

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLERE OTURAN YÜZEYSEL  
TEMELLERİN TAŞIMA KAPASİTESİNİN ANALİTİK VE  
SAYISAL ANALİZ YÖNTEMLERİYLE BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS**

**MOHAMMAD OSAMA FAWWAZ ALSMADI**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Geoteknik Bilim Dalı**

**HAZİRAN 2024**



T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLERE OTURAN YÜZEYSEL  
TEMELLERİN TAŞIMA KAPASİTESİNİN ANALİTİK VE  
SAYISAL ANALİZ YÖNTEMLERİYLE BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS

MOHAMMAD OSAMA FAWWAZ ALSMADI

Öğrenci No Y215004104

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK

HAZİRAN 2024



MOHAMMAD OSAMA FAWWAZ ALSMADI tarafından hazırlanan “Doğun Olmayan Zeminlere Oturan Yüzeysel Temellerin Taşıma Kapasitesinin Analitik ve Sayısal Analiz Yöntemleriyle Belirlenmesi” adlı tez çalışması 28.06.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

**Jüri Başkanı :** **Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK** (Danışman) .....  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Prof. Dr. Sedat SERT** .....  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Dr. Öğr. Üyesi. Kurban ÖNTÜRK** .....  
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniv.



## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLERE OTURAN YÜZEYSEL TEMELLERİN TAŞIMA KAPASİTESİNİN ANALİTİK VE SAYISAL ANALİZ YÖNTEMLERİYLE BELİRLENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(...../...../20.....).

(imza)

**MOHAMMAD OSAMA FAWWAZ ALSMADI**





*Anneme, Abime ve ablama*



## TEŞEKKÜR

Bu tezin mümkün olmasını sağlayan tüm bireyler ve kuruluşlara verdikleri destek ve rehberlik için derin şükranlarımı sunarım. Yüksek lisans çalışmalarımı sürdürme fırsatı sunduğu için Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Fakültesi'ne içten teşekkürlerimi iletirim. Ayrıca, bu tezin tamamlanmasında büyük rol oynayan akademik ve teknik destekleri için Sakarya Üniversitesi'ne, özellikle Türkiye'ye olan minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Araştırma projem için uygun bir akademik ortam yaratan SAÜ Geoteknik Çalışma Grubu'na içten teşekkürlerimi sunarım. Araştırma danışmanım Prof. Dr. Aşkın ÖZOCAK'a, paha biçilmez önerileri, rehberliği ve desteği için yürekten teşekkür ederim. Bilgimi önemli ölçüde zenginleştiren ve bu tezin yürütülmesi ve tamamlanmasında büyük katkı sağlayan desteği, teşvikleri ve verimli katkıları için minnettarlığımı ifade etmek isterim.

Araştırma projemdeki iş birliği için Prof. Dr. Sedat SERT'e özel teşekkürlerimi sunarım. Veri toplama aşamasında kritik bilgiler, destek ve iş birliği sağlamak için değerli zamanlarını ayırmaları, büyük takdirle karşılanmıştır.

Tüm aile üyelerime anneme, kardeşime ve kız kardeşime her zaman yanımda olan en iyi arkadaşlarıma içten teşekkürlerimi sunarım. Dinlemek, teşvik etmek ve fedakârlık yapmak için harcadıkları sayısız saat, bu çalışmaya önemli ölçüde katkıda bulunmuştur.

Son olarak, ama önemli olarak, yardım eden herkese, katkıları, destekleri ve teşvikleri için yürekten minnettarlığımı ifade etmek isterim. Bu tezin başarılı bir şekilde tamamlanmasında önemli bir rol oynamışlardır.

MOHAMMAD OSAMA FAWWAZ ALSMADI



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|  |              |
|--|--------------|
| <b>ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ</b> .....                     | <b>v</b>     |
| <b>TEŞEKKÜR</b> .....  | <b>ix</b>    |
| <b>İÇİNDEKİLER</b> .....   | <b>xi</b>    |
| <b>KISALTMALAR</b> .....   | <b>xiii</b>  |
| <b>SİMGELER</b> .....  | <b>xv</b>    |
| <b>TABLO LİSTESİ</b> .....   | <b>xvii</b>  |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....   | <b>xix</b>   |
| <b>ÖZET</b> .....  | <b>xxi</b>   |
| <b>SUMMARY</b> .....   | <b>xxiii</b> |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....  | <b>1</b>     |
| 1.1. Tezin Amacı .....   | 2            |
| <b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....  | <b>3</b>     |
| 2.1. Ampirik Çalışmalar .....  | 3            |
| 2.2. Sayısal Çalışmalar .....  | 7            |
| <b>3. DOYGUN OLMAYAN ZEMİN ÖZELLİKLERİ</b> .....                             | <b>9</b>     |
| 3.1. Doygun Olmayan Zeminlerin Gerilme Durum Değişkenleri .....              | 11           |
| <b>4. TEMEL TAŞIMA GÜCÜ</b> .....  | <b>15</b>    |
| 4.1. Terzaghi'nin Taşıma Kapasitesi .....                                    | 16           |
| <b>5. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....   | <b>21</b>    |
| 5.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEM) .....                                     | 21           |
| 5.2. Geoteknik Mühendisliği'nde Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması ..... | 24           |
| 5.3. Plaxis Yazılımı .....   | 25           |
| 5.4. Plaxis Zemin Malzeme Modelleri .....                                    | 25           |
| 5.4.1. Lineer elastik model (LE) .....                                       | 26           |
| 5.4.2. Mohr-Coulomb modeli (MC) .....  | 26           |
| 5.4.3. Eklemlenmiş kaya modeli (EK) .....                                    | 26           |
| 5.4.4. Yumuşak zemin modeli (YZ) .....                                       | 26           |
| 5.4.5. Yumuşak zemin büzülme modeli (YZB) .....                              | 27           |
| 5.4.6. Pekleşen zemin modeli (HS) .....                                      | 27           |
| 5.4.7. Küçük-deformasyon rijitliği ile pekleşen zemin modeli (KDSS) .....    | 28           |
| 5.5. Geometrik Model .....   | 28           |
| 5.5.1. Sonlu elemanlar ağı .....   | 28           |
| 5.5.2. Zemin ve temel model parametreleri .....                              | 29           |
| 5.5.3. Plaxis 2D'de başlangıç gerilme durumunun tanımlanması .....           | 30           |
| 5.6. Plaxis 2D'de Zemin Modellemesi İle Yük Uygulaması .....                 | 31           |
| <b>6. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA</b> .....                                 | <b>33</b>    |
| 6.1. Temel Altı Zemin Kesitinde YASS Bulunmaması Durumu .....                | 33           |
| 6.2. Temel Altı Zemin Kesitinde YASS -5 m Durumu .....                       | 36           |
| 6.3. Temel Altı Zemin Kesitinde YASS -2 m Durumu .....                       | 39           |
| 6.4. Temel İle Aynı Seviyede YASS Durumu .....                               | 42           |
| <b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....  | <b>49</b>    |

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>8. KAYNAKLAR.....</b> | <b>51</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>     | <b>55</b> |



## KISALTMALAR

|   |   |
|---|---|
| <b>DOZ</b>                              | : Doygun olmayan zemin                                  |
| <b>EK</b>                               | : Eklemlenmiş Kaya                                      |
| <b>KDSS</b>                             | : Küçük-deformasyon sertliği ile sertleşen zemin modeli |
| <b>LE</b>                               | : Lineer elastik zemin modeli                           |
| <b>MC</b>                               | : Mohr-Coulomb modeli                                   |
| <b>(<math>P_{\text{excess}}</math>)</b> | : Aşırı boşluk suyu basıncı                             |
| <b>SEM</b>                              | : Sonlu elemanlar yöntemi                               |
| <b>YZB</b>                              | : Yumuşak zemin büzülme                                 |



## SİMGELER

|  |   |
|--|---|
| <b>B</b>   | : Temel genişliği   |
| <b>D<sub>f</sub></b>                               | : Temel gömme derinliği   |
| <b>T</b>   | : Temelin kalınlığı   |
| <b>k<sub>1</sub></b>                               | : Temel tabanı birinci şekil faktörü                                  |
| <b>k<sub>2</sub></b>                               | : Temel tabanı ikinci şekil faktörü                                   |
| <b>L</b>   | : Temel uzunluğu  |
| <b>D<sub>r</sub></b>                               | : Bağlı birim hacim ağırlık   |
| <b>A<sub>f</sub></b>                               | : Temel Etkin Alanı   |
| <b>[B]</b>   | : Eleman deformasyon matrisi  |
| <b>b<sub>c</sub>, b<sub>q</sub>, b<sub>γ</sub></b> | : Temel taşıma gücü faktörleri  |
| <b>c</b>   | : Kohezyon  |
| <b>d<sub>c</sub>, d<sub>q</sub>, d<sub>γ</sub></b> | : Derinlik faktörleri   |
| <b>[D]</b>   | : Elastikiyet matrisi   |
| <b>{d}</b>   | : Sistem yer değiştirme vektörü                                       |
| <b>{δ}</b>   | : eleman içindeki herhangi bir noktadaki yer değiştirme bileşenlerini |
| <b>{d}<sub>e</sub></b>                             | : Elemanın düğümdeki yer değiştirmeleri                               |
| <b>E</b>   | : Elastikiyet modülü  |
| <b>e</b>   | : Boşluk oranı  |
| <b>{f}</b>   | : Eleman dış yük vektörü  |
| <b>S<sub>c</sub>, S<sub>q</sub>, S<sub>γ</sub></b> | : Temel şekil faktörleri  |
| <b>g<sub>c</sub>, g<sub>q</sub>, g<sub>γ</sub></b> | : Zemin eğim faktörleri   |
| <b>i<sub>c</sub>, i<sub>q</sub>, i<sub>γ</sub></b> | : Yük eğim faktörleri   |
| <b>N<sub>c</sub>, N<sub>q</sub>, N<sub>γ</sub></b> | : Taşıma gücü katsayıları   |
| <b>q<sub>u</sub></b>                               | : Nihai taşıma gücü   |
| <b>φ</b>   | : Zemin kayma direnci açısı   |
| <b>γ</b>   | : Zemin birim hacim ağırlığı  |
| <b>ψ</b>   | : Zemin dilatans açısı  |
| <b>v</b>   | : Poisson oranı   |
| <b>σ</b>   | : Normal gerilme  |

$u_a$  : Boşluk hava basıncı

$u_w$  : Boşluk su basıncı

$\sigma - u_a$  : Net gerilme

$\sigma - u_w$  : Efektif gerilme



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

|  |    |
|--|----|
| <b>Tablo 5.1.</b> Terzaghi'nin taşıma gücü katsayıları (Das ve Sobhan, 1990). .....  | 18 |
| <b>Tablo 6.1.</b> Zemin katmanının malzeme özellikleri.....  | 29 |
| <b>Tablo 6.2.</b> Betonun malzeme özellikleri.....   | 30 |
| <b>Tablo 7.1.</b> Aşırı b.s.b. değerlerindeki değişim. ....  | 36 |
| <b>Tablo 7.2.</b> Aşırı b.s.b. değerlerindeki değişim. ....  | 39 |
| <b>Tablo 7.3.</b> Aşırı b.s.b. değerlerindeki değişim .....  | 42 |
| <b>Tablo 7.4.</b> Farklı doygunluk ve yer altı su seviyelerinde, güvenlik faktörü sonrası artımlı yer değiştirmeler (m). ..... | 46 |
| <b>Tablo 7.5.</b> Farklı yeraltı su seviyeleri ile emniyet faktörü. ....   | 47 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|  |    |
|--|----|
| Şekil 2.1. Kılcal gerilme etkisi ile $\phi$ değerlerine bağlı kohezyon bileşeni (Fredlund ve Rahardjo, 1993). ....                             | 5  |
| Şekil 2.2. Zeminin kılcal gerilme değeri ile temel taşıma gücü arasındaki ilişki (Fredlund & Rahardjo, 1993). ....                             | 6  |
| Şekil 3.1. Kurak ve yarı kurak bölgelerdeki doymun olmayan zemin profili (Rasool, 2014). ....  | 10 |
| Şekil 3.2. Sürekli hava fazı içeren bir doymun olmayan zemin elemanı (Fredlund ve Rahardjo, 1993). ....  | 10 |
| Şekil 3.4. Doymun olmayan zeminde dört evreli blok diyagram (Fredlund ve diğ., Özocak, 2003). ....   | 12 |
| Şekil 3.5. DOZ kübik elemanı üzerindeki normal ve kayma gerilmeleri: net normal gerilme ve kılcal gerilme tensörleri (Likos ve Lu, 2004). .... | 13 |
| Şekil 3.6. DOZ de gerilme durum değişkenleri matris formu (Likos & Lu, 2004). ..   | 14 |
| Şekil 4.1. Üst yapı-temel zemini-temel sistemi etkileşimi (Uzuner, 1990). ....   | 15 |
| Şekil 5.1. Pürüzlü, sert, sürekli (şerit) temel altında taşıma gücü yenilmesi (Das ve Sivakugan, 2018). ....                                   | 17 |
| Şekil 5.2. Temel tabanı şekil katsayıları (Kumbasar ve Kip, 1999). ....  | 18 |
| Şekil 6.1. Sürekli bir sistemin sonlu elemanlara ve düğümlere bölünmesi .....  | 21 |
| Şekil 6.2. Çeşitli FEM elemanları (Logan, 2022). ....  | 22 |
| Şekil 6.3. Zemin ve model temel geometrik modeli. ....   | 28 |
| Şekil 6.4. Plaxis 2D kullanarak oluşturulan ağ. ....   | 29 |
| Şekil 6.9. Şerit temel ve zemin kesiti (YASS yok). ....  | 31 |
| Şekil 6.10. Zemin durumu ve doymunluk. ....  | 32 |
| Şekil 7.1. $S_r = 99\%$ 'da şerit temel için toplam yer değiştirme. ....   | 34 |
| Şekil 7.2. $S_r = 50\%$ 'da şerit temel için toplam yer değiştirme. ....   | 34 |
| Şekil 7.3. Doymunluk ile (0,10) düğümünde yer değiştirme ilişkisi. ....  | 34 |
| Şekil 7.4. $S_r = 99\%$ için aşırı b.s.b. dağılımı (YASS yok). ....  | 35 |
| Şekil 7.5. $S_r = 50\%$ için aşırı b.s.b. dağılımı (YASS yok). ....  | 36 |
| Şekil 7.6. $S_r = 99\%$ 'da şerit temel için toplam yer değiştirme. ....   | 37 |
| Şekil 7.7. $S_r = 50\%$ 'da şerit temel için toplam yer değiştirme. ....   | 37 |
| Şekil 7.8. Doymunluk ile (0,10) düğümünde yer değiştirme ilişkisi. ....  | 38 |
| Şekil 7.9. $S_r = 99\%$ için aşırı b.s.b. dağılımı. ....   | 39 |
| Şekil 7.10. $S_r = 50\%$ için aşırı b.s.b. dağılımı. ....  | 39 |
| Şekil 7.11. $S_r = 99\%$ 'da şerit temel için toplam yer değiştirme. ....  | 40 |
| Şekil 7.12. $S_r = 50\%$ 'da şerit temel için toplam yer değiştirme. ....  | 40 |
| Şekil 7.13. Doymunluk ile (0,10) düğümünde yer değiştirme ilişkisi. ....   | 41 |
| Şekil 7.14. $S_r = 99\%$ için aşırı b.s.b. dağılımı. ....  | 41 |
| Şekil 7.15. $S_r = 50\%$ için aşırı b.s.b. dağılımı. ....  | 42 |
| Şekil 7.16. Tam doymunlukta şerit temel için toplam yer değiştirme. ....   | 43 |
| Şekil 7.17. Doymunluk derecesi ile yer değiştirme ilişkisi. ....   | 43 |
| Şekil 7.18. Tam doymunlukta aşırı b.s.b. dağılımı. ....  | 44 |

**Şekil 7.19.** Farklı yer altı su seviyeleri altında şerit temel için yer değiştirmeler  
a)Drenajsız durum b)Drenajlı durum. .... 45  
**Şekil 7.20.** Farklı yeraltı su seviyeleri ile güvenlik faktörü. .... 48



## DOYGUN OLMAYAN ZEMİNLERE OTURAN YÜZEYSEL TEMELLERİN TAŞIMA KAPASİTESİNİN ANALİTİK VE SAYISAL ANALİZ YÖNTEMLERİYLE BELİRLENMESİ

### ÖZET

Bir temelinin taşıma kapasitesi, yapıların stabilitesi ve güvenliğini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Ancak, doygun olmayan zeminler üzerinde yer alan temeller, bu tür zeminlerin karmaşık davranışları nedeniyle ayrıca değerlendirilmelidir. Araştırmacılar, bu temellerin taşıma kapasitesini belirlemek amacıyla analitik ve sayısal analiz yöntemleri geliştirmişlerdir. Bu yöntemler, doygun olmayan zeminlerin davranışlarına dair parametreler sağlayarak daha güvenilir tasarıma yardımcı olur. Bu çalışmada, doygun olmayan zeminler üzerinde yer alan sığ temellerin taşıma kapasitesini belirlemek için analitik ve sayısal yöntemleri incelenmiştir. Tez kapsamında bahsedilen yöntemlerin avantaj ve dezavantajları değerlendirilerek doygun olmayan zeminler üzerine inşa edilen yapıların güvenliğini ve uzun ömürlülüğünü sağlamadaki rollerini irdelemeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, bu çalışmada Plaxis 2D'yi kullanarak, uniform zemin tabakaları üzerindeki şerit temellerin taşıma kapasitelerini analiz edilmiştir. Oturma ve yer değiştirme gibi hususlar da bu araştırmanın ayrılmaz bir parçasıdır ve farklı doygunluk seviyelerinde, farklı koşullar altında temel davranışının anlaşılabilirliğini artırmaktadır.

Kentsel nüfuslar genişledikçe inşaat yapılarına talebi önemli ölçüde artmıştır. Köprüler, kuleler ve barajlar, modern dünyamızı sürdürmek için gereken yaşamsal altyapı örneklerinden sadece birkaçıdır. Ancak, göz ardı edilmemesi gereken kritik bir unsur vardır: Yapı temeli. Uygun bir temel olmadan, bu yapılar çökme ve başarısızlık riski taşır. Temellerin titizlikle tasarlanması ve inşa edilmesi gerekir ki, bunlar yapılarımızın güvenliğini ve dayanıklılığını sağlamak için esastır.

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEM), matematiksel ifadelerle tanımlanan sürekli sistemleri çözmek için etkili bir tekniktir. SEM, sürekli sistemleri düğümlerle birbirine bağlı sınırlı sayıda bileşene veya elemanlara bölerek başarır. Dolayısıyla, sistem bu sonlu elemanlara bölünür ve her eleman için denklemler türetilir. Bu bireysel denklemler daha sonra sistem seviyesinde denklemler oluşturmak için birleştirilir. Bu yaklaşım, sürekli bir alana uygulanan orijinal diferansiyel denklemleri, yönetilebilir bir dizi doğrusal denkleme indirger.

Bu çalışmada, Plaxis 2D kapsamında 15 düğümlü elemanlar kullanılarak sayısal analizler yapılmıştır. Plaxis 2D, iki boyutlu geoteknik problemleri modellemek için tasarlanmış ileri bir yazılım aracıdır ve hem statik hem de dinamik analizleri destekler. Yazılımın doğrusal olmayan zemin malzeme modellerini kullanması, zemin içerisindeki herhangi bir noktada gerilme-deformasyon değerlerinin doğru bir şekilde belirlenmesini sağlar. Yazılımın zemin-yapı etkileşimini modelleme yeteneği, temel tasarımı ve inşaatı için kritik öneme sahiptir ve mühendislerin zeminlerin yük

taşıma kapasitelerini değerlendirmelerine, taşıma kapasitesini belirlemelerine ve yapıların güvenli tasarımıını sağlamalarına olanak tanır.



## **Determination of the Bearing Capacity of Shallow Foundations Sitting on Unsaturated Soils Using Analytical and Numerical Analysis Methods**

### **SUMMARY**

The bearing capacity of a foundation is crucial for ensuring the stability and safety of structures. However, shallow foundations on unsaturated soils pose challenges due to the complicated behavior of such soils. To address this issue, engineers have developed analytical and numerical methods of analysis, which can be used to determine the bearing capacity of these foundations. These methods provide valuable insights into the behavior of unsaturated soils and help design more dependable foundations. This research uses these analytical and numerical methods to determine the bearing capacity of shallow foundations on unsaturated soils. This study explores the advantages and disadvantages of these methods, offering a thorough understanding of their role in ensuring the safety and longevity of structures built on unsaturated soil. Furthermore, this study employed Plaxis 2D to analyze the bearing capacities of strip foundations on uniform soil strata. Considerations of settlement and displacement are also integral to this research, enhancing the understanding of foundation behavior under different conditions and different global level with different values in saturation.

As urban populations expand and the global population surpasses 8 billion, the demand for civil structures has increased significantly. Bridges, towers, and dams are just a few examples of the vital infrastructure required to sustain our modern world. However, one crucial element that cannot be overlooked is the foundation. Without a sturdy foundation, these structures risk collapse and failure. It is imperative that foundations are meticulously designed and constructed, as they are essential for ensuring the safety and durability of our built environment.

Unsaturated soil (UNS) mechanics is commonly considered a part of saturated soil mechanics, and saturated soil parameters are preferred in calculations. After many studies in the 1960s, the results found a big difference between saturated and unsaturated soils, if the soil has more than 98% voids filled with water and when the air bubbles are not directly connected, they are called saturated soil. If the volume is 95% or less, the soil loses its saturated characteristics, and as a result, it is referred to as unsaturated soil [9]. UNS commonly are assumed to be three stages. However, after many studies, the results have discovered a very thick layer formed between water and air, called the water-air interface. When conducting tests on the mass-volume relationships of UNS, the water-air interface is typically disregarded due to its minimal volume.

