KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AYRIK ELEMAN YÖNTEMİ İLE KUM ÜZERİNE OTURAN ŞERİT TEMELİN TAŞIMA GÜCÜNÜN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Abdeladeam ALTALEB

HAZİRAN 2021
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AYRIK ELEMAN YÖNTEMİ İLE KUM ÜZERİNE OTURAN ŞERİT TEMELİN TAŞIMA GÜCÜNÜN ANALİZİ

Abdeladeam ALTALEB

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03 / 06 /2021
Tezin Savunma Tarihi : 25 / 06 /2021

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU

Trabzon 2021

ÖNSÖZ

"Ayrık Eleman Yöntemi İle Kum Üzerine Oturan Şerit Temelin Taşıma Gücünün Analizi" isimli tez çalışmam süresince büyük bir sabırla yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim süresince beni destekleyen çok sevdiğim değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Abdeladeam ALTALEB

Trabzon, 2021

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Ayrık Eleman Yöntemi İle Kum Üzerine Oturan Şerit Temelin Taşıma Gücünün Analizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU'nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 25/06/2021

Abdeladeam ALTALEB

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ IV
İÇİNDEKİLER V
ÖZET VIII
SUMMARY IX
ŞEKİLLER DİZİNİ X
TABLOLAR DİZİNİ XII
SEMBOLLER DİZİNİ XIII
1. GENEL BİLGİLER 1
1.1. Giriş 1
1.2. Temellerin Sınıflandırılması 3
1.3. Zeminde Kırılma Tipleri 3
1.3.1. Genel Kayma Kırılması 4
1.3.2. Yerel (Bölgesel) Kayma Kırılması 4
1.3.3. Zımbalama Kayma Kırılması 5
1.4. Taşıma Gücü Denklemleri 6
1.4.1. Terzaghi'nin Taşıma Gücü Denklemi 7
1.4.2. Meyerhof'un Taşıma Gücü Denklemi 10
1.4.3. Hansen'in Taşıma Gücü Denklemi 12
1.4.4. Vesic'in Taşıma Gücü Denklemi 14
1.5. Ayrık Eleman Yöntemi 16
1.5.1. Ayrık Elemanlar Yöntemine Dayalı Yazılımlar 18
1.5.2. Ayrık Eleman Yönteminin Prensipleri 19
1.5.3. Hesaplama Mekanizması 20
1.5.4. Kontak Algılama 21
1.5.5. Kontak Modelleri 22
1.5.5.1. Elastik Kontak Modeli 23
1.5.5.1.1. Lineer Yay Kontak Modeli 23
1.5.5.1.2. Hertz-Mindlin Kontak Modeli 24
1.5.5.1.3. Hertz Mindlin + JKR Kontak Modeli 26

1.5.5.2. Elastik Olmayan Kontak Modeli 27
1.5.5.2.1. Lineer Yay-Dashpot Kontak Modeli 27
1.5.5.2.2. Histeretik Kontak Modeli 28
1.5.6. Partikül Şekilleri 29
1.5.7. Zaman Adımı 30
1.6. Literatür İncelemesi 32
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR 33
2.1. Giriş 34
2.2. Temelin Taşıma Gücünün Ayrık Eleman Modellenmesi 34
2.2.1. Zemin Modellenmesi 34
2.2.1.1. Zemin Özellikleri 34
2.2.1.2. Partikül Şekli ve Boyut Dağılımı 38
2.2.1.3. Maksimum Boşluk Oranının Belirlenmesinin Modellenmesi 39
2.2.1.4. Minimum Boşluk Oranının Belirlenmesinin Modellenmesi 40
2.2.1.5. Kesme Kutusu Deneyinin Modellenmesi 42
2.2.2. Deney Ekipman Modellemesi 45
2.2.2.1. Ekipman Özellikleri 45
2.2.2.2. Ekipman Geometrik Modelleme 46
2.2.3. Simülasyon Ayarları 48
2.2.3.1. Entegrasyon Yöntemi 48
2.2.3.2. Zaman Adımı 48
2.2.3.3. Simülasyon Süresi ve Veri Tasarrufu 49
2.2.3.4. Simülasyon Grid Hücre Boyutu ve Simülatör Motoru 49
2.3 Bir Deneyin Modellenmesi 51
3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR 53
3.1. Yapılan Analizler 53
3.2. %40 Rölatif Sıkılıkta Yapılan Modelleme 53
3.3. %50 Rölatif Sıkılıkta Yapılan Modelleme 55
3.4. %60 Rölatif Sıkılıkta Yapılan Modelleme 56
3.5. %70 Rölatif Sıkılıkta Yapılan Modelleme 58
3.6. Yapılan Simülasyon Sonuçlarının Taşıma Gücü Katsayıları ile Arasındaki İlişki 60

3.7. Yapılan Simülasyon Sonuçların Taşıma Gücü Teorileri ile Karşılaştırılması .. 61
3.8. Temel Genişliğinin Taşıma Gücü Katsayıları ile Arasındaki İlişki 64
4. SONUÇLAR 66
5. ÖNERİLER 68
6. KAYNAKLAR 69
ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

Ayrık Eleman Yöntemi ile Kum Üzerine Oturan Şerit Temelin Taşıma Gücünün Analizi

Abdeladeam ALTALEB

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU

2021, 71 Sayfa

Temeller, yapının yükünü zeminin geniş bir alanına aktaracak şekilde tasarlanmaktadır. Temel, yapısal yükleri güvenli bir şekilde aktarabilecek, altındaki zeminde kırılma meydana gelmeyecek ve yapı aşırı oturma yapmayacak şekilde tasarlanmalıdır. Temellerin klasik tasarım yöntemleri, taşıma gücü ilkesine dayanmaktadır. Zeminin taşıma gücünü modellemek ve hesaplamak için genellikle sayısal çözüm tekniği olarak sonlu eleman yöntemi kullanılır. Bu yaklaşımda tamamen bağımsız üç varsayım yer alır: süreklilik, homojenlik ve izotropik. Zemin, taneler ve çevresindeki boşluklardan oluşur. Bu nedenle, zeminin mekanik davranışı doğası gereği süreksiz, heterojen ve anizotropiktir. Ayrık elemanlar yöntemi, zeminin mekanik davranışını hesaba katan yöntemlerden biridir.

Bu çalışmada ayrık eleman yöntemi kullanılarak farklı sıkılıklarda kum üzerine oturan şerit temelin taşıma gücünün modellenmesi ve analizi yapılmıştır. Ayrık eleman yöntemi ile modellenen kum zeminin makro parametreleri olan maksimum boşluk oranı, minimum boşluk oranı ve kayma mukavemeti sıkılık ve kesme kutusu deneylerinin modellenmesinden elde edilmiştir. Farklı rölatif sıkılıklarda yapılan taşıma gücü deneyinin modellenmesinden elde edilen yük-oturma ilişkileri, taşıma gücü teorileri (Terzaghi, Meyerhof, Brinch Hansen ve Vesic) ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. %40, %50 ve %60 rölatif sıklıklarda yapılan analizler sonuçlarından elde edilen nihai taşıma gücü değerlerinin, taşıma gücü teorilerinden elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu görülürken, %70 rölatif sıklıkta nümerik analizden elde edilen sonucun teorilerinden elde edilen değerlere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ayrık Eleman Yöntemi, Rölatif Sıkılık, Taşıma Gücü.

Master Thesis

SUMMARY

Analysis of Bearing Capacity of Strip Foundation Resting on Sand using Discrete Element Method

Abdeladeam ALTALEB

Karadeniz Technical University

The Graduate School of Natural and Applied Sciences

Civil Engineering Graduate Program

Supervisor: Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU

2021, 71 Pages

Foundations are designed to transfer the load of the structure to a large area of the ground. The foundation should be designed in such a way that it can safely transfer structural loads without any failure of the soil or exceeding the permissible settlement. Finite element method is generally used as a numerical solution technique to model and calculate the bearing capacity of the soil. This approach takes three completely independent assumptions: continuity, homogeneity, and isotropy. The soil consists of contact granules and surrounding voids. The discrete element method is one of the methods that take into account the mechanical behavior of the soil.

In this study, modeling, and analysis of the bearing capacity of the strip foundation resting on sand at different relative densities using the discrete element method was performed. The macro parameters of the sand modeled by the discrete element method, such minimum and maximum void ratio and shear strength, were obtained by modeling the relative density and the direct shear tests. The load-settlement relations obtained from the modeling of the bearing capacity experiment performed at different relative densities were compared with the results obtained by the bearing capacity theories (Terzaghi, Meyerhof, Brinch Hansen and Vesic). It was seen that the ultimate bearing capacity values obtained from the analysis results were higher than the ultimate bearing capacity values obtained from theories at 40%, 50% and 60% relative denisties, while the ultimate bearing capacity value obtained from the numerical analysis at 70% relative density were lower than the ultimate bearing capacity values obtained from the theories.

Keywords: Discrete Element Method, Relative Density, Bearing Capacity

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Genel kayma kırılması 4
Şekil 2. Yerel kayma kırılması 5
Şekil 3. Zımbalama kayma kırılması 5
Şekil 4. Zeminde meydana gelen kırılma türleri 6
Şekil 5. Terzaghi'nin taşıma gücü modeli 7
Şekil 6. Meyerhof'nin taşıma gücü modeli 10
Şekil 7. 100 diskte ilk kontak kuvvet zinciri 17
Şekil 8. Sert küre modelinin şematik diyagramı 17
Şekil 9. Yumuşak küre modelinin şematik diyagramı 18
Şekil 10. Ayrık eleman yöntemi için hesaplama döngüsü 19
Şekil 11. a) Grid hücreleri yaklaşımı b) Verlet listesi yaklaşımı 22
Şekil 12. Parçacıklar arasındaki oluşan normal ve teğet kuvvetler 23
Şekil 13. Lineer yay modelinde kuvvet ve yer değiştirme arasındaki ilişki 24
Şekil 14. Hertz-Mindlin Kontak modelinde kuvvet ve yer değiştirme arasındaki ilişki 25
Şekil 15. Hertz-Mindlin+JKR Kontak modelinde kuvvet ve yer değiştirme arasındaki ilişki 27
Şekil 16. Histeretik Kontak modelinde kuvvet ve yer değiştirme arasındaki ilişki 28
Şekil 17. Üç boyutlu küme şekilleri örneği (Yang et al., 2017) 30
Şekil 18. Büyük bir zaman adımının parçacık temas mekanizması üzerindeki etkisi 31
Şekil 19. EDEM'de atanan kum malzemesi özelliklerinin parametrelerinin ayarlanması 37
Şekil 20. Kullanılan ve varsayılan tanelerin ölçeklendirilmiş parçacık boyutu dağılımı 39
Şekil 21. Maksimum boşluk oranı deneyinin simülasyonu sırasındaki adımları 40
Şekil 22. Minimum boşluk oranı deneyinin simülasyonu sırasındaki adımlar 41
Şekil 23. Kesme kutusu deneyinin modeli 42
Şekil 24. Dr=40% rölatif sıkılıkta kesme kutusu deneyi sonucu 43
Şekil 25. Dr=50% rölatif sıkılıkta kesme kutusu deneyi sonucu 43
Şekil 26. Dr=60% rölatif sıkılıkta kesme kutusu deneyi sonucu 44
Şekil 27. Dr=70% rölatif sıkılıkta kesme kutusu deneyi sonucu 44
Şekil 28. EDEM programında kullanılan geometrik düzeneği 47

Şekil 29. Simülasyon ayarları 50
Şekil 30. EDEM programında kum partikülü oluşumu için gerekli fabrika parametreleri . 52
Şekil 31. %40 rölatif sıkılıkta yük-oturma eğrisi 54
Şekil 32. %40 rölatif sıkılıkta parçacık arasında normal kuvvetler 54
Şekil 33. %40 rölatif sıkılıkta parçacık arasında teğet kuvvetler 55
Şekil 34. %50 Rölatif sıkılıkta yük-oturma eğrisi 55
Şekil 35. %50 Rölatif sıkılıkta parçacık arasında normal kuvvetler 56
Şekil 36. %50 Rölatif sıkılıkta parçacık arasında teğet kuvvetler 56
Şekil 37. %60 Rölatif sıkılıkta yük-oturma eğrisi 57
Şekil 38. %60 Rölatif sıkılıkta parçacık arasında normal kuvvetler 57
Şekil 39. %60 Rölatif sıkılıkta parçacık arasında teğet kuvvetler 58
Şekil 40. %70 Rölatif sıkılıkta yük-oturma eğrisi 58
Şekil 41. %70 Rölatif sıkılıkta parçacık arasında oluşan normal kuvvetler 59
Şekil 42. %70 Rölatif sıkılıkta parçacık arasında oluşan teğet kuvvetler 59
Şekil 43. Farklı rölatif sıkılıklar için taşıma gücü- oturma eğrileri 60
Şekil 44. Analiz verilerine göre taşıma gücü katsayısının rölatif sıkılıkla değişimi 61
Şekil 45. Terzaghi taşıma gücü katsayısının rölatif sıkılıkla değişimi 62
Şekil 46. Meyerhof taşıma gücü katsayısının rölatif sıkılıkla değişimi 62
Şekil 47. Brinch Hansen taşıma gücü katsayısının rölatif sıkılıkla değişimi 63
Şekil 48. Vesic taşıma gücü katsayısının rölatif sıkılıkla değişimi 63
Şekil 49. Normal ve düzeltilmiş sürtünme açısı değerleri için taşıma gücü katsayıları ile rölatif sıkılık arasındaki ilişkisi 64
Şekil 50. Nγ taşıma gücü katsayısının Rölatif sıkılıkla arasındaki ilişki 65
Şekil 51. Taşıma gücü katsayısının Nγ değişimin γB/q ile karşılaştırılması 65

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Temel şekil katsayıları 8
Tablo 2. Taşıma gücü katsayıları 8
Tablo 3. Temel tabanı şekil katsayıları 9
Tablo 4. Değiştirilmiş taşıma gücü katsayıları 10
Tablo 5. Meyerhof taşıma gücü katsayıları 11
Tablo 6. Meyerhof taşıma gücü şekil, derinlik ve eğim katsayıları 12
Tablo 7. Hansen'in taşıma gücü katsayıları 13
Tablo 8. Hansen (1970) taşıma gücü eşitliğinin şekil, derinlik ve eğim katsayıları 14
Tablo 9. Vesic (1973) taşıma gücü eşitliğinin şekil, derinlik ve eğim katsayıları 15
Tablo 10. Vesic'in taşıma gücü katsayıları 16
Tablo 11. Kum Malzemesinin Özellikleri 36
Tablo 12. Maksimum boşluk oranı deney modelleme sonuçları 39
Tablo 13. Minimum boşluk oranı deney modelleme sonuçları 41
Tablo 14. Simülasyonda kullanılan ekipman malzeme özellikleri 45

SEMBOLLER DİZİNİ

B	: Temel genişliği
L	: Temel uzunluğu
q_u	: Sınır taşıma gücü
k_1, k_2	: Temel tabanı şekline bağlı katsayılar
c	: Kohezyon
φ	: Kayma mukavemeti açısı (içsel sürtünme açısı)
D_f	: Temel derinliği
γ	:Temel tabanı üstündeki zemin birim hacim ağırlığı
B	: Temel genişliği
N_c, N_γ, N_q	: Taşıma gücü katsayıları
X_i	: Partikülün pozisyonu
F_i	: Parçacık üzerinde etkili olan tüm kuvvetlerin toplamı
I_i	: Partikülün atalet momenti
ω_i	: Partikülün açısal hızı
F_n, F_t	: Normal ve teğetsel yöndeki temas kuvvetleri
δ_n, δ_t	: Normal ve teğetsel örtüşme
K_n, K_t	: Normal ve teğetsel yöndeki temasta yer alan parçacık yay sabiti
E	: Young modülü
R	: Parçacık yarıçapı
G	: Kayma modülü
ν	: Poisson oranı
η_n	: Normal sönümleme katsayısı
V_n	: Normal yönde temas halindeki parçacıkların bağıl hızı
δ_{max}	: Temas sırasında maksimum örtüşme
m_s	: Modeldeki en küçük parçacıkların kütlesi
k_n	: Normal kontak rijitliği
e_{max}	: Maksimum boşluk oranı
e_{min}	: Minimum boşluk oranı
D_r	: Rölatif sıkılık

1. GENEL BİLGİLER

1.1.Giriş

Kentsel bölgelerin hızla gelişmesi ve dünyanın nüfusunun 8 milyardan fazla kişiye ulaşması ile köprüler, kuleler, barajlar gibi birçok sivil yapının inşa edilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Herhangi bir yapının en önemli bileşenlerinden biri, yapının ağırlığı ve diğer kaynaklardan oluşan yüklerin, altta yatan temel zeminine aktarılmasında birincil role sahip olan temeldir.

Temellerin taşıma gücü temel mühendisliğinde önemli bir konudur. Yapının öz ağırlığı ve uygulanan diğer yükler, zemine güvenli ve ekonomik bir şekilde aktarılmalıdır. Temel altındaki zeminin kayma kırılmasının meydana geldiği yüke "temelin nihai taşıma gücü" denir. Nihai taşıma gücünün büyüklüğü, zeminin mukavemet ve fiziksel özellikleri ile temelin geometrik özelliklerine bağlıdır.

Temel tasarımı iki ayrı aşamadan oluşur: temel altındaki zeminin nihai taşıma kapasitesi ve temelin üst yapıyı etkilemeden yapabileceği tolere edilebilir oturma. Nihai taşıma kapasitesi, temel altındaki zeminin, kayma kırılması oluşmadan önce taşıyabileceği yükü tanımlamaktadır. Bununla birlikte, üst yapıdan kaynaklanan oturmanın hesaplanması ile, stabilizasyon için izin verilen deformasyon sınırlarının aşılmadığı gösterilmelidir.

Granül malzemelerin modellenmesi yıllardır zorlu bir araştırma konusu olmuştur. Granül malzemelerin partikül doğası geometrik davranışlarını kontrol eder. Klasik bir tanıma göre granül malzeme temel bileşenleri; sert elastik olmayan temaslar, sürtünme ve ihmal edilebilir termodinamik etkiler ile karakterize edilir (Gennes, 1999).

Zeminleri ve kayaları idealleştirmek için klasik sürekli ortam mekaniği geliştirilmiş ve bu malzemeleri modellemek için sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal çözüm teknikleri başarıyla kullanılmıştır. Sürekli ortam mekaniği modelleri, fenomenolojik ve temel fiziksel ayrıntılara dikkat vermeden gözlenen fenomenin matematiksel modellemesi ile öncelikle ilgilidir. Bu yaklaşım, tamamen bağımsız üç varsayımı ele almaktadır: süreklilik, homojenlik ve izotropi. Diğer taraftan granül malzemeler temas halindeki taneler ve çevresindeki boşluklardan oluşur. Bu nedenle, granül malzemelerin mekanik davranışı doğal olarak süreksiz, heterojen ve anizotropiktir.

Farklı bir yaklaşım, partikülleri doğrudan bir şekilde ele alan süreksiz veya ayrık modellerin kullanılmasıdır. Partiküllerin doğası otomatik olarak ayrık partiküller olarak simüle edilir ve kuvvetler partiküller arasındaki temas noktalarından aktarılır. Malzeme davranışı, partiküllerin boyut ve şeklinin rastgele dağılımı göz önüne alınarak gerçekçi bir şekilde modellenmektedir. Kayalar gibi kohezyonlu malzemeler durumunda, yapışkan temaslı partiküller arasındaki bağların kırılması yoluyla kırılma basit bir şekilde elde edilebilir.

Granül malzemelerin simülasyonu için en yaygın ayrık teknikler ayrık eleman yöntemi (Cundall ve Strack, 1979) ve moleküler dinamiktir (Alder ve Wainwright, 1959). Her iki yöntemde çok çeşitli materyallerin bünyesel davranışları, kontak yasaları ve farklı geometriler ile göz önüne alabilir. İnşaat mühendisliği bağlamında granül zeminin modellenmesi için ayrık eleman yöntemi ilk olarak Cundall ve Strack (1979) tarafından kullanılmıştır. Partiküller, ayrı disklerin rastgele bir montajı olarak modellenmiştir. Köşeli tane şekillerinin simülasyonunu geliştirmek için de birçok araştırma yapılmıştır. Günümüzde, ayrık eleman yöntemi çok çeşitli mühendislik problemlerinde kullanılmaktadır.

Ayrık eleman yöntemi, simüle edilecek ortama bağlı olarak farklı lineer ve lineer olmayan kontak yasalarının kullanılmasına izin verir. Bu, farklı ölçeklerde bir problemin simülasyonuna ve sistemdeki birçok partikülün etkileşimini içeren partiküllerin gerçek boyutundaki davranışlarının modellenmesine izin verir. Bu teknik, farklı problemlerin analizi için çok etkili bir araçtır, ancak bazı dezavantajlarla birlikte gelir. Her bir partikül-partikül etkileşiminin karmaşık temas yasalarına hesaplanması, bazı durumlarda yüksek bir hesaplama çabası gerektirir. Bazen ayrık eleman yönteminin simülasyonu günlerce veya haftalarca sürebilir. Bu uygulandığı durumları, az sayıda element veya basit şekilli partiküller içeren basit problemlerle kısıtlar. Ayrık eleman yönteminin bir başka gereksinimi, bazı durumlarda doğrudan elde edilemeyen temas modeli parametrelerinin tahminidir. Bu çalışmada, farklı rölatif sıkılıktaki kum üzerine oturan şerit temelin taşıma gücü analizi, ayrık eleman yöntemine dayalı EDEM yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Ayrık eleman yöntemi ile yapılan taşıma gücünün analizlerinden elde edilen sonuçlar, analitik yöntemlerle elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

1.2.Temellerin Sınıflandırılması

Temel, yapının en önemli bölümlerinden biridir. Tüm yükleri yapıdan zemine aktarır ve yapının stabilitesini sağlar. Temeller, temelin yükleri aktardığı derinliğe bağlı olarak sığ temeller ve derin temeller olmak üzere iki bölüme ayrılabilir. Sığ temeller, zemin yüzüne yakın yerleştirilen ve yapı yüklerini sığ tabakalara aktaran temeldir. Derin temeller, daha büyük bir derinliğe yerleştirilen ve yapı yüklerini derin tabakalara aktaran temeldir. Sığ temelde derinlik genişliğinden daha az veya ona eşitken, derin temelde derinliğin genişliğe (veya çapa) oranı 5'ten fazladır (Terzaghi, 1943).

Temeller aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

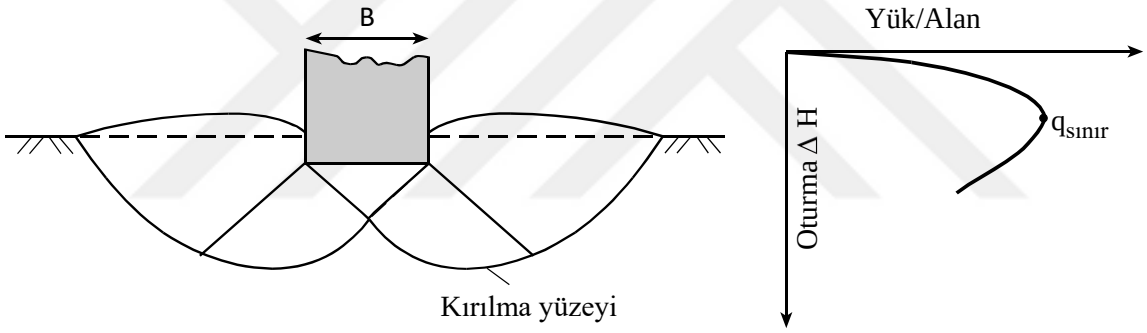
1) Yüzeysel (sığ) Temeller:
    a) Tekil Temeller
    b) Şerit Temeller
    c) Radye Temeller
2) Derin Temeller:
    a) Kazıklı Temeller
    b) Ayak Temeller
    c) Keson Temeller

1.3. Zeminde Kırılma Tipleri

Deneysel çalışmalar, yetersiz taşıma kapasitesi nedeniyle bir temel zemininde kırılma olması durumunda, kırılma mekanizmasının türüne bağlı olarak farklı kırılma şekillerinin geliştiğini göstermiştir. Vesic (1963) üç tip kayma kırılması; genel kayma kırılması, yerel kayma kırılması ve zımbalama kayma kırılması gözlemlemiştir.

1.3.1. Genel Kayma Kırılması

Sıkı kum veya sert kohezyonlu bir zeminin yüzeyine oturan B genişliğinde olan bir şerit temeli göz önüne alalım, temele kademeli olarak bir yük uygulanırsa, oturma aynı şekilde artacaktır. Belirli bir noktada, birim alandaki yük $q_{sınır}$'a eşit olduğunda, temeli destekleyen zeminde ani bir kırılma meydana gelir ve zemindeki kırılma yüzeyi, Şekil 1'de gösterildiği gibi zemin yüzeyine uzanacaktır. Bu kırılma anında birim alana etkiyen yük değerine temelin sınır taşıma gücü ($q_{sınır}$) denir (Vesic, 1963). Zeminde bu çeşit ani kırılma oluştuğunda, buna genel kayma kırılması denilir. Rölatif sıkılığın (D_r), %70 den büyük ve içsel sürtünme açısının (ϕ), 35°den büyük olduğu durumlarda genel kayma kırılması oluşur (Das, 2007).

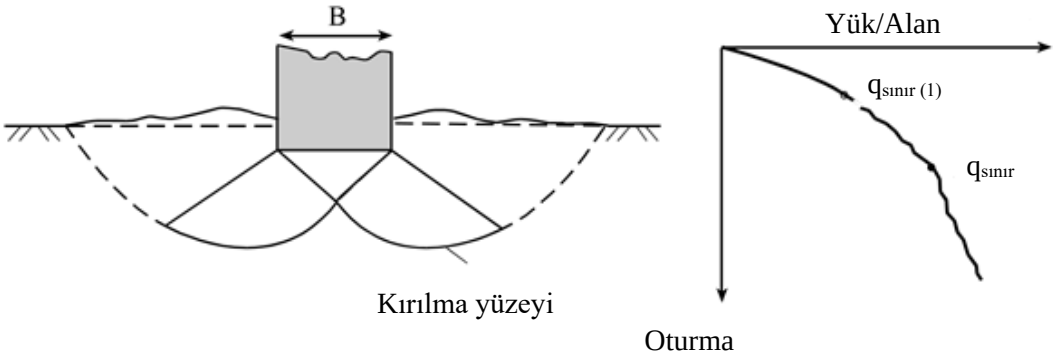


Şekil 1. Genel Kayma Kırılması

1.3.2. Yerel (Bölgesel) Kayma Kırılması

Söz konusu temel, orta sıkı kum veya orta sert kil zemine oturuyorsa, temeldeki yükte bir artışa, oturmada da bir artış eşlik edecektir. Bununla birlikte, bu durumda, zemindeki kırılma yüzeyi, Şekil 2'deki düz çizgilerle gösterildiği gibi, temelden dışarı doğru yavaşça uzanacaktır. Temel üzerindeki birim alana gelen yük $q_{sınır(1)}$'e eşit olduğunda, temel hareketine ani oturmalar eşlik edecektir. Daha sonra zemindeki kırılma yüzeyinin zemin yüzeyine ulaşması için temelin oldukça büyük oturma yapmasına ihtiyaç vardır (Şekil 2'deki kırık çizgilerle gösterildiği gibi). Bu durumdaki birim alana gelen yük değeri, sınır taşıma

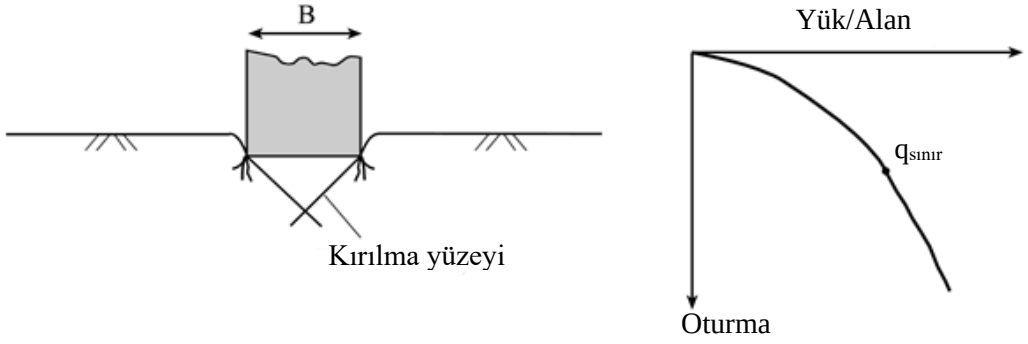
gücüne ($q_{sınır}$) eşit olur. Bundan sonra, yükteki artışa temel oturmasında büyük bir artış eşlik edecektir. Birim alana gelen $q_{sınır\ (1)}$ yüküne Birinci Kırılma Yükü denir (Vesic, 1963).



