etkileşimlerin göz önüne alınması ile hesaplama sürelerinin azaltılmasına yönelik önerilen yöntemin sonuçlar üzerinde olumsuz etki oluşturmadığı ortaya koyulmuştur. Sonuçların uyumlu çıkması sebebiyle, bundan sonraki yöntemlerin uygulanmasında da numunenin dörtte biri kullanılarak hesaplama maliyetinden tasarruf edilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 5. Tüm numune ve numunenin dörtte birinin kullanıldığı modellerden elde edilen penetrasyon direnç eğrilerinin karşılaştırılması

3.2. Büyütülmüş Model Kullanılması

DEM modellerinde hesaplama maliyetini etkileyen en önemli faktörlerden biri, zaman adımının hesaplanmasında bir parametre olduğu için simülasyondaki en küçük tanecik boyutudur. Diğer bir ifadeyle, daha büyük taneciklerin üretilmesi hesaplama süresini azaltmaya yardımcı olmaktadır. Bu nedenle, tanecik büyütme yöntemi DEM uygulamalarında sıkça uygulanan bir tekniktir. Bununla birlikte, büyütülmüş taneciklerin DEM modellerinde daha küçük olanları temsil edecek şekilde kalibre edilmesi gerekir, çünkü sadece tanecikler büyürken geometri boyutları aynı kalmaktadır (Coetzee, 2019). Büyütülmüş bir model oluşturmak ise tanecik büyütme prosedüründen farklıdır. Bu yöntemde, tüm tanecikler ve geometriler dahil olmak üzere tüm simülasyon bileşenleri büyütülmektedir. Bu sayede tanecik büyütme prosedüründen farklı olarak, silindirik nesnenin çapı ile ortalama tanecik boyutu arasındaki oran sabit kalmaktadır. Farklı boyutlar için gözlemlenen tanecikler ile geometriler arasındaki etkileşim, penetrasyon simülasyonlarının sonuçları Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 kullanılarak normalize edilebilmekte ve birbirleriyle karşılaştırmak mümkün hale gelebilmektedir.

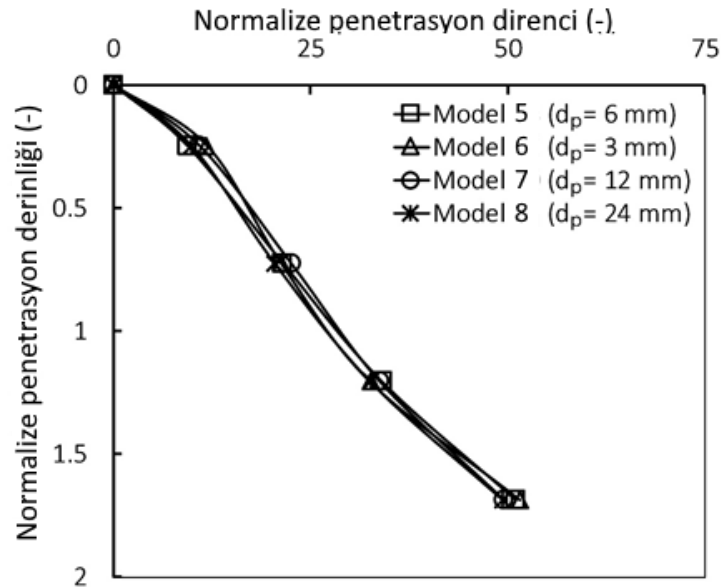
'Model ölçeklemenin' normalize edilmiş penetrasyon direnci üzerindeki etkisini araştırmak için, Model 5'e ek olarak detaylarının Tablo 5'te verildiği farklı boyutlarda modeller (Model 6 – 8) oluşturulmuştur. Tablo 5'te de görüldüğü üzere tüm modellerde test haznesinin genişliğinin silindirik nesnenin çapına ve nesne çapının tanecik çapına oranları sabit tutulmuştur. Bununla birlikte, Eşitlik 3'te gösterildiği gibi penetrasyon hızı tanecik çapına bağlı olduğu için, her tanecik boyutu için ayrı izin verilebilir maksimum

penetrasyon hızı hesaplanmıştır. İzin verilebilir hız değerleri dikkate alınarak seçilen her bir model için belirlenen penetrasyon hızları da Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 5. İkinci yöntem geçerliliğini göstermek için oluşturulan modellerin boyut özellikleri

Model No	d_p (mm)	H_c (mm)	W_c (mm)	B_o (mm)	H_c/W_c	W_c/B_o	B_o/d_p	ϑ_o (mm/s)
5	6	210	450	50	0.467	9	8.33	30
6	3	105	225	25	0.467	9	8.33	24
7	12	420	900	100	0.467	9	8.33	45
8	24	840	1800	200	0.467	9	8.33	60