Engineers used to design projects based on bearing capacity until the 1950s. They stated that if the bearing capacity is sufficient, the foundation will not settle.

However, Hough emphasized the need to consider both aspects together. In the design of engineering structures, the settlement rate is as important as the settlement amount. Especially in cases of excessive settlements, structural and/or non-structural damage may occur in situations where settlement is rapid or even if settlement is not rapid. Settlement ( $S_t$ ) has three components: immediate settlement (distortion settlement) ( $S_i$ ), consolidation settlement (time-dependent) ( $S_c$ ), and secondary settlement (time-dependent) ( $S_s$ )

Researchers have identified three types of bearing capacity settlements (failures): general shear settlement, punching shear settlement and regional (partial, local). When it comes to shallow foundations, understanding bearing capacity is crucial. Fortunately, over time, experts like Terzaghi have developed theories and solutions for various load conditions, including the widely used theories: Meyerhof (1951), Brinch Hansen (1961), and Vesic (1975). However, continued research, particularly into the behavior of unsaturated soils and advanced simulation tools like Plaxis, is essential for further advancements in geotechnical engineering.

Both theoretical and empirical, are employed to investigate the behavior of soil. These approaches continuously evolve to simplify the intricate nature of the soil and its behavioral characteristics. However, With the emergence of computer and software technologies, numerical methods have become a valuable tool in solving geotechnical problems by offering more realistic and efficient solutions, similar to other engineering challenges. In these methods, differential equations describe the behavior of physical systems, which are analyzed through numerical techniques.

The Finite Element Method (FEM) is an effective technique for solving continuous systems described by mathematical expressions. FEM achieves this by breaking down continuous systems into a finite number of interconnected components, or elements, linked by nodes. Consequently, the system is partitioned into these finite elements, and equations are derived for each element. These individual equations are then combined to form system-level equations. This approach simplifies the original differential equations, which apply to a continuous domain, into a manageable set of linear equations.

This study employed Plaxis 2D version 24.01.00.1060, utilizing 15-node elements for numerical analysis. Plaxis 2D is an advanced software tool designed for modeling two-dimensional geotechnical problems, supporting both static and dynamic analyses. Its use of non-linear soil material models allows for the accurate determination of stress-deformation values at any point within the soil.

Plaxis 2D is recognized globally as a premier tool for stress-strain analysis, particularly in understanding how soil materials respond under various loading conditions and different saturation levels. The software's capability to model soil-structure interaction is crucial for foundation design and construction, allowing engineers to assess the load-bearing capabilities of soils, determine bearing capacity, and ensure the safe design of structures.

Determining the initial stresses is crucial in geotechnical engineering finite element analyses to approximate natural conditions. The initial stress represents the undisturbed soil's equilibrium state under its self-weight. Plaxis 2D offers different methods to determine initial stress based on the problem's characteristics. The  $K_0$  procedure is appropriate when the ground surface, ground layers, and groundwater level are all parallel and horizontal. The gravity loading method determines initial stress in cases where the  $K_0$  Procedure's idealized assumptions do not apply, such as

non-horizontal ground surfaces, non-parallel ground layers, or non-conforming groundwater levels. The gravity loading method is used when the ground surface has slopes, inclinations, or non-horizontal features or when ground layers and groundwater levels deviate from parallelism to accurately account for real-world conditions in finite element analyses.

The load-bearing capacity of the strip foundation was determined by modeling the soil and the foundation in Plaxis 2D. Initially, the stress causing failure in a saturated condition was investigated, and a load of 100 kN/m<sup>2</sup> was selected for all models to ensure comparability of the results. The model was then subjected to the load using the parameters discussed earlier. However, it is essential to note that the results obtained from the Plaxis 2D model differed from those obtained from the experimental modeling test. This chapter will discuss the results from the fourth model. In each model, the difference between the results for the displacement and the pore pressure  $P_{\text{excess}}$  was observed.

In this study, the aim is to determine the bearing capacity of shallow foundations located on an unsaturated soil layer. The analyses conducted using Plaxis 2D software aim to achieve the following points:

Evaluate the behavior of unsaturated soils. Accurately estimate the bearing capacity of shallow foundations resting on unsaturated soils. Examine the behavior of unsaturated soil in sections with different groundwater levels and analyze the effects of the water level on the soil and displacement. Additionally, examine the changes in soil with different degrees of saturation (from 0.99 to 0.50) and the changes in displacement and pore water pressure.



## 1. GİRİŞ

Dünyadaki nüfus artışı ve konfor talebi sonucu daha fazla altyapı çalışmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Köprüler, kuleler ve barajlar, sürdürülebilirlik için gereken hayati altyapı örneklerinden sadece birkaçıdır. Ancak, göz ardı edilemeyecek bir temel unsur vardır: Yapı temeli. Güvenli bir temeli olmayan yapılar çeşitli yenilme riskleri taşır. Temel, yapıdan gelen gerilmeleri zemine aktarmada kritik bir rol oynar. Güvenlik ve uzun ömürlülük sağlamak için temel bileşenlerin dikkatle tasarlanması ve inşa edilmesi gereklidir.

Zemin Mekaniği/Geoteknik, İnşaat Mühendislerinin ana çalışma konularından biridir. Geleneksel zemin mekaniği hala doymuş zeminlere odaklanmış olsa da, günümüzde ilgili kesitlerde doymuş olmayan zeminlerin davranışını göz önüne almanın gerekliliği anlaşılmıştır. Doymuş olmayan zeminler, karmaşık davranışları nedeniyle kaçınılmaz istense de bu tür zeminlerin üzerlerine inşa edilecek yapılar için güvenilir ve ekonomik temeller tasarlamak da esastır. Doymuş olmayan zeminlerin özelliklerini ve davranışlarını belirleyerek, bu tür zeminler üzerine oturan sığ temellerin taşıma kapasitesini daha doğru belirlemek için analitik ve sayısal analiz yöntemleri kullanılabilir. Özellikle kurak ve yarı kurak iklimlerde bu durum daha da güncel olmaktadır.

Doymuş olmayan zeminler, gözeneklerinde hem hava hem de sıvı fazları içerir ve mekanik özellikleri ile zemin-yapı etkileşim davranışları, kılcal gerilme ( $u_a - u_w$ ) ve net normal gerilme ( $\sigma_n - u_a$ ) tarafından etkilenir. Kılcal gerilme, boşluk hava basıncı ( $u_a$ ) ile boşluk su basıncı ( $u_w$ ) arasındaki farktır. Net normal gerilme ise uygulanan normal gerilme ( $\sigma_n$ ) ile boşluk hava basıncı ( $u_a$ ) arasındaki fark olarak ifade edilir.

Temel tasarımı, iki kritik görevi içerir. Birincisi yenilme olmadan taşıyabileceği en büyük gerilmeyi içeren temel taşıma gücü, ikincisi ise yapının görevini etkilemeden tolere edebileceği oturma miktarı olarak değerlendirilmelidir. Uygun temel tasarımı, herhangi bir yapının ömrü ve güvenliği için esastır ve tasarım süreci sırasında tüm ilgili faktörlerin dikkate alınması zorunludur.

## 1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmada, doymun olmayan zemin tabakası üzerinde yer alan sığ temellerin taşıma kapasitesinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Plaxis 2D yazılımı kullanılarak yapılan analizler ile aşağıda sıralanan noktalar hedeflenmiştir.

Doymun olmayan zeminlerin davranışını değerlendirmek.

Doymun olmayan zeminler üzerine oturan sığ temellerin taşıma kapasitesini gerçeğe yakın bir şekilde tahmin edebilmek.

Farklı yeraltı su seviyesine sahip kesitlerde doymun olmayan zeminin davranışını, su seviyesinin zemin ve yer değiştirme üzerindeki etkisini incelemek. Ayrıca, zeminin farklı doymunluk derecelerinde (0,99'dan 0,50'ye kadar) ve yer değiştirme ile boşluk su basıncındaki değişimi incelemek.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. Ampirik Çalışmalar

Bir sığ temelin tasarımı iki kriterin sağlanmasını gerektirir. İlk kriter, temelin altındaki zeminin nihai taşıma kapasitesidir ki, bu da yenilme yaşanmadan önce dayanabileceği maksimum gerilmedir. İkinci kriter, temel için izin verilebilen oturma miktarıdır.

Sığ temellerin taşıma kapasitesine ilişkin literatürün önemli bir kısmı, doymuş zeminler için Terzaghi'nin taşıma kapasitesi teorisi üzerine kuruludur. Ancak, bu yöntem, sığ temellerin genellikle doymuş olmayan zemin tabakaları üzerine inşa edilmesi nedeniyle, tasarımlar için muhafazakâr ve maliyetli olma eğilimindedir. Bu nedenle, son yıllarda bazı araştırmacılar, doymuş olmayan zeminler üzerindeki temellerin taşıma kapasitesini belirleme ve tahmin etme konusuna ilgi göstermektedir (Yılmazoğlu ve Özocak, 2023). Literatürde kabul edilen başlıca çalışmalar aşağıdaki paragraflarda özetlenmiştir.

Button (1953), iki katmandan oluşan kohezyonlu zeminler üzerine oturan silindirik temellerin kapasitesini inceleyen bir çalışma yürütmüştür. Katmanları güçlü ve zayıf olarak modelleyerek, kapasite değerinin belirlenmesini etkileyen farklı faktörleri değerlendirmiştir. Araştırma, Terzaghi ve Peck yöntemleri gibi standart yöntemler kullanılarak hesaplanan taşıma gücü değerleri için çeşitli formüller ve karşılaştırmalar sunmuştur; bu yöntemler doymuş zeminlerde temel taşıma gücü değerini belirlemek için kullanılmaktadır. Çalışma, her iki doymuş olmayan zemin katmanının ortalamasını alan eşdeğer analizler yoluyla silindirik temellerin taşıma gücü değerini hesaplamaktadır (Button, 1953).

Broms (1963), araştırmasında esnek kaplamalarda doymuşluk derecesinin taşıma gücü üzerindeki etkisini incelemiştir. Doymuş olmayan zeminler üzerinde esnek kaplamaların kapasitesini değerlendirmek için bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem, göçmenin tamamen doymuş alt zemin katmanında gerçekleştiğini varsaymıştır. Taşıma gücü, doymuşluk derecesi, görünür kohezyon ve kayma direnci açısının bir

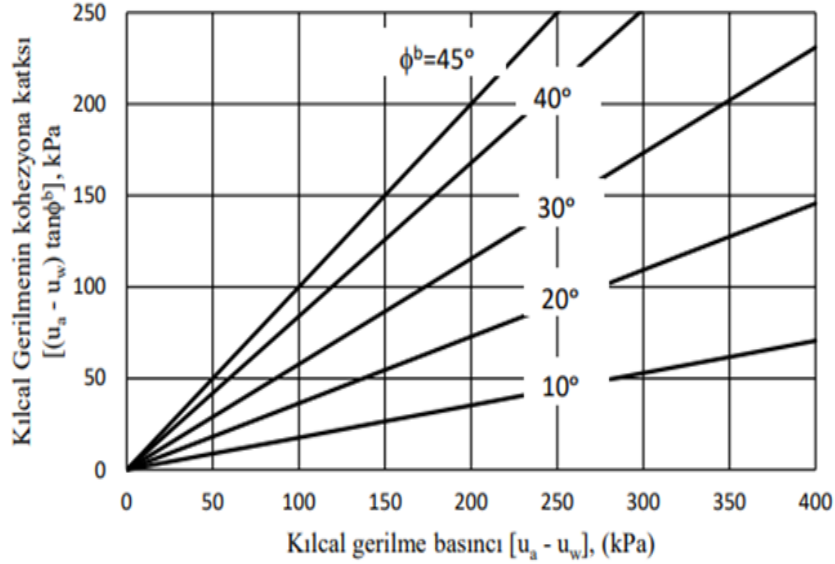
fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir. Broms, doyunluk derecesinin kaplama taşıma gücü değeri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu tespit etmiştir. Doygunluk derecesinin %100'den %90'a düşmesi, silt ve kil zeminlerde taşıma gücü değerini sırasıyla yaklaşık %2 ve %8 artırmıştır. Bu durum, doyunluk derecesindeki bir artış nedeniyle ince daneli zeminler üzerine oturan temellerin taşıma gücü değeri azalma olduğunu göstermektedir. Çalışma ayrıca, doyunluk derecesinin, granüler zeminlere kıyasla kohezyonlu zeminlerde asfalt betonunun taşıma gücü üzerinde daha belirgin bir etkisi olduğunu ortaya koymuştur (Broms, 1963).

1987 yılında, Steensen-Bach ve diğ. Hem doyun hem de doyun olmayan koşullarda iki tür kum üzerindeki sığ temellerin taşıma gücü üzerine bir araştırma yapmışlardır. Temelin altındaki zemin tabakalarının kılcal gerilme değerlerini ölçmek için tansiyometreler kullanmış ve laboratuvar koşullarında SWC eğrileri oluşturmuşlardır. Bulguları, doyun olmayan kum üzerindeki temelin taşıma gücünün, genellikle aynı zemin altında doyun koşullara göre 4 ila 6 kat daha yüksek olduğunu göstermiştir. Farklı özelliklere sahip kumlar üzerinde yapılan model test sonuçlarına dayanarak, zemindeki kılcal gerilmenin önemli olduğunu ve dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varmışlardır (Steensen-Bach ve diğ. , 1987).

Gan ve diğ. (1988), modifiye edilmiş bir kesme kutusu test cihazı kullanarak doyun olmayan buzul kili için kayma direnci parametrelerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Doyun olmayan zeminlerde kayma direnci parametrelerini belirlemek için kullanılan çeşitli yöntemleri tartışmış ve modifiye edilmiş kesme kutusu test cihazının uygun bir yöntem olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, kılcal gerilme değerini kontrol etmenin kritik önemini vurgulamışlardır (Gan ve diğ., 1988).

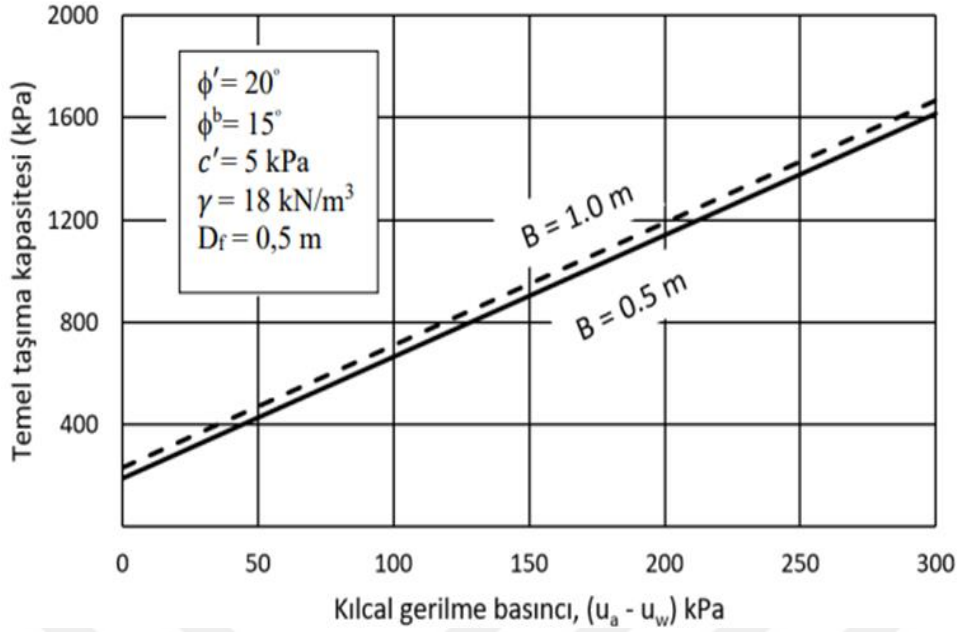
1993'te Fredlund ve Rahardjo, geleneksel kayma direnci denklemini genişleterek doyun olmayan zeminler için bir denklem önermişlerdir. Görünür kohezyon teriminde kılcal gerilme etkisini dahil etmişler ve böylece toplam gerilme yaklaşımını genişletmişlerdir. Kohezyonun, efektif kohezyon ve kılcal gerilmenin ( $u_a - u_w$ ) katkısı olan bileşenle birlikte iki bileşenden oluştuğunu açıklamışlardır. Kılcal gerilmenin katkısının büyüklüğü, toplam gerilme yaklaşımında ek bir kohezyon bileşeni olarak kabul edilmiştir. Efektif kohezyon değerine kılcal gerilmeden kaynaklanan bileşenini ekleyerek doyun olmayan zeminler için

geleneksel kayma direnci teorisini genişletmişlerdir. Kohezyondaki bu artış, kılcal gerilme etkisinden kaynaklanmakta olup,  $\phi^b$  değeri ile temsil edilmiştir (Şekil 2.1) (Fredlund ve Rahardjo, 1993).



**Şekil 2.1.** Kılcal gerilme etkisi ile  $\phi^b$  değerlerine bağlı kohezyon bileşeni (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Kil zemine gömülü bir kare temelin nihai taşıma gücü değeri üzerinde kılcal gerilmenin etkisini değerlendirmek amacıyla teorik bir çalışma yapılmıştır. İnce daneli zeminin drenajsız kayma direncine eşit miktarda kılcal gerilme uygulandığında, temelin taşıma kapasitesinin %27 arttığı bulunmuştur. Ayrıca, deneyler yoluyla zeminin kılcal gerilme değerleri ile temelin taşıma kapasitesi arasında bir korelasyon olduğu sonucuna varılmıştır. Bu ilişki, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi sunulmuştur (Fredlund & Rahardjo, 1993).



**Şekil 2.2.** Zeminin kılcak gerilme değeri ile temel taşıma gücü arasındaki ilişki (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Sığ temellerin taşıma gücünü hesaplamak için ampirik denklemler de kullanılmaktadır. Sığ temeller için temel denklem, ilk olarak 1948'de Terzaghi tarafından nihai taşıma gücü değerini belirlemek için türetilmiştir. Terzaghi, temelin genişliği B'nin, temelin derinliği D<sub>f</sub>'ye eşit veya daha az olduğu durumda bir temeli sığ olarak kabul etmiştir. Meyerhof, Hansen ve Vesic modelleri dahil olmak üzere birçok model bu genel bir taşıma gücü denklemi üzerinden ilerlemiştir.. Her model, şekil, derinlik ve eğim faktörleri gibi düzeltme katsayıları içeren farklı bir tanım içermektedir. Bu nedenle, çeşitli modeller kullanmak farklı taşıma gücü değerleri sağlayacaktır. Farklı modeller, sayısal analiz veya gerçek saha sonuçları kullanılarak değerlendirilebilir. Çoğu araştırma, Terzaghi modelinin en muhafazakâr olduğunu öne sürmektedir. Ancak, Hansen ve Vesic modellerinin, tasarım kriterlerinde daha fazla faktörü dikkate aldıkları için, şekil faktörü, derinlik faktörü ve eğim faktörü gibi, daha güvenilir olduğuna inanılmaktadır.

Temellerin ana işlevi, bir yapının yükünü geniş bir temel alanına güvenli bir şekilde aktarmaktır. Temel, yapısal yükleri güvenle taşıyacak şekilde tasarlanmalı, temel zemininde olası bir yenilme önlemeli ve yapının izin verilebilir sınırlar dışında oturmaya maruz kalması önlenmelidir. Temeller için geleneksel tasarım yöntemleri, taşıma gücü ilkesine dayanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, temel/zemin kesitini

modellemek ve taşıma gücü değeri ile deformasyonları hesaplamak için yaygın olarak kullanılan bir sayısal çözüm tekniğidir. Bu yaklaşım, süreklilik, homojenlik ve izotropiktik olmak üzere üç temel varsayıma dayanır. Ancak, zemin daneler ve boşluklardan oluştuğu için, mekanik davranışı doğal olarak süreksiz, heterojen ve anizotropiktir.

## 2.2. Sayısal Çalışmalar

Son yıllarda, iyileştirilmiş zeminler, temellerin taşıma gücünü artırmak ve oturma büyüklüğünü azaltmak için sık kullanılan bir yöntem haline gelmiştir. Zidan ve diğ. (2012), dairesel bir temel üniform statik basınca maruz kaldığında, nihai taşıma kapasitesindeki iyileşmenin, iyileştirilmiş katman sayısı arttıkça arttığını bulmuşlardır. İyileştirilmiş kesitin etkinliği büyük ölçüde en üst katmanın derinliğine bağlıdır ve bu derinlik, temelin genişliğinin 0,19 katı olmalıdır. İlk katmanın derinliği temelin genişliğinin yarısı olduğunda, güçlendirme neredeyse hiç etki göstermemektedir (Zidan ve diğ., 2012).

Manavirad ve Noorzad (2014) tarafından yürütülen çalışma, Plaxis 3D programını kullanarak yumuşak kil yüzeyinde bulunan iki yakın şerit temel üzerinde geotekstil kombinasyonlarının etkisini araştırmayı amaçlamıştır. Bulgular, takviye katmanlarının sayısı arttıkça ve takviyeler belirli bir avantajlı derinlik seviyesi çevresinde yerleştirildiği sürece, şerit temellerin yük taşıma kapasitesinin arttığını göstermiştir (Noorzad & Manavirad, 2014).