Şekil 2. Yerel Kayma Kırılması

1.3.3. Zımbalama Kayma Kırılması

Temel oldukça gevşek bir zemine oturuyorsa, yük-oturma eğrisi Şekil 3'teki gibi olacaktır. Bu durumda, zemindeki kırılma yüzeyi zemin yüzeyine uzanmayacaktır. Sınır taşıma gücüne ($q_{sınır}$) ulaştıktan sonra yük-oturma eğrisi daha dik ve pratik olarak lineer olacaktır. Zemindeki bu tür kırılmaya Zımbalama Kayma Kırılması denir (Vesic, 1963).



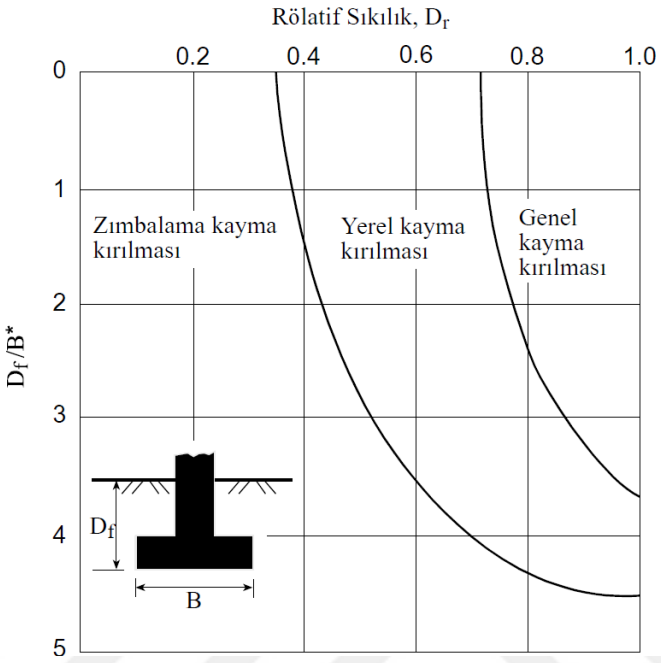
Şekil 3. Zımbalama Kayma Kırılması

Vesic (1973), kumlara oturan temellerin taşıma kapasitesi kırılma modu için bir yöntem önermiştir. Şekil 4 bu yöntemi göstermektedir. Grafikte kullanılan B* değeri aşağıdaki bağıntı ile tanımlanmaktadır.

$$B^* = \frac{2BL}{B+L} \tag{1.1}$$

B= Temel genişliği

L= Temel uzunluğu



Şekil 4. Zeminde meydana gelen kırılma türleri

1.4.Taşıma Gücü Denklemleri

Temellerin taşıma gücü ve oturması, geoteknik mühendisliği ve zemin mekaniği alanında araştırılması gereken önemli konulardan biri olmuştur. Geçmişten günümüze zeminin taşıma kapasitesi için deneysel ve teorik olarak birçok çalışma yapılmıştır (Vesic, 1973). Bir temelin taşıma gücü, üzerine inşa edilecek zeminin genel özelliklerine, sahadaki zemin yapısının durumuna ve temelin tasarım geometrisine ve parametrelerine bağlı olarak değişir (Kumbasar ve Kip, 1999).

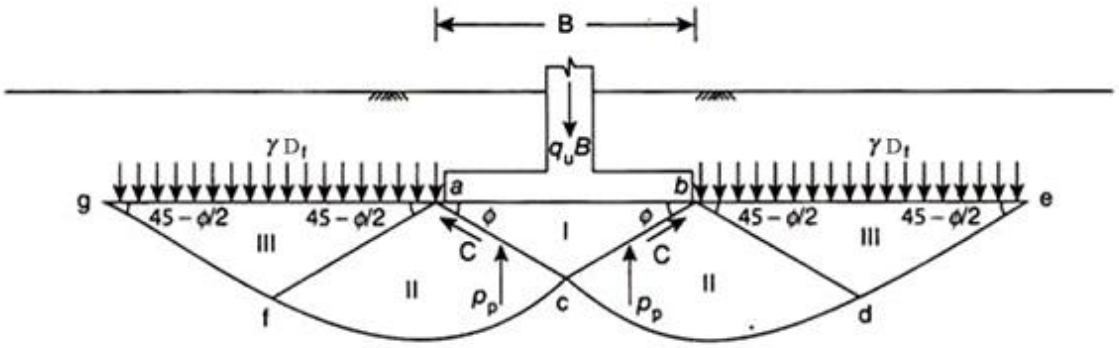
Birçok faktörün taşıma gücü üzerindeki etkisi nedeniyle geçmişte deneysel çalışmalarla birlikte teorik yöntemler geliştirilmeye çalışılmıştır. Terzaghi (1943) tarafından geliştirilen limit denge teorisi ile gelişmeler ilerlemeye başlamıştır. Daha sonra bilim adamları farklı parametreler ve denge yöntemleri ile taşıma gücü konusunda ilerleme kaydetmişlerdir.

Temeller, yapı yüklerini ve kendi ağırlıklarını zemine aktarır ve bu aktarma olayının, zemin ortamında kayma ve yapıda herhangi bir çökme olmadan gerçekleşmesi istenir. Ayrıca temel sisteminin minimum maliyetle tasarlanması ihtiyacı da aranır.

1.4.1. Terzaghi'nin Taşıma Gücü Denklemi

Karl von Terzaghi, sert sığ temellerin sınır taşıma gücünün değerlendirilmesi için kapsamlı bir teori sunan ilk kişidir. Terzaghi'nin teorisine göre, bir temel derinliği (D_f), temel genişliğine eşit veya daha az ise sığdır (Terzaghi, 1943). Daha sonraki çalışmalarda, temelin derinliğinin, genişliğinin 3 veya 4 katından küçük olan temeller, yüzeysel temeller olarak kabul edildi.

Terzaghi tarafından önerilen bu bağıntı şerit bir temel üzerine geliştirilmiştir. Araştırmacılar tarafından sığ temellerin taşıma gücünün hesaplanmasında farklı formüller geliştirilmiştir. Ancak terzaghi tarafından kullanılan formül basit olması sebebiyle bugüne kadar en çok kullanılan formül olmuştur (Das, 2010).



Şekil 5. Terzaghi'nin taşıma gücü modeli

Şekil 5'te temel plağının yüklenmesiyle birlikte oluşan Terzaghi'nin taşıma gücü modeli görülmektedir. abc üçgen bölgesi temel tabanı altında oluşur, bu kama yükün etkisi altında aşağı doğru hareket eder, aktif Rankine bölgesi abc ve bac bölgesinde oluşur ve iç açıları eşit olur. ac ve bc yüzeylerinin zemin kütlesini yukarı doğru hareket ettirdiği, böylece pasif bölgelerin her iki tarafta (bde ve afg bölgesi) oluştuğu varsayılmaktadır.

Terzaghi'nin taşıma gücü formülü Denklem 1.2'deki şekilde ifade edilmektedir.

$$q_u = K_1 c' N_c + q N_q + K_2 \gamma B N_\gamma \quad (1.2)$$

Burada,

q_u: Sınır taşıma gücü

k_1, k_2: Temel tabanı şekline bağlı katsayılar (Tablo 1)

c': Kohezyon

ϕ: Kayma mukavemeti açısı (içsel sürtünme açısı)

D_f: Temel derinliği

γ: Temel tabanı üstündeki zemin birim hacim ağırlığı

B: Temel genişliği

N_c, N_γ, N_q : Taşıma gücü katsayılarıdır (Tablo 2).

Tablo 1. Temel şekil katsayıları

Temel tabanı şekli	**k_1**	**k_2**
Şerit	1	0.5
Kare	1.3	0.4
Daire	1.3	0.3

Tablo 2. Taşıma gücü katsayıları

φ	**Nc**	**Nq**	**Nγ**
0	5.7	1	0
5	7.34	1.64	0.14
10	9.61	2.69	0.56
15	12.86	4.45	1.52
20	17.69	7.44	3.64
25	25.13	12.72	8.34
30	37.16	22.46	19.13
35	57.75	41.44	45.41
40	95.66	81.27	115.31
45	172.28	173.28	325.34
50	347.5	415.14	1072.8

Terzaghi, zeminde yerel kayma kırılması modunu gösteren temeller için önceki denklemde aşağıdaki modifikasyonları önerdi.

$$q_u = k_1 c' N_c' + q N_q' + k_2 \gamma B N_\gamma' \tag{1.3}$$

Burada,

q_u: Sınır taşıma gücü

k_1, k_2: Temel tabanı şekline bağlı katsayılar (Tablo 3)

c': Kohezyon

ϕ: Kayma mukavemeti açısı (içsel sürtünme açısı)

D_f: Temel derinliği

γ: Temel tabanı üstündeki zemin birim hacim ağırlığı

B: Temel genişliği

N_c', N_q', N_γ': Değiştirilmiş taşıma gücü katsayılarıdır (Tablo 4).

Tablo 3. Temel tabanı şekil katsayıları

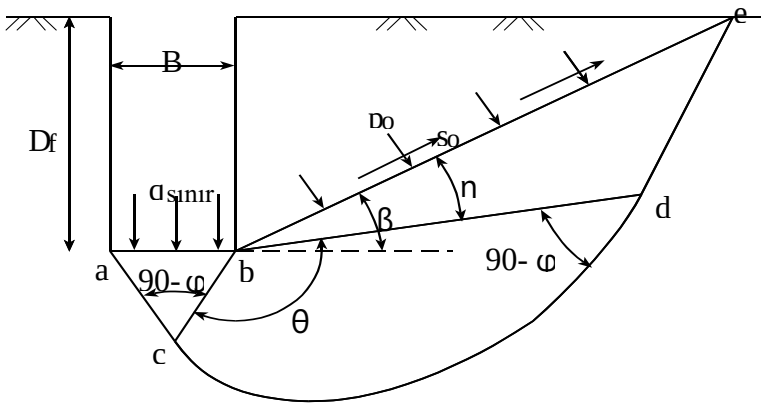
Temel tabanı şekli	**k_1**	**k_2**
Şerit	2/3	0.5
Kare	0.867	0.4
Daire	0.867	0.3

Tablo 4. Değiştirilmiş taşıma gücü katsayıları

φ	$N_c^{'}$	$N_q^{'}$	$N_\gamma^{'}$
0	5.7	1	0
5	6.74	1.39	0.074
10	8.02	1.94	0.24
15	9.67	2.73	0.57
20	11.85	3.88	1.12
25	14.8	5.6	2.25
30	18.99	8.31	4.39
35	25.18	12.75	8.35
40	34.87	20.5	17.22
45	51.17	35.11	36
50	81.31	65.6	85.75

1.4.2. Meyerhof'un Taşıma Gücü Denklemi

Meyerhof (1951) tarafından simetrik olarak yüklenmiş şerit temellerin nihai taşıma güçlerini belirlemek için kullanılan denklemin şekli Terzaghi denklemi ile aynıdır. Ancak problemi çözme yaklaşımı farklıdır. Meyerhof, Şekil 6'da görülen bir sığ şerit temel altında sınır yükte oluşan kırılma yüzeyini göstermiştir. Bu şekilde temel altında; elastik üçgen kama, cd bir logaritmik eğri, bcd radyal kayma bölgesi ve bde karışık kayma bölgeleri oluşur.



Şekil 6. Meyerhof'nin taşıma gücü modeli

Meyerhof'un yüzeysel şerit temel için şekil (s), derinlik (d) ve eğim (i) faktörleri de dikkate alınarak ortaya koyduğu genel taşıma gücü denklemi Bağıntı 1.4 ve 1.5'te verilmiştir.

Düşey yük için: $$q_u = cN_c s_c d_c + \gamma D_f N_q s_q d_q + 0.5\gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma \quad (1.4)$$

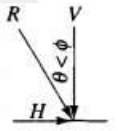
Eğimli yük için: $$q_u = cN_c s_c d_c i_c + \gamma D_f N_q s_q d_q i_q + 0.5\gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma \quad (1.5)$$

Meyerhof'a göre taşıma gücü katsayıları (N_c, N_q ve N_γ) Tablo 5'te ve Tablo 6'da şekil, derinlik ve eğim faktörlerinin formülleri verilmiştir.

Tablo 5. Meyerhof taşıma gücü katsayıları

φ	**N_c**	**N_q**	**N_γ**
0	5.14	1	0
5	6.49	1.57	0.07
10	8.35	2.47	0.37
15	10.98	3.94	1.13
20	14.83	6.4	2.87
25	20.72	10.66	6.77
30	30.14	18.4	15.67
35	46.12	33.3	37.15
40	75.31	64.2	93.69
45	133.88	134.88	262.74
50	266.89	319.07	873.84

Tablo 6. Meyerhof taşıma gücü şekil, derinlik ve eğim katsayıları

Faktör	Değer	Aralık
Şekil	$S_c = 1 + 0.2 k_p \frac{B}{L}$ $S_q = S_\gamma = 1 + 0.1 k_p \frac{B}{L}$ $S_q = S_\gamma = 1$	Herhangi φ değeri için Φ>10 Φ=0
Derinlik	$d_c = 1 + 0.2\sqrt{k_p}\frac{D}{B}$ $d_q = d_\gamma = 1 + 0.1\sqrt{k_p}\frac{D}{B}$ $d_q = d_\gamma = 1$	Herhangi φ değeri için Φ>10 Φ=0
Eğim 	$i_c = i_q = (1 - \frac{\theta}{90})^2$ $i_\gamma = (1 - \frac{\theta}{\phi})^2$ $i_\gamma = 0 \quad \theta > 0$	Herhangi ϕ değeri için ϕ>10 ϕ=0
$K_p = \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$ θ = R bileşke kuvvetinin düşey ile yaptığı açı (Eğer θ= 0 ise i_i =1 dir.)		

1.4.3. Hansen'in Taşıma Gücü Denklemi

Hansen (1970), Meyerhof'un sunduğu denklemin iki farklı zemin durumu için (0 < ϕ ve ϕ = 0) geliştirilmiş bir uzantısını olarak sunmuştur. Eğimli bir yüzeyde yükün yaptığı açı faktörlerini, temel ve zemin eğim faktörlerini hesaba katarak bir eşitlik sunmuştur (Bowles, 1997). Hansen temelin pürüzsüz olduğunu varsayarak taşıma gücünü hesaplamıştır. Taşıma gücü faktörlerinden N_c ve N_q değerleri Meyerhof değerleri ile aynıdır, fakat Nγ değeri farklıdır. Tablo 7'de Hansen'in taşıma gücü katsayılarını verilmiştir.

$$q_u = c.N_c.s_c.d_c.i_c.g_c.b_c + \sigma.N_q.s_q.d_q.i_q.g_q.b_q + 0.5.\gamma.B'.N_\gamma.s_\gamma\, d_\gamma.i_\gamma.g_\gamma.b_\gamma \qquad (1.6)$$

$$N_c = (N_q - 1)\cot\phi$$
$$N_q = N_\phi\, e^{\pi \tan\phi}$$
$$N_\gamma = 1.8(N_q - 1)\tan\phi$$
$$N_\phi = \tan^2(45 + \frac{\phi}{2})$$

Tablo 7. Hansen'in taşıma gücü katsayıları

φ	**Nc**	**Nq**	**Nγ**
0	5.14	1	0.0
5	6.49	1.57	0.1
10	8.35	2.47	0.4
15	10.98	3.94	1.2
20	14.83	6.4	2.9
25	20.72	10.66	6.8
30	30.14	18.4	15.1
35	46.12	33.3	33.9
40	75.31	64.2	79.5
45	133.88	134.88	200.8
50	266.89	319.07	568.6

Hansen'in şekil, derinlik ve genel taşıma gücü denklemini oluşturan diğer katsayıları toplu olarak Tablo 8'te verilmiştir.

Tablo 8. Hansen (1970) taşıma gücü eşitliğinin şekil, derinlik ve eğim katsayıları

Faktör	Değer	Aralık
Şekil	$S_c^{'} = 0.2\frac{B'}{L}$ $S_c = 1+\frac{N_q}{N_c}\frac{B^{'}}{L^{'}}$ $S_q = 1+\frac{B^{'}}{L^{'}}\sin\phi$ $S_\gamma = 1-0.4\frac{B^{'}}{L^{'}}$	$\phi=0$ Hehangi ϕ değeri için
Derinlik	$d_c = 1+0.4k$ K=D/B≤1 , K=tan^{-1}(D/B)≥1 $d_q = 1+2\tan\phi\,(1-\sin\phi)^2\,.k$ $d_\gamma = 1.0$	Hehangi ϕ değeri için Tüm ϕ değeri için
Yük eğim	$I_c^{'} = 0.5-\sqrt{1-\frac{H_i}{Af.ca}}$ $i_c = i_q-\frac{1-i_q}{N_q-1}$ $iq = [1-\frac{0.5.Hi}{V+Af.ca.cot\phi}]^{\alpha1}\quad 2\le\alpha1\le 5$ $i\gamma = [1-\frac{0.7.Hi}{V+Af.ca.cot\phi}]^{\alpha2}\quad 2\le\alpha2\le 5$	
Zemin eğim	$g_c^{'} = \frac{\beta^\circ}{147^\circ}$ $g_c^{'} = 1.0-\frac{\beta^\circ}{147^\circ}$ $g_q = g_\gamma = (1-0.5\tan\beta)^5$	
Temel eğim	$b_c^{'} = \frac{\eta^\circ}{147^\circ}$ $b_c^{'} = 1.0-\frac{\eta^\circ}{147^\circ}$ $b_q = exp(-2\eta\,tan\phi)$ $b_\gamma = exp(-2.7\eta\,tan\phi)$	$\phi=0$ $\phi>0$ η (radyan olarak hesaplanır)

1.4.4. Vesic'in Taşıma Gücü Denklemi

Vesic (1973) tarafından geliştirilen denklem, Meyerhof taşıma gücü denklemi ile benzer yaklaşıma dayanmaktadır. N_c ve N_q değerleri Hansen'in geliştirdiği denklemle aynıdır ve buna ek olarak N_γ katsayısı geliştirilmiştir. Bunlardan farklı olarak i_i, b_i ve g_i faktörlerinin dışında faktörler kullanılarak taşıma gücü hesabı yapılmıştır. Bu faktörler Tablo 9'da verilmiştir.

$$q_u = c.N_c.S_c.d_c.i_c.g_c.b_c + \sigma.N_q.S_q.d_q.i_q.g_q.b_q + 0.5.\gamma.B'.N_{\gamma}.S_{\gamma}\, d_{\gamma}.i_{\gamma}.g_{\gamma}.b_{\gamma} \quad (1.7)$$

Tablo 9. Vesic (1973) taşıma gücü eşitliğinin şekil, derinlik ve eğim katsayıları

Faktör	Değer	Aralık
Şekil	$S_c = 1 + \frac{N_q}{N_c}\frac{B'}{L'}$ $S_q = 1 + \frac{B}{L}\tan\phi$ $S_\gamma = 1 - 0.4\frac{B}{L} > 0.6$	Hehangi ϕ değeri için
Derinlik	$d_c = 1 + 0.4k$ K=D/B≤1 , K=tan^{-1}(D/B)≥1 $d_q = 1 + 2\tan\phi\,(1 - \sin\phi)^2\,.k$ $d_\gamma = 1.0$	Herhangi ϕ değeri için Tüm ϕ değeri için
Eğim	$i_c' = 1 - \frac{m.H_i}{Af.c_a.N_c}$ $i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1}$ $i_q = [1 - \frac{Hi}{V + Af.ca.\cot\phi}]^m$ $i_\gamma = [1 - \frac{Hi}{V + Af.ca.\cot\phi}]^{m+1}$ $m = m_b = \frac{2 + B/L}{1 + B/L}$ $m = m_l = \frac{2 + B/L}{1 + B/L}$	
Zemin eğim faktörü	$g_c' = \frac{\beta}{5.14}$ $g_c = i_q - \frac{1 - i_q}{5.14.\tan\phi}$ $g_q = g_\gamma = (1 - \tan\beta)^5$	
Temel eğim faktörü	$b_c' = g_c' = \frac{\beta}{5.14}$ $b_c' = 1.0 - \frac{\beta}{5.14\tan\phi}$ $b_q = b_\gamma = (1.0 - \eta.tan\varphi)^2$	ϕ =0 ϕ >0 η (radyan olarak hesaplanır)

1. ϕ =0 olduğunda (β ≠ 0) Nγ = -2sin(±β)
2. Hi = HB olduğunda m = m_B hesaplanır ve Hi=HL olduğunda m=mL hesaplanır. HB ve HL birlikte hesaplanmak isteniyorsa
m= $\sqrt{m_B^2 + m_l^2}$ şeklinde hesaplanır.
3. Terimlerin tanımı için semboller listesine bakınız.
4. İq, iγ değerleri hesaplanırken Hi ≤ 0 olarak alınır.

Tablo 10. Vesic'in taşıma gücü katsayıları

φ	N_c	N_q	N_γ
0	5.14	1	0.0
5	6.49	1.57	0.4
10	8.35	2.47	1.2
15	10.98	3.94	2.6
20	14.83	6.4	5.4
25	20.72	10.66	10.9
30	30.14	18.4	22.4
35	46.12	33.3	48.1
40	75.31	64.2	109.3
45	133.88	134.88	271.3
50	266.89	319.07	761.3

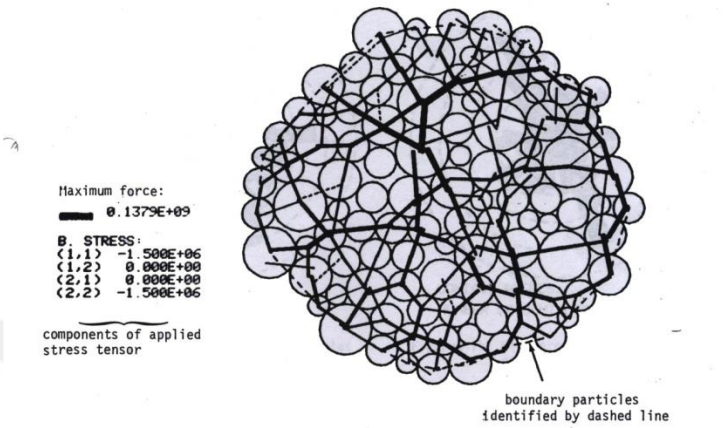
1.5.Ayrık Eleman Yöntemi

Ayrık eleman yöntemi, granüler malzemeler gibi ayrık karakteristiğe sahip malzemelerin davranışını modellemek için kullanılan sayısal bir tekniktir. Her partikülün kendi yer değiştirme, ivme, hız ve temas kuvvetleri özellikleri vardır. Ayrık eleman yöntemi, büyük dönme ve yer değiştirmelere maruz kalan çoklu, etkileşen, deforme olmuş veya süreksiz analiz etme yeteneğine sahiptir. Bir modeldeki her partikülün her özelliği için hesaplama işlemi çok zordur. Ayrık eleman yöntemi, granül malzemenin mekanik davranışını hem mikroskobik hem de makroskopik olarak analiz edebilen güçlü bir araçtır.

Ayrık eleman yöntemi, zemin ve kaya mekaniğine yaygın olarak uygulanmıştır. Cundall ve Peter (1971), kaya parçası ayrık elemanların ilerici kırılmalarını temsil eden ilk bilgisayar modelini sundu. Modelinde, ayrık bloklar arasındaki etkileşim için sürtünme ve normal rijitliğe dayanıyordu. Bloklar temas ettiğinde veya ayrıldığında her bir bloğun yer değiştirme veya dönme miktarında bir sınır yoktu.

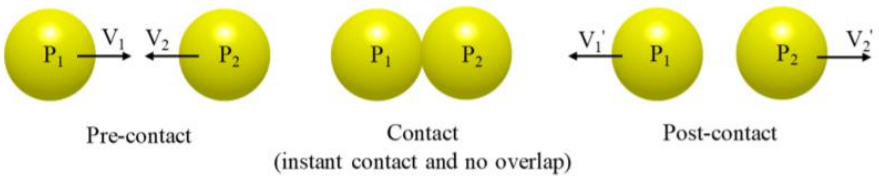
Cundall ve Strack (1979), partikül örtüşmesi de dahil olmak üzere granüler montaj modelleri için ayrık eleman yöntemini tanıttılar. Cundall and Strack'in amacı montajdaki

partikül teması kuvvet zincirini simüle etmekti. Bu granül ortam, sadece temas noktalarında etkileşen ve birbirinden bağımsız olarak hareket eden ayrı partiküllerden oluşur. Şekil 7, 100 diskte ilk kontak kuvvet zincirini gösterir.



Şekil 7. 100 diskte ilk kontak kuvvet zinciri

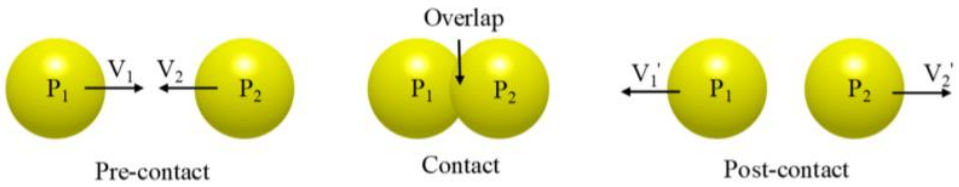
Partikül, temas doğasına bağlı olarak ayrık eleman yönteminde kullanılan iki yaklaşım vardır; sert ve yumuşak küreler. Sert küre yaklaşımında, partiküller arasındaki temasın rijit olduğu varsayılmaktadır. Bu yaklaşım kullanılırken partiküller arasındaki çakışmalar ve deformasyonlar simüle edilmez. Partiküller arasındaki kuvvetler dürtüseldir ve dolaylı olarak, momentum değişimi sadece çarpışmalar nedeniyle kabul edilir. Çarpışma sadece bir kez gerçekleşir ve aynı anda birden fazla çarpışma olmaz. Sert küre yönteminin tipik bir uygulaması hızlı granül akış simülasyonudur (Zhu, 2007).



Şekil 8. Sert küre modelinin şematik diyagramı

Yumuşak küre yaklaşımı, ayrık eleman yönteminde en yaygın kullanılan yaklaşımdır. Yumuşak küre yönteminde, parçacıklar arasındaki temas kısmen rijit olarak kabul edilir. Simülasyon sırasında partiküllerin çakışmalarını ve deformasyonlarını dikkate alır (Walton vd., 1984). Yumuşak küre yönteminin avantajlarından biri, bir dizi partiküllerin temasını idare edebilmesidir (Zhu, 2007). Yumuşak küre yaklaşımı, temas kuvvetinin hesaplandığı

bir zaman adımını ayarladığı için zaman odaklı bir yaklaşım olarak adlandırılır. Bu nedenle, küçük zaman adımları, elde edilen parçacık denklemlerinin doğru entegrasyonuna izin verir. Ancak simülasyondaki hesaplama süresini büyük ölçüde artırdığı için zaman adımının doğru belirlenmesini gerektirir. Yumuşak küre ayrık eleman yöntemi genellikle birçok araştırma alanında ve ayrık eleman yöntemi yazılım paketlerinde kullanılmaktadır. Şekil 9'da yumuşak küre yaklaşımı görülmektedir.