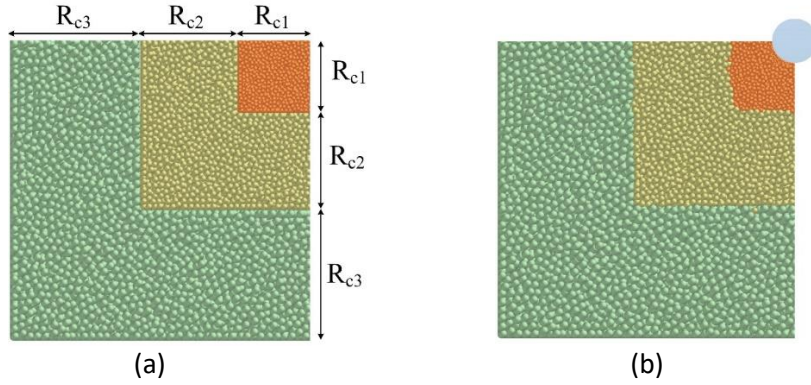
Bu modellerde elde edilen normalize edilmiş penetrasyon dirençleri Şekil 6'da gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu, farklı boyutlardaki modellerden elde edilen tüm normalize edilmiş direnç sonuçlarının birbiriyle uyumlu oldukları gözlemlenmiştir. Bu sayede, model büyütme tekniğinin hesaplama maliyetini düşürmek için tercih edilebilir bir yöntem olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 6. Farklı boyutlardaki modellerden elde edilen penetrasyon direnç eğrilerinin karşılaştırılması

3.3. Etkileşim Bölgesinde Tanecik Küçültme

DEM modellerinde hesaplama maliyetini etkileyen faktörlerden biri, test haznesini doldurmak için üretilmesi gereken toplam tanecik sayısıdır. Bölüm 3.1'de bahsedildiği gibi, haznenin tamamını doldurmaya gerek duymadan analizleri tamamlamak maliyeti düşürmenin bir yoludur. Fakat tanecik sayısını daha da azaltmak için başka bir teknik daha vardır. Bu teknik, numuneyi penetre eden nesneyi çevreleyen taneciklerin uzakta olanlara oranla daha küçük olması fikrine dayanmaktadır ve tanecik küçültme yöntemi (particle refinement method) olarak isimlendirilmiştir (McDowell vd., 2012). Bu yöntem kullanılarak ilk aşamada Model 9 oluşturulmuştur. Bu model, Şekil 7(a)'da gösterildiği üzere, penetrasyonun gerçekleşeceği kısımdan uzaklaştıkça sırasıyla 6 mm (turuncu), 9 mm (sarı) ve 12 mm (yeşil) olmak üzere üç farklı boyutta üretilen taneciklerin doldurduğu bölgeleri içermektedir. Bu tanecik boyutları, McDowell vd. (2012)'nin çalışmasından ilham alınarak seçilmiştir.



Şekil 7. Farklı büyüklüklerde tanecikler içeren bölgelerin gösterimi (a) penetrasyon öncesi (b) penetrasyon sonrası

Bölgelerin taneciklerle doldurulması öncesinde bölgeleri birbirinden ayırmak için sürtünmesiz duvarlar kullanılmaktadır. Numuneye penetre olan silindirik nesneyi çevreleyen taneciklerin oluşturduğu bölgenin genişliği, nesneden diğer bölgelere kuvvetlerin iletiminin uygulanan yöntemden etkilenmemesi için yeterince büyük olmalıdır. Sharif vd. (2019)'ne göre; birinci bölgenin genişliğinin silindirik nesne yarıçapının en az 2,5 katı olması gerekmektedir. Diğer bölgelerin genişlikleri ise, söz konusu bölgedeki tanecik çapının çekirdek bölgedeki tanecik çapına oranına göre belirlenmiştir. Test haznesinde oluşturulan bölgelerin genişlikleri (R_{c1} , R_{c2} ve R_{c3}) ve hesaplamalarında kullanılan denklemler Tablo 6'da ayrıntılarıyla verilmiştir. Bu yöntemin uygulanmasında hazne içerisinde yer alan bütün bölgelerde porozitenin aynı olması büyük önem taşımaktadır (McDowell vd., 2012; Zhao vd., 2019). Bu kapsamda, tüm bölgeler için porozite 0,4 olarak elde edilmiştir.