Benmebarek ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmaya göre, sığ temellerin taşıma kapasitesini artırmak için sayısal bir işlem gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, güçlendirilmiş kum yatağı üzerine bir şerit temel yerleştirilmesini ve geotekstil uçlarını tamamen kaplayan yatay bir katman eklenmesini içermiştir. Yapılan çözümler taşıma gücü değerinin önemli ölçüde arttığını ve güçlendirilmiş kum yatağı mekanizması inşa etmek için gerekli alanın azaldığını tespit etmiştir. (Benmebarek ve diğ., 2018).

Zidan ve Mohamed (2019) tarafından yapılan bir çalışmaya göre, Plaxis 2D V8.6 programının kullanımı geogrid ile hem donatılandırılmış hem de donatılandırılmamış kumlu zeminde, temeller arası mesafenin temel genişliğinin iki katından az olduğunda, bitişik temeller arasındaki etkileşim önemsiz olduğunu göstermiştir.

Nihai taşıma gücündeki iyileşme, zeminin kayma direnci açısına, genişleme açısına ve donatı katman sayısına bağlıdır (Zidan & Mohamed, 2019).

Abu El-Soud ve Belal (2019) tarafından yürütülen araştırma, geosentetikler ile iyileştirilen kumların üzerine yerleştirilen şerit temellerin taşıma gücü üzerinde önemli bir etkisi olabileceğini ve yük-şekil değiştirme davranışını iyileştirebileceğini göstermiştir. Taşıma gücü ve oturma için, sırasıyla şerit temelin altına üç ve dört geozgara katmanının kullanılması tavsiye edilmektedir. Çalışmaya göre, taşıma gücü oranı ile güçlendirilmiş katmanlarının miktarı arasında doğru orantılı bir ilişki vardır. Ancak, taban genişliği ile mobilize olan taşıma gücü oranı arasında ters orantılı bir ilişki belirlenmiştir (Abu El-Soud ve Belal, 2019).

Azzam ve Nasr (2015), model test sonuçlarının doğruluğunu sağlamak için sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmişlerdir. Deneysel araştırmalarının sonuçları, güçlendirilmiş alt tabaka tarafından desteklenen temelin maksimum taşıma gücünün, güçlendirilmemiş alt tabaka tarafından desteklenenden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Ayrıca, bu güçlendirme sonucu yük-oturma eğrileri önemli ölçüde iyileştirilmiştir.

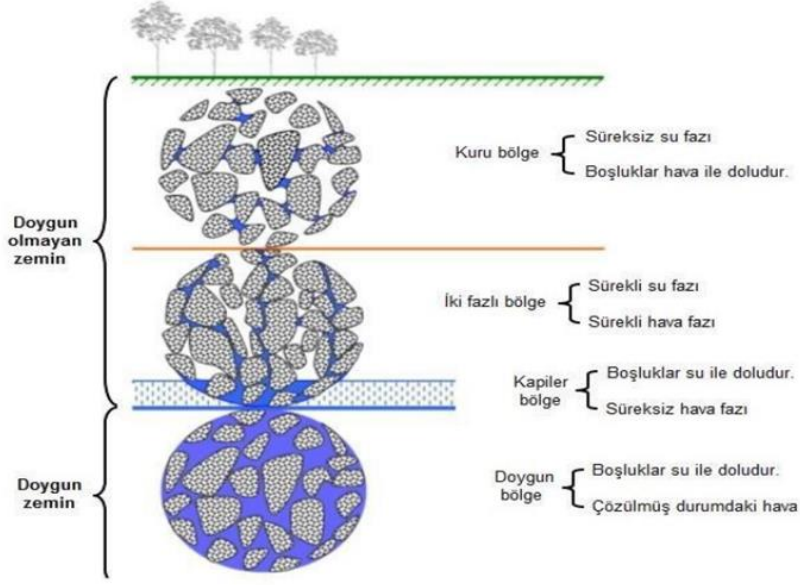
Majedi ve Çelik (2018), sayısal analiz yöntemi yardımı ile nihai temel taşıma gücünün, kohezyon ve katıma direnci açısının yanı sıra temel genişliği ve zemin birim hacim ağırlığı tarafından etkilendiğini göstermiştir. Bu faktörlerden herhangi birinin artırılması, taşıma gücü değerinin artmasına neden olmaktadır (Majedi, Ghalehjough, Akbulut, Çelik, 2018).

### 3. DOYGUN OLMAYAN ZEMİN ÖZELLİKLERİ

Zeminler tamamen suyla dolu boşluklar (doygun zemin) veya hava ve su içeren boşluklar (doygun olmayan zemin DOZ) içerebilir. Zeminlerin mekaniği ilke ve kavramları doygun ve doygun olmayan zeminler için farklılık gösterebilir. Buradaki en önemli etken doygunluktan uzaklaşan zeminlerde beliren emme büyüklüğüdür. DOZ çalışmaları, hacim değişimi ve kayma direnci açısından karmaşık ve belirgin davranış özelliklerine sahiptir. DOZlar ilk olarak 1936 yılında Harvard'da düzenlenen "Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Uluslararası Konferansı'nda tariflenmiştir (Fredlund & Rahardjo, 1993). 1960'ların sonlarında, zemin mekaniğine daha tutarlı bir yaklaşım sağlamak için iki bağımsız gerilme durum değişkeni kullanılmıştır (Fredlund ve diğ. 1978).

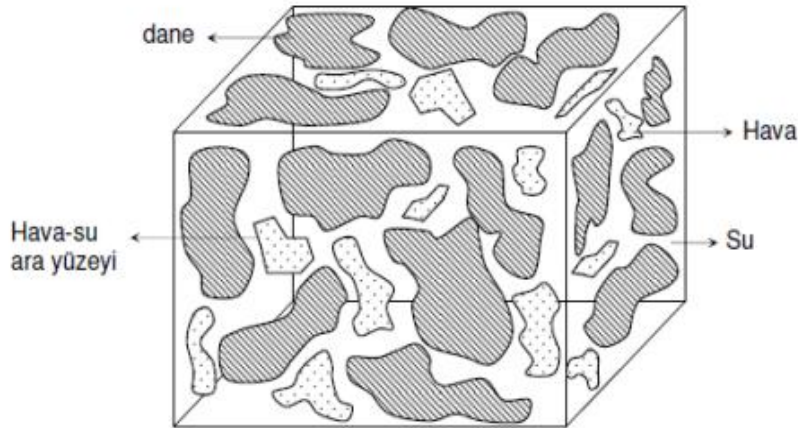
Doygun olmayan zeminlerin mekaniği hala doygun zemin mekaniği ile ikame edilmeye çalışılsa da aralarında çok önemli farklılığın bulunduğu bilinmektedir. Zemin boşluklarının %98'den fazlası suyla doluyorsa ve hava kabarcıkları doğrudan bağlantılı değilse, bu zemin doygun zemin olarak göz önüne alınabilir. Eğer boşluk hacmi %95 veya daha az su içeriyorsa, zemin doygun durumdan uzaklaşmakta olup 'doygun olmayan zemin' olarak adlandırılmalıdır (Önalp, 1997).

DOZ, boşluklarında sıvı ve hava bulunan zemin olarak tanımlanabilir. DOZ, yer altı su seviyesinin üzerinde, kurak ve tropikal bölgelerde bulunabilir, ancak mühendisler tarafından sıkıştırma (kompaksiyon) yoluyla da oluşturulabilir. Dünya topraklarının üçte ikisi kurak ve yarı kurak bölgelerde olduğu için, tam doygunluk koşullarına ulaşmak neredeyse imkansızdır. Bu koşullarda, zeminin yeraltı su seviyesinin, DOZ profillerinin oluşumunda hayati önem taşıdığı göz önünde bulundurulmalıdır (Şekil 3.1) (Hamid, 2005; Rasool, 2014).



**Şekil 3.1.** Kurak ve yarı kurak bölgelerdeki doymun olmayan zemin profili (Rasool, 2014).

Bilindiği gibi iki akışkan arasında ara yüzey oluşur. DOZ ortamında, su ve hava arasında beliren kalın tabakaya su-hava arayüzü denir. DOZ kütle-hacim ilişkileri değerlendirilirken bu su zarı çoğunlukla göz ardı edilir çünkü hacimleri son derece küçüktür. Şekil 3.2, zeminin dört fazlı olduğu varsayılarak oluşturulan zemin diyagramını temsil eder.



**Şekil 3.2.** Sürekli hava fazı içeren bir doymun olmayan zemin elemanı (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Doygun olmayan zemin mekaniğine yapılan en önemli katkılardan biri, 1960'larda Bishop (1959) tarafından yapılmıştır.

1970'lerde, Fredlund ve diğerleri (1978) doygun olmayan zeminler hakkındaki anlayışımızı devrim niteliğinde değiştiren çığır açan bir teori geliştirmişlerdir.

1993 yılında yayımlanan öncü çalışmaları, sadece akademik bir başarı değil, aynı zamanda geoteknik anlayışın dokusunda bir değişimi temsil etmiştir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Nümerik modelleme, DOZ' in davranışını simüle etmek için güçlü bir araç olarak ortaya çıkmıştır ve Van Genuchten modeli, bu başarının başlıca örneklerinden biridir. Geniş çapta kabul gören bu model, DOZ da su akışını ve çözünen madde taşınımını doğru bir şekilde tahmin etmede etkinliğini kanıtlamıştır (Van Genuchten, 1980).

DOZ mekaniği boşluklarında hava içeren ve bunun sonucunda negatif boşluk suyu basıncı/kılcal gerilmeye sahip olan zeminlerin davranışına odaklanır. Zemin-su karakteristik eğrisi ve geçirgenlik fonksiyonu, doygunluk dereceleri, kılcal gerilme ve geçirimsizlik arasındaki ilişkiyi tanımlayan iki temel parametredir. Son yıllarda birçok geoteknik problemle ilgili olması nedeniyle doygun olmayan zemin mekaniği, birçok araştırmacı ve akademisyenin dikkatini çekmiştir. Sürdürülebilir altyapı ve çevre koruma talebinin artması, bu çalışma alanının önemini artırmıştır.

### **3.1. Doygun Olmayan Zeminlerin Gerilme Durum Değişkenleri**

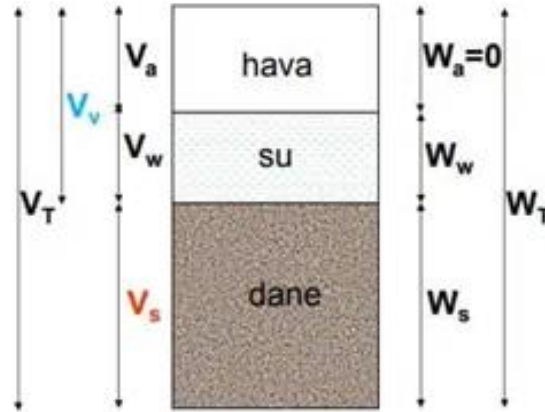
Zemin elemanının gerilme durumu, gerilme durum değişkenleri olarak bilinen belirli değişkenlerin birleştirilmesiyle açıklanabilir. Bu değişkenler, zeminin fiziksel özelliklerinden bağımsızdır ve gerilme durumunu tanımlamak için gereken değişken sayısı, içeren fazların sayısına bağlıdır. Bu değişkenlerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, mühendislerin zemin davranışını öngörmesine ve potansiyel sorunları önceden tespit etmesine yardımcı olur. Bu sayede, inşaat projeleri daha sağlam ve güvenilir temeller üzerine inşa edilebilir (Fredlund ve Rahardjo, 1993).

Efektif gerilme denklemi ( $\sigma' - u_w$ ) doygun zeminin davranışını anlamanın anahtarını sunan temel bir fizik yasasıdır. Basitçe ifade etmek gerekirse, efektif gerilme doygun zeminin hacim değişim süreci ve kayma direnci özelliklerini yöneten hakim parametredir. Kumdan kile ve silte kadar her türlü zemine uygulanabilen bağımsız

bir faktördür. Bu nedenle, efektif gerilme denklemi, zemin mekaniği ve geoteknik mühendislik çalışmalarının vazgeçilmez bir parçasıdır (Fredlund ve diğ., 2013; Özocak, 2003).

DOZ için gerçekçi gerilme durumu değişkenlerini geliştirmek son derece karmaşık ve zorlu bir alandır. Boşluk su basıncı, toplam gerilme ve boşluk hava basıncı gibi ölçülebilir gerilme değişkenlerini içerir. Bu sürecin detaylı açıklamaları, Fredlund ve Rahardjo'nun (1993) ve Lu ve Likos'un (2004) çalışmalarında bulunabilir.

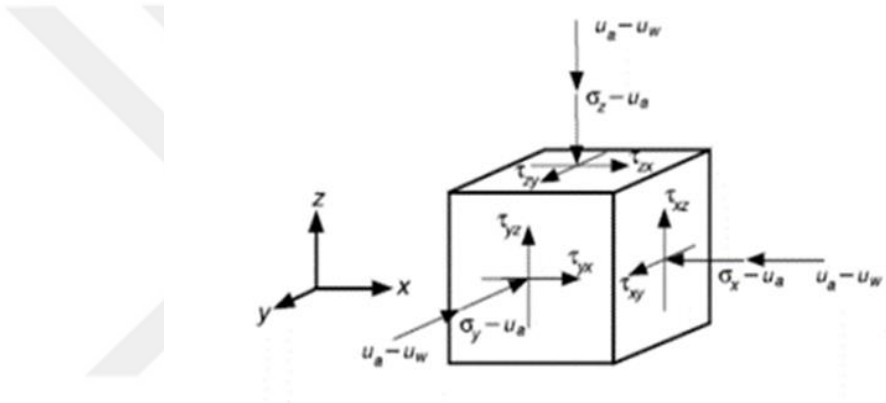
Fredlund ve Morgenstern (1977), doymun olmayan toprakların dört ayrı fazını tanımlamıştır (Şekil 3.4). Bu fazlar, zemin mekaniğinde yaygın olarak kullanılan hava, su ve katı maddelerin geleneksel unsurlarını, hava ile su arasındaki arayüz ile birlikte kapsar. Ayrıca, doymun olmayan zeminlere özgü gerilme durum değişkenlerini tanımlamak için üç kombinasyon önermişlerdir.



**Şekil 3.3.** Doymun olmayan zeminde dört evreli blok diyagramı (Fredlund ve diğ., Özocak, 2003).

DOZ mekaniği sorunlarını formüle etmede en yaygın kabul gören yaklaşım, net normal stres ( $\sigma - u_a$ ) ve kılcal gerilme ( $u_a - u_w$ ) kombinasyonunu içerir. DOZ için hesaplamalar ve deneylerde kullanılan stres durumu değişkenlerinin yanı sıra, sıcaklık ve zaman gibi diğer faktörler de zemin davranışını etkiler (Fredlund ve diğ., 2013).

Bir kübik eleman, DOZ için gerilme dengesi koşullarını ifade edebilir (Şekil 3.5). Newton'un ikinci yasasına göre, her düzlemdeki (yani, x-, y- ve z-düzlemleri) kuvvetler toplanabilir ve zemin elemanına uygulanabilir. DOZ kübik elemanı için bir denge durumu, zeminin dört fazının (hava, su, hava-su arayüzü ve daneler) dengede olduğunu gösterir. Her fazın her yönde bağımsız, doğrusal, sürekli ve örtüşen bir gerilme alanı olarak davrandığı varsayıldığında, bir denge denklemi yazılabilir ve süperpozisyon ilkesi kullanılarak üst üste konulabilir. Ancak, ölçülebilir gerilmelerle yalnızca dengeyi sağlamak mümkün değildir çünkü zemin parçacıkları arasındaki gerilmeler doğrudan ölçülemez.



**Şekil 3.4.** DOZ kübik elemanı üzerindeki normal ve kayma gerilmeleri: net normal gerilme ve kılcal gerilme tensörleri (Likos ve Lu, 2004).

DOZ kübik elemanının denge denklemlerinden türetilen üç bağımsız değişken vardır. Bunlar  $(\sigma_z - u_a)$ ,  $(u_a - u_w)$  ve doymun olmayan koşullarda zemin yapısının dengesini düzenleyen  $(u_a)$ 'dır. Bu değişkenlerin bileşenleri fiziksel olarak ölçülebilir niceliklerdir. Danelerin ve suyun sıkıştırılmaz olduğu varsayıldığında gerilme değişkeni  $(u_a)$  ortadan kaldırılabilir ve sonuç olarak  $(\sigma - u_a)$  ve  $(u_a - u_w)$ , DOZ için gerilme durum değişkenleri olarak adlandırılır. Dolayısıyla, DOZ gerilme durumu, bağımsız fazların denge denkleminde ölçülebilir gerilme tensörlerini sağlayan iki gerilme değişkeni olarak ifade edilebilir (Hemp, 1966). Bu tensörler, kısmi diferansiyel terimler dışında farklı zemin özelliklerine (örneğin, boşluk yapısı) sahip oldukları için tek bir matrise birleştirilemez. Boşluk yapısı zeminin gerilme durumuna dahil edilmediğinden, doymun olmayan bir zeminde bir noktada etki eden iki bağımsız tensör gösterilmelidir (Şekil 3.6).

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - u_a & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - u_a & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - u_a \end{bmatrix}$$

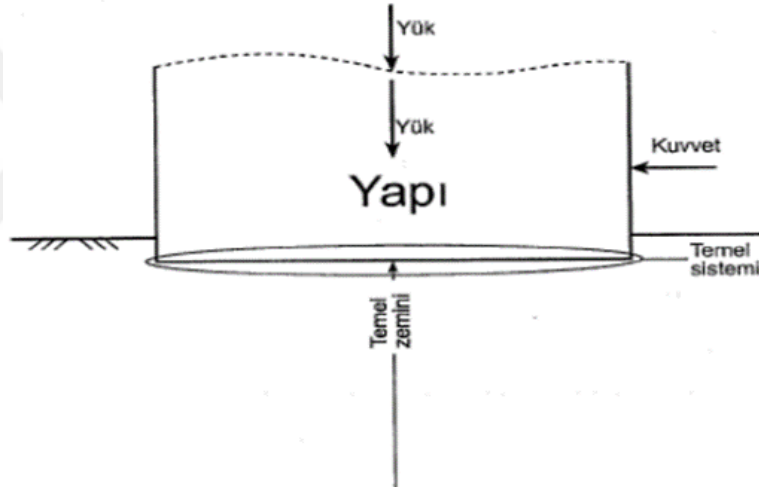
$$\begin{bmatrix} u_a - u_w & 0 & 0 \\ 0 & u_a - u_w & 0 \\ 0 & 0 & u_a - u_w \end{bmatrix}$$

**Şekil 3.5.** DOZ de gerilme durum değişkenleri matris formu (Likos & Lu, 2004).



#### 4. TEMEL TAŞIMA GÜCÜ

Temeller yapı yüklerini zemine aktaran elemanlardır. Yapı yükleri çok fazla değil ve temel yakınındaki kesitin özellikleri nitelikli ise genellikle tekil, şerit veya yayılı temeller gibi yüzeysel temeller yeterli olabilir. Yapı yüklerinin yüksek olması veya zemin özelliklerinin düşük kalması durumunda ise derin temeller gerekli olabilir. Temel tipini seçerken taban gerilmesi ve zemin özelliklerini göz önünde bulundurmak esastır.



**Şekil 4.1.** Üst yapı-temel zemini-temel sistemi etkileşimi (Uzuner, 1990).

Temel taşıma gücü için ilk Terzaghi (Terzaghi, 1943) teorik bir teorik bir çözümler geliştirmiştir. Sonrasında ise Meyerhof (1951), Brinch Hansen (Hansen, (1961) ve Vesic (Vesic, (1975)'in çalışmaları bulunmaktadır.

Temel taşıma gücünün belirlenmesinde dört farklı yaklaşım kullanabilir:

- Kayma yüzeyi yöntemi,
- Limit denge yöntemi,
- Limit gerilme yöntemi,
- Sonlu elemanlar yöntemi.

İlk üç yöntem taşıma gücünü bir plastisite sorunu olarak ele alırken, dördüncüsü yüklü ortamda yer değiştirmeleri de hesaplayabilir. Kayma yüzeyi yöntemi kullanılarak, temel yakınındaki kayma gerilmelerini, yükleme sonrası beliren maksimum değerler temsil edilmektedir. Limit denge yaklaşımı için, kayma yüzeyi yönteminde alınan kayma yüzeylerinin alanı yaklaşık yöntemler kullanarak çözülmektedir. Ebilirsiniz. Bu yöntemler, herhangi bir yenilme oluşmadan sürekli bir çözüm sağlayan üst ve alt limit çözümleri sunar.

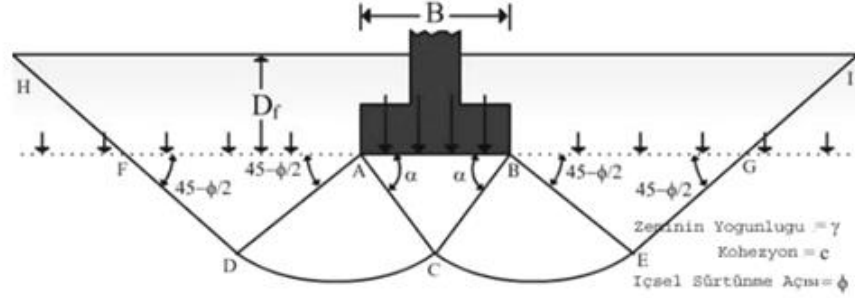
Drucker (1961)'in plastik limit teoremleri kullanılarak, limit gerilme yöntemi, zemin için idealize edilmiş bir gerilme-şekil değiştirme ilişkisini dikkate alarak farklı bir yaklaşım benimser. Sonlu elemanlar yöntemi ise, heterojen ortamlar dahil olmak üzere tüm süreci kesin olarak kontrol edebilir. Ortamı küçük parçalara ayırarak ve her bölge için fiziksel ve mekanik özellikler vererek, üst ve alt limit koşulları altında çözüm yapılır.