Şekil 9. Yumuşak küre modelinin şematik diyagramı

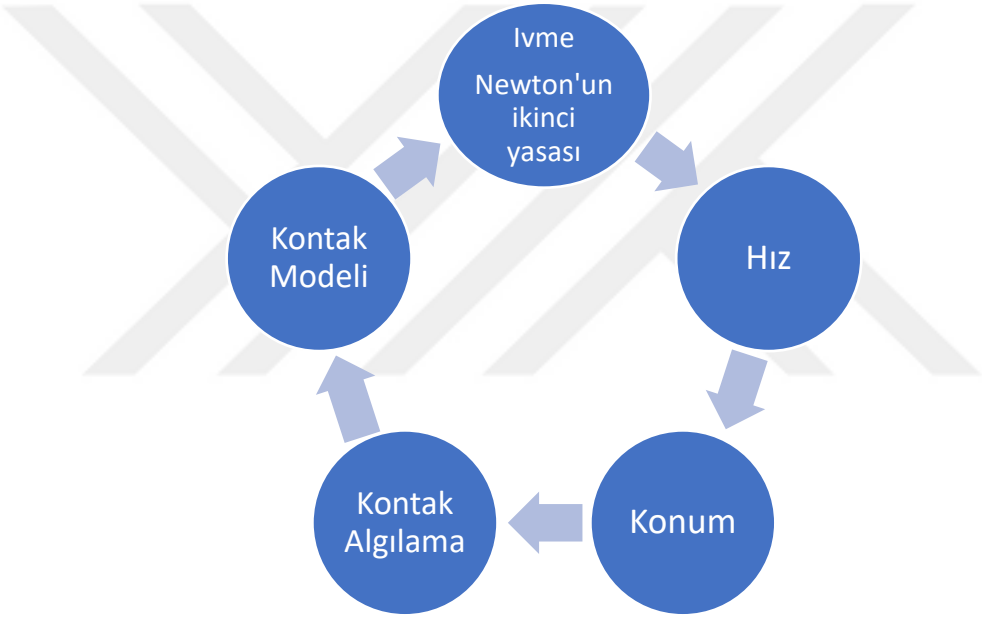
1.5.1. Ayrık Elemanlar Yöntemine Dayalı Yazılımlar

Condal ve Struck, 1979 yılında FORTRAN programlama diline dayalı ilk ayrık eleman programı, "Ball" kodu ile iki boyutta ve "Trubal" kodu ile üç boyutta geliştirmiştir. Daha sonra, bilgisayarların hızlı gelişimi ile farklı yükleme ve çevre koşullarında çok sayıda farklı partikül içeren ayrık eleman yöntemini hesaplamak için çeşitli ayrık eleman yöntemi paketleri kullanılmıştır. Geoteknik mühendisliğinde en çok kullanılan program PFC, YADE, LMGC90, BLOCKS3D ve EDEM.

PFC, BLOCKS3D, LMGC90 ve YADE kodlama becerilerine ihtiyaç duyar. PFC ve EDEM, küresel partiküllerin kümelenmesini desteklemektedir. BLOCKS3D, çok yüzlü şekillerin kullanımına izin verir. Bu çalışmada, DEM Solutions şirketi tarafından tasarlanan EDEM programı, küresel partiküllerin kullanımını desteklediği ve diğer programlara göre kullanımı kolay olduğu için kullanılmıştır.

1.5.2. Ayrık Eleman Yönteminin Prensipleri

Ayrık eleman yöntemi, Newton'un ikinci hareket yasası ve kuvvet yer değiştirme yasalarının standartlarına bağlı olan sayısal bir modelleme yöntemidir. Bu yöntem, her temasta parçacık etkileşimlerini izlemeyi ve her parçacık için parçacık hareketini modellemeyi kapsamaktadır (Boac vd., 2014). Model, modele verilen bilgi parametrelerine bağlı olarak malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerine sahip parçacıklar üretir. Ayrık eleman yönteminin temel ilkeleri, simülasyon süresi boyunca elemanlar arasındaki etkileşimlere dayanarak simülasyondaki her bir elemanın konumunu güncellemektir.



Şekil 10. Ayrık eleman yöntemi için hesaplama döngüsü

Şekil 10, ayrık eleman yöntemi için hesaplama döngüsünün ana konseptini göstermektedir. Temas alanı önce temas algılama algoritması kullanılarak aranır, daha sonra her temas alanında temas modellerine göre normal ve teğetsel rijitlik gibi malzeme özellikleri açısından temas kuvvetleri hesaplanır. Daha sonra Newton'un ikinci yasasını kullanarak parçacık ivmesi bir zaman adımı için hesaplanır.

1.5.3. Hesaplama Mekanizması

Ayrık elemanlar yöntemini kullanmanın temel amacı, her bir sonlu zaman adımında simülasyon süresi boyunca her bir ayrı elemanın sınırlı dönüşünü ve yer değiştirmesini hesaplamaktır. Parçacık üzerine etkiyen kuvvetler ve tork hesaplanır, daha sonra parçacık hareketleri Newton'un ikinci yasası kullanılarak hesaplanır, daha sonra parçacığın hızı ve yeri zaman adımında sayısal entegrasyon kullanılarak bulunur.

Zaman adımı, ayrık eleman yöntemindeki en önemli simülasyon faktörlerinden biridir. Zaman adımları büyükse, sonuçlar düşük hesaplama süresi ile yanlış olabilir (Tsuji vd., 1993). Zaman adımı küçükse, sonuçlar doğrudur, ancak uzun bir hesaplama süresi gerektirir.

Newton'un ikinci hareket yasasına göre partikülün yer değiştirme hareketi şu şekilde ifade edilir:

$$m_i \frac{d^2}{dt^2} x_i = m_i g + F_i \tag{1.8}$$

Burada; m_i partikülün kütlesi, t zaman, x_i partikülün pozisyonu, F_i parçacık üzerinde etkili olan tüm kuvvetlerin toplamı ve g yerçekimi ivmesidir. Temas kuvvetleri, temas modellerine göre hesaplanır. Partikül i için dönme hareketi denklemi Bağıntı 1.9'da verilmiştir.

$$I_i \frac{d}{dt} \omega_i = M_i \tag{1.9}$$

Burada; I_i partikülün atalet momenti, ω_i partikülün açısal hızı ve M parçacık üzerine etki eden toplam torktur.

Her farklı parçacık üzerindeki etki kuvvetleri ve torklar hesaplandıktan sonra, açısal ve doğrusal ivmeler hesaplanabilir. Daha sonra sayısal entegrasyon ile parçacığın hızı ve yer değiştirmesi bulunabilir. Ayrık eleman yönteminde kullanılan farklı sayısal entegrasyon şemaları vardır: Euler entegrasyonu, Leapfrog entegrasyonu, Verlet entegrasyonu, Dişli entegrasyonu ve Taylor serisi entegrasyonu. Euler'in entegrasyon şeması, basitliği ve diğerlerine göre düşük hesaplama süresi nedeniyle ayrık elemanların modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

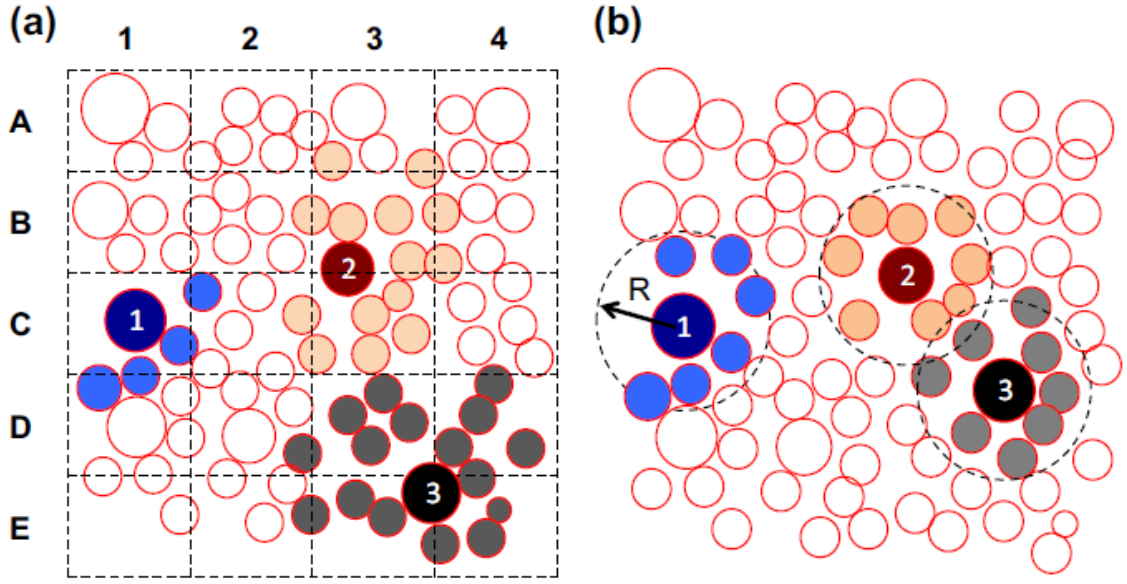
1.5.4. Kontak Algılama

Kontak algılama genellikle yumuşak partiküllü ayrık eleman yöntemi simülasyonunun en çok zaman alan bölümlerinden biridir (Mio vd., 2005). Partikül pozisyonları güncellendikten sonra, partiküller arasında yeni bir temasın kurulup kurulmadığını tespit etmek gerekir. Sistemdeki her parçacığın kontak algılaması her hesaplama döngüsünde gerçekleştirilmelidir. Model binlerce veya milyonlarca parçacık içerebilir, bu nedenle temas parçacıklarını tespit etmek için etkili ve hızlı bir yöntem gerektirir. Ayrık eleman yönteminde temas algılama için farklı yaklaşımlar vardır. Bununla birlikte, küresel şekiller için ayrık eleman yöntemi analizinde, temas algılaması genellikle iki ana adımda yapılır.

İlk adım komşu aramadır. Bu adımın amacı, modeldeki temas halindeki partikülleri tanımlamaktır ve bu farklı yaklaşımlarla yapılır, en yakın komşunun aranması birkaç yaklaşımla gerçekleştirilir. En yaygın yaklaşım Grid Hücreleri ve Verlet listesi yaklaşımıdır.

Grid hücreleri yaklaşımında, Şekil 11 (a)'da gösterildiği gibi modelin alanı eşit boyutta hücrelere bölünür. Hücrelerdeki partiküller konumlarına göre atanır. Daha sonra, partikülün aynı hücredeki diğer partiküllerle temas edip etmediğini doğrulamak için temasın ayrıntılı bir tespiti yapılır, hücrenin boyutu uygun şekilde seçilmelidir. Büyük hücre, birçok potansiyel komşuyu tanımlamak için uzun bir hesaplama süresi gerektirir, ve hücre küçükse, birçok partikül birçok hücreye katılır, böylece partiküllerin tüm bu hücrelerde taranması gerekir. 3 ile 5 partikül çapına sahip bir hücre boyutu kullanılabilir (Seville vd., 2016).

Verlet listesi yaklaşımında, Şekil 11 (b)'de gösterildiği gibi belirli bir arama yarıçapındaki her bir partikül ve onun bitişik partikülleri için bir liste oluşturulur. Tipik yarıçap, parçacık yarıçapının 2-3 katıdır. Bitişik partiküller, merkezi araştırmanın yarıçapında olduğunda listeye eklenir, hassas temas tespiti sadece listedeki partiküller ve komşuları arasında gereklidir.



Şekil 11. a) Grid hücreleri yaklaşımı b) Verlet listesi yaklaşımı

İkinci adımda, temas partikülleri tespit edildikten sonra partiküller arasındaki temasın detayları belirlenir. Daha sonra parçacıklar arasındaki temas kuvvetleri uygun temas modelleri kullanılarak hesaplanır ve parçacık konumları her zaman adımında güncellenir. Bu işlem simülasyondaki son zaman adımına kadar tekrarlanır.

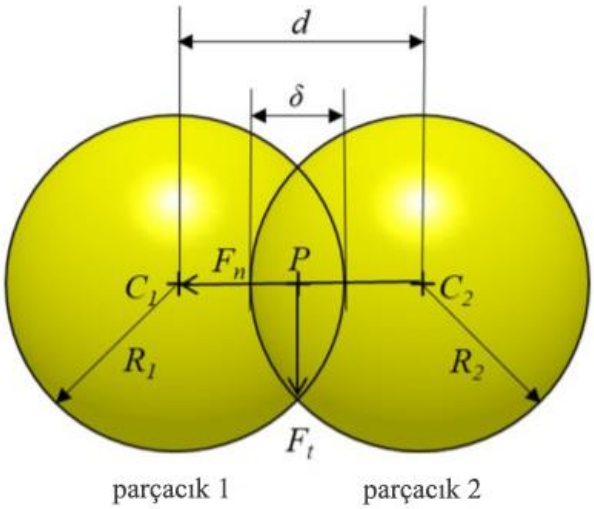
Küresel olmayan partiküller için temas tespiti, temas geometrisinin karmaşıklığı nedeniyle daha karmaşıktır, ayrıca daha uzun hesaplama süresi gerektirir. Ting vd. (1993). İki eliptik parçacık arasındaki temas noktasının, iki elipsin kesişimlerini birleştiren çizginin orta noktası olarak kabul edildiği bir temas algılama yaklaşımı önermiştir. Wu ve Cocks (2006) çokgen parçacıklarını bir üçgen koleksiyonu olarak ele almıştır ve her bir tepe noktasına dayanan bir temas arama şeması önermiştir. Boon vd., (2013) üç boyutlu küresel olmayan parçacıklar için bir temas algılama yaklaşımı önermiştir.

Çoğu ayrık eleman yöntemi yazılım paketi EDEM ve PFC gibi grid-hücre yaklaşımını kullanır. Bu çalışmada, EDEM programı bu yaklaşımı kullandığı için grid-hücre yaklaşımı kullanılmıştır.

1.5.5. Kontak Modelleri

Parçacık temasının modellenmesi, ayrık eleman yöntemini simüle etmenin temellerinden biridir. Ayrık eleman yönteminde elemanlar arasındaki oluşabilen iki tür etkileşim vardır; parçacık-parçacığa ve parçacık-duvara. Parçacıklar arası oluşan temas

kuvvetleri Şekil 12'de gösterildiği gibi, temas noktasına normal ve teğet olan iki bileşene ayrılır. Temas eden iki parçacık arasındaki oluşan örtüşme δ Bağıntı 1.10 ile hesaplanabilir.



Şekil 12. Parçacıklar arasındaki oluşan normal ve teğet kuvvetler

$$\delta = R_1+R_2-d \tag{1.10}$$

Bu normal ve teğetsel bileşenler, yaylardan oluşan ve kontak modelleri olarak adlandırılan modellerle temsil edilir. Kontak modellerinin temel amacı, kontak mekaniği bilimine dayanan simülasyon süresi boyunca her iki etkileşimi de simüle etmektir. Ayrık eleman yöntemi genellikle temas nedeniyle bir parçacık üzerine etki eden kuvvetleri ve torku hesaplamak için basitleştirilmiş temas modelleri kullanır. Kontak modeli, parçacıkların fiziksel özelliklerine göre sınıflandırılabilir.

1.5.5.1.Elastik Kontak Modeli

1.5.5.1.1. Lineer Yay Kontak Modeli

Lineer yay kontak modeli, ayrık elemanlar yönteminde eleman temasının noktalarının modellenmesi için en basit kontak modellerinden biridir. Normal ve teğet yöndeki iki parçacık arasındaki temas, lineer bir yay ile temsil edilir. İki parçacık temasından oluşan

kuvvet ile yer değiştirme arasındaki ilişki Şekil 13'te gösterildiği gibi lineerdir ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir.

$$F_n = -k_n \delta_n \tag{1.11}$$

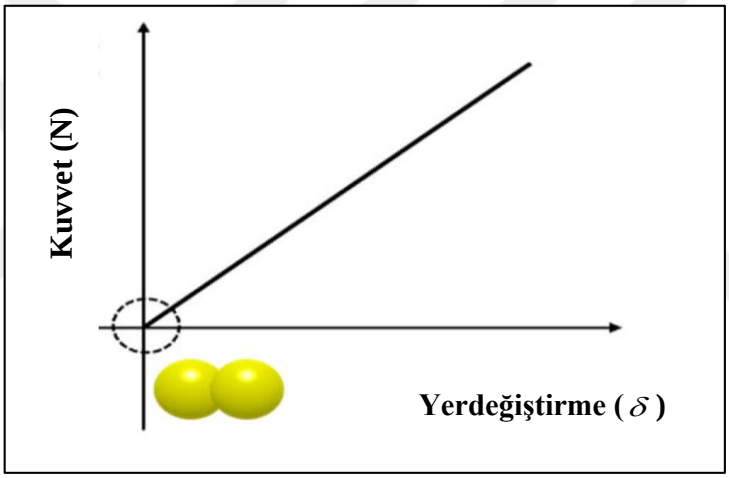
$$F_t = -k_t \delta_t \tag{1.12}$$

Burada:

F_n, Ft: Normal ve teğetsel yöndeki temas kuvvetleri

δ_n δ_t: Normal ve teğetsel örtüşme

k_n, k_t: Normal ve teğetsel yöndeki temasta yer alan parçacığa yay sabitidir.



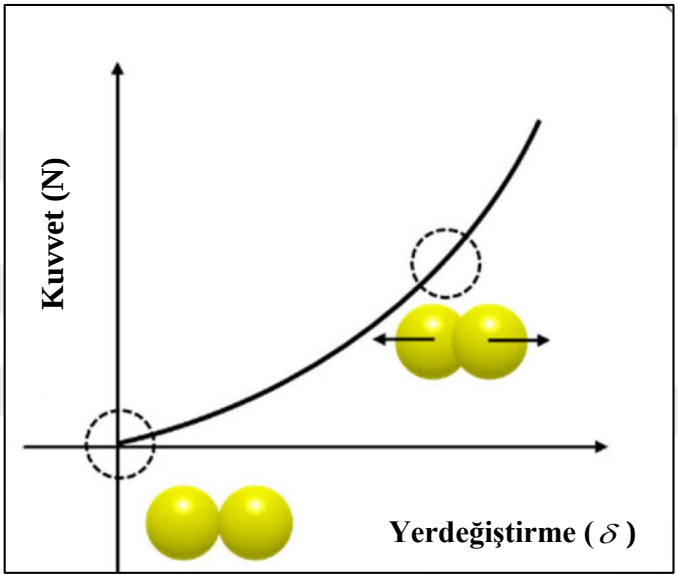
Şekil 13. Lineer yay modelinde kuvvet ve yer değiştirme arasındaki ilişki

Parçacıklar arasındaki temas elastik model kullanılarak modellendiğinde, temasın tamamen elastik olduğu kabul edilir. Bununla birlikte, çoğu pratik durumda, kinetik enerjinin bir kısmı, plastik deformasyon yaparak veya başka bir enerjiye dönüşerek dağılır, bu nedenle lineer yay modelinin kullanımının parçacık temasının modellenmesinde sınırlı uygulamaları vardır (Malone ve Xu, 2008).

1.5.5.1.2. Hertz-Mindlin Kontak Modeli

Hertz-Mindlin modeli, Şekil 14'te gösterildiği gibi, iki parçacığın temasından elde edilen kuvvet ve yer değiştirme arasındaki ilişkiyi lineer olmayan olarak tanıtmıştır. Bu

modelde normal kuvvetler Hertz teorisine dayanırken teğet kuvvetler Mindlin teorisine dayanmaktadır (Mindlin, 1953). Yapılan çalışmalara göre Hertz-Mindlin kontak modeli karmaşıklığı nedeniyle hesaplama sınırlamalarına sahiptir. Ayrıca parçacık sayısı çok büyük olduğunda, Hertz Mindlin modeli hesaplama zaman alıcıdır (Di Renzo ve Di Maio, 2004). Bu nedenle Hertz-Mindlin (no slip) temas modeli, Hertz-Mindlin temas modelinden geliştirilmiştir. Normal yönde Hertz teorisine ve teğet yönde Mindlin'e (kaymasız) dayanmaktadır. Normal ve teğet kuvvetler şu şekilde ifade edilebilir:



Şekil 14. Hertz-Mindlin Kontak modelinde kuvvet ve yer değiştirme arasındaki ilişki

$$F_n = -\frac{4}{3} E_{eq} \sqrt{R_{eq}} . \delta^{3/2} \tag{1.13}$$

$$F_t = 8 G_{eq} \sqrt{R_{eq} . \delta_n} . \delta_t \tag{1.14}$$

Burada E_{eq}, R_{eq} ve G_{eq} sarsıyla eşdeğer Young modülü, eşdeğer yarıçap ve eşdeğer kayma modülü.

$$E_{eq} = \frac{E_1 . E_2}{E_1 + E_2} \tag{1.15}$$

$$R_{eq} = \frac{R_1 . R_2}{R_1 + R_2} \tag{1.16}$$

$$G_{eq} = \frac{G_1.G_2}{G_1 + G_2} \tag{1.17}$$

$$G = \frac{E}{2.(1+\nu)} \tag{1.18}$$

Burada:

E_1, E_2: Young modülleri

R_1, R_2: Parçacık yarıçapları

G_1, G_2: Kayma modülleri

ν : Poisson oranıdır.

1.5.5.1.3. Hertz Mindlin + JKR Kontak Modeli

Johnson, Kendall ve Roberts (1971) tarafından kohezif parçacıkların temasını modellemek için Hertz teorisine dayanan Hertz-Mindlin+JKR modeli önerildi. Hertz-Mindlin + JKR modeli kuvvet ve yer değiştirme arasındaki lineer olmayan ilişki Şekil 15'te görülmektedir. Temas bölgesi içinde parçacıklar temasından oluşan yapışma kuvvetini dikkate alır. Ayrıca, Hertz'in teorisine göre temas alanlarından daha büyük temas alanlarını öngörür ve aşağıdaki kuvvet bağıntısı ile hesaplanabilir:

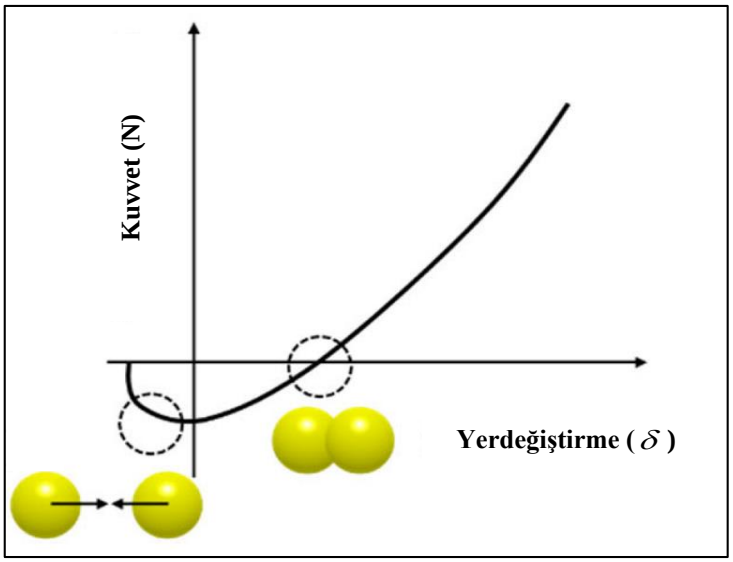
$$F_{JKR} = -4\sqrt{\pi\gamma E^*}a^{3/2} + \frac{4E^*}{3R^*}a^3 \tag{1.19}$$

$$\delta = \frac{a^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma a}{E^*}} \tag{1.20}$$

Burada:

a : Temas alanı

γ : Yüzey enerjisidir.



Şekil 15. Hertz Mindlin+JKR Kontak modelinde kuvvet ve yer değiştirme arasındaki ilişki

1.5.5.2.Elastik Olmayan Kontak Modeli

1.5.5.2.1. Lineer Yay-Dashpot Kontak Modeli

Plastik temas modeli, enerji birikimine odaklanan önceki elastik temas modelinin aksine, parçacıklar arasında plastik deformasyon meydana geldikçe enerji dağılımını modellemek için önerilmiştir (Vu Quoc ve Zhang, 1999). Walton (1984) tarafından sunulan Lineer Yay-Dashpot temas modeli, Cundall ve Strack'in çalışmasına dayanmaktadır. Bağıntı 17 ve 18'de gösterildiği gibi teğet temas kuvveti, Coulomb'un sürtünme yasası tarafından kontrol edilen lineer yay uygulanarak belirlenirken, normal temas kuvveti lineer yay ve dashpot bileşenlerinden oluşur.

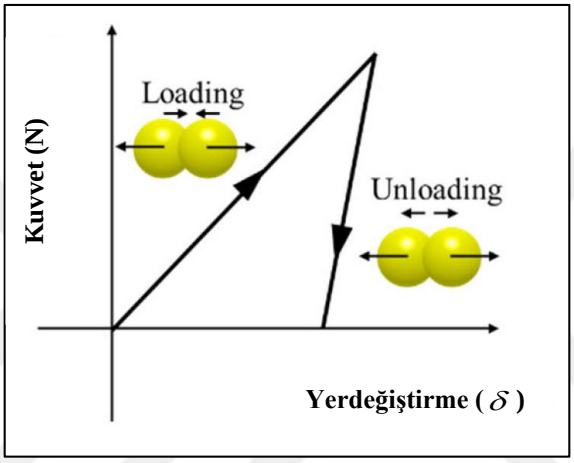
$$F_n = -K_n\delta_n + \eta_n V_n \tag{1.21}$$

$$F_t = \min\{\mu F_N, K_t \int V_t dt + \eta_t V_t\} \tag{1.22}$$

Burada, η_n, V_n Sırasıyla normal sönümleme katsayısı ve normal yönde temas halindeki parçacıkların bağıl hızıdır.

1.5.5.2.2. Histeretik Kontak Modeli

Esnek olmayan modelin temel prensibi, yükleme, boşaltma ve yeniden yükleme işlemleri sırasında farklı bir yay sabiti kullanmasıdır (Peng, 2014). Buna göre Walton ve Brown (1986), plastik deformasyon olarak kabul edilen histeretik model olarak adlandırılan lineer bir kontak modeli geliştirdi. Şekil 16, histeretik model için kuvvet ve yer değiştirme arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 16. Histeretik Kontak modelinde kuvvet ve yer değiştirme arasındaki ilişki

Normal yöndeki temas kuvveti, Bağıntı 1.19 ile hesaplanabilir:

$$F_n = -\begin{cases} K_1\delta & \delta \geq \delta_{\max} \\ K_2(\delta - \delta_{res}) & \delta_{res} < \delta < \delta_{\max} \\ 0 & 0 \leq \delta \leq \delta_{res} \end{cases} \tag{1.19}$$

K_1, K_2 Sırasıyla yükleme ve boşaltma yayının sertliği, δ_{max} temas sırasında maksimum örtüşme, δ_{res} kalan örtüşme. δ_{max} ve δ_{res} Bağıntı 1.20 ve Bağıntı 1.21 ile hesaplanabilir.

$$\delta_{max} = \dot{\delta}_0 \sqrt{\frac{m}{K_1}} \tag{1.20}$$

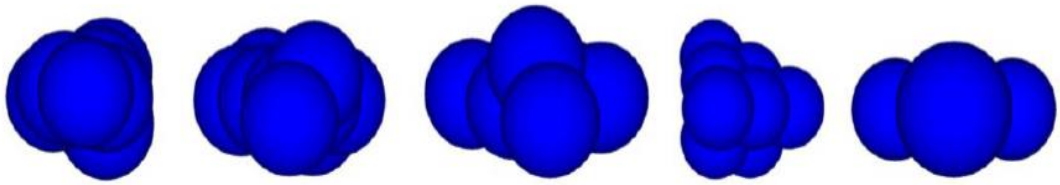
$$\delta_{res} = \dot{\delta}_0 \sqrt{\frac{\dot{m}}{K_1}} \left(1 - \frac{K_1}{K_2} \right) \tag{1.21}$$

1.5.6. Partikül Şekilleri

Ayrık eleman yönteminde bir partikülün gerçek şeklini temsil etmek için kullanılan birçok farklı partikül şekli vardır. Parçacıkların şekli doğrudan hesaplama süresi ile bağlantılıdır. Parçacık şekli ne kadar karmaşık olursa, temasları saptamak için hesaplama süresi o kadar fazla olur, ancak sonuçlar daha gerçekçi olur. Bu nedenle, ayrık eleman yönteminde kullanılan parçacıkların şekli, parçacıkların gerçek şeklini doğru bir şekilde tanımlamak için etkili olmalı ve aynı zamanda hesaplama süresini azaltacak kadar basit olmalıdır.