Tablo 6. Model 9 için hazne içerisindeki bölgeleri oluşturan tanecik çapları ve bölge genişlikleri

Parametre	Hesaplama için kullanılan eşitlikler	Değer (mm)
Birinci bölgede tanecik çapı, d_{p1}	-	6
İkinci bölgede tanecik çapı, d_{p2}	-	9
Üçüncü bölgede tanecik çapı, d_{p3}	-	12
R_o	-	50
R_{c1}	$2.5 * R_o$	125
R_{c2}	$R_{c1} * \left(\frac{d_{p2}}{d_{p1}}\right)$	187.5
R_{c3}	$R_{c1} * \left(\frac{d_{p3}}{d_{p1}}\right)$	250

Bütün bölgelerin aynı poroziteyi sağlayacak şekilde doldurulmasının ardından ayırıcı duvarlar silinmiş ve taneciklerin yerçekimi etkisi altında son konumlarını almalarına izin verilmiştir. Sonraki aşamada, silindirik nesnenin hazırlanan numuneye penetrasyonu sağlanmıştır. Penetrasyon nedeniyle tanecikler, Şekil 4.7(b)'de gösterildiği gibi, penetrasyon öncesi konumlarını kısmi olarak kaybedebilmektedirler.

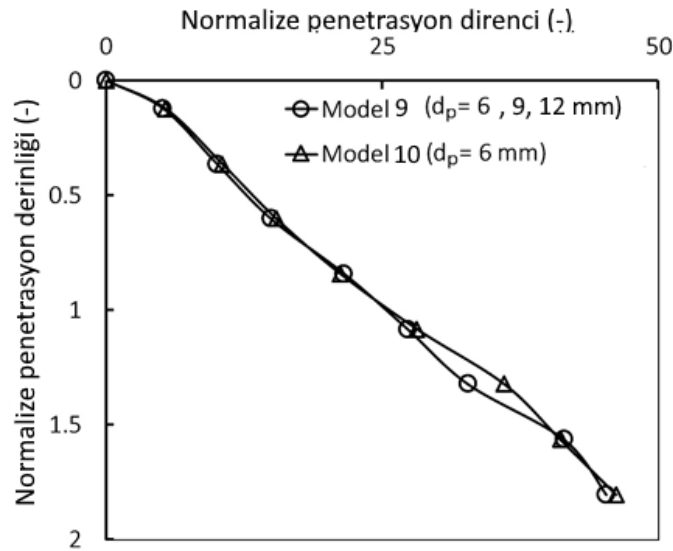
Model 9'da uygulanan hesaplama maliyetini azaltma yönteminin geçerliliğini araştırmak amacıyla yeni bir model (Model 10) daha oluşturulmuştur. Bu modelde tanecik boyutları hariç diğer tüm özellikler Model 9 ile aynı tutulmuştur. Model 9 ve Model 10 arasındaki tek fark, Tablo 7'de gösterildiği üzere Model 10'da oluşturulan numunenin yalnızca 6 mm tanecikler içermesidir. Sadece 6 mm çapında tanecikler ile doldurulan test haznesindeki

toplam tanecik sayısı Model 9'da yer alan toplam tanecik sayısının yaklaşık beş katı olarak gözlemlenmiştir (Tablo 7).

Tablo 7. İkinci yöntem geçerliliğini göstermek için oluşturulan modellerin boyut özellikleri

Model No	d_p (mm)	H_c (mm)	W_c (mm)	B_o (mm)	ϑ_o (mm/s)	Toplam tanecik sayısı
9	6	420	562.5	100	30	150000
10	6,9,12	420	562.5	100	30	705000

Model 9 ve Model 10'dan elde edilen penetrasyon direnç eğrileri, Şekil 8'de gösterildiği gibi karşılaştırılmış ve her iki modelden elde edilen sonuçlar arasında önemli bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar arasındaki bu büyük uyum kapsamında, bu yöntemin hesaplama süresini azaltmak için kullanılabileceği gösterilmiştir.



Şekil 8. Bölgesel tanecik küçültme yönteminin uygulandığı ve uygulanmadığı modellerden elde edilen penetrasyon direnç eğrilerinin karşılaştırılması