#### **4.1. Terzaghi'nin Taşıma Kapasitesi**

Terzaghi'nin 1943 yılındaki araştırması, yüzeysel temellerin taşıma gücünü belirlemek için ilk kapsamlı teoriyi sunması Geoteknik Mühendisliğinde önemli bir başarıydı. Terzaghi'nin çalışmaları, temel genişliği (B) ve gömme derinliği ( $D_f$ ) gibi belirli boyutlara sahip sürekli temellerin analizine odaklanmıştır. Birçok araştırmacı, Terzaghi'nin yenilikçi katkısından bu yana yüzeysel temellerin taşıma gücünü doğru bir şekilde tahmin edebilecek denklemler geliştirmek için çaba sarf etmiştir. Bu denklemler, zemin özellikleri, uygulanan yükler ve temel geometrisi gibi çeşitli faktörleri dikkate almaktadır. Ancak, önerilen denklemlere rağmen, Terzaghi'nin orijinal denklemi, doğal basitliği ve pratikliği nedeniyle en yaygın kullanılan ve öne çıkan denklem olmaya devam etmektedir. Terzaghi'nin denklemi, temel davranışının temel yönlerini vurgulayarak mühendisler ve uygulayıcılar için günlük geoteknik tasarım çabalarında değerli bir araç olmuştur. Bu, temel mühendisliğinde bir köşe taşı haline gelmiş ve alandaki daha ileri gelişmeler ve iyileştirmeler için temel oluşturmuştur (Kumbasar ve Kip, 1999; Terzaghi ve diğ., 1996).

Terzaghi, sürekli veya şerit temel için, nihai yük noktasında zemin içindeki yenilme yüzeyinin, Şekil 5.1'de sunulan şekilde tasvir edilebileceğini öne sürmüştür. Temeller genellikle homojen zemin üzerine yerleştirilir, bu da genel kayma yenilmesi yaşanacağı varsayımını haklı çıkarır. Ayrıca, temel tabanının üzerindeki zeminin

etkisinin, temel in gömme derinliğinin ( $D_f$ ) zeminin birim ağırlığı ile ( $\delta$ ) arpılmasıyla hesaplanan eşdeğer bir ilave yük olarak kabul edilmesi makul sayılabilir. Temel altındaki yenilme bölgesi, Şekil 5.1'de gösterildiği gibi, üç farklı bölüme ayrılır.



**Şekil 4.2.** Przli, sert, sürekli (Şerit) temel altında taşıma gücü yenilmesi (Das ve Sivakugan, 2018).

- Temel altındaki üçgen bölge ACD olarak adlandırılır,
- ADF, CDE, DE ve DF eğrilerine uyan logaritmik spiral yaylarla karakterize edilen radyal kayma bölgeleridir,
- İki gen Rankine pasif bölgesi, AFH ve CEG, nc bileşeni oluşturur. Temel zerine uygulanan kuvvetlerin ve basıncaların dağılımların anlamak hayati önem taşır ve bu pasif bölgeler bu konuda önemli bir rol oynar.

Terzaghi yönteminin yüzeysel temeller için taşıma gücü değerinin hesaplamalarında kabul ettiği varsayımlar Şu Şekilde zetlenebilir:

- Temelin gömme derinliği ( $D_f$ ), genişliğinden ( $B$ ) az olmalıdır,
- Temel tabanı, temel ile zemin arasında kayma olmasını önlemek için yeterince przli olmalıdır,
- Zemin, homojen ve eşyönlü bir kütle olarak kabul edilir,
- Taşıma gücünün limit değerlerine ulaşıldığında, genel kayma yenilmesi meydana gelir,
- Zeminde konsolidasyon oturması olmamalıdır,
- Temel, altındaki zeminden önemli ölçüde daha rijit olmalıdır,

8. Temel üzerine etki eden yükler basma gerilmesi oluşturmali ve eksantrik olmamalıdır.

Terzaghi ilk hesaplamalarını sürekli temeller için gerçekleştirdikten sonra reçte, deneysel olarak elde edilen sonuçlara dayanarak kare ve dikdörtgen temeller için geometrik katsayılar geliştirmiştir. Terzaghi taşıma kapasitesi formülü şu şekilde verilmiştir:

$$q_u = k_1 c N_c + \gamma D_f N_q + k_2 \gamma B N_\gamma \quad (5.1)$$

Burada, " $q_u$ " nihai taşıma kapasitesini; " $c$ " zeminin kohezyonunu; " $\phi$ " kayma direnci açısını; " $D_f$ " temel gömme derinliğini; " $\gamma$ " zeminin birim hacim ağırlığını; " $B$ " temelin genişliğini temsil eder; " $N_c, N_q, N_\gamma$ " taşıma gücü katsayılarıdır. Ek olarak, " $c N_c$ " kohezyonun taşıma kapasitesine katkısını; " $\gamma D_f N_q$ " ilave yükün taşıma kapasitesine katkısını; " $0.5 \gamma B N_\gamma$ " toprağın iç sürtünmesinin taşıma kapasitesine katkısını temsil eder. Burada, " $k_1, k_2$ " temelin şekil faktörleridir. Çeşitli çalışmalarda, şerit, dikdörtgen, kare ve dairesel temeller farklı temel şekilleri için farklı şekilde hesaplanmıştır. Şekil 5.2, şekil katsayılarının nasıl alınacağını açıklamaktadır (Das ve Sivakugan, 2018; Kumbasar ve Kip, 1999). Tablo 5.1'de ise " $N_c, N_q, N_\gamma$ " taşıma gücü katsayıları verilmiştir.

| Temel tabanı<br>Şekli | Şerit<br>$L = \infty$ | Dikdörtgen<br>$B < L$   | Kare<br>$B = L$ | $L = B = D$<br>Daire |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|----------------------|
| $k_1$                 | 1                     | $1 + 0.2 \frac{B}{L}$   | 1.2             | 1.2                  |
| $k_2$                 | 0.5                   | $0.5 - 0.1 \frac{B}{L}$ | 0.4             | 0.3                  |

**Şekil 4.3.** Temel tabanı şekil katsayıları (Kumbasar ve Kip, 1999).

**Tablo 4.1.** Terzaghi'nin taşıma gücü katsayıları (Das ve Sobhan, 1990).

| $\phi$ | $N_c$ | $N_q$ | $N_\gamma$ | $\Phi^\circ$ | $N_c$ | $N_q$ | $N_\gamma$ |
|--------|-------|-------|------------|--------------|-------|-------|------------|
| 0      | 5.70  | 1.00  | 0.00       | 27           | 29.24 | 15.90 | 11.60      |
| 1      | 6.00  | 1.10  | 0.01       | 28           | 31.61 | 17.81 | 13.70      |
| 2      | 6.30  | 1.22  | 0.04       | 29           | 34.24 | 19.98 | 16.18      |

|    |       |       |      |    |        |        |         |
|----|-------|-------|------|----|--------|--------|---------|
| 3  | 6.62  | 1.35  | 0.06 | 30 | 37.16  | 22.46  | 19.13   |
| 4  | 6.97  | 1.49  | 0.10 | 31 | 40.41  | 25.28  | 22.65   |
| 5  | 7.34  | 1.64  | 0.14 | 32 | 44.04  | 28.52  | 26.87   |
| 6  | 7.73  | 1.81  | 0.20 | 33 | 48.09  | 32.23  | 31.94   |
| 7  | 8.15  | 2.00  | 0.27 | 34 | 52.64  | 36.50  | 38.04   |
| 8  | 8.60  | 2.21  | 0.35 | 35 | 57.75  | 41.44  | 45.41   |
| 9  | 9.09  | 2.44  | 0.44 | 36 | 63.53  | 47.16  | 54.36   |
| 10 | 9.61  | 2.69  | 0.56 | 37 | 70.01  | 53.80  | 62.27   |
| 11 | 10.16 | 2.98  | 0.69 | 38 | 77.50  | 61.55  | 78.61   |
| 12 | 10.76 | 3.29  | 0.85 | 39 | 85.97  | 70.61  | 95.03   |
| 13 | 11.41 | 3.63  | 1.04 | 40 | 95.66  | 81.27  | 115.31  |
| 14 | 12.11 | 4.02  | 1.26 | 41 | 106.81 | 93.85  | 140.51  |
| 15 | 12.86 | 4.45  | 1.52 | 42 | 119.67 | 108.75 | 171.99  |
| 16 | 13.68 | 4.92  | 1.82 | 43 | 134.58 | 126.50 | 211.56  |
| 17 | 14.60 | 5.45  | 2.18 | 44 | 151.95 | 147.74 | 261.60  |
| 18 | 15.12 | 6.04  | 2.59 | 45 | 172.28 | 173.28 | 325.34  |
| 19 | 16.56 | 6.70  | 3.07 | 46 | 196.22 | 204.19 | 407.11  |
| 20 | 17.69 | 7.44  | 3.64 | 47 | 224.55 | 241.80 | 512.84  |
| 21 | 18.92 | 8.26  | 4.31 | 48 | 258.28 | 287.85 | 650.67  |
| 22 | 20.27 | 9.19  | 5.09 | 49 | 298.71 | 344.63 | 831.99  |
| 23 | 21.75 | 10.23 | 6.00 | 50 | 347.50 | 415.14 | 1072.80 |
| 24 | 23.36 | 11.40 | 7.08 | 51 | —      | —      | 1395.92 |
| 25 | 25.13 | 12.72 | 8.34 | 52 | —      | —      | 1834.30 |
| 26 | 27.09 | 14.21 | 9.84 | 53 | —      | —      | 2436.20 |

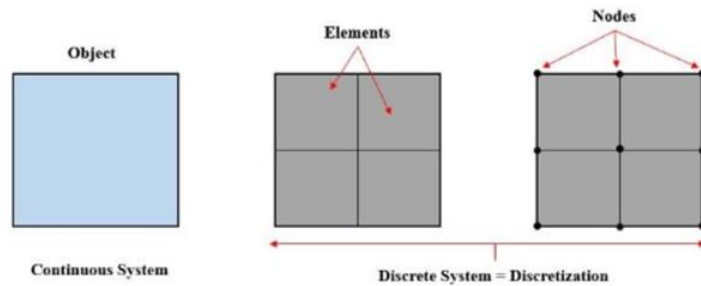
---



## 5. MATERYAL VE YÖNTEM

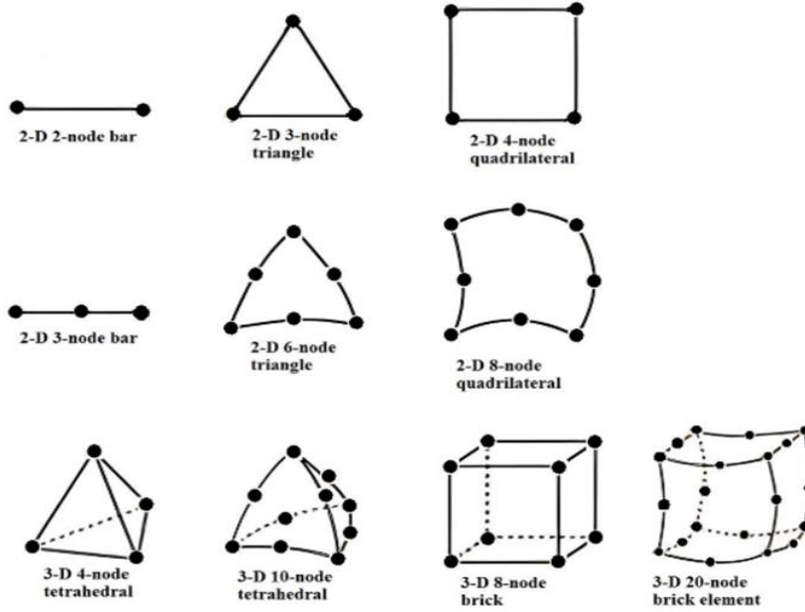
### 5.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEM)

Zeminlerin davranışını incelemek için kullanılan teorik ve ampirik yöntemler zeminin karmaşık doğasını ve davranışsal özelliklerini basitleştirmek için sürekli olarak gelişmektedir. Yaklaşımlarda genellikle, lineer-elastik ve homojen bir ortam varsamı yapılmaktadır. Ancak, zeminin doğal olarak doğrusal olmayan davranışı, anizotropisi, zaman ve çevreye bağlı özellikleri ve heterojen yapısı, gerçekçi çözümlere ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Bilgisayar ve yazılım teknolojilerinin ortaya çıkışıyla, sayısal yöntemler, diğer mühendislik zorluklarına benzer şekilde daha gerçekçi ve verimli çözümler sunarak geoteknik problemleri çözmede değerli bir araç haline gelmiştir. Bu yöntemlerde, fiziksel sistemlerin davranışını tanımlayan diferansiyel denklemler, sayısal teknikler aracılığıyla analiz edilir. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEM), matematiksel ifadelerle tanımlanan sürekli sistemler için çok avantajlı bir çözüm yöntemidir. Bu yöntem, sürekli sistemlerin matematiksel modellemesini, onları sonlu sayıda bileşen veya elemana bölmek suretiyle sağlar; bu elemanlar, Şekil 6.1'de gösterildiği gibi düğümlerle birbirine bağlanır. Sonuç olarak, sistem sonlu elemanlara bölünür ve her eleman için denklemler formüle edilir; daha sonra bu denklemler, sistem düzeyinde denklemleri oluşturmak üzere entegre edilir. Bu süreç, sürekli bir ortama uygulanabilir orijinal diferansiyel denklemleri, bir dizi lineer denkleme dönüştürür (Petalas ve diğ., 2022)



Şekil 5.1. Sürekli bir sistemin sonlu elemanlara ve düğümlere bölünmesi

Sonlu elemanlar yönteminin ilk adımında, çözülecek bölge, eşdeğer bir sonlu eleman ağı oluşturmak için kullanılan elemanlar adı verilen daha küçük parçalara bölünür. Eleman tipi seçimi, göz önünde bulundurulmuş temel bilinmeyenlere bağlıdır ve bir, iki veya üç boyutlu olabilir. Eleman tiplerinin seçimi, gerekli serbestlik derecelerini hesaba katmak için yapılmalıdır. Kavisli yüzeyler modellenirken, kıvrımlı elemanlar tanımlanmalıdır. İki boyutlu problemler için yaygın olarak üçgen veya dörtgen sonlu elemanlar kullanılır ve düğümlerle ilişkilendirilirler. Üç boyutlu problemler için yaygın olarak tetrahedral veya tuğla tipi elemanlar kullanılır. Düğümler genellikle düz yüzeylerin köşelerinde bulunur. Kıvrımlı yüzeylere sahip elemanlarla uğraşılırken, düğümler ayrıca her yüzeyin orta noktalarına da yerleştirilmelidir. Şekil 6.2, SEM elemanlarının farklı türlerini göstermektedir (Logan, 2022).



Şekil 5.2. Çeşitli FEM elemanları (Logan, 2022).

Ağ modelindeki her eleman arasındaki bağlantılar, komşu elemanlarla sonsuz sayıda nokta aracılığıyla gerçekleşir. Ancak, sonlu elemanlar yönteminde, bu bağlantılar yalnızca bu noktalarda uygun yer değiştirmeleri sağlamak için düğümler aracılığıyla gerçekleşir. Büyük, karmaşık sistemlerde gerçekçi sonuçlar elde etmek için genellikle önemli sayıda eleman gereklidir, bu da artan hesaplama taleplerine ve daha uzun çözüm sürelerine neden olabilir. Buna rağmen, bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler, bu zorluğun üstesinden gelmeyi giderek daha yönetilebilir hale getirmiştir.

İkinci adımda, eleman içindeki bilinmeyenlerin dağılımını karakterize eden bir şekil fonksiyonu seçilmesi gereklidir. Bu fonksiyon, örneğin eleman düğümleri ve eleman bölgesi içindeki yer değiştirmeler gibi bilinmeyen değişkenlerin dağılım şeklini matematiksel olarak tanımlamamıza olanak tanır. Geoteknik mühendislik problemlerinde genellikle yer değiştirme yöntemi kullanılır ve şekil fonksiyonları yaygın olarak polinomlar veya seriler kullanılarak, denklem 6.1'de gösterildiği gibi belirlenir.

$$\{\delta\} = [N]\{d\}_e \quad (6.1)$$

Bu denklemde,  $\{\delta\}$  eleman içindeki herhangi bir noktadaki yer değiştirme bileşenlerini,  $[N]$  şekil fonksiyonunu ve  $\{d\}_e$  elemanın düğüm noktalarındaki yer değiştirmeleri temsil eder. Eleman içindeki gerilmeler ( $\varepsilon$ ), denklem 6.2'de gösterildiği gibi, düğüm yer değiştirmeleri açısından ifade edilir, burada  $[B]$  eleman gerilme matrisidir. Gerilmeler  $\{\sigma\}$ , denklem 6.3 ile deformasyonlar arasındaki ilişkiyi sağlayan elastikiyet matrisi  $[D]$  kullanılarak hesaplanabilir.

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\}_e \quad (6.2)$$

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (6.3)$$

Bir sonraki adımda, minimum enerji prensibi gibi uygun bir varyasyon prensibi kullanılır. Bu prensip, her düğümdeki değerlere dayanan bir denklem kümesine yol açar:

$$\{f\} = [k]\{d\}_e \quad (6.4)$$

Denklem 6.4'te,  $\{f\}$  elemanın dış yük vektörünü ve  $[k]$  elemanın sertlik matrisini temsil eder. Her bir sonlu eleman için bağımsız olarak türetilen denklemler (Denklem 6.4'te gösterildiği gibi) uygun şekilde bir araya getirilir. Bu süreç, denklem 6.5'te ifade edildiği gibi tüm sistem için bir cebirsel denklem kümesine yol açar.

$$\{F\} = [K]\{d\} \quad (6.5)$$

{F} sistem yük vektörünü, [K] sistem sertlik matrisini ve {d} sistem yer değiştirme vektörünü temsil eder. Sınır koşulları, sistemde uygun satır/sütun işlemleri kullanılarak dahil edilir ki bu da sistemi azaltır.

## 5.2. Geoteknik Mühendisliği'nde Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanması

Geoteknik mühendisliğinde gerçekçi hesaplamalar yapmak, zeminin doğal heterojenitesi nedeniyle zor olabilir, ancak SEM güçlü bir araçtır ve bu konuda yardımcı olabilir. SEM'i geoteknik problemlere uygularken birçok varsayım gereklidir. Geleneksel lineer-elastik modeller genellikle yetersizdir çünkü zeminler tipik olarak sıvı/katı faz içermektedir ve bu, yük altında boşluk suyu basıncında değişikliklere yol açar. Geoteknik mühendislikte kullanılan Sonlu Elemanlar Yöntemi, doğru çözümler için lineer-elastik teorilerden daha geniş sınır koşulları gerektirir. Sonuç olarak, bu benzersiz zorlukları ele almak için yöntemi değiştirmek ve göz önünde bulundurmamak gereklidir (Petalas ve diğ., 2022).

Gerçek kesitleri modellemek için, geoteknik mühendislik problemlerinde sonlu eleman analizleri genellikle kademeli olarak yapılır. Örneğin kademeli yükleme veya kazı yoluyla. Bu kademeli yaklaşım iki önemli avantaj sunar:

- a. Analizde dolgu malzemesinin yerleştirilmesi veya kaldırılması nedeniyle değişen geometri, sonlu eleman ağında elemanlar eklenerek veya çıkarılarak doğru bir şekilde temsil edilebilir.
- b. Zemin özellikleri, analizler boyunca zemin kesitindeki gerilme değişiklikleri nedeniyle her yükleme aşamasında evrimleşir.

Sonlu eleman analizleri geoteknik mühendislikte kıymetli bir araçtır. Gerilmeler, düşey ve yanal hareketler, yeraltı suyu akışı ve boşluk suyu basınçları dahil olmak üzere çeşitli parametreler hakkında değerli içgörüler sağlamaya yardımcı olurlar. Analiz sırasında zeminlerin doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışını doğru bir şekilde modellemek esastır. Bunu başarmak için, inşaat öncesi başlangıç gerilme durumunu belirlemek, zeminin doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme ve dayanım özelliklerini dahil etmek ve analizde yükleme aşamaları arasında gerçekçi bekleme sürelerini hesaba katmak önemlidir (Van Baars, 2018, (Benz ve Nordal, 2010)).

### **5.3. Plaxis Yazılımı**

Plaxis, 1987 yılında Hollanda'daki Delft Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen bir bilgisayar yazılımıdır. Zemin ve Kaya Analizi için Sonlu Elemanlar Kodu' anlamına gelen bir kısaltmadır. Başlangıçta, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yumuşak zemin üzerinde nehir setlerini analiz etmek için oluşturulmuştur. Ancak, yıllar içinde önemli gelişmeler geçirmiş ve geniş bir geoteknik problem yelpazesini kapsayacak şekilde genişletilmiştir. Bu çok yönlü yazılım, geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmakta ve kapsamlı bir yetenekler seti sunmaktadır. Mühendisler, çeşitli yükleme koşulları altında zemin ve kaya gereçlerinin nasıl tepki verdiğini anlamak için Plaxis'i kullanır, bu da onu gerilme-şekil değiştirme analizi için dünya çapında bir araç yapar. Ayrıca, Plaxis, temel tasarımı ve inşaatında hayati öneme sahip olan yapı-zemin etkileşimini değerlendirmede de çok yardımcıdır. Yazılım temel taşıma gücüne dair kesin öngörüler sağlar, bu da yapıların güvenli tasarımında önemli bir araç olmasını sağlar. Konsolidasyon oturmasını içeren projelerde, Plaxis mühendislere zaman içindeki oturma davranışını tahmin etmelerinde yardımcı olur, bu da mühendislik sistemlerinin uzun vadeli stabilitesini sağlar (Brinkgreve ve diğ., 2016).