Üç boyutlu küresel şekli ve iki boyutlu dairesel şekli kullanmanın avantajları, düşük aritmetik zaman gerektirmesidir. Kontak modellerinin çoğu küresel şekiller için tasarlanmıştır. Zhang ve Thornton (2005), kum parçacıklarını tanımlamak için küre şeklini kullanarak direkt kesme testinin ayrık eleman yöntemi simülasyonlarını tanıtmıştır. Küre şeklinin kum tanelerinin gerçek şeklini temsil etmemesine rağmen test sonuçları laboratuvar sonuçlarına yakındı.

Kümeler, rijit cisimler gibi davranan örtüşen topların tek varlıklarıdır (Şekil 17). Kümeler, daha gerçekçi geometrilere sahip partiküller oluşturmak için ayrık eleman yönteminde kullanılır. Hesaplamalarda iç örtüşen kontaklar dikkate alınmaz. Küme parçacık şeklinin etkisini değerlendirmek için karmaşık temas modelleri gerektirmez, çünkü temas her zaman küresel yüzeyler arasında oluşur (Şekil 18). Bununla birlikte, hesaplama süresi, her bir küme birçok küresel elemandan oluştuğu için kümelerin kullanılmasından güçlü bir şekilde etkilenir. Potansiyel temas sayısı, simülasyondaki tüm gruplarda bulunan toplam küresel eleman sayısı ile kontrol edilir. Sonuç olarak, simülasyonda yer alan blokların sayısı nispeten az olmalıdır.



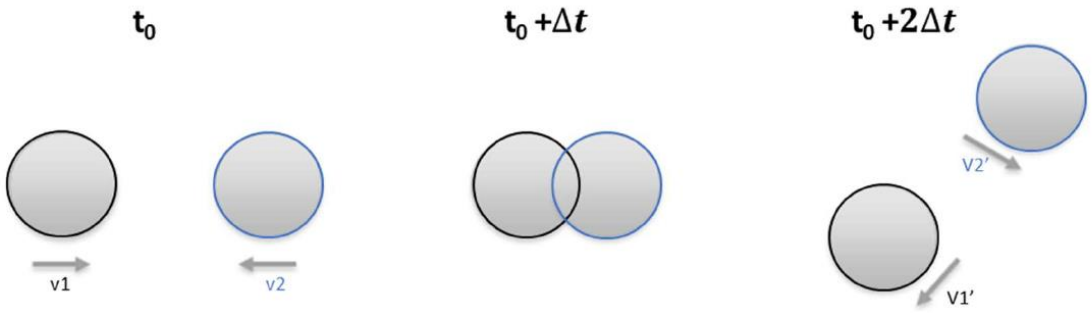
Şekil 17. Üç boyutlu küme şekilleri örneği (Yang vd., 2017)

Başka bir yaklaşım, parçacık şeklini çokyüzlüler (2 boyutta çokgen) olarak modellemektir. Bir polihedron, açıların, kenarların ve yüzlerin sayısı ile tanımlanır ve gerçekçi formu temsil eder, ancak bu metodolojide her bir parçacık için temasların saptanması ve hesaplanması daha karmaşıktır. Bu şekil için az kontak modeli de vardır. BLOKS3D yazılımı, poligonlar ve çokgenler için LMGC90 kullanımına izin verir. Çokyüzlüler, etkili temas algılama algoritmalarının uygulanmasındaki zorluklar nedeniyle ayrık eleman yönteminde sınırlı kullanım görmüştür. Bu çalışmada, ayrık eleman yönetimi kullanarak partiküllerin davranışını modellemek için küresel bir şekil yaklaşımın diğer yaklaşımlara göre daha düşük hesaplama süresi gerektirdiğinden dolayı kullanılmıştır.

1.5.7. Zaman Adımı

Zaman adımı, temasların tespit edildiği ve parçacık konumlarının simülasyon sırasında hesaplandığı ve güncellendiği iki nokta arasındaki ayrık zamandır. Simülasyonun verimliliğini artırmak ve hesaplama süresini azaltmak için zaman adımı mümkün olduğunca büyük olmalı, aynı zamanda hesaplamaların stabilitesini sağlamak için kritik zaman adımından daha küçük olmalıdır.

Büyük zaman adımı, küçük bir zaman adımına kıyasla daha az hesaplama iterasyonuna sahiptir ve düşük hesaplama zamanı gerektirir. Ancak, büyük zaman adımı yanlış sonuçları üretebilir (Tsuji vd.1993). Şekil 18'de gösterildiği gibi, büyük bir zaman adımı kullanırken, parçacıklar belirli bir hızda birbirlerine yaklaşırlar, bir zaman adımından sonra pozisyonları belirgin bir örtüşme ile güncellenir, bu da parçacıkların konumlarının yanlış hesaplanmasına yol açan büyük bir kuvvet teması oluşturur.



Şekil 18. Büyük bir zaman adımının parçacık temas mekanizması üzerindeki etkisi

Lineer bir kontak modeli için, kritik zaman adımı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir (Cundall, 1988).

$$\Delta t_c = 2\pi\sqrt{\frac{m_s}{k_n}} \tag{1.22}$$

m_s: Modeldeki en küçük parçacıkların kütlesi

k_n: Normal kontak rijitliği

Lineer olmayan kontak modelinde, kritik zaman adımı Rayleigh dalgasının frekansına dayanır. Rayleigh zaman adımı, kayma dalgasının katı bir parçacık içinden yayılması için geçen süre olarak tanımlanabilir. Kullanılan zaman adımı, dalga bozukluğunun etkisini önlemek için Rayleigh dalgasının en küçük parçacıktan yayıldığı zamandan daha küçük olmalıdır. Kritik bir zaman adımı şu şekilde ifade edilir (Seville vd., 2016):

$$\Delta t_c = \frac{\pi D}{2(0.1631\upsilon + 0.8766)}\sqrt{\frac{\rho_s}{G}} \tag{1.23}$$

Burada:

D: Parçacık çapı

ρ: Parçacık yoğunluğu

G: Kayma modülü

υ: Poisson oranıdır.

Ayrık bir eleman yöntemi için tipik zaman adımı 1×10^{-4} ile 1×10^{-6} saniye arasında değişir.

1.6.Literatür İncelemesi

Ching vd. (1991), Temelin taşıma gücünü ayrık eleman yöntemine göre analiz etmiştir. Modeldeki toprak kütlesini, esnek Winkler-plastik yaylarla bağlanan bloklar olarak ele aldı. Winkler-yayların rijitliğinin ve mesh deseninin hesaplanan sonuçlar üzerine etkilerini araştırmıştır. Ayrık eleman yöntemi ile elde edilen kırılma yüzeyi üzerindeki gerilmelerin denge koşullarını karşıladığını ve malzeme mukavemetini aşmadığını ve bu yöntem kullanılarak hesaplanan sığ temellerin taşıma gücünün genel taşıma kapasitesi denkleminden elde edilene uygun olduğu bulunmuştur.

Ching vd. (1992), ayrık eleman yöntemine dayalı şev stabilitesini analiz etmiştir. Mevcut modeldeki bir eğimin, elastoplastik Winkler yayları ile bağlanan dilimlerden oluştuğu varsayılmıştır. Mevcut modelin kırılgan toprakta ilerici kırılmaya duyarlı şevlerin stabilite analizi için potansiyel olarak yararlı bir araç olduğunu bulmuştur.

Ardıç (2004), ayrık eleman yöntemini kullanarak şerit temelin taşıma gücünü analiz etmiştir. Hesaplama süresini azaltmak için zemin parçacıklarının büyüklüğünü ve yoğunluğunu arttırmıştır. Nihai taşıma kapasitesi sonuçlarının, analitik sonuçlardan 1.5 ile 2 kat daha yüksek olduğunu belirtmiştir.

Bhandari ve Han (2009), rijit bir temelin altındaki granüler bir toprakta sığ bir temelin laboratuvar testi ve ayrık eleman yöntemi simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Ayrık eleman yöntemi simülasyonunun laboratuvar test sonuçlarını yakından eşleştirdiğini ve ayrık eleman yöntemi simülasyonundaki partikül hareketinin genel kırılma modunu temsil ettiğini bulmuşlardır. Kırılma yüzeyleri rijit temel ile sınırlandırılmıştır ve temel altındaki üçgen kama, Terzaghi ve diğerleri tarafından varsayılandan çok daha küçüktür.

Park vd. (2010), geosentetik ile güçlendirilmiş çok katmanlı bir temel toprak sistemi üzerinde temellerin taşıma gücünü hesaplamak için ayrık eleman yöntemine dayanan bir yöntem sunmuşlardır. Toprak kütlesinin elasto-plastik Winkler-yaylarla bağlanmış bloklardan ve geosentetiklerin çekme yaylarıyla bağlanmış rijit çubuklardan oluştuğunu varsaymıştır. Geliştirilen yöntemin sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen benzer sonuçlar verdiği bulunmuştur.

Lobo-Guerrero ve Vallejo, (2010), temelin taşıma kapasitesi üzerindeki granüler ezmenin etkisini ayrık eleman yöntemi kullanarak incelemiştir. İki ayrı ayrık eleman yöntemi simülasyonu yapılmıştır. Biri partikül kırma, diğeri kırılmaz parçacıklar için. Simülasyon kırılmaz parçacıkların taşıma kapasitesi değerinin, teorik taşıma kapasitesi denkleminin öngördüğünden daha yüksek olduğunu bulmuştur.

Majidi vd. 2011), tarafından ayrık eleman yöntemi kullanılarak dikdörtgen temellerin üç boyutlu taşıma kapasitesi incelenmiştir. Toprak kütlesini winkler yaylarıyla bağlantılı ayrı bloklar olarak modellemiştir. Kırılma yüzeyinin geometrisini etkileyen farklı faktörler, kırılma yüzeyini tanımlamak için altı bağımsız açı kullanılmıştır. Temel altında kırılma yüzeyinin optimum şekli deneme yanılma ile bulunmuştur. Ayrık eleman yöntemi sonuçlarının, Meyerhof ve Hansen gibi daha önceki araştırmacılar tarafından önerilen klasik yarı deneysel sonuçlara daha uygun olduğunu bulmuştur.

Dizadji vd. (2011), anizotropik süreksiz kaya kütlesine oturan şerit temelin taşıma kapasitesini değerlendirmek için farklı bir eleman yönteminin sayısal modellemesini uygulamıştır. Elde edilen sonuçlardan, bir mafsal seti içeren kaya kütlesinin nihai taşıma kapasitesinin, bozulmamış kayanın %27 ile %86 arasında değiştiği bulunmuştur.

Li ve Cheng (2016), sığ temel taşıma kapasitesi problemini incelemek için elastisite analizini ve ayrık eleman analizini kullanmıştır. Elastisite analizi için, ayrık eleman yöntemi ile analiz edilen zemin parçacıklarının genel davranışının, teorik elastisite yöntemiyle türetilenlerle uyumlu olduğu bulunmuştur.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1.Giriş

Binalar, barajlar, köprüler vb. gibi tüm inşaat mühendisliği yapıları zemin üzerine inşa edilmektedir. Yapının yükünü, zeminin geniş bir alanına aktarmak için temel olarak isimlendirilen yapı elemanları gereklidir. Temel, altındaki zeminde kırılma olmayacak ve yapı aşırı oturma yapmayacak şekilde tasarlanmalıdır. Temellerin klasik tasarım yöntemleri, taşıma gücü ilkesine dayanmaktadır. Taşıma gücü, zemine mühendislik yapısının uyguladığı yükü zeminin göçmeden veya aşırı oturma yapmadan güvenli bir şekilde taşıma yeteneğidir. Zeminin taşıma gücünü modellemek ve hesaplamak için sayısal çözüm teknikleri kullanırken, genellikle sonlu elemanlar yöntemi kullanılır. Bu yaklaşımda tamamen bağımsız üç varsayım vardır; süreklilik, homojenlik ve izotropi. Zemin, taneler ve çevresindeki boşluklardan oluşur. Bu nedenle, zeminin mekanik davranışı doğası gereği süreksiz, heterojen ve anizotropiktir. Ayrık eleman yöntemi, zeminin mekanik davranışını hesaba katan yöntemlerden biridir. Bu çalışmada, farklı rölatif sıkılıklardaki (% 40, % 50, % 60, % 70) kumlu zemin üzerinde, farklı temel genişlikleriyle, ayrık eleman yöntemine dayalı EDEM programı kullanılarak taşıma gücü modellemesi yapılmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlar, teorilerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

2.2.Temelin Taşıma Gücünün Ayrık Eleman Modellemesi

2.2.1. Zemin Modellenmesi

2.2.1.1.Zemin Özellikleri

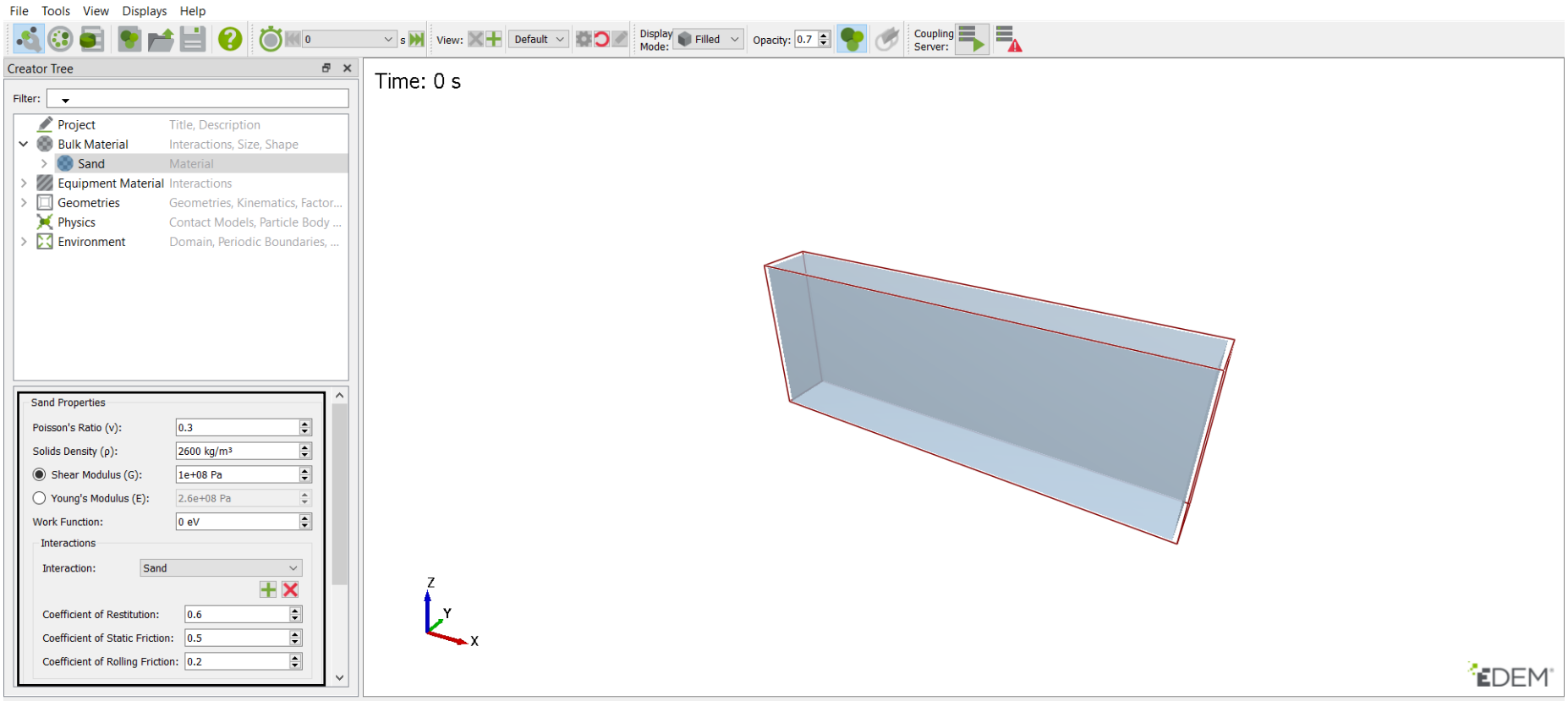
Simülasyondaki ilk adım, deneyde kullanılacak malzemelerin özelliklerinin tanımlanmasıdır. Doğru sonuçların alınabilmesi için malzemelerin özelliklerinin doğru belirlenmesi gereklidir. Simülasyonda kullanılan iki tür malzemenin özellikleri belirlendi: dökme malzeme ve ekipman. Taşıma gücü deneyinin modellemesinde kullanılan ekipman temel ve deney tankıyken, dökme malzeme ise kumdur. Partiküllerin arasında oluşan temas kuvvetlerini hesaplayabilmek için kullanılan kontak modelleri temel olarak malzeme

özelliklerine dayanmaktadır. EDEM yazılımında kum partiküllerin arasındaki temas kuvvetlerinin modellemesinde kullanılan farklı kontak modelleri bulunmaktadır. Bu çalışmada histeretik kontak modeli kullanılmıştır.

Kumun malzeme özelliklerinin çoğu doğrudan simülasyonda kullanılabilir, ancak ayrık eleman yöntemindeki temas mekanizması gerçek senaryonun basitleştirilmiş şekli olduğu için bazı modifikasyonlar gerektirdiğinden bazıları doğrudan kullanılamaz. Literatürde deneysel bir çalışma modellenerek statik ve yuvarlanma sürtünme katsayısı gibi bazı özellikler belirlenmiştir. Parçacık ölçeğinin malzeme özellikleri, statik sürtünme katsayısı ve yuvarlanma sürtünme katsayısı sürtünme açısını etkiler. Tütüncü (2019) tarafından kullanılan %50 rölatif sıkılığa sahip kum üzerinde kesme kutusu deneyinin modellenmesi, statik ve yuvarlanma sürtünme katsayısının değerini bulabilmak için yapılmıştır. Gerçek sürtünme açısı değeri elde edilene kadar statik ve yuvarlanma sürtünme katsayısının değeri değiştirilerek birkaç modelleme yapılmıştır. Tablo 11, EDEM programında gerekli olan kum malzemesi özelliklerini ve bu çalışmada her bir parametre için kullanılan değerleri özetlemektedir. Kumun kullanılan malzeme özellikleri Şekil 19’da gösterildiği gibi EDEM'de atanmıştır.

Tablo 11. Kum Malzemesinin Özellikleri

Özellik	**Tanım**	**Değer**	**Kaynak**
Partiküllerinin Yoğunluğu (Kg/m^3)	Toplam katı kütlenin hacmine oranıdır.	2600	Das (1997)
Kayma Modülü (MPa)	Elastik bölgede oluşan gerilmeye uygulanan gerilmenin oranıdır.	4.3×10^4	Asaf et al. (2007)
Poisson Oranı	Poisson oranı, enine büzülme geriniminin, gerilme kuvveti yönündeki uzunlamasına uzama gerinimine oranıdır.	0.3	Asaf et al. (2007)
Kayma Gerilmesi (MPa)	Malzemenin enine kesitine paralel kuvvet uygulanmasından kaynaklanan ve malzemenin kesiti ile aynı düzlemdeki gerilmedir.		Waltron
Geri Getirme Katsayısı	Çarpışmadan sonra iki parçacığın bağıl hızının çarpışmadan önceki iki parçacığın bağıl hızına oranıdır.	0.6	Das (1997)
Statik Sürtünme Katsayısı	Statik sürtünme kuvvetinin uygulanan normal kuvvete oranıdır.	0.38	kalibre edilmiştir
Yuvarlanma Sürtünme Katsayısı	Yuvarlanma hareketine direnen kuvvetin, yuvarlanma hareketine neden olan uygulanan kuvvete oranıdır.	0.2	kalibre edilmiştir

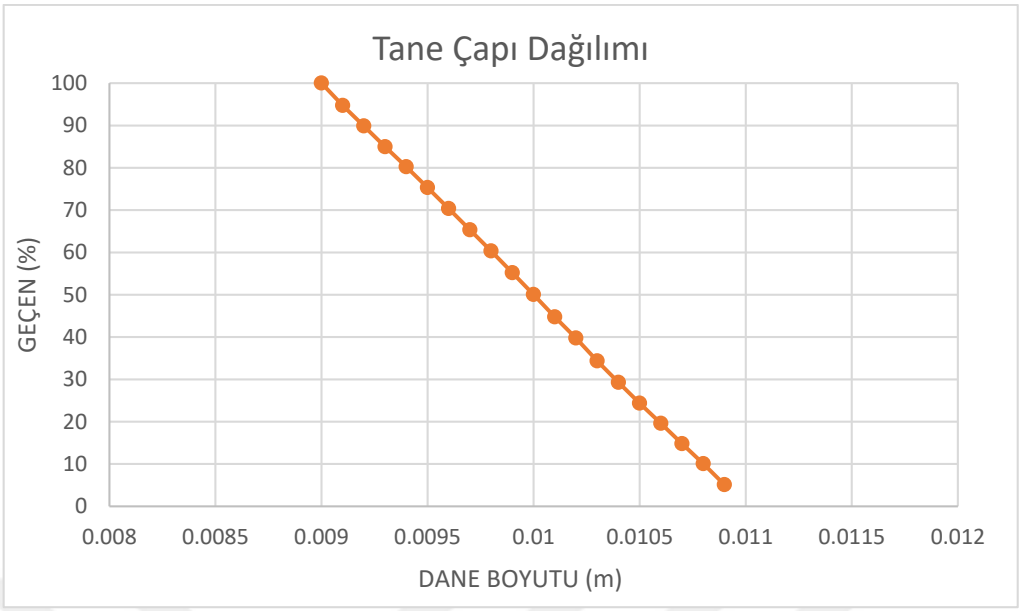


Şekil 19. EDEM'de atanan kum malzemesi özelliklerinin parametrelerinin ayarlanması

2.2.1.2. Partikül Şekli ve Boyut Dağılımı

Ayrık eleman yöntemini kullanarak granül malzemenin modellenmesinde farklı şekiller ve yaklaşımlar kullanılabilir. Literatürde, granüler malzeme partikülleri çokyüzlüler, küreler veya çoklu küre temel alınarak modellenmiştir. Parçacık açısı da dahil olmak üzere kum şekli polihedron ile temsil edilebilir. Bununla birlikte, temas algılama ve hesaplamalar bir çokyüzlü için karmaşıktır, ayrıca çokyüzlü için birkaç kontakt modeli mevcuttur. Polihedron'un doğru matematiksel temsilini içeren üç tür temas vardır; yüz yüze, yüz kenara ve kenar kenara. Bir polyhedron kullanılarak kum parçacıklarının şeklini modellemek, kumun gerçek şeklini temsil etmesine rağmen, büyük hesaplama süresine mal olur. Küreler çoğunlukla ayrık eleman yöntemi kullanılarak kumun modellenmesinde kullanılmaktadır. Çünkü kontakt modellerinin çoğu küresel şekillere dayanmaktadır. Küre şeklini kullanarak kum davranışını modellemek, çokyüzlülere kıyasla daha düşük hesaplama süresi gerektirir. Ancak küreler, kumun köşeli şeklini yansıtmaz. Kum modellemesinde çoklu küre ve yuvarlanma direnci yaklaşımları da kullanılmaktadır. Çok küreli bir yaklaşımda, kullanılan kürelerin sayısı hesaplama süresini etkiler. Gerçek kum şeklini temsil etmek, parçacık şeklini simüle eden karmaşık bir ayrık eleman yöntemi gerektirir. Gerçek kumun şeklini temsil etmek, küreler veya bir çokyüzlü kullanarak parçacıkların şeklini simüle etmek karmaşık bir ayrık eleman yöntemi gerektirir. Bir parçacık şeklinin karmaşıklığı, kum parçacığının gerçek şeklini temsil etmesine rağmen çok büyük bir zaman gerektirir. Bu çalışmada kum partikülleri modellemek için küre şekli kullanılmıştır. Bu yaklaşımın temel avantajı, yukarıda tartışıldığı gibi çoklu küre ve çokyüzlü yaklaşımlarla karşılaştırıldığında düşük hesaplama süresidir.