4. SONUÇLAR

DEM yöntemi zemin davranışlarını ve zemin-yapı etkileşimlerini özellikle mikro ölçekte gözlemlemek açısından büyük avantaj sağlayan bir sayısal analiz yöntemidir. Bununla birlikte, hesaplama süresinin çok yüksek seviyelere çıkabilmesi gibi gözardı edilemeyecek bir dezavantaja sahiptir. Hesaplama sürelerinin azaltılmasına yönelik birçok teknik geliştirilmeye çalışılmakla birlikte, bu teknikler kimi zaman analiz sonuçlarına doğrudan etki edebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, penetrasyon modellemesinin hesaplama maliyetini büyük oranda düşürme potansiyeli olan üç farklı tekniğin geçerliliği incelenmiştir. Öncesinde literatürde yer alan deneysel bir çalışmanın sonuçlarından faydalanılarak doğrulanmış bir DEM modeli geliştirilmiştir. Sonraki adım olarak, hesaplama maliyetinin düşürülmesini sağlayacak üç farklı teknikte farklı modeller oluşturulmuştur. Verimliliklerinin gözlemlenebilmesi amacıyla, teknikler kullanılmadan kontrol modelleri de hazırlanmış, elde edilen penetrasyon direnç eğrileri karşılaştırılarak sonuçların uyumlu olup olmadıkları gözlemlenmiştir. Yapılan analizler sonucu önerilen her üç teknik için de uyumlu sonuçlar elde edilmiş, böylelikle uygulanan her üç tekniğin de sonuçlara etkisinin olmadığı gösterilmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmayı 119M849 no'lu proje kapsamında destekleyerek mümkün kılan TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Arroyo, M., Butlanska, J., Gens, A., Calvetti, F. ve Jamiolkowski, M. (2011), "Cone Penetration Tests in a Virtual Calibration Chamber", Géotechnique, Vol 61, No 6, 525–531.
- Butlanska J., Arroyo, M., Gens, A. ve O'Sullivan, C. (2014), "Multi-Scale Analysis of Cone Penetration Test (CPT) in a Virtual Calibration Chamber", Canadian Geotechnical Journal, Vol 51, No. 1, 51–66.
- Coetzee C.J. (2019), "Particle Upscaling: Calibration and Validation of the Discrete Element Method", Powder Technology, Vol. 344.
- Cundall, P.A. ve Strack, O.D.L., (1979), "A discrete numerical model for granular assemblies", Géotechnique, Vol 29, No 1, 47–65.
- Duan N., Cheng, Y.P. ve Liu, J.W. (2018), "DEM Analysis of Pile Installation Effect: Comparing a Bored and a Driven Pile", Granular Matter, Vol 20, No 3, 20–36.
- EDEM (2018), "EDEM 2018 User Guide".
- Feng Y., Blumenfeld, R. ve Liu, C. (2019), "Support of Modified Archimedes' Law Theory in Granular Media", Soft Matter, Vol 15, No 14, 3008–3017.
- Gezgin A.T., B. Soltanbeigi, and O. Cinicioglu, "Discrete-element Modelling of Pile Penetration to Reveal Influence of Soil Characteristics", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering*, pp. 1-18, 2020.
- Janda A. ve Ooi, J.Y. (2016), "DEM Modeling of Cone Penetration and Unconfined Compression in Cohesive Solids", Powder Technology, Vol 293, 60–68.
- Jiang M.J., Yu, H.S. ve Harris, D. (2006), "Discrete Element Modelling of Deep Penetration in Granular Soils", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol 30, No 4, 335–361.
- Lobo-Guerrero S. ve Vallejo, L.E. (2007), "Influence of Pile Shape and Pile Interaction on the Crushable Behavior of Granular Materials around Driven Piles: DEM Analyses", Granular Matter, Vol 9, 241–250.
- McDowell G.R., Falagush, O. ve Yu, H.S. (2012), "A Particle Refinement Method for Simulating DEM of Cone Penetration Testing in Granular Materials", Geotechnique Letters, Vol 2, No 3, 141–147.
- Sharif, Y., Ciantia, M., Brown, M. J., Knappett, J. A., ve Ball, J. D. (2019), "Numerical techniques for the fast generation of samples using the particle refinement method", In Proceedings of Proceedings of the 8th International Conference on Discrete Element Methods.
- Tran Q.A., Chevalier, B. ve Breul, P. (2016), "Discrete Modeling of Penetration Tests in Constant Velocity and Impact Conditions", Computers and Geotechnics, Vol71, 12–18.
- Zhao, H., Zhang, J., Qiu, P. ve Ji, S. (2019), "Hierarchical modeling method for dem simulation and its application in soil–pile–cap interaction and impact case", International Journal of Geomechanics, Vol 19, No 7, 04019076.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
B_o	Silindirik nesne kesit çapı	R_o	Silindirik nesne yarıçapı
d_p	Tanecik çapı	S	Silindirik nesnenin kesit alanı
e_r	Tanecik geri dönüş katsayısı	ϑ_c	İzin verilebilir maksimum penetrasyon hızı
F	Penetrasyon direnç kuvveti	ϑ_o	Penetrasyon hızı
G_p	Tanecik kayma modülü	W_c	Hazne genişliği
g	Yerçekimi ivmesi	μ_r	Tanecik yuvarlanma sürtünme katsayısı
H_c	Hazne yüksekliği	$\mu_{s,p}$	Tanecikler arası statik sürtünme katsayısı
h	Penetrasyon derinliği	$\mu_{s,o}$	Tanecikler ile penetre eden nesne arasındaki statik sürtünme katsayısı
n	Numune porozitesi	ν_p	Tanecik Poisson oranı
R	Silindirik nesne yarıçapı	ρ_p	Tanecik yoğunluğu