Plaxis'in en etkileyici özelliklerinden biri, zemin kesiti içinde akım ağlarını modelleyebilmesidir; bu, yeraltı suyu akışı, sızıntı ve drenaj sorunlarını çözmek için esastır. Yetenekleri zemin dinamiğine kadar uzanır ve mühendislerin, sismik kuvvetler de dahil olmak üzere dinamik yükler altında zeminlerin nasıl tepki verdiğini incelemelerine olanak tanır. Ayrıca, Plaxis, karmaşık geoteknik projelerde malzeme ayrımı gerektiği durumlarda değerli bir araçtır. Bu çalışma, sayısal analiz için iki boyutlu problemleri modellemeyi destekleyen ve hem statik hem de dinamik analizleri mümkün kılan 2D modelleme yazılımı olan 15 düğümlü elemanlarla Plaxis 2D sürüm 24.01.00.1060 kullanılarak yapılmıştır.

### **5.4. Plaxis Zemin Malzeme Modelleri**

Plaxis 3D programı, toprak sorunlarının karmaşık doğası nedeniyle çeşitli malzeme modelleri sunar. Plaxis programında, zeminin doğru ve gerçekçi modellenmesini sağlamak için yedi farklı zemin modeli bulunmaktadır. Aşağıdaki bölümde, bu zemin modelleri ve uygulamaları için gerekli parametreler hakkında kısa bir genel bakış sunulmuştur.

#### **5.4.1. Lineer elastik model (LE)**

Lineer Elastik Zemin Modeli (LE), zemin davranışını temsil etmek için kullanılan modellerden biridir. Bu model, zeminlerin Hooke yasasına uyduğunu ve elastisite modülü (E) ve poisson oranı ( $\nu$ ) parametreleri ile karakterize edilen izotropik lineer elastik malzemeler olduğunu varsayar. LE zemin modelinin belirli uygulamalar için yararlı olduğunu ancak zeminlerin karmaşık mekanik davranışını tam olarak yakalayamayabileceğini belirtmek gerekir. Model, zeminle ilgili problemlerde rijit yapıların modellenmesinde özellikle etkilidir, ancak zemin davranışı genellikle doğrusal olmayan eğilim ve plastisite gibi faktörler nedeniyle daha karmaşık olabilir.

#### **5.4.2. Mohr-Coulomb modeli (MC)**

Mohr-Coulomb zemin modeli (MC), malzeme gerilme-şekil değiştirme davranışını elasto-plastik formda temsil eder. Modelin doğru çalışabilmesi için beş malzeme parametresi belirtilmelidir: Elastisite modülü (E), poisson oranı ( $\nu$ ), kohezyon (c), kayma direnci açısı ( $\phi$ ) ve dilatasyon (genleşme) açısı ( $\psi$ ). Doğru analiz için doğru yanal toprak basıncı katsayısı ( $K_0$ ) değerini seçmek ve zemin özelliklerini tanımlamak da önemlidir. Modelde deformasyonlar boyunca E sabit kalır. MC zemin modeli, elasto-plastik temsili nedeniyle gerçekçi hesaplamalara imkan verebilir.

#### **5.4.3. Eklemlenmiş kaya modeli (EK)**

Eklemlenmiş Kaya (EK) modeli anizotropik elasto-plastik davranışı, plastik yenilmenin yalnızca belirli kayma yönlerinde meydana geldiğini varsayar. Bu, modeli, katmanlı veya büyük kaya oluşumlarının gerilme deformasyonunu simüle etmek için özellikle uygun hale getirir. EK modelini hesaplamalarda kullanmak için, elastisite modülü (E), Poisson oranı ( $\nu$ ), kohezyon (c), kayma direnci açısı ( $\phi$ ) ve dilatasyon açısı ( $\psi$ ) gibi temel malzeme parametrelerini tanımlamak esastır. Bu parametreler, farklı yükleme koşulları altında kaya malzemesinin davranışını birlikte belirler.

#### **5.4.4. Yumuşak zemin modeli (YZ)**

Yüksek sıkıştırılabilirlik özelliklerine sahip zeminler, örneğin normal konsolide killer, turba ve kil-silt zeminler, yumuşak zeminler olarak sınıflandırılır. Diğerlerine kıyasla bu zeminler, yumuşak zemin modeli kullanılarak analiz için ideal olan benzersiz gerilme-şekil değiştirme davranışına sahiptir. SS zemin modeli, özellikle

birincil konsolidasyonu içeren durumlarda optimal sonuçlar sağlar. Yumuşak zemin modelini kullanarak hesaplamalar yapmak için, kayma direnci açısı ( $\phi$ ), kohezyon ( $c$ ), dilatasyon açısı ( $\psi$ ), modifiye sıkışma indeksi ( $\alpha$ ) ve modifiye şişme indeksi ( $\beta$ ) gibi temel malzeme parametrelerini belirtmek gerekir. Bu parametreler, çeşitli yükleme ve deformasyon koşulları altında yumuşak zeminlerin davranışını birlikte belirler.

#### **5.4.5. Yumuşak zemin büzülme modeli (YZB)**

YZS (Yumuşak Zemin Sürünme) modeli, turba, killer, siltler ve normal konsolide killer gibi zeminlerin zamana bağlı davranışını hesaba katmak için özellikle tasarlanmıştır. Bu model, temel ve set uygulamaları için zamanla değişen oturma değerlerini hesaplamada ve derin kazılar ve tünellerin stabilitesini değerlendirmede önemli bir rol oynar. SS zemin modeli ile hesaplama yapılırken, kayma direnci açısı ( $\phi$ ), kohezyon ( $c$ ), dilatasyon açısı ( $\psi$ ), modifiye sıkışma indeksi ( $\lambda^*$ ), modifiye şişme indeksi ( $\kappa^*$ ) ve modifiye sürünme indeksi ( $\mu^*$ ) gibi birkaç temel parametreyi tanımlamak esastır. Bu parametreler, çeşitli geoteknik senaryolarda zeminin zamana bağlı davranışını doğru bir şekilde temsil etmeyi sağlar.

#### **5.4.6. Pekleşen zemin modeli (HS)**

Mohr-Coulomb (MC) modeli ve pekleşen zemin modelinin her ikisi de kohezyon ( $c$ ), kayma direnci açısı ( $\phi$ ) ve dilatasyon açısı ( $\psi$ ) tarafından belirlenen gerilme sınırlarını dikkate alır. Ancak, pekleşen zemin modeli, MC modelinden daha doğru bir şekilde hem yumuşak hem de sert zemin davranışını temsil eder, basınç arttıkça, zemin sertliği de artar. Bu davranış, drenajlı üç eksenli hücre kesme testlerinden elde edilen gözlemlere dayanır, burada eksenel deformasyon-deviyasyonel gerilme ilişkisi hiperbolik bir formu takiptir. Kondner (1963) bu ilişkiyi ilk kez formüle etmiş ve daha sonra, Duncan ve Chang (1979) bunu daha da geliştirerek hiperbolik model olarak adlandırmıştır. Sonraki iyileştirmeler, plastisite teorisine dayanan pekleşen zemin modelinin geliştirilmesine yol açtı, bu da onu hiperbolik modelden ayırdı. Ayrıca, pekleşen zemin modeli, hesaplamalarına zemin dilatasyonu ve verim kap parametrelerini dahil eder. HS modeli, çeşitli yükleme ve deformasyon koşulları altında zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışını doğru bir şekilde oluşturmak için genellikle üç elastisite modülü girişi gerektirir: Başlangıç elastisite modülü ( $E_{50}$ ), bu ilk yükleme aşamasında zeminin rijitliğini temsil eder. Boşaltma/yeniden yükleme elastisite modülü ( $E_{ur}$ ), bu, yeniden yükleme veya

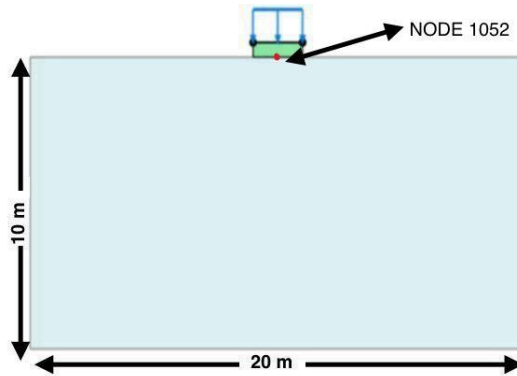
boşaltma aşamaları sırasında zeminin sertliğini açıklar ve odometre elastisite modülü ( $E_{oed}$ ), ödometre/konsolidasyon testleri aracılığıyla belirlenen zeminin davranışını karakterize eder. Genel olarak, HS modeli, geoteknik analizde çok yönlü bir araçtır.

#### 5.4.7. Küçük-deformasyon rijitliği ile pekleşen zemin modeli (KDSS)

Küçük-deformasyon rijitliği ile pekleşen zemin modeli (KDSS), pekleşen zemin modelinin faydalarını küçük deformasyon rijitliği göz önünde bulundurularak birleştiren ileri düzey bir geoteknik modeldir. KDSS hem yumuşak hem de sert zeminlerin davranışını doğru bir şekilde uyarlayabilir. Kohezyon ( $c$ ), kayma direnci açısı ( $\phi$ ) ve dilatasyon açısı ( $\psi$ ) gibi parametreleri dahil ederek değişen gerilme koşulları altında zemin davranışını tanımlar. Bu model, inşa aşamasında oturma gibi erken aşama zemin tepkisinin kritik olduğu uygulamalarda fayda sağlamaktadır.

### 5.5. Geometrik Model

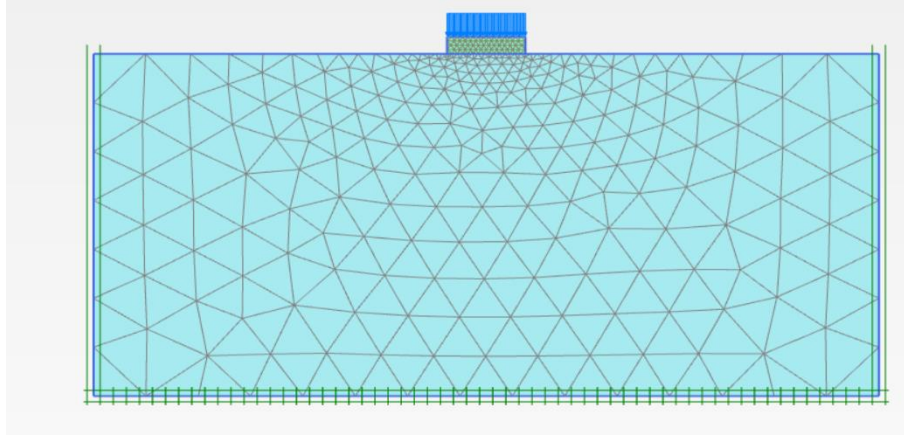
Bu çalışmada, yüzeysel temel için aşağıdaki parametrelere sahip bir geometrik model kullanılmıştır (Şekil 6.3.). Şerit temelin boyutları 0,5 metre kalınlığında ve 2 metre genişliğindedir. Sonuçları sunmak için (0,10) koordinatlarında bulunan 1052 numaralı düğüm seçilmiştir.



Şekil 5.3. Zemin ve model temel geometrik modeli.

#### 5.5.1. Sonlu elemanlar ağı

Plaxis 2D'de, sonlu elemanlar ağı otomatik olarak oluşturulmuş, deneysel model üzerinde çeşitli ağ koşullarını, Plaxis 2D'de mevcut olan çok kaba ile çok ince arasında değişen bir dizi analiz yapılmıştır. FEM sonuçları üzerindeki ağın etkisini en aza indirmek için, 13 düğümlü kama elemanları kullanılarak orta derecede bir ağ oluşturulmuştur (Şekil 6.4). Bu iyileştirme süreci, ortalama eleman boyutu 0.723 m olan 596 eleman ve 4941 düğüm içermekte olup 0.1 kalalık faktörü kullanılmıştır.



**Şekil 5.4.** Plaxis 2D kullanarak oluşturulan ağ.

### 5.5.2. Zemin ve temel model parametreleri

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile zeminin drenajsız davranışı Mohr-Coulomb (MC) modeli kullanılarak modellenmiştir. di. Drenajsız durum seçilmiş olup zemin parametreleri Tablo 6.1’de detaylandırılmıştır.

**Tablo 5.1.** Zemin katmanının malzeme özellikleri.

| Parametreler                  | İsim             | Değer        | Birim    |
|-------------------------------|------------------|--------------|----------|
| Genel                         |                  |              |          |
| Zemin Modeli                  | Model            | Mohr-Coulomb | -        |
| Drenaj tipi                   | Tip              | Drenajsız A  | -        |
| DOZ birim hacim<br>ağırlık    | $\gamma_{unsat}$ | 16           | $kN/m^3$ |
| Doygun birim<br>hacim ağırlık | $\gamma_{sat}$   | 19           | $kN/m^3$ |
| Mekanik                       |                  |              |          |
| Elastisite modülü             | $E'_{ref}$       | 5000         | $kN/m^2$ |
| Poisson oranı                 | $\nu$            | 0.3          | -        |
| Kohezyon                      | $c'_{ref}$       | 5.0          | $kN/m^2$ |
| Kayma direnci<br>açısı        | $\phi'$          | 23           | °        |
| Dilatans açısı                | $\psi$           | 0            | °        |

Beton gözeneksiz ve lineer-elastik seçtik olarak seçilmiş, diğer parametreler Tablo 6.2’de verilmiştir.

**Tablo 5.2.** Betonun malzeme özellikleri.

| Parametereler                 | İsim             | Değer           | Birim    |
|-------------------------------|------------------|-----------------|----------|
| Genel                         |                  |                 |          |
| Zemin Modeli                  | Model            | linear-elastic  | -        |
| Drenaj tipi                   | Tip              | nonporous       | -        |
| DOZ birim hacim<br>ağırlık    | $\gamma_{unsat}$ | 24              | $kN/m^3$ |
| Doygun birim<br>hacim ağırlık | $\gamma_{sat}$   | 24              | $kN/m^3$ |
| Mechanical                    |                  |                 |          |
| Elastisite modülü             | $E'_{ref}$       | $30 \cdot 10^6$ | $kN/m^2$ |
| Poisson oranı                 | $\nu$            | 0.2             | -        |
| Kohezyon                      | $c'_{ref}$       | -               | $kN/m^2$ |
| Kayma direnci<br>açısı        | $\phi'$          | -               | °        |
| Dilatans açısı                | $\psi$           | -               | °        |

### 5.5.3. Plaxis 2D'de başlangıç gerilme durumunun tanımlanması

Başlangıç gerilmesi, doğal zeminin kendi ağırlığı altındaki denge durumunu temsil eder. Plaxis 2D, sorunun özelliklerine bağlı olarak başlangıç gerilmesini belirlemek için farklı yöntemler sunmaktadır.  $K_0$  prosedürü, zemin yüzeyi, zemin katmanları ve yeraltı su seviyesi paralel ve yatay olduğunda uygundur. Yerçekimi yükleme yöntemi, zemin yüzeyinde eğimler veya yatay olmayan özellikler olduğunda veya zemin katmanları ve yeraltı su seviyeleri paralellikten sapmış olduğunda, sonlu eleman analizlerinde gerçek koşullarını doğru bir şekilde hesaba katmak için kullanılır (Brinkgreve ve diğ., 2019).

$K_0$  yöntemi kullanılarak başlangıç gerilmelerinin analiz edilmesi durumunda, zeminin kendi ağırlığı düşey gerilmeler oluşturur ve sükunetteki toprak basıncı katsayısı  $K_0$  değeri yatay gerilmeleri belirler. Denklem 6.6,  $K_0$  'un yatay gerilmelere oranla dikey gerilmelerin oranı olduğunu gösterir.

$$K_0 = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad (6.6)$$

Özellikle kumlu zeminlerde  $K_0$  değeri kayma direnci açısına dayanan bir ilişki kullanılarak Denklem 6.7'deki gibi belirlenebilir (Jacky, 1944).

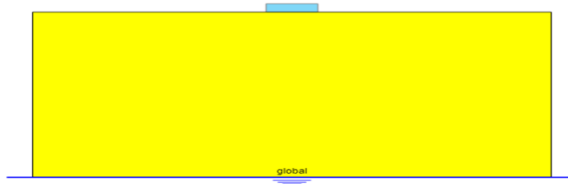
$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (6.7)$$

Yerçekimi yükleme yönteminde, başlangıçta başlangıç gerilmeleri sıfır olarak kabul edilir. Bu gerilmeler, başlangıç hesaplama aşamasında zeminin kendi ağırlığının uygulanmasıyla kademeli olarak tanıtılır. Bu senaryoda  $K_0$  değeri, seçilen poisson oranı ( $\nu$ ) değeri tarafından önemli ölçüde etkilenir. Gerçekçi  $K_0$  değerlerine ulaştıran  $\nu$  değerlerini seçmek önemlidir. Denklem 6.8,  $K_0$  ve  $\nu$  değerleri arasındaki elastik ilişkiyi temsil eder.

$$K_0 = \frac{K_0}{1 + K_0} \quad (6.8)$$

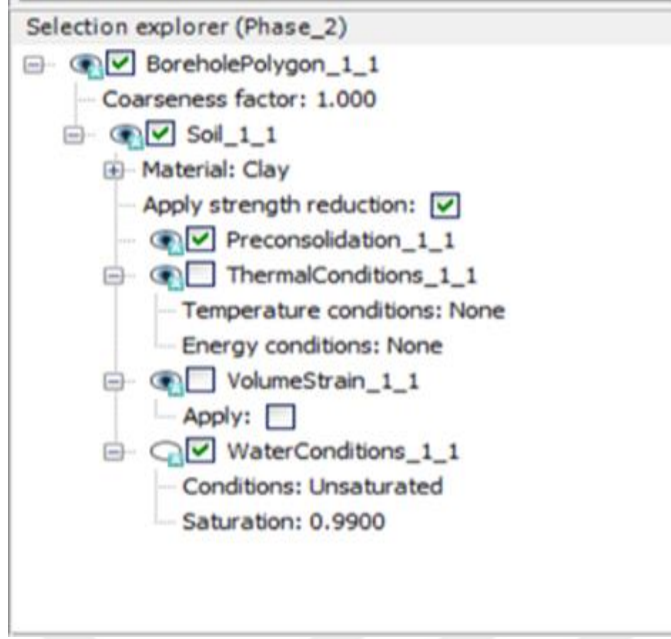
### 5.6. Plaxis 2D'de Zemin Modellemesi İle Yük Uygulaması

Temel yüklemesi olarak (-1,10) noktasından başlayıp (1,10) noktasında biten, y yönünde  $-100 \text{ kN/m}^2$  değerinde bir şerit yük kullanılmıştır. Bu yükü dört farklı modelde simüle edilmiştir. İlk modelde, temel tabanının 10 metre altında bulunan yer altı su seviyesinin, temel altındaki doygun olmayan zemin tabakasını etkilemeyeceği varsayılmıştır. Model Şekil 6.9'de verilmiştir.



**Şekil 5.5.** Şerit temel ve zemin kesiti (YASS yok)

Zemin modellemesi için doygun olmayan zemin özellikleri tercih edilmiş olup başlangıç doygunluk derecesi 0.99'dan 0.50'ye kadar 0.05 aralıklarla değiştirilmiştir (Şekil 6.10).



**Şekil 5.6.** Zemin durumu ve doygunluk.

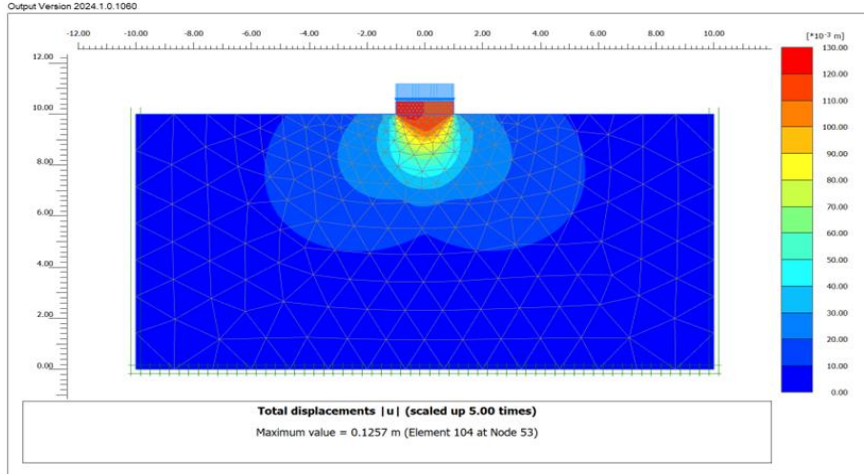
İkinci modelde, yer altı su seviyesi temel tabanının 5m altında alınmış dolayısıyla alt zemin tabakası doymuş, üst zemin tabakası doymuş olmayan koşullarda ele alınmıştır. Üçüncü modelde yer altı su seviyesi temel tabanının 2 m altında, son modelde ise zemin yüzeyinde etkilmiştir.