Dünya üzerindeki kumlar için çeşitli partikül boyutu dağılımları vardır. Tane boyutu dağılım eğrisi ile ayrık eleman yöntemi simülasyonu, tipik bir simülasyon için yaklaşık milyarlarca parçacığın kullanılmasını gerektirecektir. Tipik bir bilgisayarla bir saniyelik bir simülasyon çalıştırmanın yıllarca CPU zamanı alacağını gösterir. Hesaplama maliyetini yönetilebilir tutmak için, ayrık eleman yöntemi araştırma topluluğunda parçacık boyutlarının doğrusal ölçeklendirilmesi uygun bir şekilde kullanılır. Şekil 20'de bu çalışmada kullanılan ve varsayılan tanelerin ölçeklendirilmiş parçacık boyutu dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 20. Kullanılan ve varsayılan tanelerin ölçeklendirilmiş parçacık boyutu dağılımı

2.2.1.3.Maksimum Boşluk Oranının Belirlenmesinin Modellenmesi

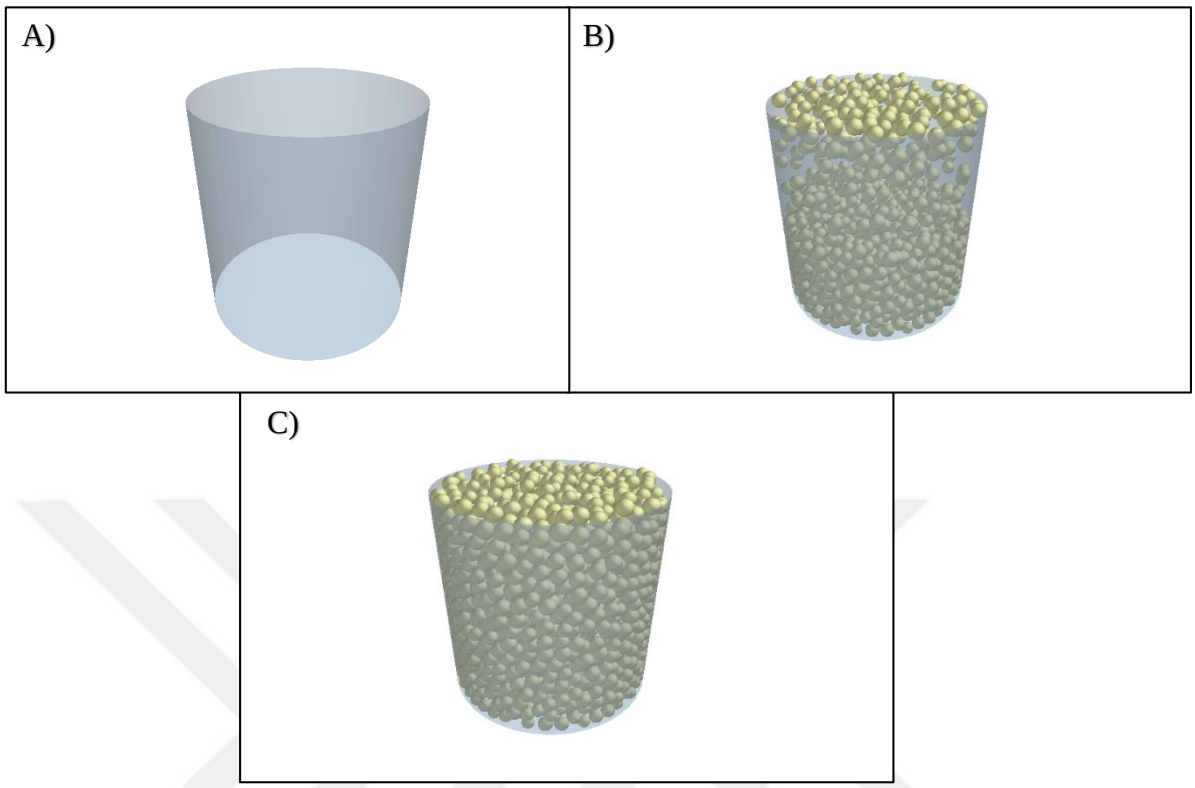
Boşluk oranı, zemindeki boşlukların hacminin katıların hacmine oranı olarak tanımlanır. Modellenen kumun maksimum boşluk oranını bulmak için, çapı = 152.4 mm ve yüksekliği = 160 mm olan bir silindir oluşturulmuştur. Bundan sonra, silindir dolana kadar yerçekimi etkisi altında üstten kum dökülmüştür. Kumun boşluk oranı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmış olup deney sonuçları Tablo 12'de gösterilmiştir. Şekil 21'de simülasyon sırasında izlenen adımlar sunulmuştur.

$$e_{\max} = \frac{V_v}{V_s} \tag{2.1}$$

Burada:
V_v: Boşluk hacmi
V_s: Katı hacmi

Tablo 12. Maksimum boşluk oranı deney modelleme sonuçları

Parametre	**Değer**
Maksimum boşluk oranı (%)	80.18
Minimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3)	14.15



Şekil 21. Maksimum boşluk oranı deneyinin simülasyonu sırasındaki adımları

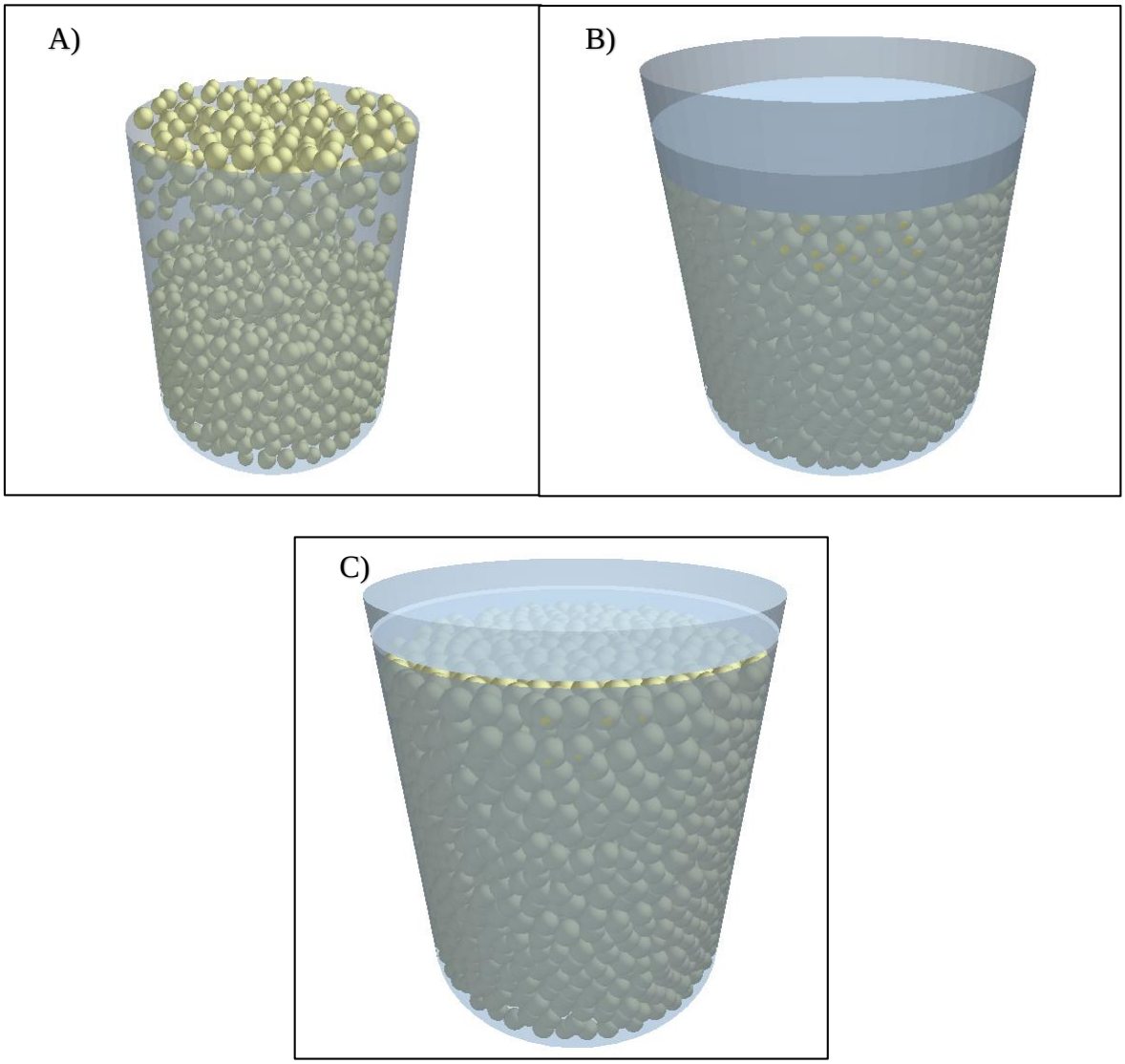
2.2.1.4.Minimum Boşluk Oranının Belirlenmesinin Modellenmesi

Maksimum boşluk oranı belirlenme deneyinde kullanılan ekipmanın aynısı minimum boşluk oranı belirlenme deneyinde kullanılmıştır. Çapı = 152.4 mm ve yüksekliği = 160 mm olan bir silindir oluşturulmuştur. Bundan sonra, silindir dolana kadar yerçekimi etkisi altında üstten kum partikülleri dökülmüştür. Kumu sıkıştırmak için kum partiküllerinin üzerine plaka oluşturulmuştur. Plaka, kum akma mukavemetine ulaşana kadar parçacıkları sıkıştırmak için yavaş bir hızda aşağı doğru hareket ettirilmiştir. Plaka, depolanan elastik enerjinin yavaşça dağılması için yukarı hareket ettirilmiştir. Plaka, plaka ile parçacıklar arasındaki toplam temas kuvveti sıfıra eşit olana kadar yukarı hareket ettirilmiştir. Ardından tekrar kum silindire dolana kadar dökülüp tekrar sıkıştırılmıştır. Kum parçacıkları arasındaki örtüşme değeri, küçük olması nedeniyle ihmal edilmiştir. Bağıntı 2.2 kullanılarak maksimum boşluk oranı hesaplanmış olup deney sonuçları Tablo 13'te gösterilmiştir.

$$e_{\min} = \frac{V_v}{V_s} \tag{2.2}$$

Tablo 13. Minimum boşluk oranı deney modelleme sonuçları

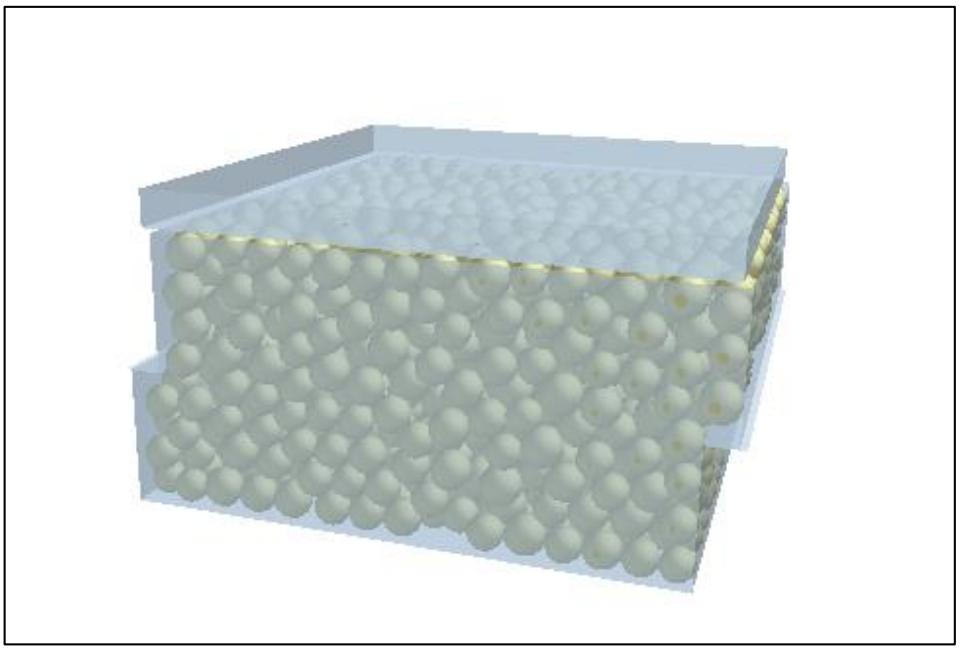
Parametre	**Değer**
Minimum boşluk oranı (%)	10.52
Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3)	23.07



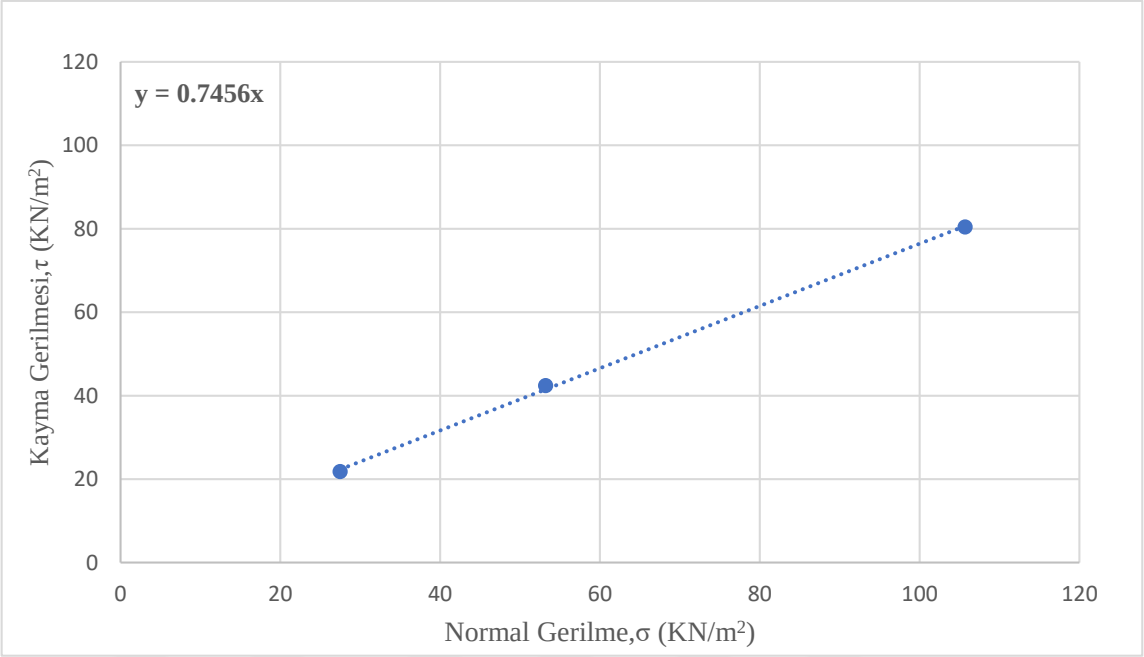
Şekil 22. Minimum boşluk oranı deneyinin simülasyonu sırasındaki adımlar

2.2.1.5.Kesme Kutusu Deneyinin Modellenmesi

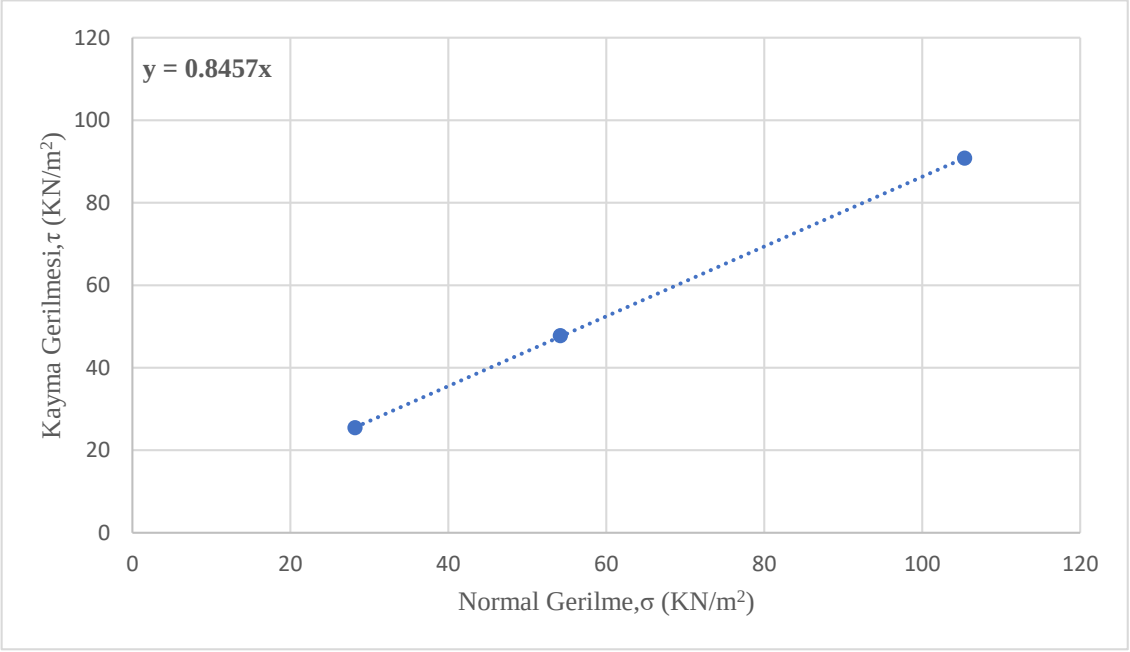
Deney sisteminde modellenmiş olan kum zemin partikülleri, dört farklı rölatif sıkılık değerlerine (%40, %50, %60, %70) karşılık gelen içsel sürtünme açılarının belirlenmesi amacıyla kesme kutusu deneyine tabi tutulmuştur. Kesme kutusu, 150 mm x 150 mm ebatlarında ve 75 mm yüksekliğinde ikiye bölünerek oluşturulmuştur. Kum, kesme kutusunda yerçekiminin etkisi altında doldurulup, ardından farklı rölatif sıkılıklar elde etmek için sıkıştırılmıştır. Kesme kutusunun üst kısmında plaka oluşturulup kesme sırasında normal gerilmeler uygulamak için kullanılmıştır. Hesaplama süresini en aza indirmek için, kesme kutusunun üst kısmı sabitlenirken kesme kutusunun alt kısmı, 0.001 mm/sn 'lik bir hızda yatay yönde deplasmana tabi tutulmuştur. Kayma bandına etki eden normal kuvvet, üst kutunun ağırlığı, üst kutudaki partiküllerin ağırlığı ve üstte oluşan plakaya uygulanan yükün toplamı olarak hesaplanabilir. Kayma bandına etki eden kesme kuvveti ise iç partiküllerin üst kutunun sol ve sağ yan duvarına etkiyen normal kuvvet ile üst kutuya etki eden kesme kuvvetinin toplamı olarak hesaplanabilir (Yan vd., 2010). İç sürtünme açısı, rölatif sıkılıktaki (%40, %50, %60, %70) kum zeminler için sırasıyla, $\phi = 36.71^{\circ}$, $\varphi = 40.22^{\circ}$, $\varphi = 44.50^{\circ}$ ve $\varphi = 46.30^{\circ}$ elde edilmiştir.



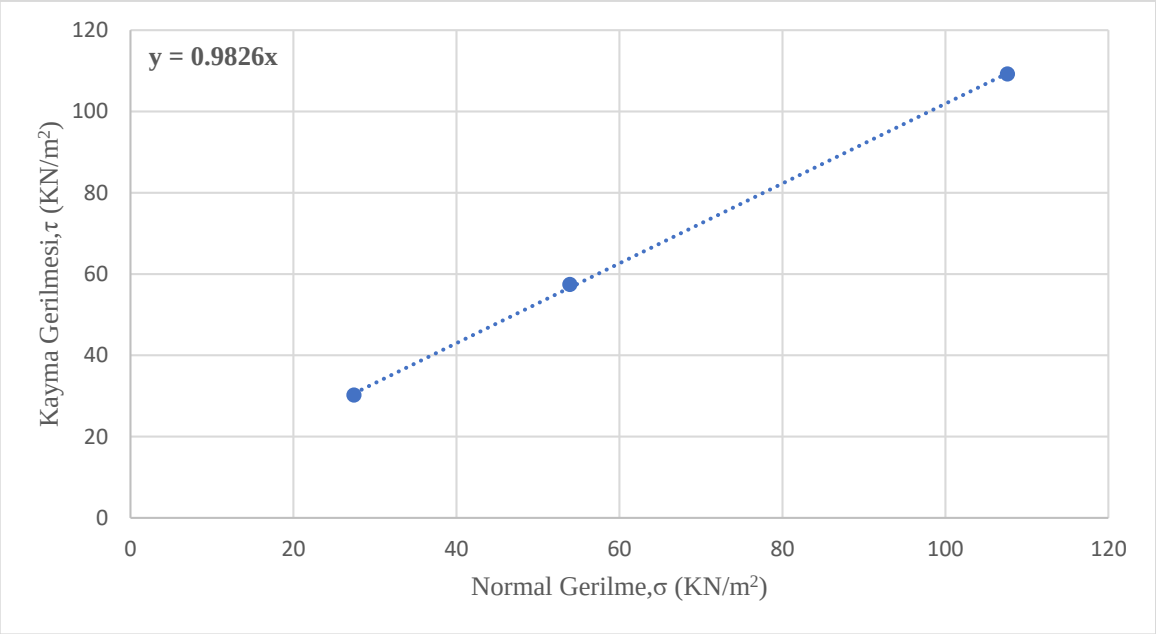
Şekil 23. Kesme kutusu deneyinin modeli



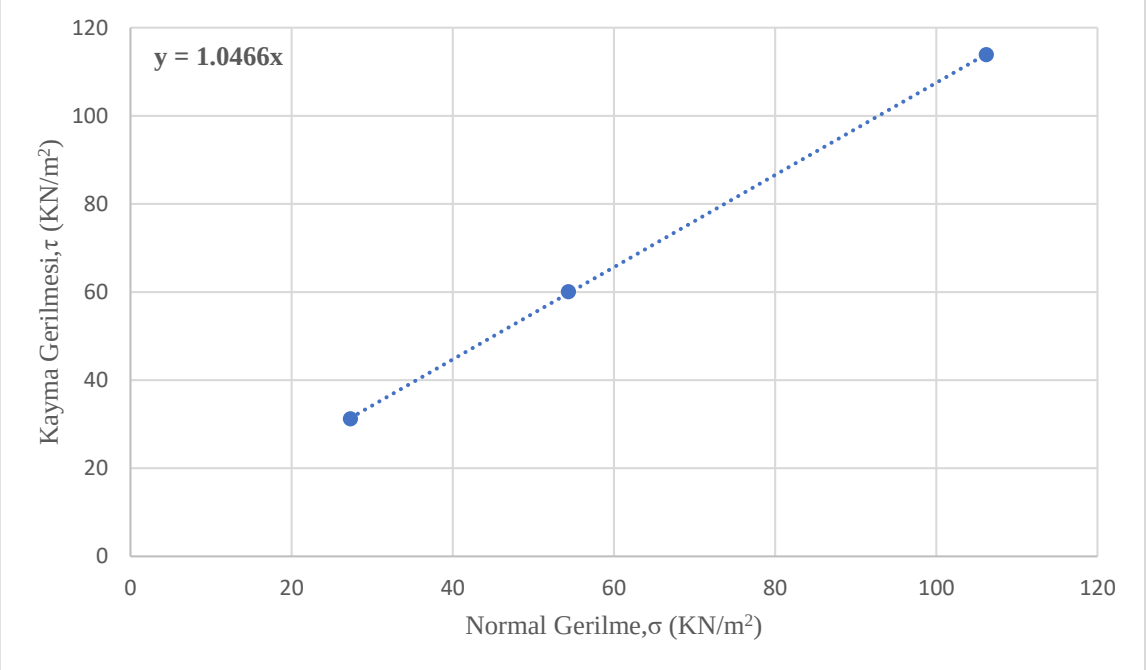
Şekil 24. Dr= %40 rölatif sıkılıkta kesme kutusu deneyi sonucu



Şekil 25. Dr= %50 rölatif sıkılıkta kesme kutusu deneyi sonucu



Şekil 26. Dr= %60 rölatif sıkılıkta kesme kutusu deneyi sonucu



Şekil 27. Dr= %70 rölatif sıkılıkta kesme kutusu deneyi sonucu

2.2.2. Deney Ekipman Modellemesi

2.2.2.1.Ekipman Özellikleri

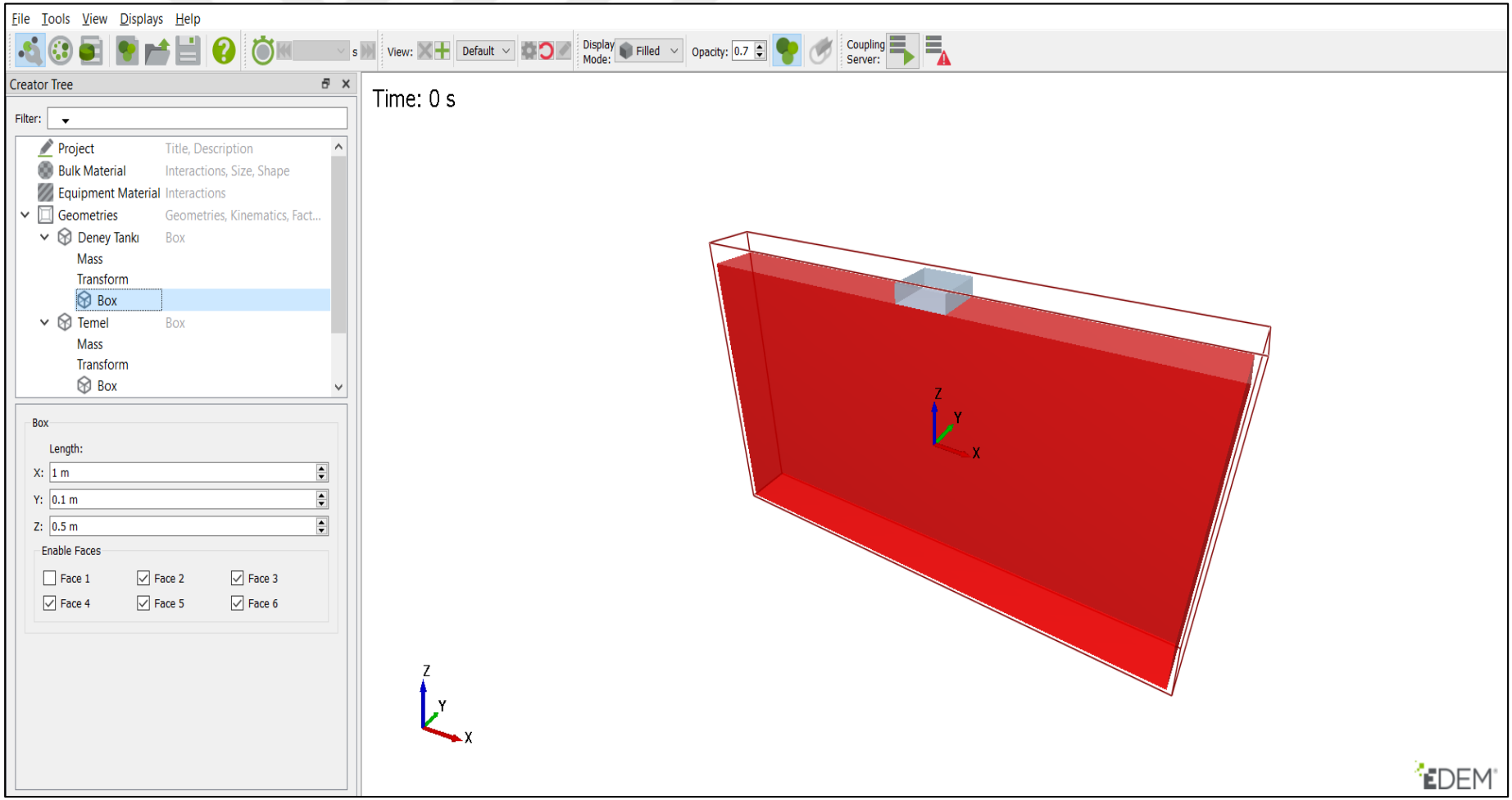
Dökme malzeme, partikül şekli ve partikül boyut dağılımı gibi özellikler belirlendikten sonra ekipman malzemesi olarak EDEM programında ikinci tip bir malzeme belirlenmiştir. Geometriler için ekipman malzemesi tanımlanır. Deney sisteminde iki tür ekipman kullanılmıştır: Deney tankı için çelik ve temel için beton seçilmiştir. Her iki malzemenin malzeme özellikleri için kullanılan değerler, literatürde bilinenlerin tipik değerleridir. Ayrık eleman yönteminde ekipmanlar ve kum arasındaki etkileşim özellikleri konusunda literatürde yeterli veri olmadığı için EDEM'den bazı varsayılan değerler kullanılmıştır. Tablo 14'te, simülasyonda kullanılan ekipman malzemelerinin özelliklerini özetlemiştir.

Tablo 14. Simülasyonda kullanılan ekipman malzeme özellikleri

Özellik	**Çelik**	**Kaynak**	**Beton**	**Kaynak**
Katı yoğunluk (Kg/m^3)	7750	Engineersedge 2020	2400	Yaygın
Kayma modülü (MPa)	$20*10^4$	Engineersedge 2020	$12*10^4$	Yaygın
Poisson oranı	0.29	Engineersedge 2020	0.25	Yaygın
Ekipman malzemeleri ve kum arasındaki etkileşim özellikleri				
Geri getirme katsayısı	0.6	Das (1997)	0.5	EDEM'de varsayılan değer
Statik sürtünme katsayısı	0.01	Seçilmiştir	0.5	EDEM'de varsayılan değer
Yuvarlanma sürtünme katsayısı	0.01	Seçilmiştir	0.01	EDEM'de varsayılan değer

2.2.2.2.Ekipman Geometrik Modelleme

Deney tankı ve temel için ekipman özelliklerini belirledikten sonra, ekipmanın boyutlarının belirlenmesi gerekir. EDEM üç tür geometrik şekil sağlar: Bir kutu, bir silindir ve bir çokgen. Bu deneyde kutu şekli kullanılmıştır. 10 cm uzunluğunda, 10 cm genişliğinde ve 3 cm kalınlığında model temel oluşturulmuştur. Deney tankı, Şekil 28'de gösterildiği gibi 100 cm uzunluğunda, 50 cm yüksekliğinde ve 10 cm genişliğinde üstten açık bir kutu olarak (temelin düşey olarak hareket etmesini sağlamak için) oluşturulmuştur. Geometri fiziksel veya sanal olarak tanımlanabilir. Deney tankı ve temel fiziksel geometri olarak tanımlanmıştır. Sanal geometrinin ana kullanımı parçacık oluşumudur. Ayrıca varsayımsal geometri, fiziksel mühendislik ile etkileşime girmez.