## 6. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

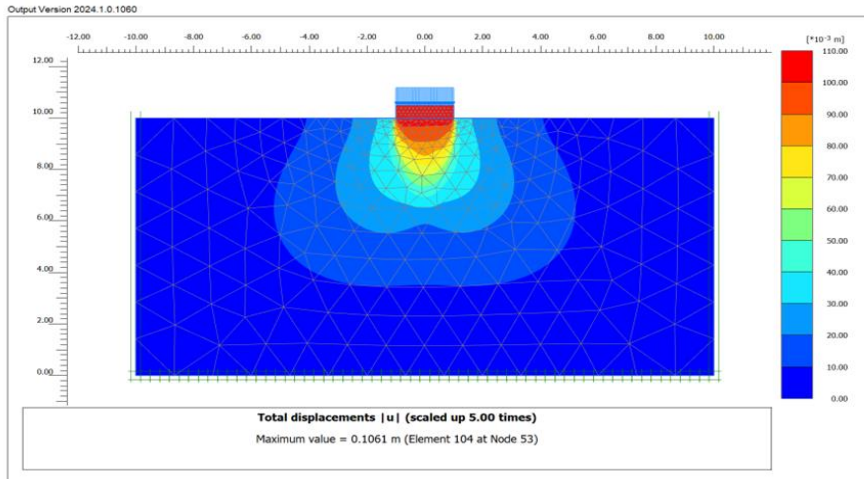
Doygun olmayan koşullarda şerit temel taşıma gücü, varsayılan bir yük ile Plaxis 2D'de zemin ve temel kesitinin modellenmesi ile analiz edilmiştir. Bu bölümde analiz sonuçları tartışılmış, her modelde, yer değiştirmeler ve fazla boşluk suyu basıncı değerleri değerlendirilmiştir. Düğüm (0,10), grafikler ve tablolar ile karşılaştırma için stratejik olarak seçilmiştir.

### 6.1. Temel Altı Zemin Kesitinde YASS Bulunmaması Durumu

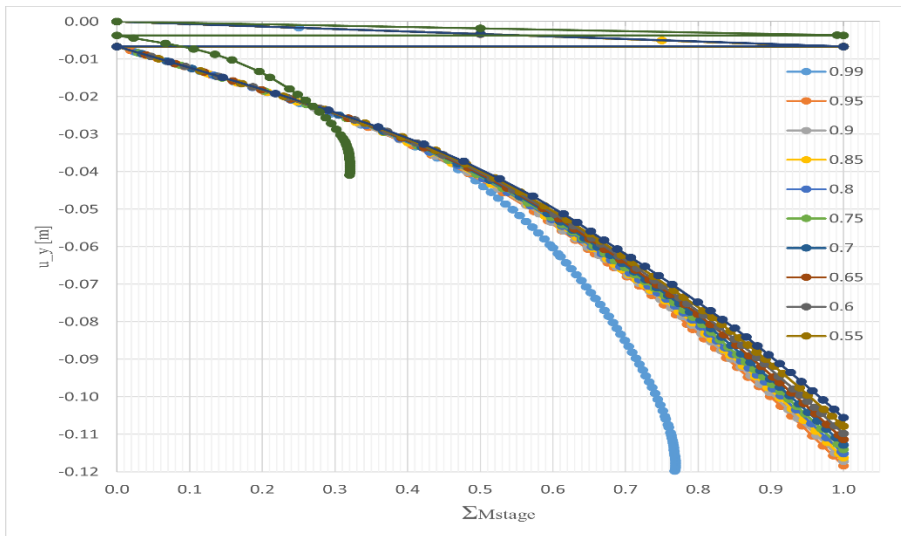
Gözlemlenen yer değiştirme verileri net bir eğilim göstermekte olup yer değiştirme büyüklüğü, doymunluk derecesi %99'dan %50'ye düştükçe azalmaktadır. Özellikle, doymunluk seviyesi %99 iken maksimum yer değiştirme 0.1257 m olarak kaydedilmiş ve %50 doymunlukta 0.1061 m değerine düşmüştür. Bu bulgular, Şekil 7.1-7.3'te kapsamlı bir şekilde sunulmuştur. Şekil 7.1'de özellikle zeminin mevcut durumda yapısal yükleri destekleme yeteneğinin düşüklüğü vurgulanarak, bir şerit temel altında toplam yer değiştirmeler sergilenmektedir. Yer değiştirmeler %5 azalan doymunluk aralıklarında tekrarlanan analizlerde sürekli azalmıştır ve bulgular, en yüksek yer değiştirmenin en yüksek doymunluk derecesinde meydana geldiğini doğrulamıştır. Yer değiştirmedeki bu azalma, zemini su içeriği ile yapısal rijitlik arasında doğrudan bir ilişki olduğunu göstermektedir. Neredeyse tam doymunlukta (%99) maksimum yer değiştirme, bu tür koşullarda temel duraylılığı için önemli endişeler oluşturabilir. Yüksek su içeriği altında bu önemli yer değiştirme, kritik bir zayıflığı vurgular: doymunluk derecesi arttıkça, zeminin yapısal yükleri taşıma yeteneği önemli ölçüde zayıflar. Bu, yüksek yer altı su seviyesi varlığı veya sel riski olan bölgelerde mühendislik değerlendirmeleri için hayati önem taşır.



Şekil 6.1.  $S_r$ =%99'da şerit temel için toplam yer değiştirme.



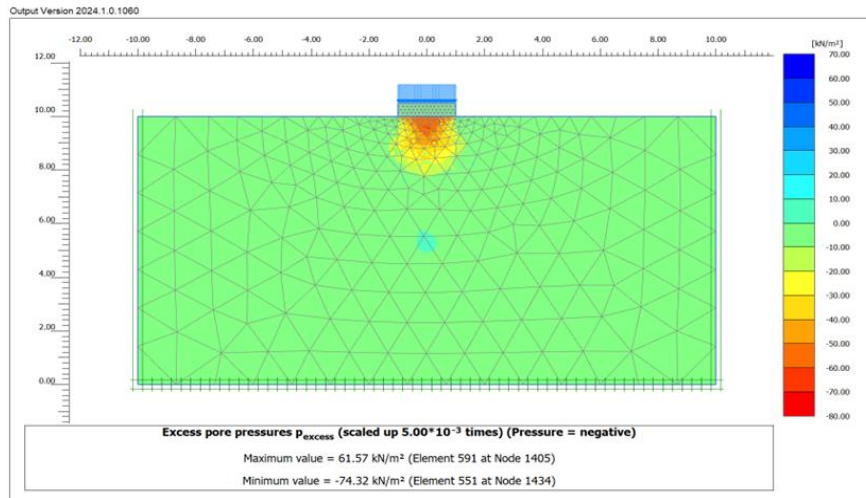
Şekil 6.2.  $S_r$ =%50'da şerit temel için toplam yer değiştirme.



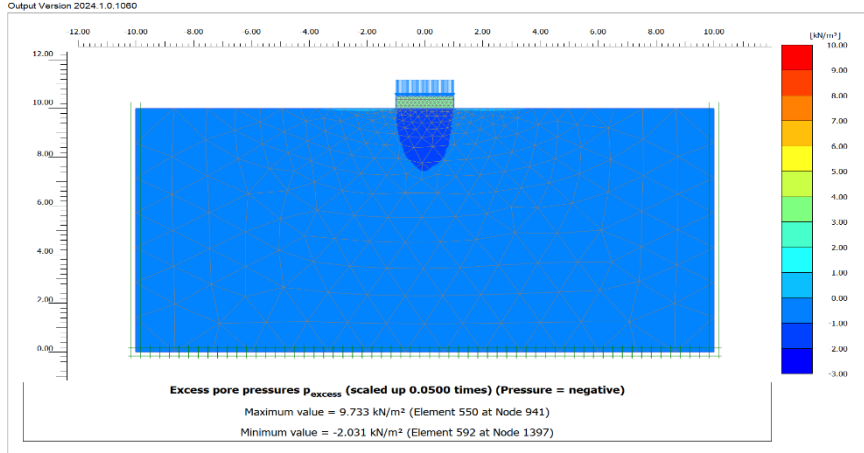
Şekil 6.3. Doygunluk ile (0,10) düğümünde yer değiştirme ilişkisi.

Bu çalışmada doygunluk derecesi ile fazla boşluk suyu basıncı ( $P_{\text{excess}}$ ) büyüklüğünde gerçekleşen dalgalanmalar da incelenmiş, bunun zemin davranışı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Aşırı boşluk suyu basıncı o anki boşluk suyu basıncı ile hidrostatik boşluk suyu basıncı arasındaki fark olarak tanımlanır ve efektif gerilme değişimiyle zemin dayanımı ve sıkılabilirliği üzerindeki önemli etkisi nedeniyle güvenli tasarım ve inşaat uygulamaları için hayati önem taşır. Boşluk suyu basıncı değişimlerini anlamak, sıvılaşma veya aşırı oturma gibi potansiyel riskleri değerlendirmeye de yüksek oranda olmaktadır.

Şekil 7.4 ve 7.5, Tablo 7.1. ile birlikte doygunluk derecesi %0.99'dan %50'ye düştükçe aşırı boşluk suyu basıncında gerçekleşen değişiklikleri göstermektedir. Doygunluk derecesi %99'da belirgin bir maksimum olan 61.57 kPa değeri doygunluk azaldıkça keskin bir şekilde düşmekte, bu da zeminin su içeriğindeki değişikliklere karşı oldukça duyarlı bir tepki verdiğini göstermektedir.



**Şekil 6.4.**  $S_r=99$  için aşırı b.s.b. dağılımı (YASS yok).



Şekil 6.5.  $S_r=50\%$  için aşırı b.s.b. dağılımı (YASS yok).

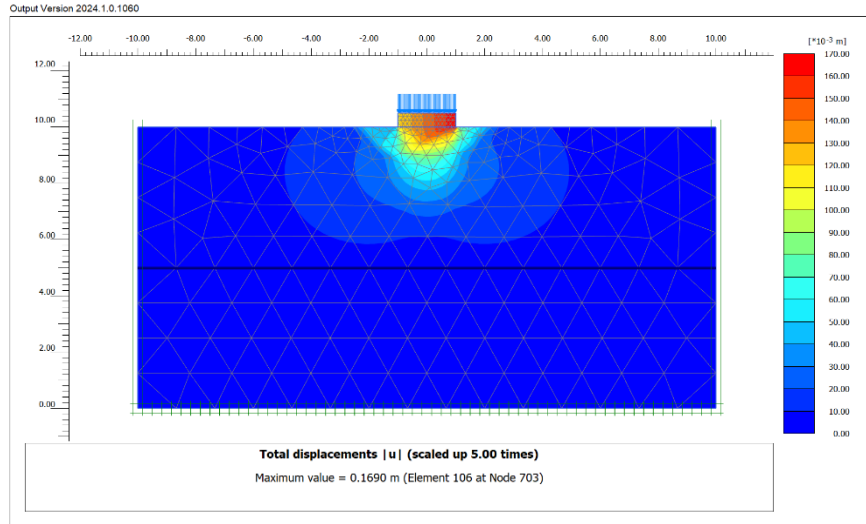
Tablo 6.1. Aşırı b.s.b. değerlerindeki değişim.

| $S_r$<br>(%) | Maksimum değer<br>(kPa) | Minimum değer<br>(kPa) |
|--------------|-------------------------|------------------------|
| 99           | 61.57                   | -74.32                 |
| 95           | 7.405                   | -1.483                 |
| 90           | 6.984                   | -1.400                 |
| 85           | 6.692                   | -1.364                 |
| 80           | 6.268                   | -1.322                 |
| 75           | 6.083                   | -1.323                 |
| 70           | 6.438                   | -1.298                 |
| 65           | 7.723                   | -1.237                 |
| 60           | 9.010                   | -1.181                 |
| 55           | 10.39                   | -1.517                 |
| 50           | 9.733                   | -2.031                 |

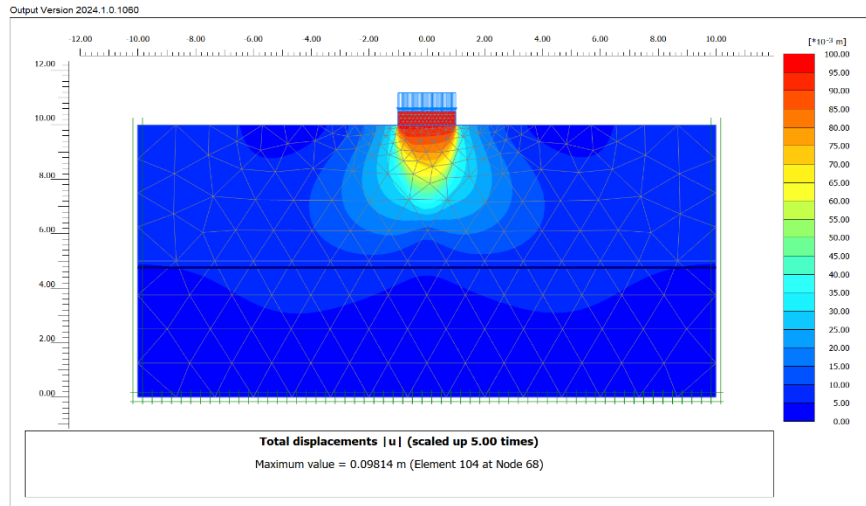
## 6.2. Temel Altı Zemin Kesitinde YASS -5 m Durumu

$S_r=99\%$  değerinde 0.1690 m olarak kaydedilen yer değiştirme büyüklüğü Şekil 7.6'da gösterilmiştir. Analizler, maksimum yer değiştirmenin 0.09814 m değerine düştüğü  $S_r=50\%$  gibi düşük bir doygunluk seviyesine kadar uzanmaktadır. (Şekil 7.7). Bu azalma, daha düşük doygunluk derecelerinde artan zemin duraylılığını vurgulamaktadır.

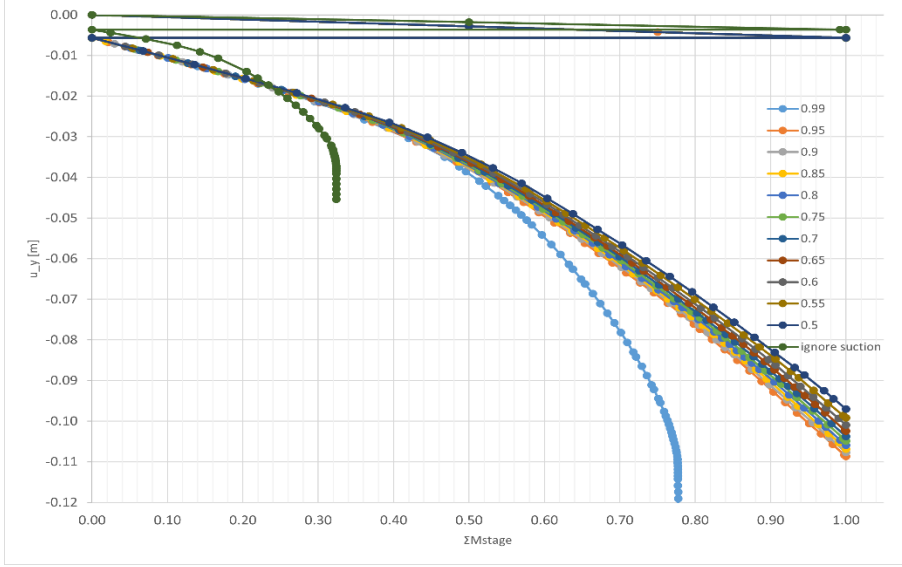
Şekil 7.8,  $S_r$  değerinin %99'dan %50'ye düşmesiyle yer değiştirmedeki azalan eğilime işaret etmektedir. Bu eğilim, su içeriği ile zemin kesitinde beliren yer değiştirme miktarı arasındaki ilişkiyi açıklamak için önem taşır ve daha yüksek su içeriğinin zeminin sıkışabilirliğini belirgin şekilde yükselttiğini göstermektedir. Bu bulgu, özellikle su seviyelerinde dalgalanmaya eğilimli bölgelerde temellerin tasarımı için son derece önemlidir.



Şekil 6.6.  $S_r$ =%99'da şerit temel için toplam yer değiştirme.

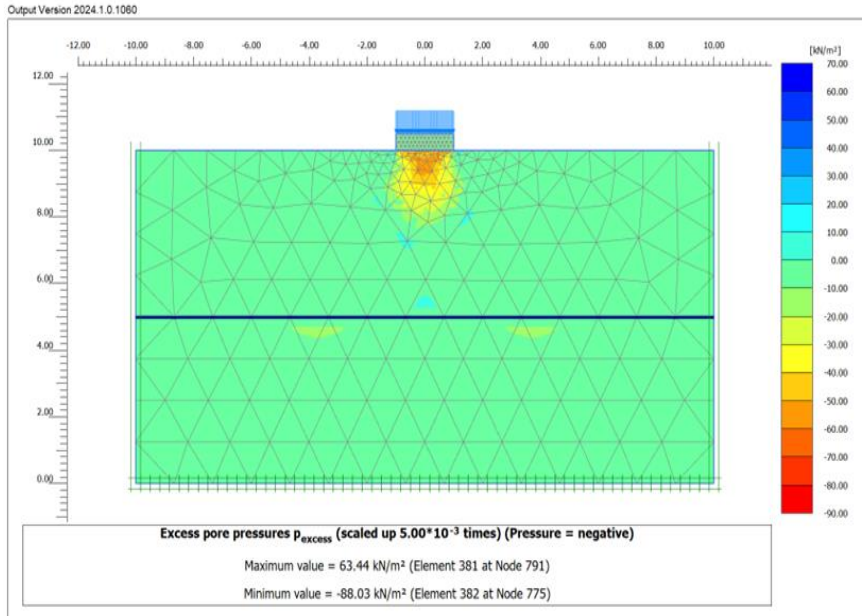


Şekil 6.7.  $S_r$ =%50'da şerit temel için toplam yer değiştirme.

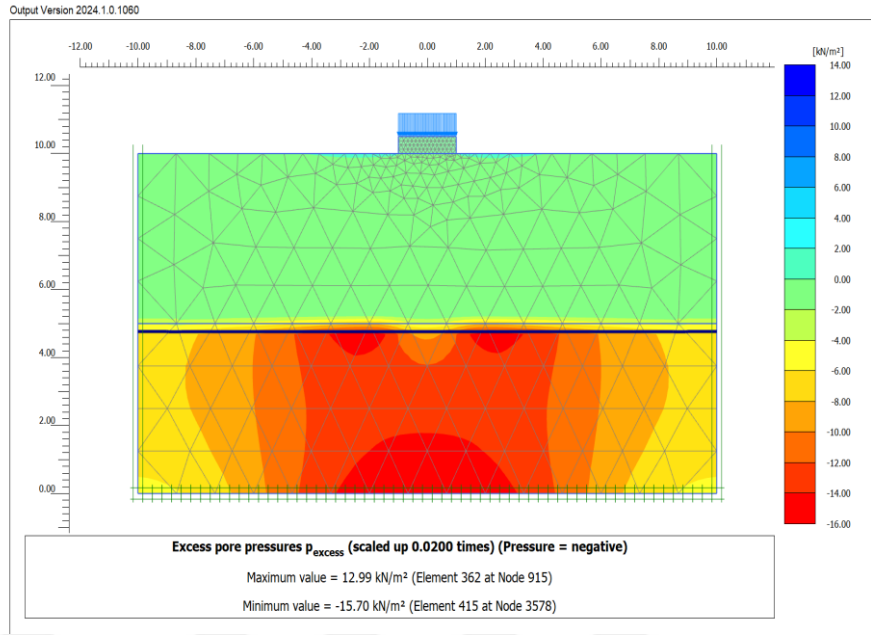


**Şekil 6.8.** Doygunluk ile (0,10) düğümünde yer değiştirme ilişkisi.

Şekil 7.9 ve 7.10 ile Tablo 7.2. doyunluk derecesi %99'dan %50'ye düştükçe aşırı boşluk suyu basıncında gerçekleşen değişiklikleri göstermektedir. Doygunluk derecesi %99'da maksimum değer 63.44 kPa değeri doyunluk azaldıkça keskin bir şekilde düşmektedir. Doygunluk azaldıkça, aşırı b.s.b. değerlerinin sürekli arttığı belirgin bir eğilim gözlemlenir; daha yüksek doyunluklardaki daha düşük basınçlardan %50 doyunlukta 12.99 kPa maksimum değere geçiş yapar. Buna karşılık, minimum aşırı b.s.b. değerleri negatiflikte azalan bir eğilim göstermektedir.



Şekil 6.9.  $S_r=0\%$  için aşırı b.s.b. dağılımı.



Şekil 6.10.  $S_r=50\%$  için aşırı b.s.b. dağılımı.

Tablo 6.2. Aşırı b.s.b. değerlerindeki değişim.

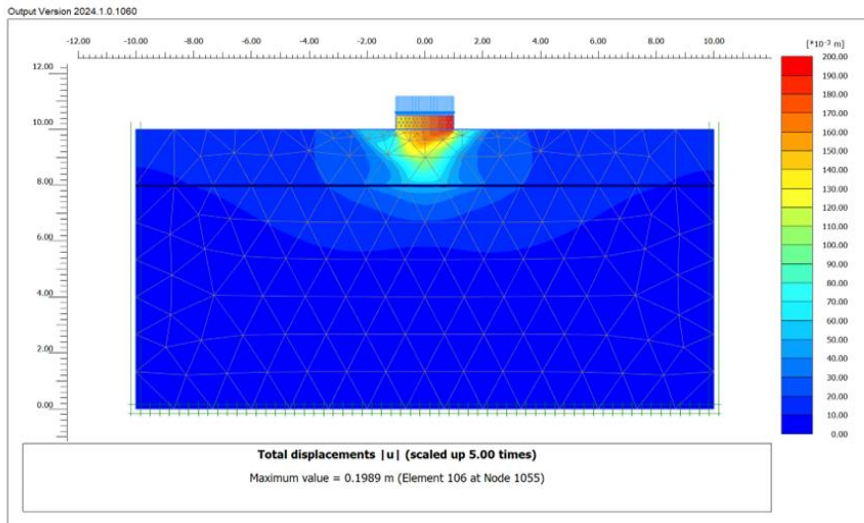
| $S_r$<br>(%) | Maksimum değer<br>(kPa) | Minimum değer<br>(kPa) |
|--------------|-------------------------|------------------------|
| 99           | 63.44                   | -88.03                 |
| 95           | 4.793                   | -15.20                 |
| 90           | 4.965                   | -15.15                 |
| 85           | 5.393                   | -15.12                 |
| 80           | 5.967                   | -15.12                 |
| 75           | 6.603                   | -15.16                 |
| 70           | 7.874                   | -15.23                 |
| 65           | 9.896                   | -15.32                 |
| 60           | 10.26                   | -15.43                 |
| 55           | 11.23                   | -15.55                 |
| 50           | 12.99                   | -15.70                 |

### 6.3. Temel Altı Zemin Kesitinde YASS -2 m Durumu

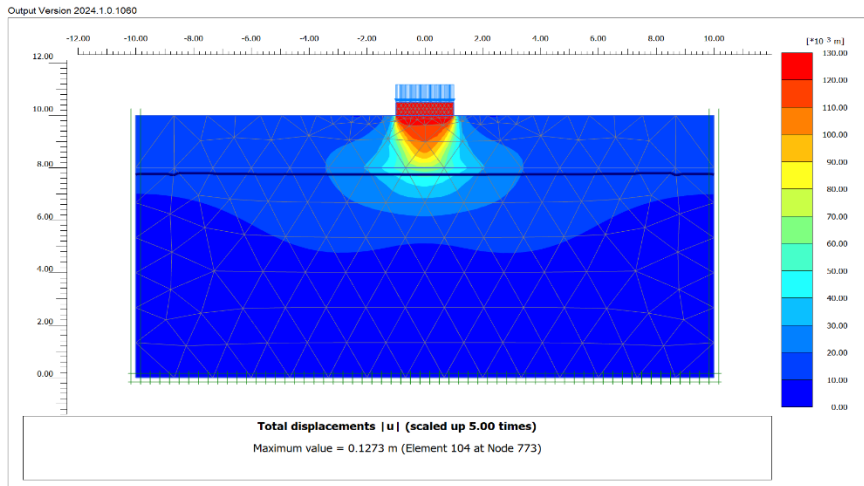
YASS'nin temel altından 2m derinde olduğu durumda %99 doygunluk derecesinde temelde maksimum 0.1989 m büyüklüğünde bir yer değiştirme hesaplanmıştır (Şekil 7.11). %50 doygunluk derecesindeki yer değiştirme ise, Şekil 7.12'de verilmiş olup,

maksimum değeri 0.1273 m olarak kaydedilmiştir. Bu daha düşük doygunluk derecesinde azalmış yer değiştirme, artan zemin dayanım ve azalan sıkışabilirlik özelliğini vurgular.

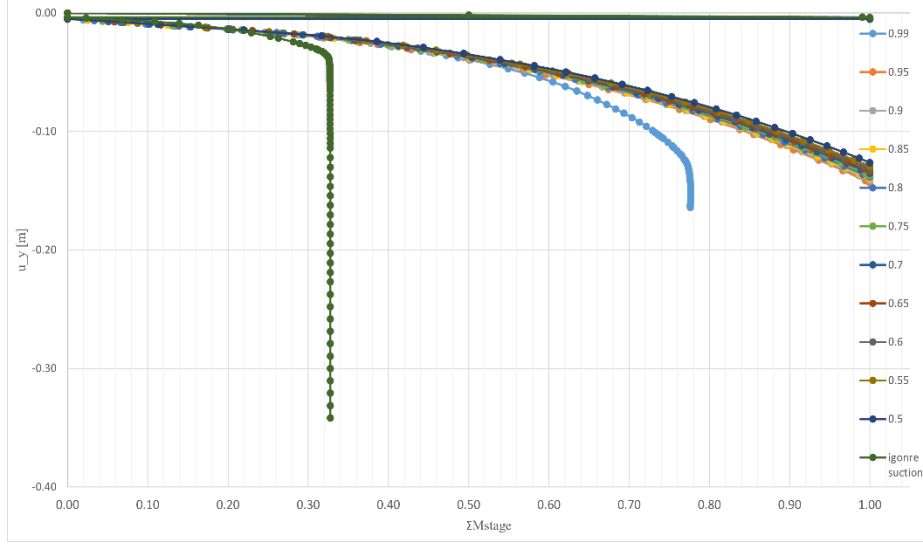
Şekil 7.13, doygunluk derecesinin %99'dan %50'ye düşerken yer değiştirmedeki azalan eğilimi göstermektedir. Bu eğilim, su içeriği ile zeminin niteliği arasındaki ters ilişkiyi anlatmaktadır. Bu durum ayrıca düşen doygunluk derecesi/su içeriği ile artan emme büyüklüğünün zemin parametrelerini olumlu yöne doğru yönlendirdiğine işaret etmektedir.



Şekil 6.11.  $S_r=99$ 'da şerit temel için toplam yer değiştirme.

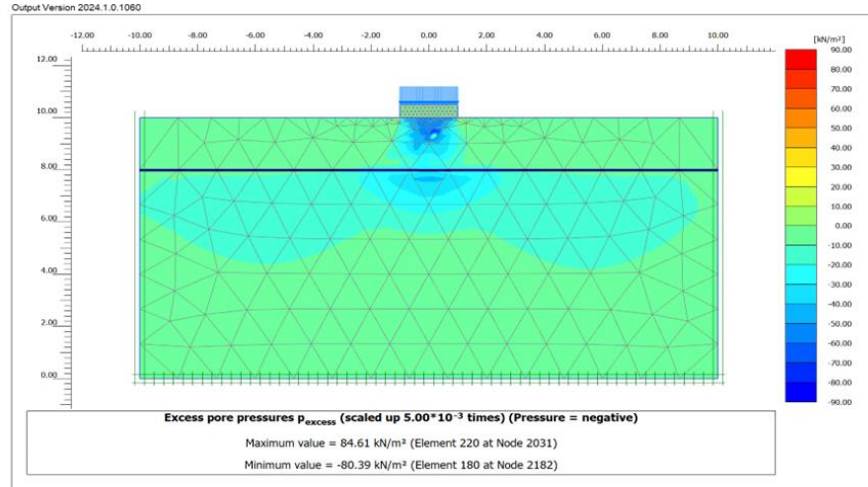


Şekil 6.12.  $S_r=50$ 'da şerit temel için toplam yer değiştirme.

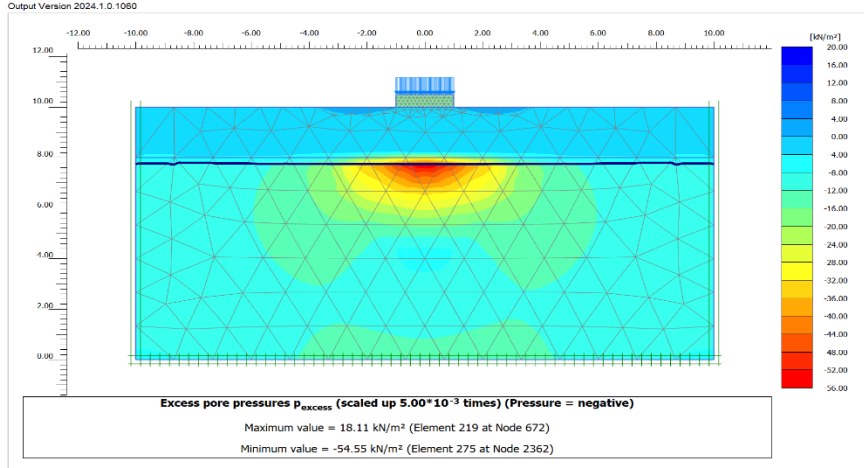


**Şekil 6.13.** Doygunluk ile (0,10) düğümünde yer değiştirme ilişkisi.

Şekil 7.14 ve 7.15 sırasıyla %99 ve %50 doyumluk derecelerinde aşırı b.b.b değerlerini göstermektedir. %99 doyumlukta, b.s.b. 84.61 kPa maksimum değerine ulaşmaktadır. Doyumluk azaldıkça maksimum aşırı b.s.b. değerlerinde belirgin bir düşme gözlenmektedir. Aşırı b.s.b. değerleri Tablo 7.3'te sunulmaktadır.



**Şekil 6.14.**  $S_r=99\%$  için aşırı b.s.b. dağılımı.



**Şekil 6.15.**  $S_r=0\%$  için aşırı b.s.b. dağılımı.

**Tablo 6.3.** Aşırı b.s.b. değerlerindeki değişim

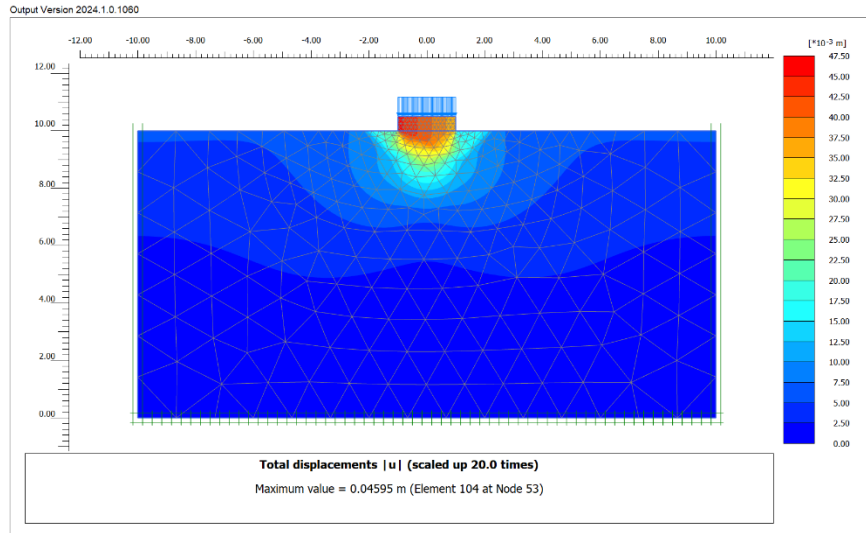
| $S_r$<br>(%) | Maksimum değer<br>(kPa) | Minimum değer<br>(kPa) |
|--------------|-------------------------|------------------------|
| 99           | 84.61                   | -81.39                 |
| 95           | 5.460                   | -57.03                 |
| 90           | 6.202                   | -56.82                 |
| 85           | 7.280                   | -56.61                 |
| 80           | 8.887                   | -56.39                 |
| 75           | 10.15                   | -56.16                 |
| 70           | 11.60                   | -55.97                 |
| 65           | 13.11                   | -55.72                 |
| 60           | 14.03                   | -55.42                 |
| 55           | 16.07                   | -55.04                 |
| 50           | 18.11                   | -54.55                 |

#### 6.4. Temel İle Aynı Seviyede YASS Durumu

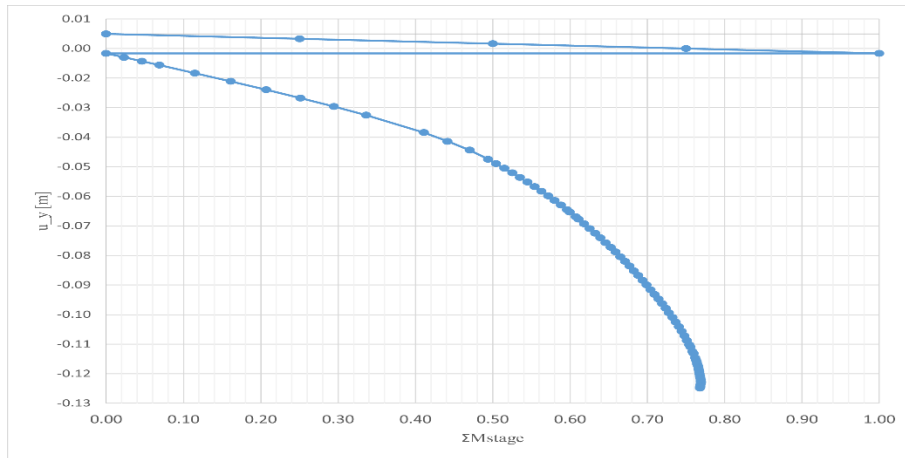
YASS'nin yüzeyde olduğu bu modelde, doymun zemin durumunda ( $S_r=0\%$ ) toplam yer değiştirme analiz sonucunda 0.04595 m olarak bulunmuştur (Şekil 7.16 ve 7.17). Bu şekiller, neredeyse doymun koşullar altında şerit temelin yer değiştirme desenini göstermektedir. Gözlemlenen yer değiştirme büyüklüğü, toprak sertliği ve mukavemetinde önemli bir azalma olduğunu belirtir ve doymun topraklarda yapısal stabiliteyi sürdürme zorluklarını vurgular.

Zemin, %99 doygunluk seviyesinde 0.04595 metre toplam yer değiştirme sergiler. Bu bulgu, bu koşullar altında şerit temelin yer değiştirme desenini detaylandıran şekil 7.16 ve 7.17'de gorsel olarak temsil edilmiştir. Gzlemlenen yer değiştirmenin genişliği, yksek nem iğeriği nedeniyle toprak sertliği ve mukavemetinde belirgin bir azalma olduğunu vurgular ve doğun ortamlarda yapısal stabilite zorluklarını vurgular.

Yer değiştirme ılımlı olmasına rağmen, taşıma kapasitesi ve temel oturması ile ilgili potansiyel sorunlar hakkında endişeleri gündeme getirecek kadar önemlidir. Bu, ozellikle yksek yeraltı su seviyelerine veya sel riski taşıyan blęelerdeki inşaat projeleri için son derece ilgilidir.

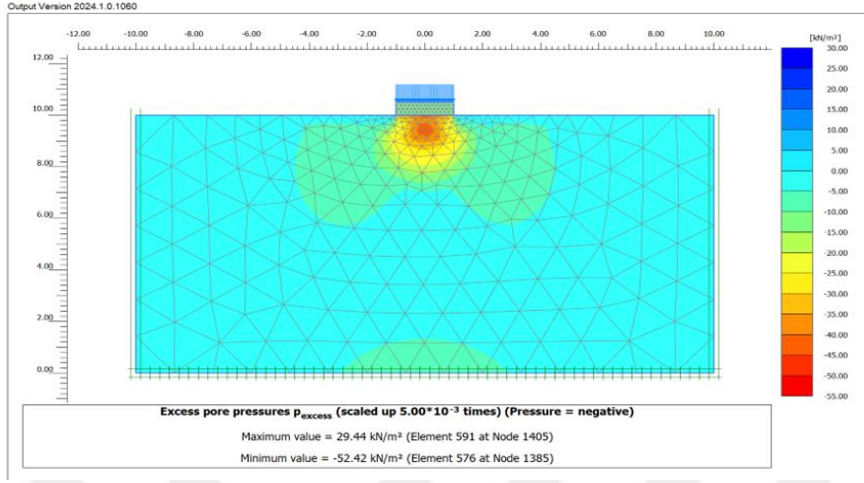


şekil 6.16. Tam doğunlukta şerit temel için toplam yer değiştirme.



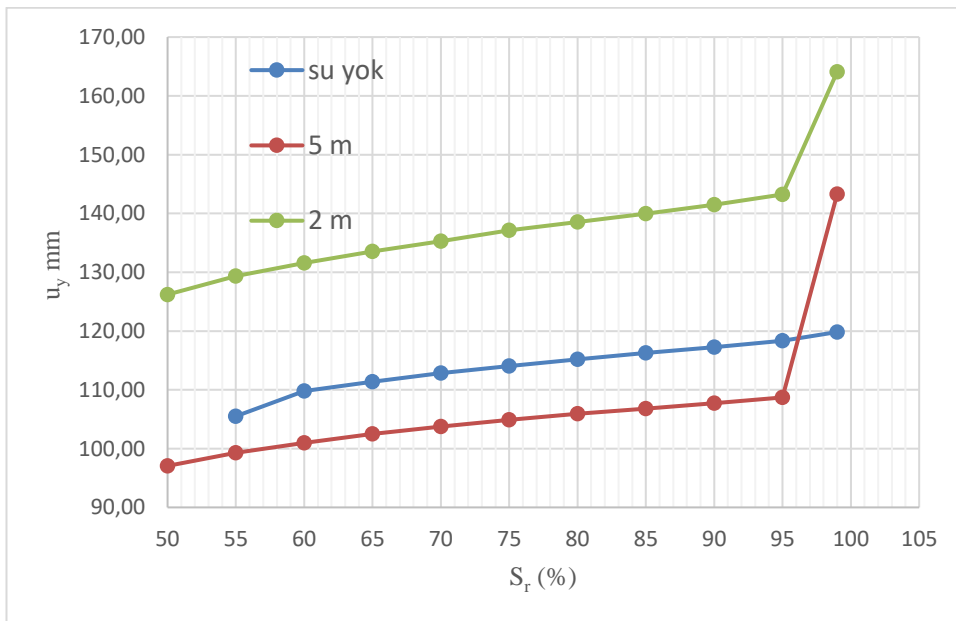
şekil 6.17. Doğunluk derecesi ile yer değiştirme ilişkisi.

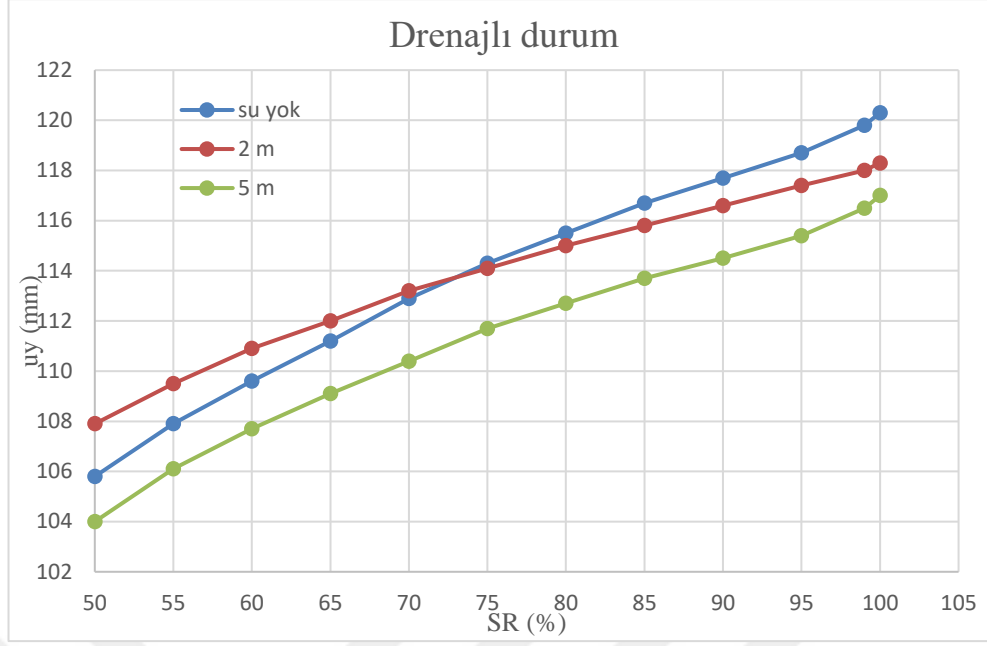
Şekil 7.18’de tam doygun durum için aşırı b.s.b. analiz sonucu verilmektedir. Veriler, tam doygun koşullarda maksimum +29.41 kPa ve minimum -52.42 kPa olan bir dağılım göstermektedir.



Şekil 6.18. Tam doygunlukta aşırı b.s.b. dağılımı.

Yer altı su seviyesi temele yaklaştıkça yer değiştirme büyüklüğü artmaktadır. Şekil 7.19’da doygunluk derecesi ile yer değiştirme miktarları farklı YASS konumları için verilmektedir. YASS’nin olmadığı durumda yer değiştirmeler doygunluk derecesi ile doğrusal bir artış göstermektedir. Temel tabanından daha aşağıda bulunan su seviyeleri için yer değiştirmeler %95 doygunluğun ötesinde önemli bir yükseliş gösterir ve tam doygunlukta zirve yapmaktadır. Tablo 7.4’te ise yer değiştirme verisi detaylı olarak sunulmuştur.





**Şekil 6.19.** Farklı yer altı su seviyeleri altında şerit temel için yer değiştirmeler  
a)Drenajsız durum b)Drenajlı durum.

Üç senaryo boyunca çeşitli doygunluk seviyelerindeki artımlı yer değiştirmeler, birkaç önemli gözlem sağlamıştır:

Su seviyesi yok : Yer değiştirmeler genellikle doygunlukla artmaktadır.

Su seviyesi 5 metrede : Yer değiştirmeler benzer bir eğilim izler ancak su olmayan senaryoya kıyasla doygunluk seviyeleri boyunca tutarlı bir şekilde daha yüksektir.

Su seviyesi 2 metrede: Bu senaryoda su seviyesinin yakınlığı, mekanik davranışı önemli ölçüde etkilemekte ve daha büyük deformasyonlara neden olmaktadır. YASS'nin yüzeyden 2 m aşağıda olması ve yapılmış ani yükleme durumunda plastik noktaların su seviyesi altında daha geniş bir alana yayıldığı ve bu nedenle bu modellerde deplasmanların daha fazla olduğu yorumlanmıştır.