Şekil 28. EDEM programında kullanılan geometrik düzeneği

2.2.3. Simülasyon Ayarları

EDEM simülasyonu başlamadan önce, integrasyon yöntemi, zaman adımı, simülasyon zamanı, veri kaydetme alanı, ızgara hücre boyutu ve simülasyon motoru gibi simülasyon kurulumuyla ilgili çeşitli parametrelerin tanımlanması gerekir. Bu çalışmada her parametre ve kullanılan değer aşağıda tartışılmaktadır (Şekil 29).

2.2.3.1.Entegrasyon Yöntemi

Bölüm 1.5.3'te tartışıldığı gibi ayrık eleman yönteminde kullanılan farklı sayısal integrasyon şemaları vardır. Zaman sayısal entegrasyonu, Newton'un ikinci yasasına göre parçacık hızını ve konumunu sayısal olarak hesaplamak için kullanır. EDEM'de iki tür integrasyon şeması vardır; Euler ve Verlet. Edem'deki varsayılan şema Euler entegrasyon şemasıdır. Verlet şeması, Euler şemasına kıyasla EDEM'de ek hesaplama süresinin %10'una mal olmuştur. Bu çalışmada, basitliği ve düşük hesaplama süresi gereksinimi nedeniyle Euler entegrasyon şeması kullanılmıştır.

2.2.3.2.Zaman Adımı

Simülasyon başlamadan önce ayrık eleman yönteminin simülasyonunda uygun zaman adımını seçmek gerekir. Parçacık hareketi, komşu parçacıklarla doğrudan temas ve uzak parçacıklardan kaynaklanan dalga türbülansından etkilenir. Bu dalgaya yüzey dalgası denir ve bir Rayleigh dalgası olarak tanımlanır. Zaman adımı, her partikülden gelen dalga pertürbasyon etkisinin diğer, bitişik olmayan partiküllere yayılmasını önlemek için yeterince küçük olmalıdır.

Rayleigh dalga zamanı, Rayleigh dalga hızından hesaplanabilir. Rayleigh dalga zamanının bir kısmı Rayleigh dalgasının diğer komşu parçacıklara yayılmamasını sağlamak ve daha kararlı ve doğru sonuçlar elde etmek için bir zaman adımı olarak alınır. Rayleigh dalgası parçacık yarıçapına, yoğunluğa, kayma modülüne ve Poisson oranına bağlıdır. Rayleigh dalga süresinin %10 ile %20'si uygun bir zaman adımı olarak kabul edilebilir. Bu çalışmada 0,2 (%20) varsayılan kesir faktörü kullanılmıştır. Kullanılan zaman adımı 1.55772 x 10^{-5} saniyedir.

2.2.3.3.Simülasyon Süresi ve Veri Tasarrufu

Ayrık eleman yönteminde simülasyon süresi, simülasyonun çalıştığı toplam süre olarak tanımlanır. Ayrık eleman yöntemine dayalı tüm programlarda simülasyon süresi kullanıcı tarafından belirlenir. Bu çalışmada, her bir zemin taşıma gücü deneyinin simülasyondaki toplam süresi 10 saniyedir. Simülasyonun zaman adımı ve simülasyon süresi belirlendikten sonra, EDEM programında gerekli iterasyonlar otomatik olarak hesaplanır. İterasyon sayısı, simülasyon süresinin zaman adımına oranı olarak bilinir.

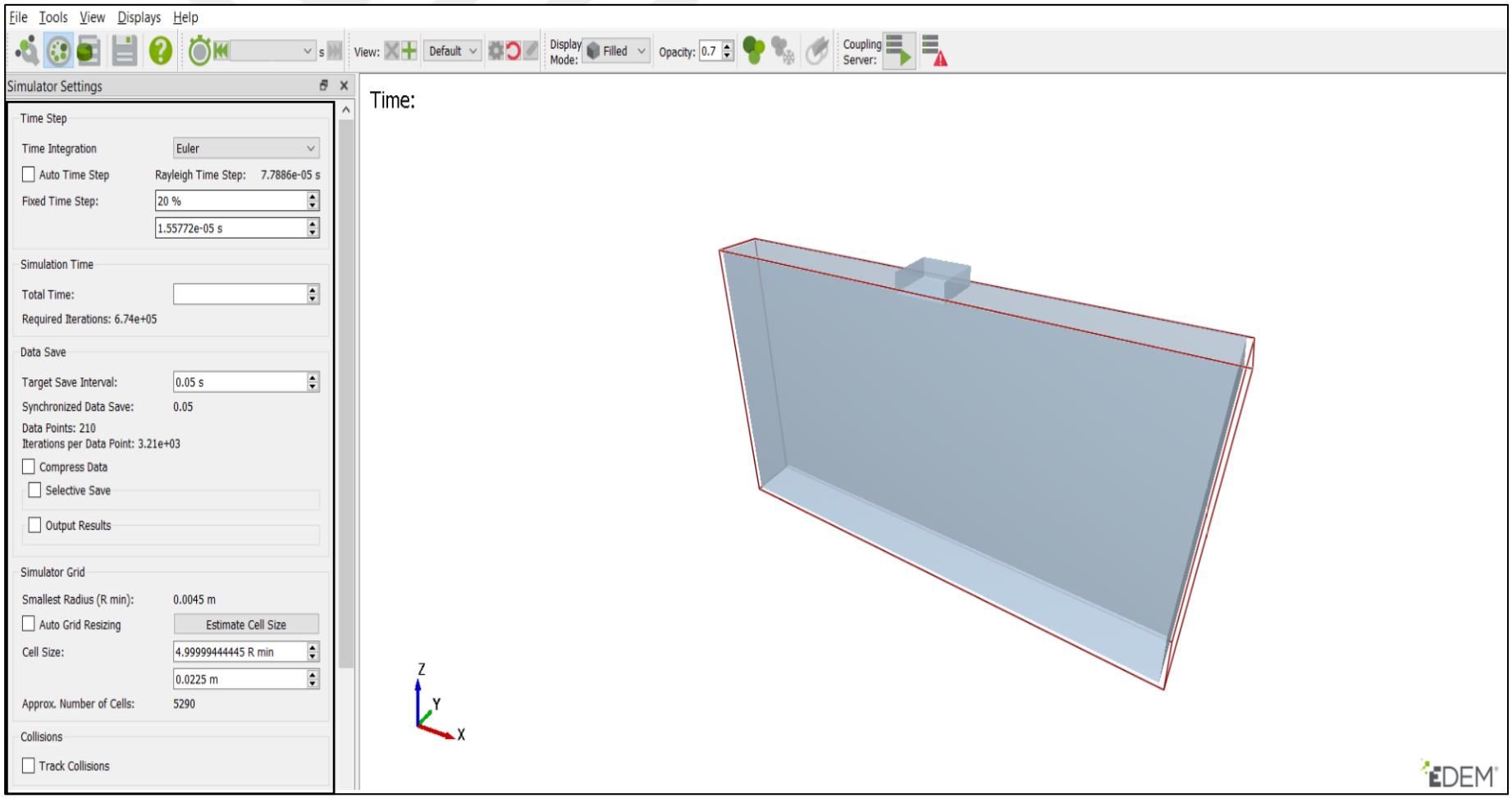
EDEM programı, veri kaydetme olan başka bir özellik daha sağlar. Veri tasarrufu, simüle edilen verilerin kaydedildiği süredir. Kaydedilen veri süresi ne kadar büyükse, daha az hesaplama süresi gerekir. Veri kaydetme noktalarının sayısı ve iterasyon sayısı, simülasyon süresi, zaman adımı ve veri kayıt süresine bağlı olarak her veri noktası için otomatik olarak hesaplanır. Bu çalışmada EDEM yazılımında varsayılan değer olan verilerin kaydedilmesi için 0.05 sn kullanılmıştır.

2.2.3.4.Simülasyon Grid Hücre Boyutu ve Simülatör Motoru

Bölüm 1.5.5'te tartışıldığı gibi, parçacıklar arasındaki temas farklı yaklaşımlarla tespit edilebilir. Parçacık teması bir ızgara veya ağaç yaklaşımı kullanılarak tespit edilebilir. EDEM programı dahil, ayrık eleman yöntemi programlarının çoğu ızgara tabanlı algoritmayı kullanır. Bu yaklaşımda, simüle edilen alan grid hücrelerine bölünür ve her bir hücredeki potansiyel partikül temasları araştırılır ve ardından temas detayları belirlenir.

Izgara hücre boyutu, hesaplama süresini etkilemeyecek şekilde belirlenir. Izgara hücresi boyutu küçükse, büyük miktarda hesaplama süresi gerektirir. Genel olarak, ızgara boyutu parçacık yarıçapının 3-5 katı optimaldir. Bu çalışmada ızgara hücre boyutu, Rmin'in 5 katı olarak seçilmiştir.

EDEM'de simülatör, Merkezi İşlem Birimi (CPU) veya Grafik İşlem Birimi (GPU) olarak iki modda çalışabilir. Bu çalışmada kullanılan bilgisayar, 12 çekirdekten ve bir "NVIDIA GeForce GTX 1060" GPU'dan oluşan bir i7 İntel CPU'ya sahiptir. Bu çalışmada simulasyon hesaplama süresini azaltmak için ve en iyi senaryoyu elde etmek için her iki mod da kullanılmıştır.



Şekil 29. Simülasyon ayarları

2.3.Bir Deneyin Modellenmesi

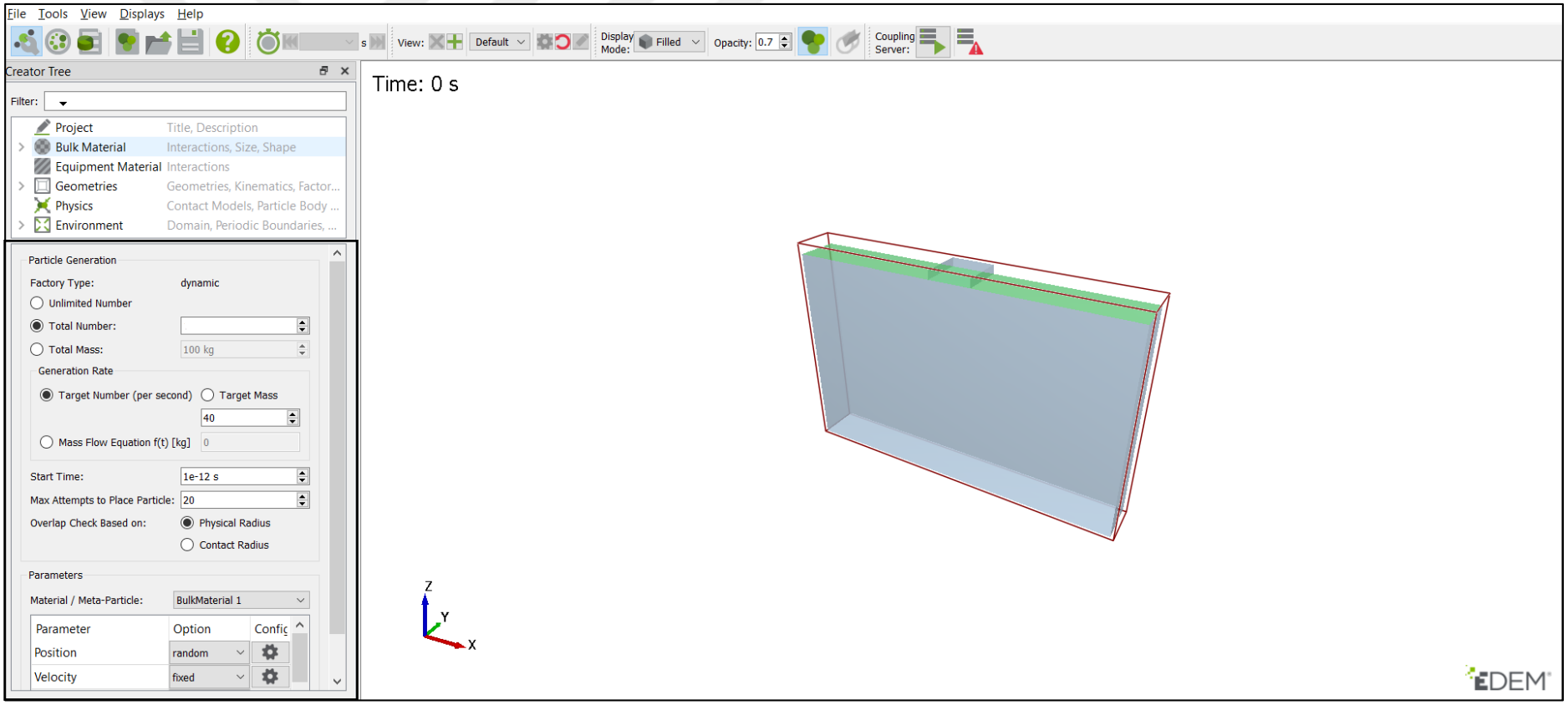
Bir deneyin yapılışı, deneye hazırlık ve yükleme olmak üzere iki aşamaya bölünmüştür. Tüm simülasyonda her aşamadaki tüm adımlar tekrar edilmiş ve deneyde yapılan çalışmalar bu iki aşama için adım adım anlatılmıştır.

Deneyin modellenmesi hazırlık aşamasında, kum parçacıkları, EDEM programında statik veya dinamik geometrik fabrikalar kullanılarak oluşturur. Statik fabrika simülasyonun duraklatılması sırasında parçacıklar oluşturur. Parçacıklar önce üretilir, ardından simülasyon çalıştırılır. Dinamik simülasyon sırasında simülasyonu duraklatmadan parçacıklar oluşturur. Bu simülasyonda, kum parçacıkları deney tankına dökülürken gerçeğe daha yakın olduğundan parçacıklar oluşturmak için dinamik fabrikası kullanılmıştır. D_r =0.4 elde etmek için 85.31 kg, D_r =0.5 elde etmek için 89.4 kg, D_r =0.6 elde etmek için 93.90 kg ve Dr =0.7 elde etmek için 98.88 kg olan gerekli kum kütlesi girilmiştir.

EDEM'deki varsayılan üretim oranı 5000 kg/sn'dir. Üretim oranının değeri, iz sayısına göre tanımlanır. Yüksek bir üretim hızı kullanıldığında, fabrikanın bu hızda partikül oluşturacak kadar büyük olmadığına dair bir uyarı mesajı görünür. Küçük bir üretim oranı kullanıldığında partikül oluşumu uzun zaman alır. Bu oran, simülasyon başladıktan sonra her zaman adımı için bir kütleye dönüştürülür. Bu çalışmada 40 kg/s'lik bir üretim hızı kullanılmıştır. Simülasyonda kullanılan fabrika ayarları Şekil 30'da gösterilmektedir.

Parçacıklar, simülasyon süresinin 3. saniyesinden sonra, D_r= %40 için toplam 62086 parçacık, D_r= %50 için 65487 parçacık, D_r= %60 için 69386 parçacık ve D_r= %70 için 73751 parçacıkla birlikte oluşturulur ve dengeye ulaşır. Daha sonra kum tanelerini sıkıştırmak için 100cm× 10cm×3cm boyutlarında bir plaka oluşturulmuştur. Plaka yaklaşık 0,002 m/s'de düşey yönde harekete tabi tutulmuş olup ardından aynı hızda yukarı hareket edilmiştir. Farklı rölatif sıkılıklardaki kum kütlesini sıkıştırmak ve tamamen deney tankına yerleştirmek için deneme yanılma yöntemi kullanılmıştır.

Zemini modelledikten ve sıkıştırıldıktan sonra, her rölatif sıkılık için 10 cm genişliğinde bir temel oluşturulmuştur. Temel, modellenen zeminin üzerine yerleştirilmiş olup ardından temel 0.001 m/s hızla 5 saniye boyunca düşey yönde harekete tabi tutulmuştur. Temel altında oluşan kuvvet hesaplanmıştır. Ortalama basınç, toplam temas kuvvetlerinin temel alanına bölünmesiyle elde edilmiştir.



Şekil 30. EDEM programında kum partikülünün oluşumu için gerekli fabrika parametreleri

3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

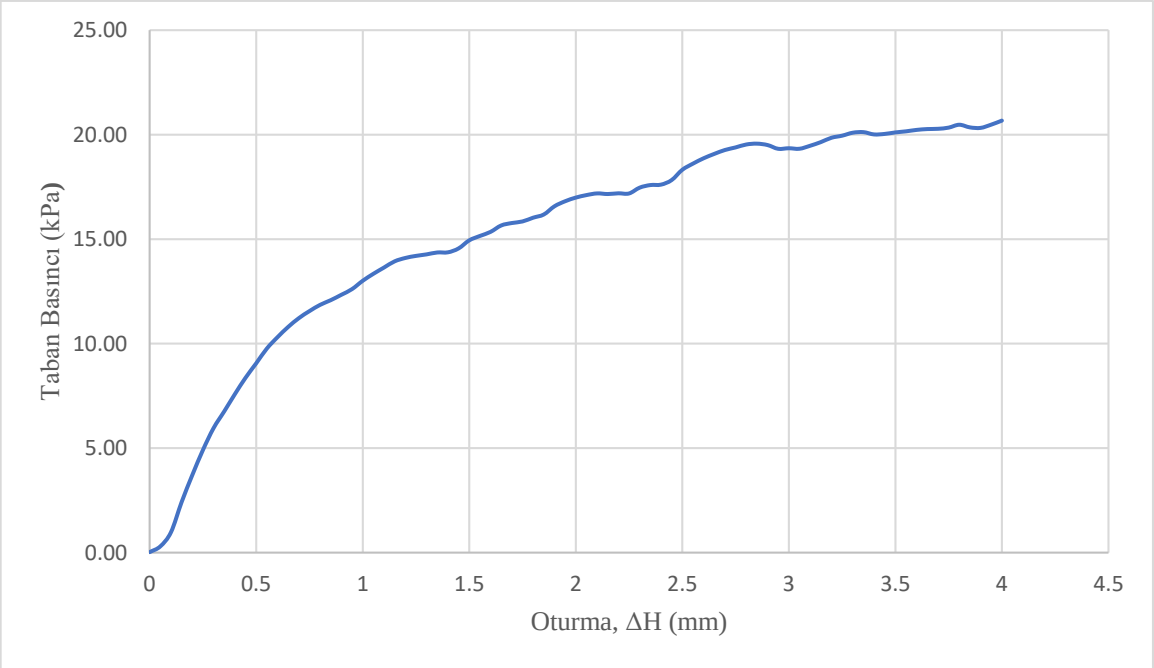
Bu çalışmanın temel konusu, ayrık eleman yöntemi kullanılarak farklı rölatif sıkılıklarda modellenen kum zemin üzerine oturan farklı genişlikteki şerit temelin taşıma gücünün analizinin yapılmasıdır. Farklı rölatif sıkılığa sahip kuma oturan farklı genişlikteki şerit temel nihai taşıma gücüne erişiminin ayrık eleman yöntemi ile simülasyonu yapılmıştır. Farklı rölatif sıkılıklardaki kuma oturan farklı genişlikteki şerit temelden elde edilen sonuçlar, teorilerle hesaplanan nihai taşıma gücü değerleri ile karşılaştırılmıştır.

3.1.Yapılan Analizler

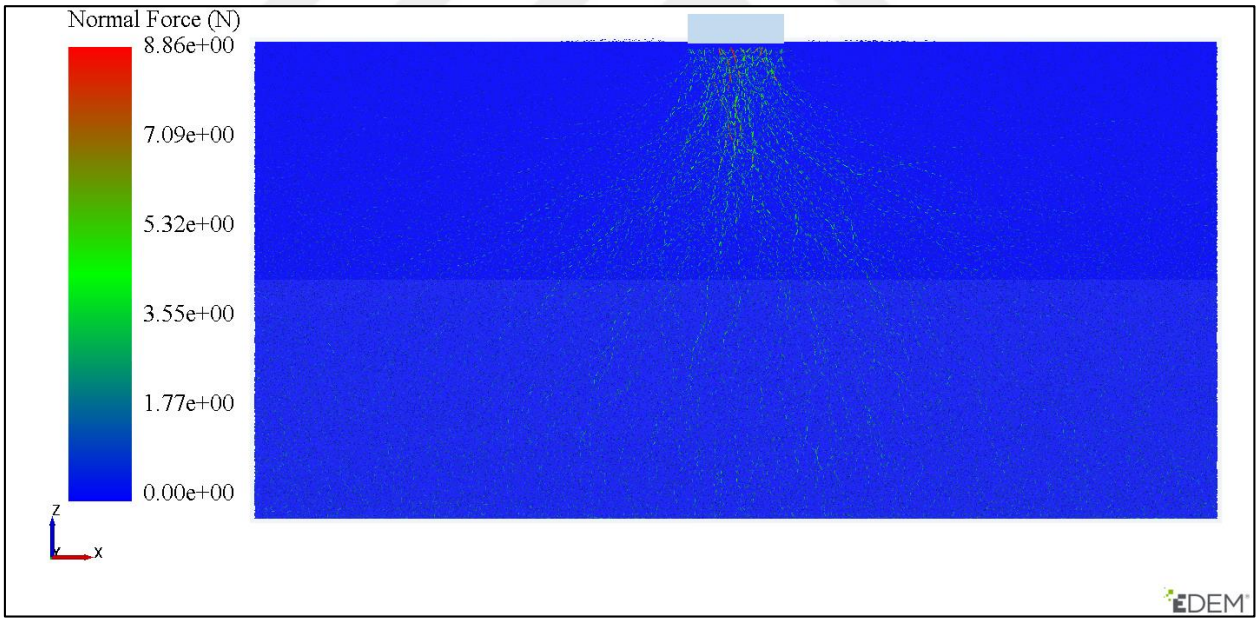
Nihai taşıma kapasitesini incelemek ve şerit temelin genişliğinin değişiminin Nγ katsayısı üzerindeki etkisini incelemek için zeminin farklı rölatif sıkılıklarda (%40, %50, %60, %70) 12 tür taşıma gücü analizi yapılmıştır.

3.2.%40 Rölatif Sıkılıkta Yapılan Modelleme

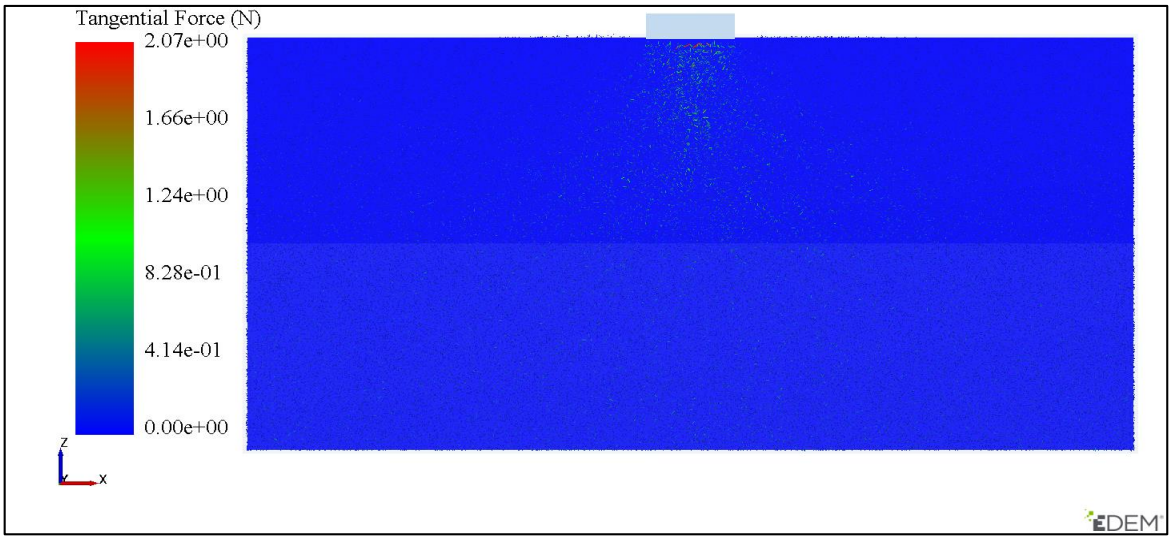
%40 rölatif sıkılıkta modellenen kum üzerinde yapılan taşıma gücü deneyinin simülasyonunun sonucunda temelin altında elde edilen taban basıncı-oturma ilişkisi Şekil 31'de sunulmuştur. Simülasyon sırasında modellenen şerit temeli belirli bir hızla yükleme yapılmıştır. %40 rölatif sıkılıkta yapılan analizler taban basıncı ile oturma arasındaki ilişkiyi veren eğriden yerel kayma kırılmasının oluştuğu gözlemlenmiştir. Simülasyonun sonunda modellenen kum parçacıkları arasında oluşan normal ve teğet kuvvetler Şekil 32 ve 33'te gösterilmiştir. Parçacıklar arasında oluşan normal ve teğetsel kuvvetin derinlikle azaldığı görülmüştür.