Artımlı yer değiştirme verileri, su seviyesi derinliğinin temellerin stabilitesindeki önemli rolünü vurgular. Su seviyesi yükseldikçe, genellikle zemin aynı doygunluk koşulları altında daha büyük deformasyonlar sergilemektedir. Veriler, zemin davranışının ve temel performansının büyük ölçüde doygunluğa bağlı olduğunu göstermektedir.

Şekil 7.19.b'de ayrıca drenajlı durum için tekrarlanan analiz sonuçları verilmektedir. Buradaki iki grafik, doygunluk derecesi arttıkça düşey deformasyon üzerindeki farklı koşulların etkilerini karşılaştırmaktadır. Drenajsız durumda doygunluk derecesi

%100'e yaklaştıkça su seviyesinin bulunması durumunda deformasyonlarda dik bir artış göze çarpmakta, diğer durumlarda ise daha kademeli artışlar sergilenmektedir. Drenajlı durumda ise tüm koşullarda deformasyonlarda doğrusal bir artış görülmektedir. Bu iki grafik birlikte değerlendirildiğinde, drenaj koşulunun genellikle drenajsız duruma kıyasla daha düşük deformasyon değerlerine yol açtığı görülmektedir. Bu karşılaştırma, su varlığı ve konumun ölçülen deformasyon üzerindeki kritik etkisini vurgulamaktadır.

**Tablo 6.4.** Farklı doygunluk ve yer altı su seviyelerinde, güvenlik faktörü sonrası artımlı yer değiştirmeler (m).

| Doygunluk (%) | Artımlı yer değiştirmeler (m) |          |          |
|---------------|-------------------------------|----------|----------|
|               | Su yok                        | Su 5m'de | Su 2m'de |
| 95            | 0.516                         | 0.5974   | 0.6094   |
| 90            | 0.4938                        | 0.5788   | 0.7166   |
| 85            | 0.5072                        | 0.699    | 0.6942   |
| 80            | 0.457                         | 0.7685   | 0.8386   |
| 75            | 0.518                         | 0.8555   | 1.0445   |
| 70            | 0.5182                        | 0.831    | 0.8312   |
| 65            | 0.8792                        | 0.8975   | 0.7764   |
| 60            | 0.9158                        | 0.6706   | 0.38565  |
| 55            | 0.5905                        | 0.7585   | 0.8055   |
| 50            | 0.5138                        | 0.7136   | 0.7855   |

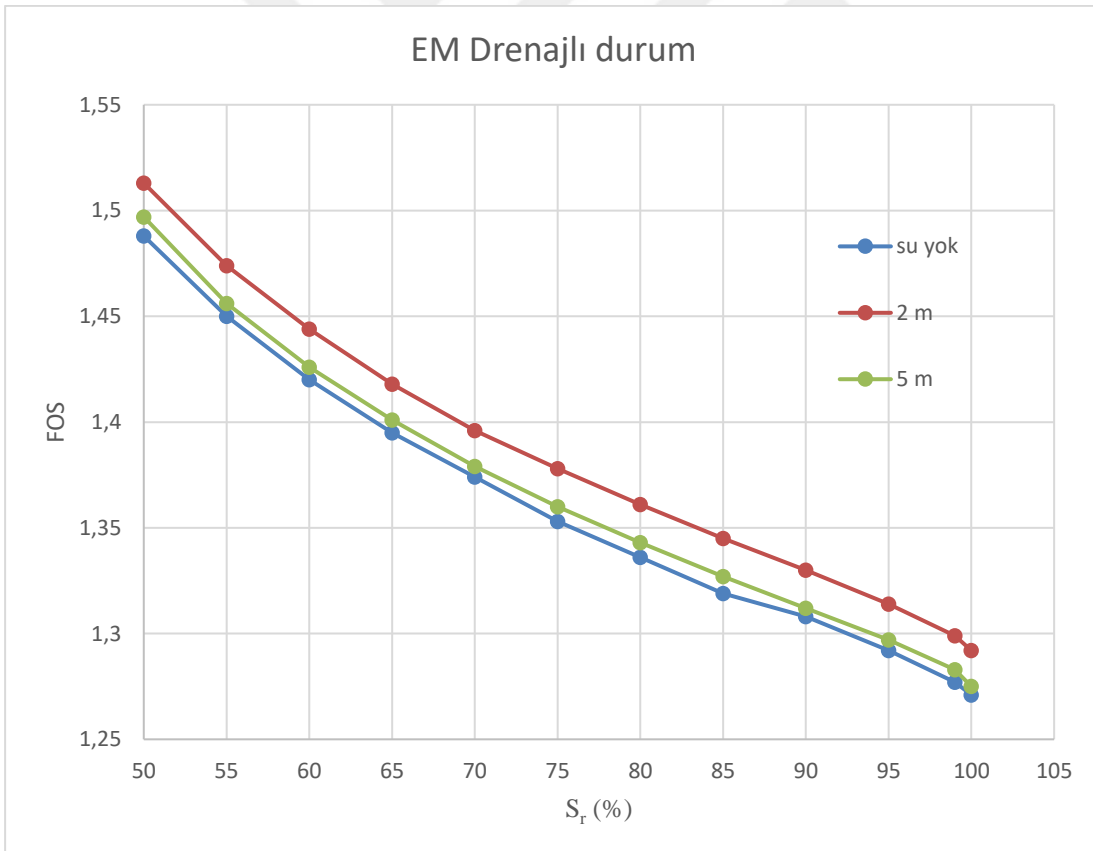
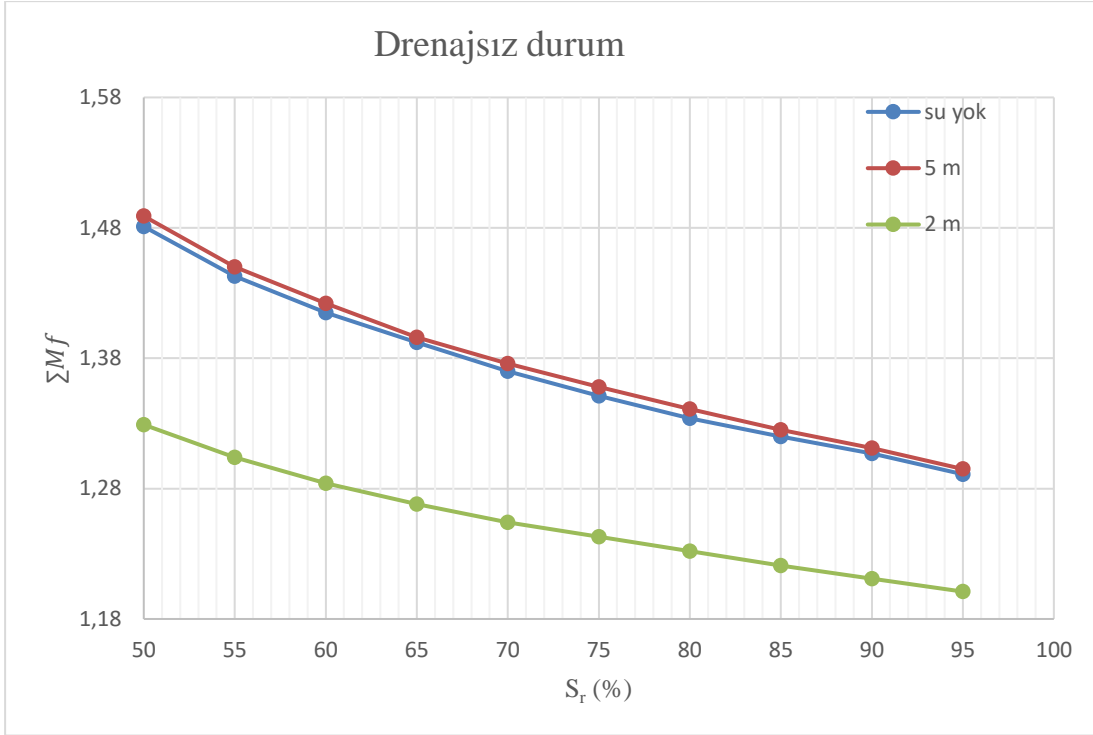
Şekil 7.20'de farklı yer altı su seviyeleri için doygunluk derecelerine göre güvenlik katsayısı ( $\sum Mf$ ) değerlerini göstermektedir. Üç eğri de doygunluk arttıkça zemin rijitliğinin azalan bir eğilim gösterdiğini belirtir, bu da daha yüksek su içerikleri altında azalan zemin direncini ve artan sıkışabilirliği göstermektedir. Eğriler arasındaki belirgin ayırım, su seviyesi derinliğinin zemin davranışı üzerindeki önemli etkisini vurgulamaktadır. Tablo 7.5 ise bu koşullar altında farklı doygunluk dereceleri için güvenlik katsayısı değerlerini sunmaktadır. 2 metre su seviyesi durumunda güvenlik katsayısındaki düşüşün 5 metre durumundan daha dik olması, su seviyesine yakınlığın zemin stabilitesi üzerinde daha belirgin bir etkisini göstermektedir. Sunulan graif ve tablolarda ayrıca drenajlı ve drenajsız durumlardaki analiz sonuçları yer almaktadır.

**Tablo 6.5.** Farklı yeraltı su seviyeleri ile emniyet faktörü.

| Güvenlik Sayısı (Drenajsız) |        |          |          |
|-----------------------------|--------|----------|----------|
| Doygunluk                   | Su yok | Su 5 mde | Su 2 mde |
| 95                          | 1.291  | 1.295    | 1.201    |
| 90                          | 1.307  | 1.311    | 1.211    |
| 85                          | 1.32   | 1.325    | 1.221    |
| 80                          | 1.334  | 1.341    | 1.232    |
| 75                          | 1.351  | 1.358    | 1.243    |
| 70                          | 1.37   | 1.376    | 1.254    |
| 65                          | 1.392  | 1.396    | 1.268    |
| 60                          | 1.415  | 1.422    | 1.284    |
| 55                          | 1.443  | 1.45     | 1.304    |
| 50                          | 1.481  | 1.489    | 1.329    |

| Güvenlik Sayısı (Drenajlı) |        |          |          |
|----------------------------|--------|----------|----------|
| Doygunluk                  | Su yok | Su 5 mde | Su 2 mde |
| 95                         | 1.488  | 1.497    | 1.513    |
| 90                         | 1.45   | 1.456    | 1.474    |
| 85                         | 1.42   | 1.426    | 1.444    |
| 80                         | 1.395  | 1.401    | 1.418    |
| 75                         | 1.374  | 1.379    | 1.396    |
| 70                         | 1.353  | 1.36     | 1.378    |
| 65                         | 1.336  | 1.343    | 1.361    |
| 60                         | 1.319  | 1.327    | 1.345    |
| 55                         | 1.308  | 1.312    | 1.33     |
| 50                         | 1.292  | 1.297    | 1.314    |



**Şekil 6.20.** Farklı yeraltı su seviyeleri ile güvenlik faktörü.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada doymun olmayan zemin koşullarında şerit temelin davranışı değerlendirilmiştir. Faklı su seviyeleri ve doymunluk dereceleri içeren zemin kesitlerinde sonlu elemalar yöntemi yardımı ile gerçekleştirilen analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları nümerik analizler ile ampirik yöntemler arasındaki farkı etkili bir şekilde ortaya koymakta ve Geoteknik Mühendisliğinde hesaplama araçlarındaki gelişmelere bir bakış açısı sunmaktadır. PLAXIS 2D simülasyonları ile elde edilen veriler, su seviyesindeki dalgalanmaların ve doymunluk dercesindeki değişimlerin temelde beliren yer değiştirme üzerindeki etkilerini ortaya koymakta ve ampirik yaklaşımlarda sıklıkla göz ardı edilen bu yönlere dikkat çekmektedir.

Doymun olmayan koşullarda, doymunluk dercesinin azaldıkça zeminin yapısal bütünlüğü daha fazla koruyabilmesi ile temelde gerçekleşen yer değiştirme miktarı azalmaktadır. Ancak, neredeyse tam doymunluk (%99) durumunda yer değiştirmeler önemli ölçüde artmakta, bu da yüksek doymunluk seviyelerindeki zeminlerde, özellikle su baskınına eğilimli alanlarda temel stabilitesine yönelik riskleri vurgulamaktadır.

Yüksek doymunluk derecesine sahip kesitlerde aşırı boşluk suyu basıncındaki değişkenlik, yüksek gerilmeler altında yapısal bütünlük açısından potansiyel zemin istikrarsızlığı risklerine işaret etmektedir.

Sonlu eleman yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerde zemin kesitinin drenajlı veya drenajsız özelliklerde tariflenmesi zemin tepkisini değiştirmekte bu da zemin yüzeyinde yer alan temelerde gerçekleşecek yer değiştirmeleri etkilemektedir.

Nümerik analizlerin sağladığı kapsamlı analiz, ampirik yöntemlerin sınırlamalarını vurgulamakta ve modern geoteknik uygulamalarda ileri simülasyon araçlarının önemini ortaya koymaktadır.



## 8. KAYNAKLAR

- . (<https://civilwale.com/types-of-foundation/>, Access: 03-04-2023).
- Abu El-Soud, S., ve Belal, A. M. (2019). Numerical modeling of rigid strip shallow foundations overlaying geosynthetics-reinforced loose fine sand deposits. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(7), 254.
- Aytekin, M. (2000). *Deneyisel zemin mekaniği*. Akademi Yayınevi.
- Azzam, W., ve Nasr, A. (2015). Bearing capacity of shell strip footing on reinforced sand. *Journal of advanced research*, 6(5), 727-737.
- Benmebarek, S., Djeridi, S., Benmebarek, N., & Belounar, L. (2018). Improvement of bearing capacity of strip footing on reinforced sand. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 12(6), 537-545.
- Benz, T., & Nordal, S. (2010). *Numerical methods in geotechnical engineering*. CRC Press Boca Raton, FL.
- Bishop, A. W. (1959). The principal of effective stress. *Teknisk ukeblad*, 39, 859-863.
- Bowles, J. E., & Guo, Y. (1996). *Foundation analysis and design* (Vol. 5). McGraw-hill New York.
- Brinkgreve, R., Kumarswamy, S., Swolfs, W., Waterman, D., Chesaru, A., & Bonnier, P. (2016). PLAXIS 2016. *PLAXIS bv, the Netherlands*, 1-16.
- Brinkgreve, R., & PLAXIS, V. P. (2019). 2D Reference manual CONNECT EDITION V20. *Delft University of Technology & PLAXIS bv, The Netherlands*.
- Broms, B. B. (1963). The effect of degree of saturation on the bearing capacity of flexible pavements. *Highway Research Record*, 71(1), 1-14.
- Button, S. (1953). The bearing capacity of footing on a two-layer cohesive subsoil. *Proc. 3<sup>rd</sup> ICSMFE, 1953, 1*, 332-335.
- Cernica, J. N. (1995). *Geotechnical Engineering: Foundation Design*. Wiley. <https://books.google.co.uk/books?id=wgWspwAACAAJ>
- Çinicioğlu, S. F. (2005). Zeminlerde statik ve dinamik yükler altında taşıma gücü anlayışı ve hesabı. *Seminer, IMO İstanbul Şubesi*, 9, 183-195.
- Coduto, D. P. (2015). *Foundation design: principles and practices*. Pearson.
- Craig, R. (2004). *Craig's soil mechanics*, Spon. In: Oxford, UK.
- Das, B. M. (2010). Principles of foundation engineering, SI Edition. *Cengage learning*.
- Das, B. M. (2017). *Shallow foundations: Bearing capacity and settlement*. CRC press.

- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2018). *Principles of foundation engineering*. Cengage learning.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (1990). Principles of geotechnical engineering.
- De Beer, E. (1965). The scale effect on the phenomenon of progressive rupture in cohesionless soils. *Soil Mech & Fdn Eng Conf Proc/Canada/*,
- Doğan Küçükçongar, Ş., Çelik, S., & Karimi Ghalehjough, B. (2022). Experimental and numerical investigation for estimating optimal depth-bearing capacity of randomly fiber-reinforced sandy soils. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 81(10), 1037-1049.
- Dregne, H. E. (1983). Soil and soil formation in arid regions. In *Environmental effects of off-road vehicles: Impacts and management in arid regions* (pp. 15-30). Springer.
- Duncan, J. M., & Chang, C.-Y. (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(5), 1629-1653.
- Fredlund, D., Morgenstern, N. R., & Widger, R. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 313-321.
- Fredlund, D., Rahardjo, H., & Fredlund, M. (2013). Unsaturated soil mechanics in engineering practice. *대한토목학회지*, 61(5), 101-101.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.
- Gan, J., Fredlund, D., & Rahardjo, H. (1988). Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test. *Canadian Geotechnical Journal*, 25(3), 500-510.
- Grasp Engineering. Why Do We Carry Out Meshing? What is Discretization?* <https://www.graspengineering.com/why-do-we-carry-out-meshing-what-is-discretization/>, Access: 01-10-2023.
- Hamid, T. B. (2005). *Testing and modeling of unsaturated interfaces*. The University of Oklahoma.
- Hansen, J. B. (1970). A revised and extended formula for bearing capacity.
- Hemp, W. (1966). Foundations of Solid Mechanics. YC Fung. Prentice-Hall, New Jersey. 1965. 525 pp. Diagrams.£ 5. *The Aeronautical Journal*, 70(663), 453-454.
- Hough, B. (1959). Compressibility as the basis for soil bearing value. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 85(4), 11-40.
- Kondner, R. L. (1963). A hyperbolic stress-strain formulation for sands. Proc. 2nd Pan-American Conf. on SMFE,
- Kumbasar, V., & Kip, F. (1999). *Zemin mekaniği problemleri*. Çağlayan Kitabevi.
- Kumbhojkar, A. (1993). Numerical evaluation of Terzaghi's  $N \gamma$ . *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(3), 598-607.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). Soil mechanics. John Wiley & Sons, Inc., New York, 553.

- Likos, W. J., & Lu, N. (2004). Hysteresis of capillary stress in unsaturated granular soil. *Journal of Engineering mechanics*, 130(6), 646-655.
- Logan, D. L. (2022). *A First Course in the Finite Element Method, Enhanced Edition, SI Version*. Cengage.  
<https://books.google.com.tr/books?id=zA2QzgEACAAJ>
- Majedi, P., Ghalehjough, B. K., Akbulut, S., & Çelik, S. (2017). Effect of Reinforcement on stability and Settlement of Embankment: A finite element analysis of different kinds of reinforcing and construction conditions. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 4(10), 759-764.
- JAKY, J. (1944). The coefficient of earth pressure at rest. *Journal of the Society of Hungarian Architects and engineers*.
- Meigs, P. (1953). World distributions of arid and semi-arid homoclimates, in *Review of research on arid zone hydrology. Arid zone program*, 1, 203-209.
- Meyerhof, G. (1951). The ultimate bearing capacity of foundations. *Geotechnique*, 2(4), 301-332.
- Noorzad, R., & Manavirad, E. (2014). Bearing capacity of two close strip footings on soft clay reinforced with geotextile. *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 623-639.
- Önalp, A. (1997). *Geoteknik bilgisi I: zeminler ve mekaniği*. Sakarya Üniversitesi.
- Önalp, A., & Sert, S. (2010). *Geoteknik Bilgisi III: Bina temelleri*. Birsen.
- Özocak, A. (2003). Doygun olmayan siltli zeminlerin sıkışabilirliği.
- Petalas, A. L., Tsiampousi, A., Zdravkovic, L., & Potts, D. M. (2022). Numerical investigation of the performance of engineered barriers in controlling stormwater runoff. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 32, 100401.
- Poulos, H. G. (2017). *Tall building foundation design*. CRC Press.
- Rasool, A. M. (2014). Mechanical behaviour of unsaturated soils in isotropic loading/unloading, monotonic and cyclic load sequence. *Saitama University, Graduate School of Science and Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Degree of Master of Engineering*.
- Steensen-Bach, J., Foged, N., & Steenfelt, J. (1987). Capillary induced stresses—fact or fiction? *European conference on soil mechanics and foundation engineering*. 9,
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Uzuner, B. A. (1990). *Çözümlü problemlerle temel zemin mekaniği*. İnşaat Mühendisleri Odası Trabzon Şubesi.
- Van Baars, S. (2018). The bearing capacity of shallow foundations on slopes. In *Numerical Methods in Geotechnical Engineering IX, Volume 2* (pp. 943-950). CRC Press.

- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Vesic, A. B. (1963). Bearing capacity of deep foundations in sand. *Highway Research Record*(39).
- Vesić, A. S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(1), 45-73.
- Yüksel, B. (2007). Konsolidasyon süresince kil yapısındaki değişimin araştırılması. *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- Zidan, A. (2012). Numerical study of behavior of circular footing on geogrid-reinforced sand under static and dynamic loading. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(2), 499-510.
- Zidan, A. F., & Mohamed, M. (2019). Numerical analysis of bearing capacity of multiple strip footing on unreinforced and reinforced sand beds. *SN Applied Sciences*, 1, 1-13.
- Yılmazoğlu, M.U., Özocak, 2023. Bearing Capacity of Shallow Foundations on Unsaturated Silty Soils. *Appl. Sci.* 2023, 13, 1308. <https://doi.org/10.3390/app13031308>.

## ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mohammad Osama Fawwaz ALSMADI

Uyruğu : Ürdün Haşimi Krallığı

Doğum Tarihi ve Yeri : 11.08.1998 - Ajloun

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, Al al-Bayt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölüm

### YABANCI DİL:

- İngilizce
- Arapça