Şekil 31. %40 rölatif sıkılıkta yük-oturma eğrisi



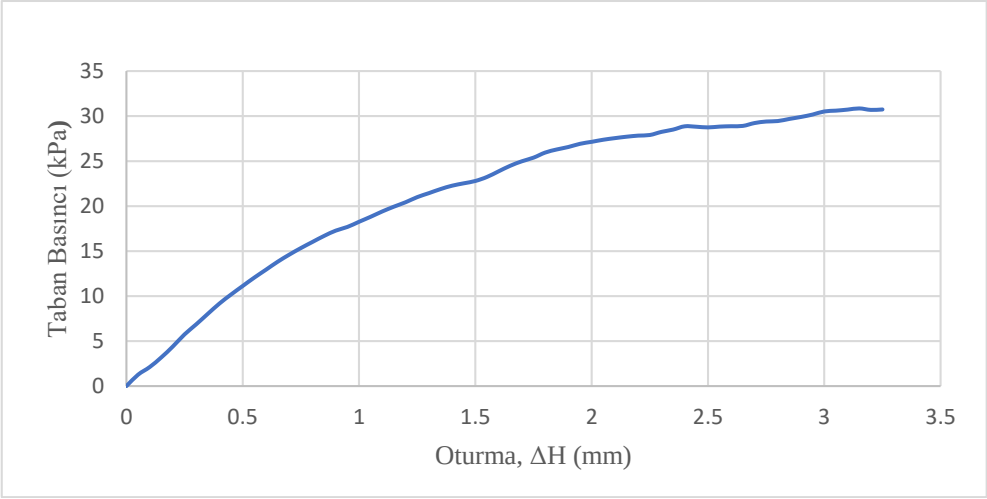
Şekil 32. %40 Rölatif sıkılıkta parçacıklar arasındaki normal kuvvetler



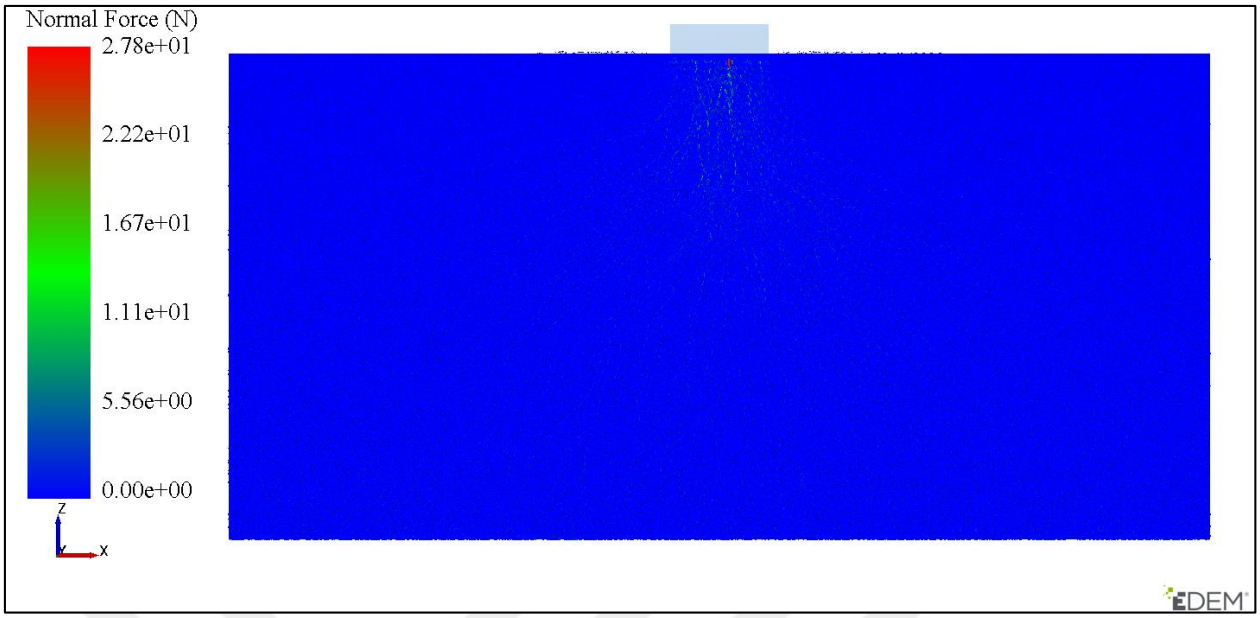
Şekil 33. %40 Rölatif sıkılıkta parçacıklar arasındaki teğet kuvvetler

3.3.%50 Rölatif Sıkılıkta Yapılan Modelleme

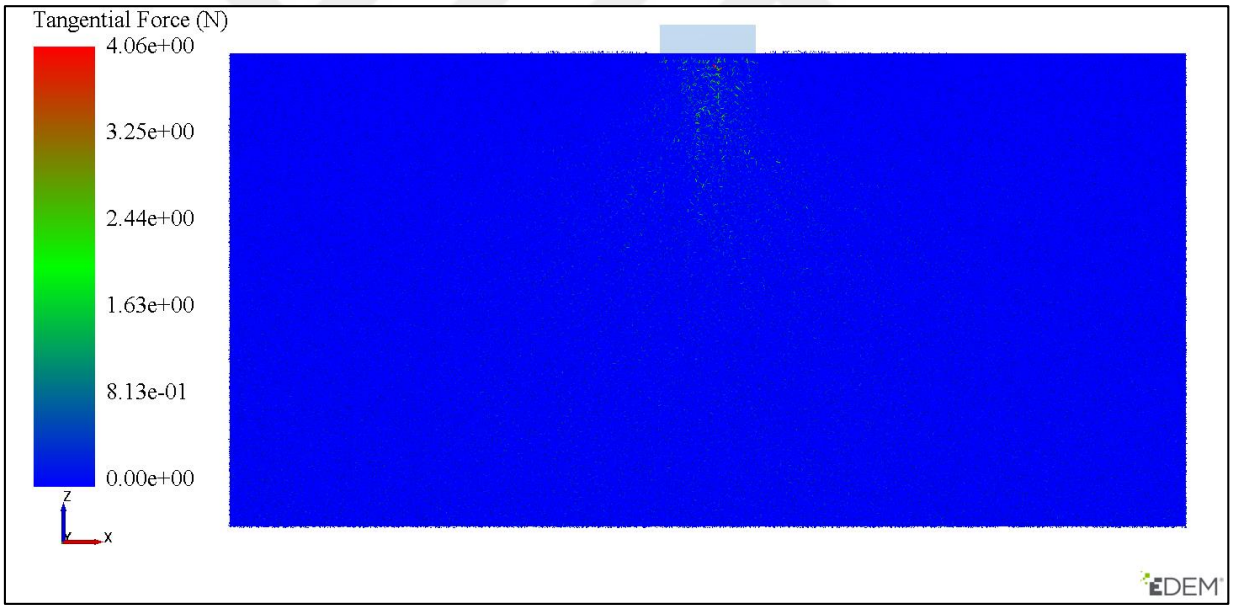
%50 rölatif sıkılıkta modellenen kum üzerinde yapılan taşıma gücü deneyinin simülasyonunun sonucunda temelin altında elde edilen taban basıncı-oturma ilişkisi Şekil 34'de sunulmuştur. %50 rölatif sıkılıkta yapılan analizde yerel kayma kırılmasının oluştuğu gözlemlenmiştir. Simülasyonun sonunda oluşan kum parçacıkları arasındaki normal ve teğet kuvvetler Şekil 35 ve 36'da gösterilmiştir. Parçacıklar arasında oluşan maksimum normal ve teğet kuvvetin, %40 rölatif sıkılıkta oluşan maksimum normal ve teğet kuvvete göre sırayla 2 ve 3 kat arttığı görülmüştür.



Şekil 34. %50 Rölatif sıkılıkta yük-oturma eğrisi



Şekil 35. %50 Rölatif sıkılıkta parçacıklar arasındaki normal kuvvetler

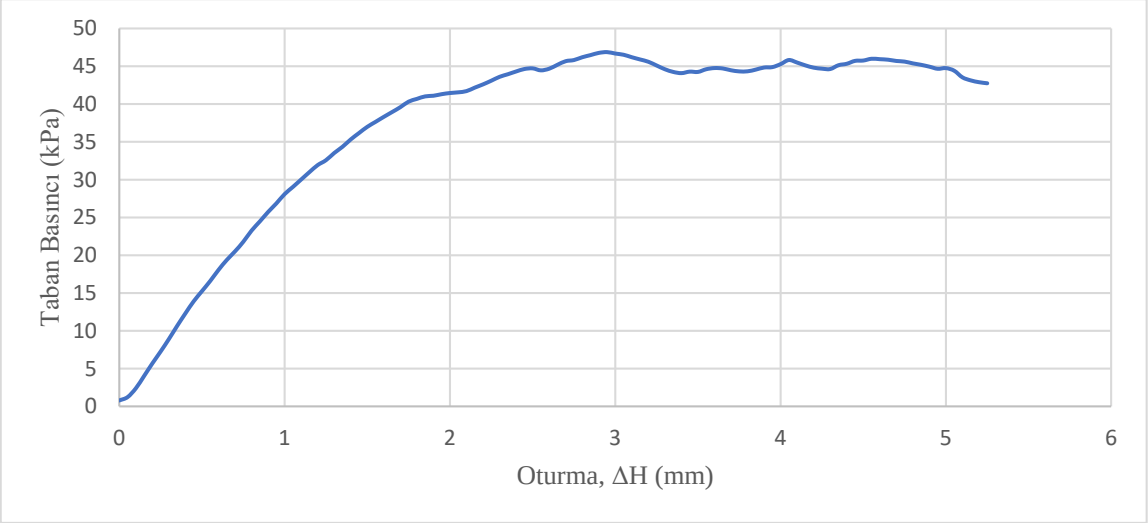


Şekil 36. %50 Rölatif sıkılıkta parçacıklar arasındaki teğet kuvvetler

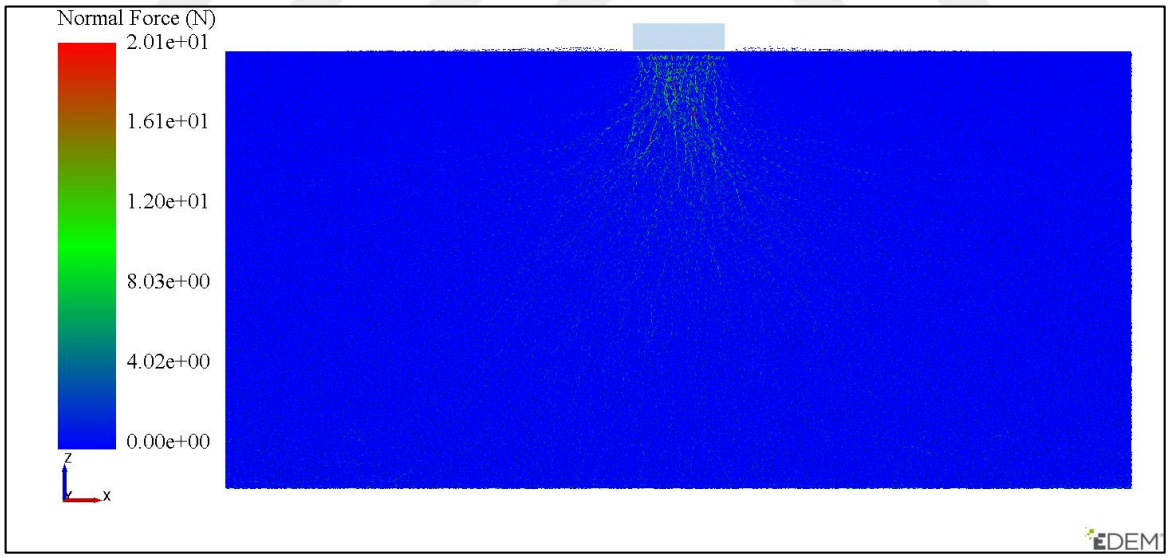
3.4.%60 Rölatif Sıkılıkta Yapılan Modelleme

%60 rölatif sıkılıkta modellenen kum üzerinde yapılan taşıma gücü deneyinin simülasyonunun sonucunda temelde gözlenen taban basıncı-oturma ilişkisi Şekil 37'de sunulmuştur. Yerel kayma kırılmasının oluşmasının yerine genel kayma kırılmasının oluştuğu gözlemlenmiştir. Simülasyonun sonunda modellenen kum parçacıkları arasında

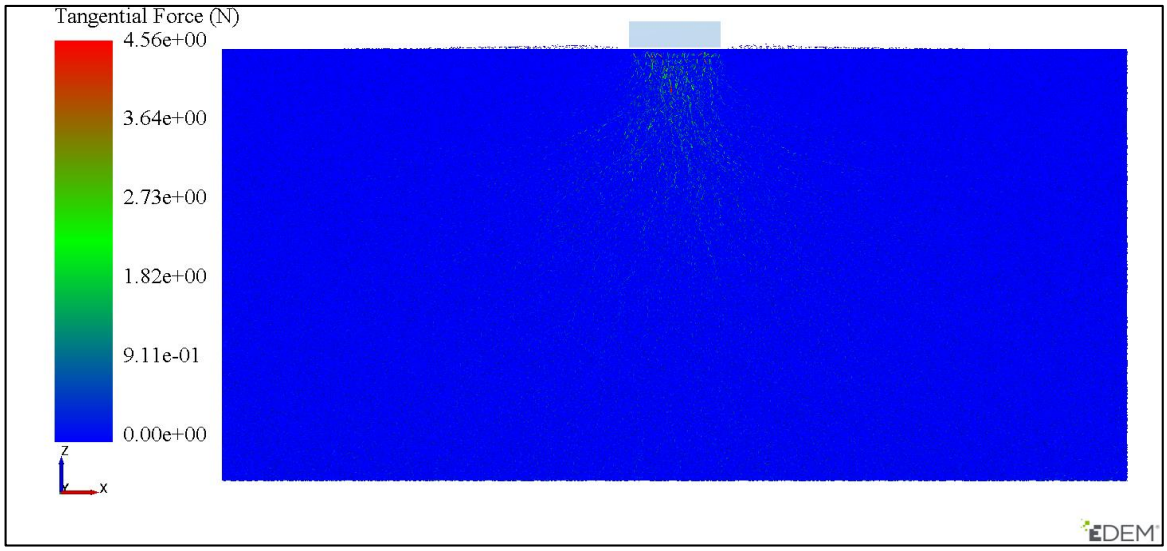
oluşan normal ve teğet kuvvetler Şekil 38 ve 39'da gösterilmiştir. %50 rölatif sıkılıkta oluşan kuvvetlerle kıyaslandığında, parçacıklar arasındaki maksimum normal kuvvetlerin %27 azaldığı, teğet kuvvetin ise %12 arttığı görülmüştür.



Şekil 37. %60 Rölatif sıkılıkta yük-oturma eğrisi



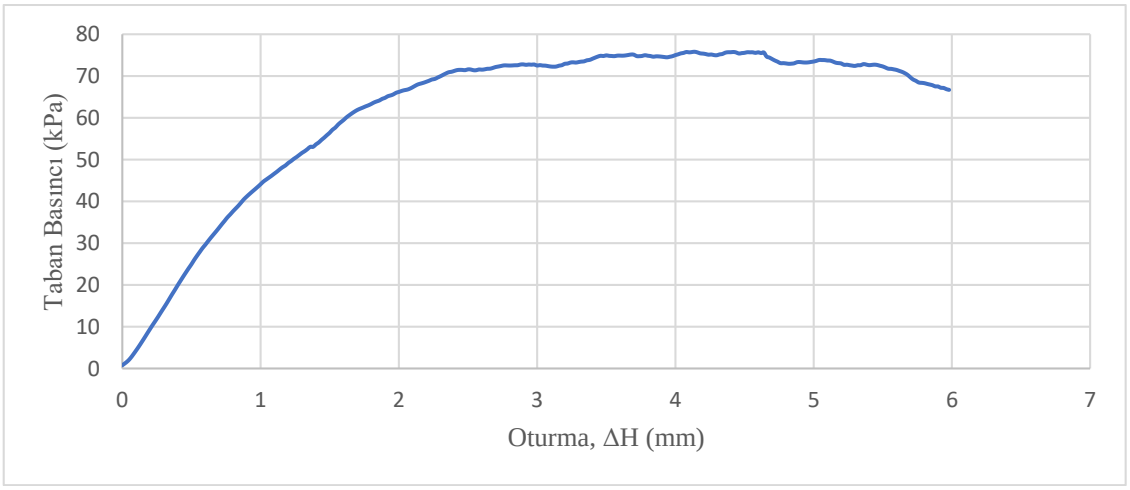
Şekil 38. %60 Rölatif sıkılıkta parçacıklar arasındaki normal kuvvetler



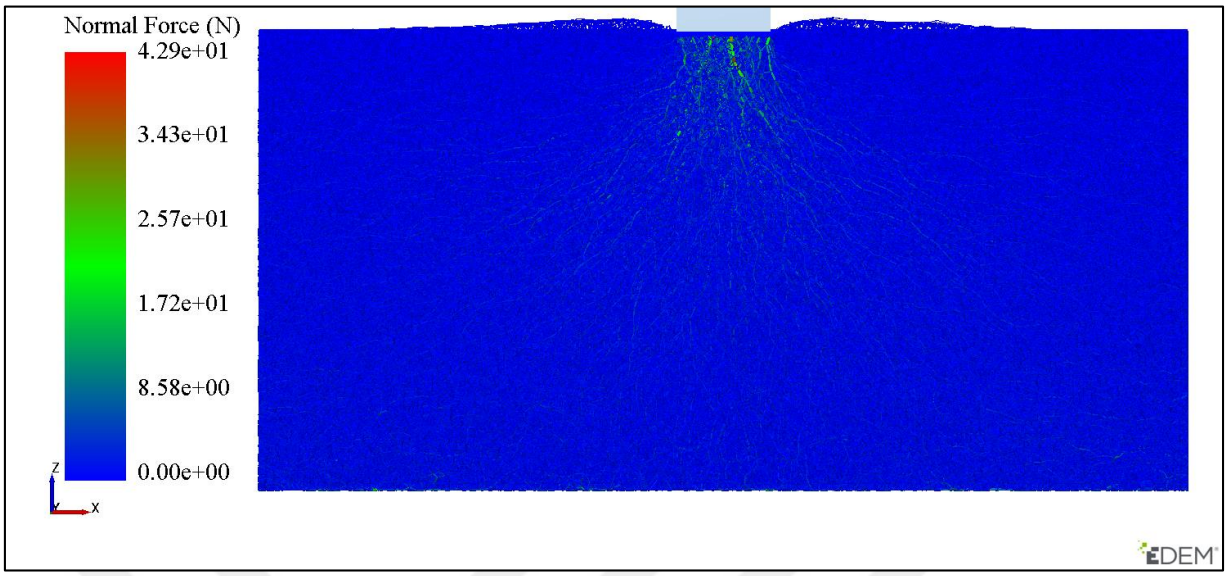
Şekil 39. %60 Rölatif sıkılıkta parçacıklar arasındaki teğet kuvvetler

3.5.%70 Rölatif Sıkılıkta Yapılan Modelleme

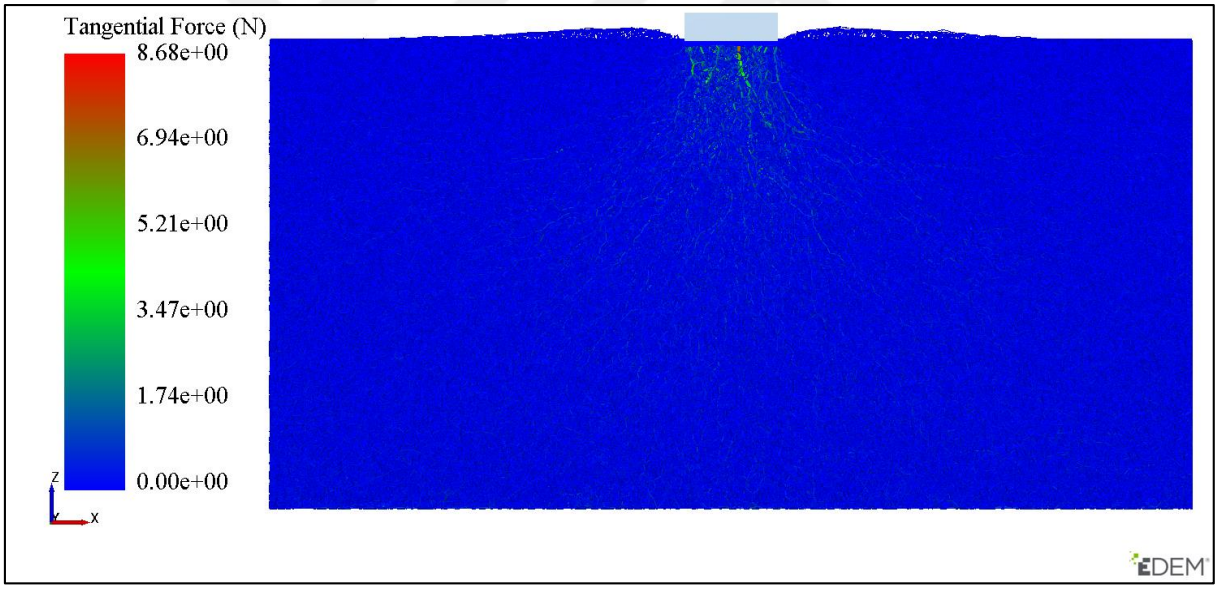
%70 rölatif sıkılıkta modellenen kum üzerinde yapılan taşıma gücü deneyinin simülasyonunun sonucunda temelde oluşan taban basıncı-oturma ilişkisi Şekil 40'ta görülmektedir. Bu rölatif sıkılıkta da yük-oturma eğrisinde bir pik noktasının gözlendiği yani genel kayma kırılmasının oluştuğu belirlenmiştir. Simülasyonun sonunda modellenen kum parçacıkları arasında oluşan normal kuvvetler Şekil 41 ve 42'de gösterilmiştir. Parçacıklar arasında oluşan maksimum normal ve teğet kuvvet, %60 sıkılıkta oluşan maksimum normal ve teğet kuvvete göre yaklaşık 2 kat arttığı görülmüştür.



Şekil 40. %70 Rölatif sıkılıkta yük-oturma eğrisi

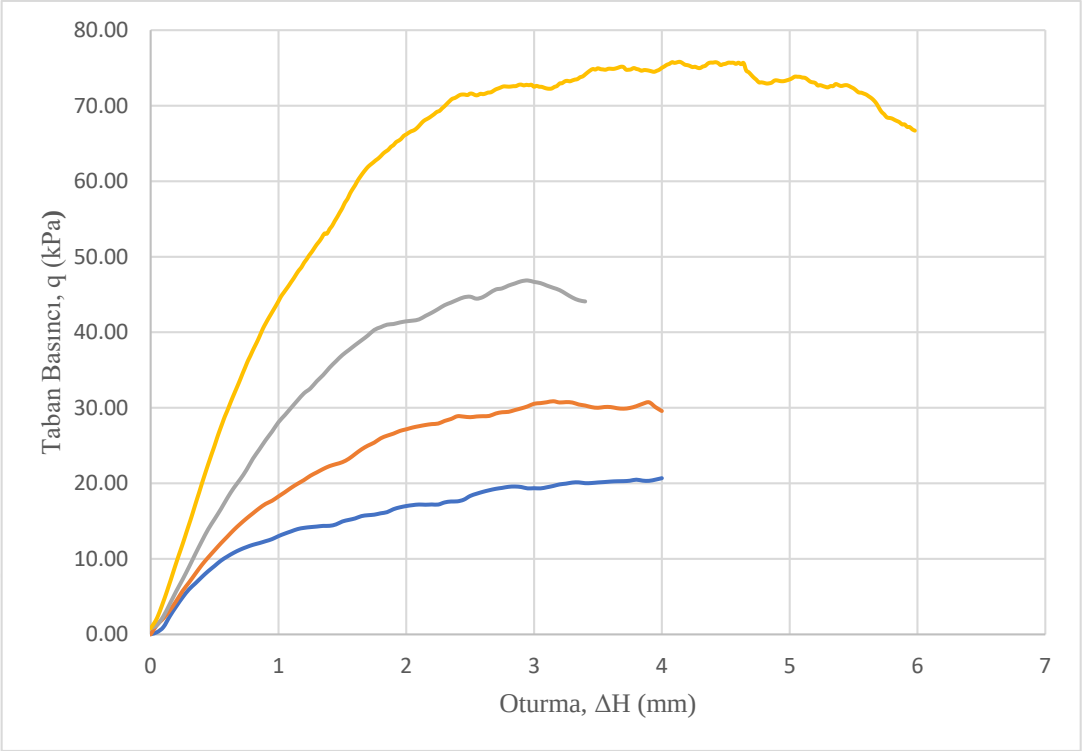


Şekil 41. %70 Rölatif sıkılıkta parçacıklar arasındaki normal kuvvetler



Şekil 42. %70 Rölatif sıkılıkta parçacıklar arasındaki teğet kuvvetler

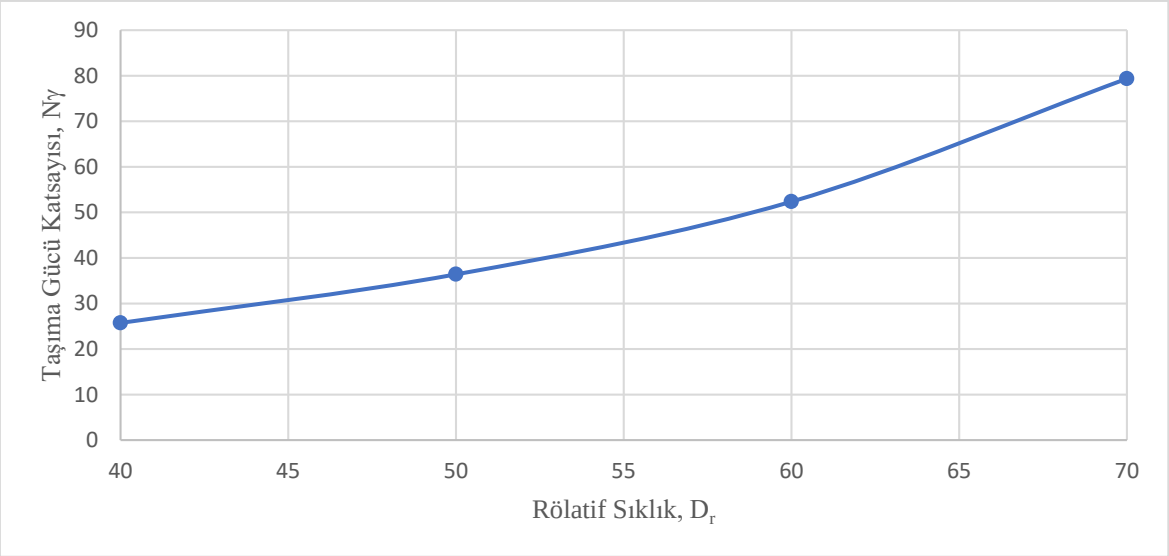
Farklı rölatif sıkılıklarda yapılan deney modellemelerinin sonucunda elde edilen taban basıncı-oturma eğrileri toplu olarak Şekil 43'te sunulmuştur. Eğrilerde görüldüğü üzere rölatif sıkılık arttıkça taşıma gücü artmakta ve kırılma modu, yerel kayma kırılmasından genel kayma kırılmasına doğru geçiş yapmaktadır.



Şekil 43. Farklı rölatif sıkılıklar için taban basıncı-oturma eğrileri

3.6. Yapılan Simülasyon Sonuçlarının Taşıma Gücü Katsayıları ile Arasındaki İlişki

Analizden elde edilen sonuçlar, Şekil 44'te gösterildiği gibi farklı rölatif sıkılıklardaki kum ile taşıma kapasitesi katsayısının değerleri arasındaki ilişkiyi elde etmek için belirlenmiştir. Beklenildiği gibi, kumun rölatif sıkılığının artması ile taşıma gücü katsayısının değeri artmıştır. Bunun nedeni, zemin sıkıştırıldığında ve gerekli rölatif sıkılığa ulaşıldığında, zemin parçacıkları arasındaki sürtünme açısının artması ile zemin taşıma gücü artmıştır.

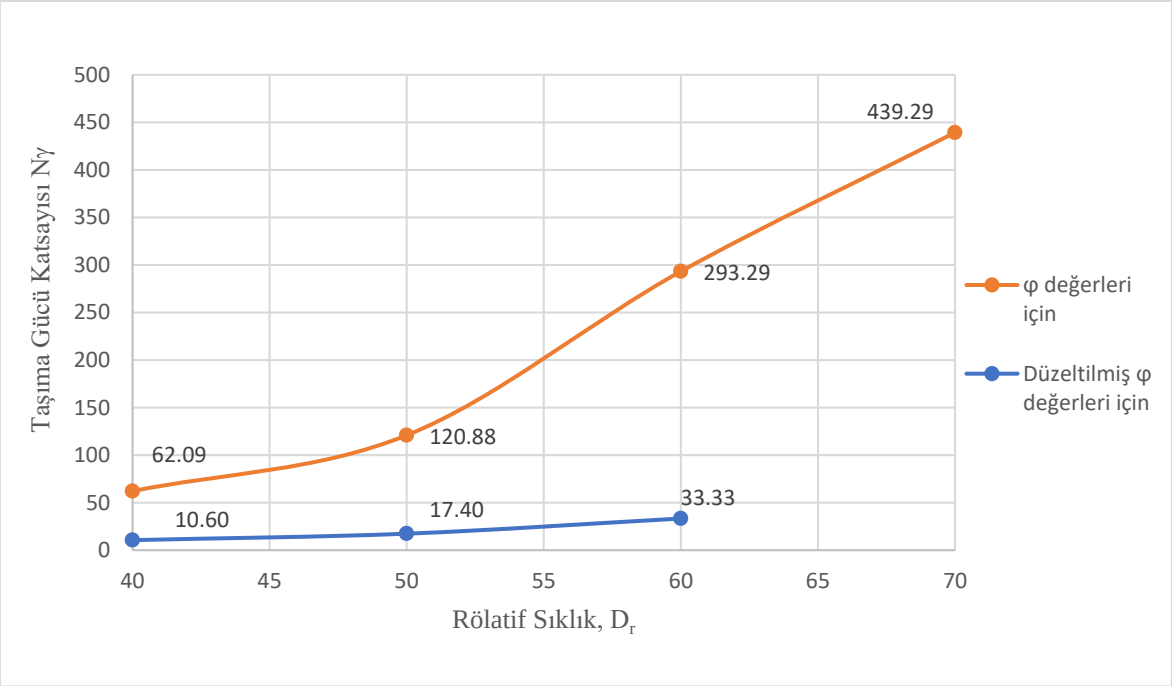


Şekil 44. Analiz verilerine göre taşıma gücü katsayısının rölatif sıkılıkla değişimi

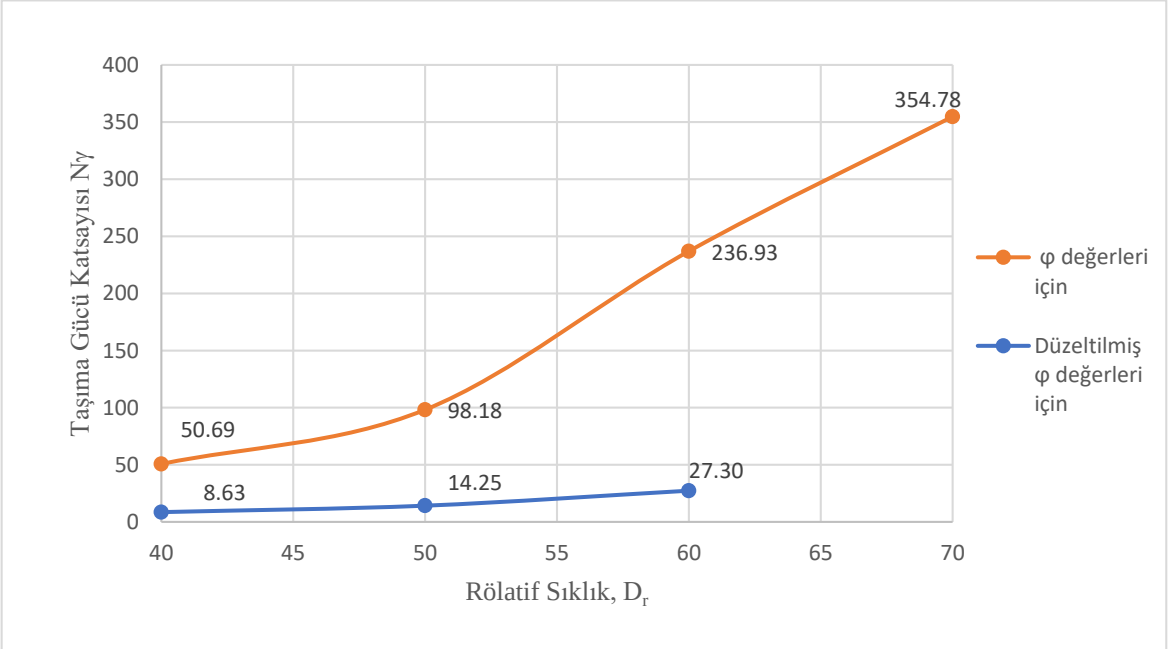
3.7.Yapılan Simülasyon Sonuçların Taşıma Gücü Teorileri ile Karşılaştırılması

Terzaghi, Meyerhof, Brinch Hansen ve Vesic'in teorisi taşıma gücünü farklı rölatif sıkılıklarda hesaplamak için Bağıntı 1.2, 1.4, 1.6 ve 1.7'yi kullanarak taşıma gücü katsayı değerleri Şekil 45 - 48 arasında gösterilmiştir. Bunun yanı sıra EDEM analizinden elde edilen sonuçlar %40, %50 ve %60 farklı rölatif sıkılıklarda meydana gelen yerel kayma kırılması için Terzaghi'nin önerdiği $\phi' = \tan^{-1}\left(\frac{2}{3}\tan\theta\right)$ düzeltme denklemi kullanılmıştır.

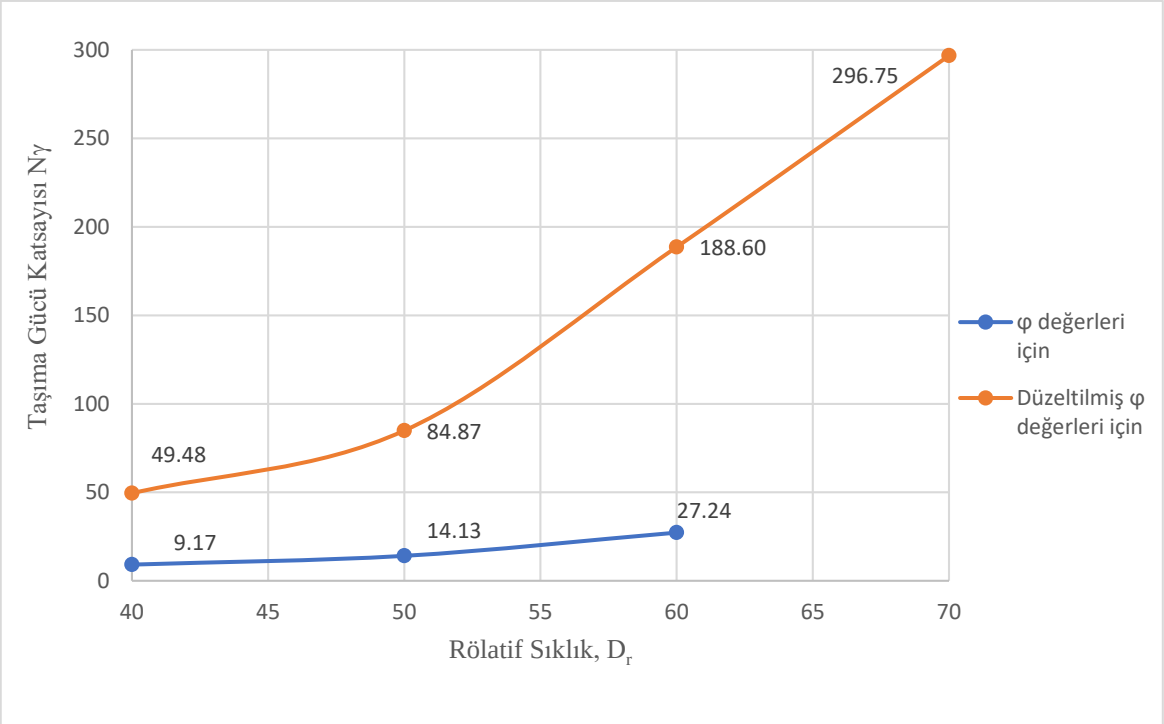
Analiz çalışmalarından elde edilen sonuçlar ve teorilerden elde edilen veriler kıyaslandığında %40, %50 ve %60 rölatif sıkılıklarda nümerik analizlerden elde edilen taşıma gücü katsayısının, teorilerin taşıma gücü katsayısına oldukça yakın olduğu görülmektedir. %70 sıkılıkta ise nümerik analizden elde edilen taşıma gücü katsayısı, teorilerden elde edilen değerlerden küçük olduğu belirlenmiştir (Şekil 49).



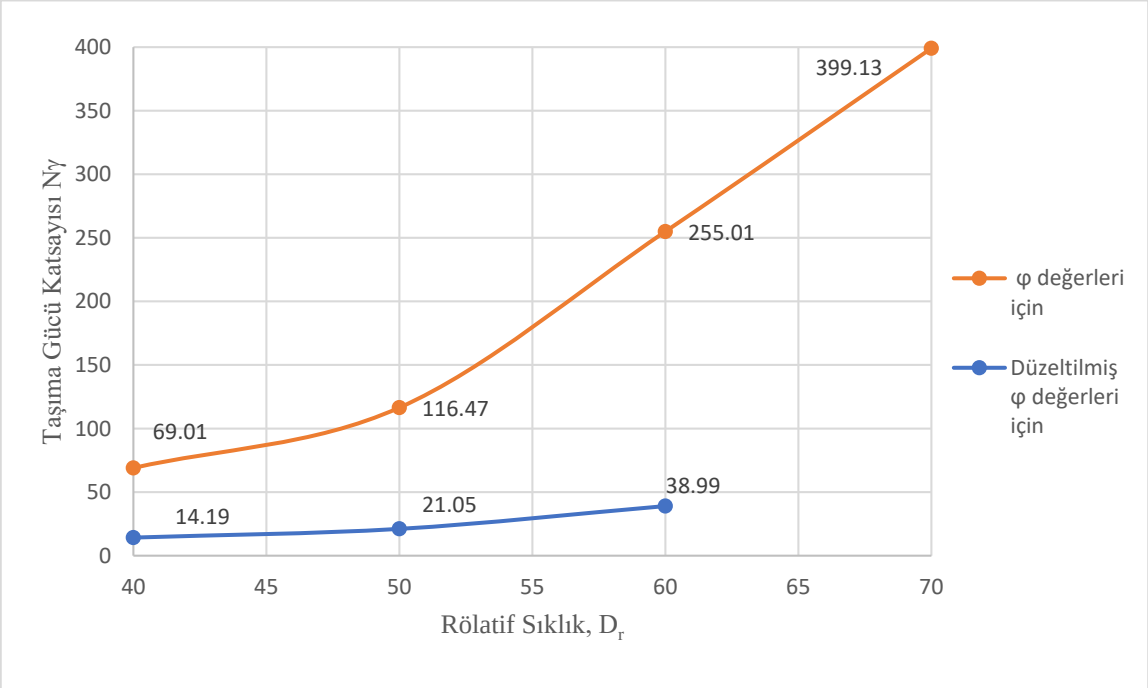
Şekil 45. Terzaghi taşıma gücü katsayısının rölatif sıkılıkla değişimi



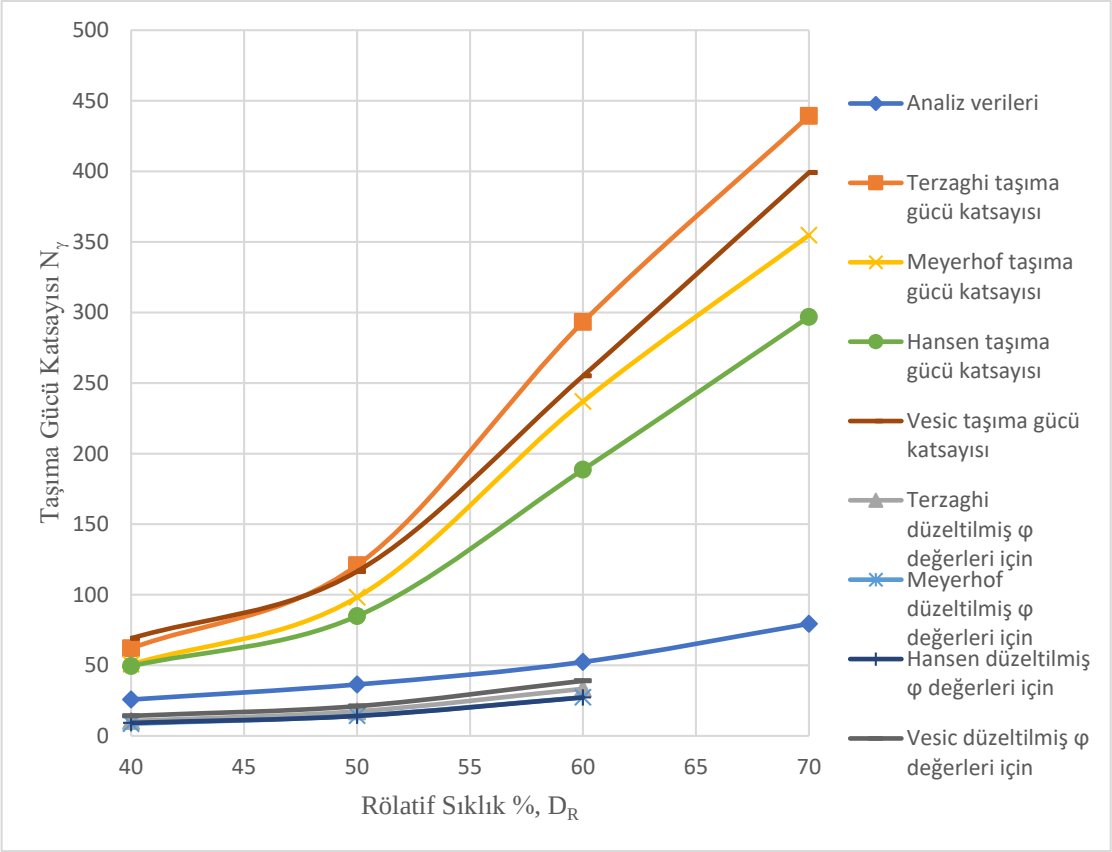
Şekil 46. Meyerhof taşıma gücü katsayısının rölatif sıkılıkla değişimi



Şekil 47. Brinch Hansen taşıma gücü katsayısının rölatif sıkılıkla değişimi



Şekil 48. Vesic taşıma gücü katsayısının rölatif sıkılıkla değişimi



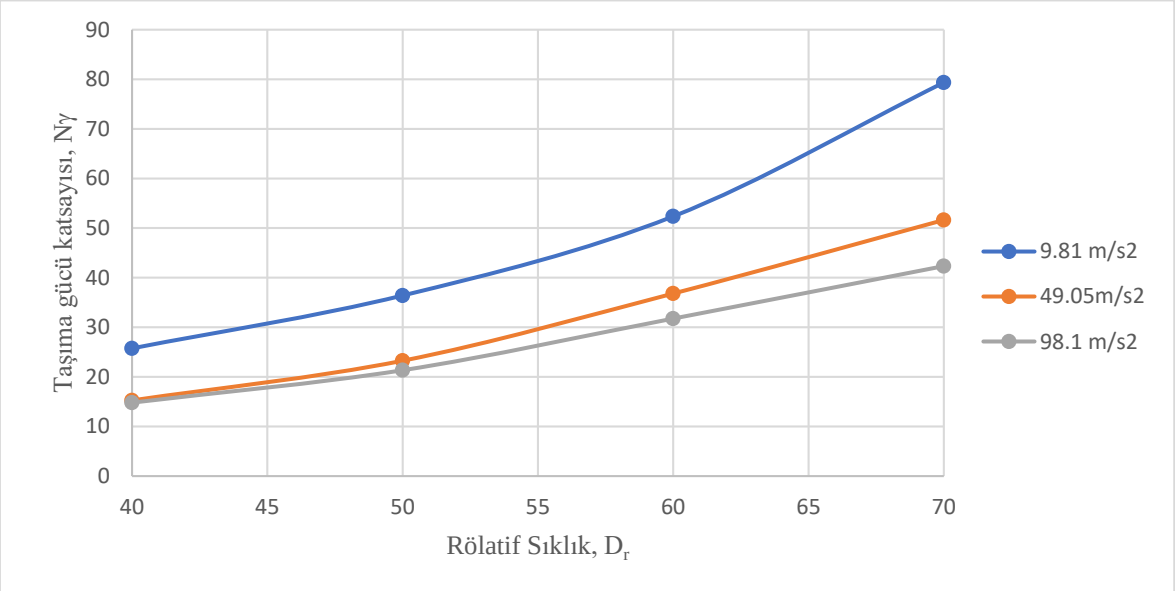
Şekil 49. Normal ve düzeltilmiş sürtünme açısı değerleri için taşıma gücü katsayıları ile rölatif sıkılık arasındaki ilişki

3.8.Temel Genişliği ile Nγ Taşıma Gücü Katsayısı Arasındaki İlişki

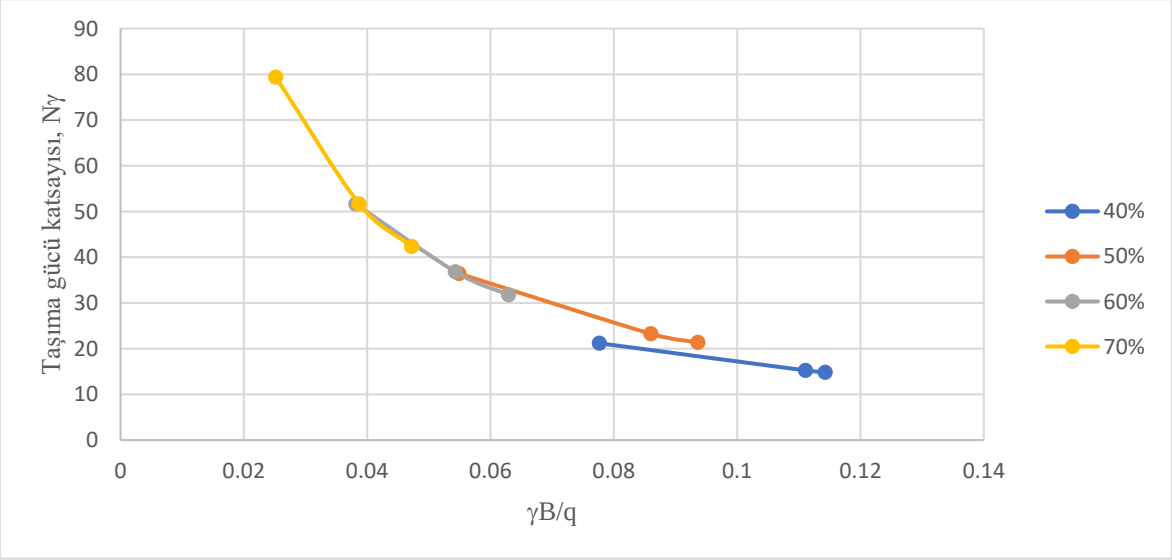
Taşıma gücü katsayısı Nγ boyutsuz bir değer olmasına rağmen, kum zemin üzerine oturan temellere yapılan yükleme deneylerinden, Nγ değerinin temel boyutunun artmasıyla azaldığı görülmüştür (Ueno vd., 1998). Bu fenomenin olmasının nedenlerinden biri, daha geniş temel için, göçme bölgelerinde oluşan gerilmenin daha büyük olması ve göçme alanlarında ϕ değerinin daha küçük olması ve dolayısıyla Nγ değerlerinin daha düşük olmasıdır.

Bu bölümde, temel genişliğinin değişiminin taşıma gücü üzerindeki etkisini irdelemek, taşıma gücü deneyinin simulasyonundan elde edilen sonuçlar verilmiştir. Hem modelde hem de prototipte eşit basınçları oluşturulması için modelde genişliklerinin azaltıldığı aynı n oran faktörü ile yerçekimi ivmesinin arttırıldığı santrifüjler için bir geoteknik modelleme tekniği kullanılmıştır (URL-1,2021) .10 cm, 50 cm ve 100 cm temel genişliği için $9.81\frac{m}{s^2}$, $49.05\frac{m}{s^2}$ ve $98.1\frac{m}{s^2}$ ivme uygulanmıştır. Simülasyon sonuncunda elde edilen taşıma gücü katsayısı ile

temel genişliği değerleri farklı rölatif sıkılıklar için Şekil 50 ve Şekil 51'de verilmiştir. Grafikten elde edilen sonuçlar kuma ait rölatif sıkılığının arttığı zaman farklı temel genişliğinin taşıma gücünün katsayısı artmıştır. Ancak temel genişliği arttığı zaman temel taşıma gücünün katsayısının azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 50. Nγ taşıma gücü katsayısı Rölatif sıkılıkla arasındaki ilişki



Şekil 51. Taşıma gücü katsayısının Nγ değişimin γB/q ile karşılaştırılması

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada farklı rölatif sıkılıklarda kum üzerine oturan sığ bir şerit temelin taşıma gücü deneyi, ayrık eleman yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Hesaplama süresi etkisini minimuma indirgemek için farklı boyutlardaki kum partikülleri küre olarak modellenmiştir. Kumu modellemede kullanılan partiküller arasındaki hafif örtüşme ihmal edilerek, istenen rölatif sıkılığı elde etmek için kum partikülleri sıkıştırılmıştır. Kum partikülleri arasındaki oluşan temas kuvvetleri, Histeretik Kontak Modeli kullanılarak modellenmiştir. Temel, kum üzerine yerleştirilip yükleme uygulanmak amacıyla belirli bir hızla yüklenmiştir. Ayrık eleman yöntemi kullanılarak %40, %50, %60 ve %70 rölatif sıkılıklarda modellenen kum üzerine oturan temelin taşıma gücü simulasyonlarının sonuçları, teorilerden elde edilen temel taşıma gücü sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, temel genişliğinin taşıma gücü katsayısı N_γ üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- %40, %50 ve %60 rölatif sıkılıklarda yapılan deneyin simülasyonundan elde edilen sonuçların; Terzaghi, Meyerhof, Brinch Hansen ve Vesic'in teorilerinden yerel kayma kırılma gözönüne alınarak elde edilen değerlere yakın olduğu tespit edilmiştir. Ancak %70 rölatif sıkılık için yapılan simülasyondan elde edilen sonuç, teorilerden elde edilen değerlere göre oldukça düşük olmuştur. Bunun nedeni, zemin partiküllerini modellemek için küre şeklinin kullanılması olabilir.
- %40, %50 ve %60 rölatif sıkılıklar için yapılan simulasyonlarda yerel kayma kırılmasının oluştuğu ve %70 rölatif sıkılıkta ise genel kayma kırılmasının oluştuğu tespit edilmiştir.
- Rölatif sıkılık arttıkça modellenen kum partikülleri arasındaki oluşan maksimum kuvvetlerin hem normal yönde hem de teğetsel yönde arttığı görülmüştür. Ancak %60 rölatif sıkılıkta parçacıklar arasında oluşan maksimum normal kuvvetin, %50 rölatif sıkılıkta oluşan maksimum kuvvete kıyasla beklenen artışın aksine %27 azalış gösterdiği gözlemlenmiştir.
- Ayrık eleman yöntemi ile yapılan simülasyonlarda temel genişliği arttıkça $N\gamma$ taşıma gücü katsayısının azaldığı görülmüştür.

- Rölatif sıkılık ve temel genişliği değerleri büyüdükçe Nγ taşıma gücü katsayısı değerindeki orantısal azalışın büyüdüğü görülmüştür.

5. ÖNERİLER

Araştırma çalışması, ayrık eleman yöntemi kullanılarak kum üzerine oturan şerit temelin taşıma gücünün farklı rölatif sıkılıklarda analiz edilmiştir. Bilgisayar kısıtlaması nedeniyle diğer sığ temel türleri incelenememiştir. Gelecekte kare, dikdörtgen ve daire şekillerin temelleri üzerinde çalışmalar yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

de Gennes, P. G., 1999. Granular matter: a tentative view. Reviews of modern physics, 71,2, 374 s.

Das, Braja M., 2010. "Principles of Foundation Engineering, SI Edition." Cengage learning. 133-136.

Vesic, A. S., 1963 Bearing Capacity of Deep Foundation in Sand, Highway Research Record, 39, 112-153.

Vesic, A. S., 1973. Analysis of ultimate loads of shallow foundations. Journal of Soil Mechanics and Foundations Div, 99 s.

Kumbasar, V. ve Kip, F., 1999. Zemin Mekaniği Problemleri, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.

Terzaghi, K., 1943. Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York

Zhu, H., et al., 2007. Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments, Chemical Engineering Science,62(13), 3378-3396.

Walton, O., J., 1984 Brandeis, and J. Cooper. Modeling of inelastic, frictional, contact forces in flowing granular assemblies. in Proc. 21st Annual Meeting of The Society of Engineering Science, Blacksburg, VA.

Cundall, P.A. ve R.D. Hart, Numerical modelling of discontinua, Engineering computations, 9(2), 101-113.

Cundall, P.A. A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock system.

B. J. Alder ve T. E. Wainwright, 1959 Studies in molecular dynamics. I. General method. The Journal of Chemical Physics, 31(2), 459-466.

Zhu, H., et al., 2007 Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments. Chemical Engineering Science, 62(13), 3378-3396.

O'Sullivan, C., 2011 Particle-based discrete element modeling: geomechanics perspective. International Journal of Geomechanics, 11(6), 449-464.

Cundall, P.A. ve R.D. Hart., 1992 Numerical modelling of discontinua, Engineering computations, 1992. 9(2),101-113.

Cundall, P. A., 1971 A computer model for simulating progressive, large-scale movement in blocky rock system, In Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics.

Cundall, P.A. ve O.D.L. Strack., 1979 A discrete numerical model for granular assemblies, geotechnique, 29(1) 47-65.

Tsuji, Y., Kawaguchi, T., ve Tanaka, T., 1993 Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed. Powder Technology, 77(1), 79–87.

Mio, H., Shimosaka, A., Shirakawa, Y., ve Hidaka, J., 2005 "Optimum cell size for contact detection in the algorithm of the discrete element method," Journal of Chemical Engineering of Japan, 38, 12, 969 – 975.

Seville., Jonathan PK., ve Chuan-Yu Wu., 2016 Particle Technology and Engineering: An Engineer's Guide to Particles and Powders: Fundamentals and Computational Approaches. Butterworth-Heinemann.

Wu, C.Y., Cocks, A.C.F., 2006 Numerical and experimental investigations of the flow of powder into a confined space. Mechanics of Materials 38 (4), 304-324.

Boon, C.W., Houlsby, G.T., Utili, S., 2013. A new contact detection algorithm for three-dimensional non-spherical particles. Powder Technology 248, 94-102.

Di Renzo, A. ve F.P. Di Maio., 2004 Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes. Chemical Engineering Science,. 59(3), 525-541

J. Ai, J.-F. Chen, J.M. Rotter, J.Y. Ooi., 2011 Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations, Powder Technology, 206, 269-282.

Zhang, L. ve Thornton, C., 2002 DEM simulations of the direct shear test. In 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, 2-5.

Tsuji, Y., T. Kawaguchi, ve T. Tanaka., 1993 Discrete particle simulation of twodimensional fluidized bed. Powder Technology, 77,1,79-87.

Lobo-Guerrero, S. and Vallejo, L., 2010 DEM analysis of the effect of granular crushing on the bearing capacity of footings. International Journal of Geotechnical Engineering, 4(3).351-359.

Malone, K.F. Xu, B.H., 2008 Determination of contact parameters for discrete element method simulations of granular systems. Particuology, 6, 521–528.

Mindlin, R.D., 1953 Elastic spheres in contact under varying oblique forces. J. Applied Mech., 20, 327–344.

Johnson, K.L., Kendall, K., Roberts, A., 1971 Surface energy and the contact of elastic solids. Proc. R. Soc. Lond., 324, 301–313.

Vu-Quoc, L., Zhang, X., 1999 An elastoplastic contact force–displacement model in the normal direction: Displacement–driven version. Proc. R. Soc. Lond. Ser. A Math. Phys. Eng. Sci, 455, 4013–4044

Walton, O.R., 1984 Application of molecular dynamics to macroscopic particles. Int. J. Eng. Sci., 22, 1097–1107.

Peng, B., 2014 Discrete Element Method (Dem) Contact Models Applied to Pavement Simulation; Virginia Tech: Blacksburg, VA, USA.

Walton, O.R., Braun, R.L., 1986 Viscosity, granular-temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks. J. Rheol, 30, 949–980.

Yan, Ying, ve Shunying Ji., 2010 "Discrete element modeling of direct shear tests for a granular material." International journal for numerical and analytical methods in geomechanics 34.9, 978-990.

URL-1, en.wikipedia.org/wiki/Geotechnical_centrifuge_modeling. Geotechnical Centrifuge Modeling. 7 Mart 2021.

ÖZGEÇMİŞ

İlköğrenimini 1999-2008 yılları arasında 23 Temmuz ve Ali Haydar Okulunda tamamladı. Lise öğrenimini Jamal Abdul Nasser Lisesi'nde 2008-2011 yılları arasında tamamladı. 2012 yılında Trablus Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı. 2016 yılında İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 1.derece ile mezun oldu. 2016-2017 yılları aralığında inşaat sektöründe çalıştı. 2017 yılında Türkiye bursları kazanıp 2018 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı. 2020 yılında Trablus Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne araştırma görevlisi olarak atandı. Halen bu görevine devam etmektedir.