

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YUMUŞAK ZEMİNLER ÜZERİNDEKİ YOL
DOLGULARINDA KONSOLİDASYONUN
HIZLANDIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özge ÖNCÜ BALI

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Sedat SERT

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YUMUŞAK ZEMİNLER ÜZERİNDEKİ YOL
DOLGULARINDA KONSOLİDASYONUN
HIZLANDIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özge ÖNCÜ BALI

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK

Bu tez 28.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Doç. Dr.
Sedat SERT
Jüri Başkanı


Doç. Dr.
Ertan BOL
Üye


Dr. Öğr. Üyesi
İsa VURAL
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Özge ÖNCÜ BALI

28.05.2019

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu ana kadar her zaman arkamda olan, beni bu yaşa kadar en iyi şekilde yetiştiren, eğitim hayatım boyunca desteklerini hiç esirgemeyen değerli aileme, her başım sıkıştığında bana yol gösterip destek olan sevgili eşim Deniz Bali'ye teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca her zaman bilgi ve birikimlerinden faydalandığım, benimle tecrübelerini paylaşan, geoteknik alanında kendimi geliştirmemde tüm içtenliğiyle bana yardım eden çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Sedat SERT'e teşekkürlerimi sunarım. Yine Sakarya Üniversitesi geoteknik çalışma grubu çatısı altında en az danışman hocam kadar bana yardımcı olan, beni destekleyen ve fikir alışverişinde bulunarak geoteknik alanında bana büyük katkıları olan Doç. Dr. Ertan BOL ve Doç. Dr. Aşkın Özocak'a tüm içtenliğimle teşekkür ederim. Ayrıca, bu süreci tamamlarken en çok ihtiyacım olan zaman ve hoşgörü anlamında her daim beni destekleyen değerli işverenlerim Orhan Gazi Kılıçaslan, Büşra Kılıçaslan ve OB Mimarlık Mühendislik ekibine, mühendislik anlamında bana çok katkısı olan sayın Ender Edip Saygılı ve Mehmet Tapan'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLOLAR LİSTESİ	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	1
BÖLÜM 2.	
ULAŞIM YAPILARINDA ZAYIF ZEMİN PROBLEMİ VE	
ALINAN ÖNLEMLER.....	3
2.1. Zeminlerin Sıkışması ve Konsolidasyon.....	3
2.1.1. Konsolidasyon teorisi	4
2.1.2. Konsolidasyon deneyi	5
2.1.3. Konsolidasyon süreci	6
2.1.4. Zeminin sıkışabilirliği	8
2.1.4.1 Sıkışma eğrisi	10
2.2. Zeminlerin Geçirimsizliği	11
2.2.1 Darcy yasası	13
2.2.2 Geçirimsizliğin hesaplanması.....	14
2.3. Zeminlerin Taşıma Gücü	14
2.3.1 Taşıma gücünün hesaplanması	15
2.3.1.1. Terzaghi taşıma gücü hesabı.....	15

2.4. Zeminlerin İyileştirme Yöntemleri.....	17
2.4.1. Dinamik konsolidasyon.....	17
2.4.2. Kum drenler.....	18
2.4.3. Prefabrik drenler.....	20
2.4.4. Vakum konsolidasyonu	21
2.4.5. Ozmotik basınç.....	22
2.4.6. Sönmemiş kireç kazıkları	22
BÖLÜM 3.	
BENZER ÇALIŞMA ÖRNEKLERİ.....	23
BÖLÜM 4.	
MODEL HAKKINDA BİLGİLER VE KULLANILAN METODLAR.....	30
4.1. Model Genel Bilgileri.....	30
4.2. Malzeme Özellikleri.....	30
4.3. Kullanılan Metod ve Yazılım	31
4.3.1. Plaxis 2D 2019 yazılımı	31
4.3.1.1 Mohr Coulomb modeli	32
4.3.1.2 Pekleşen zemin (hardening soil) modeli	32
4.4 Plaxis Modelleme	34
4.4.1. 2 metre yumuşak kil tabakası modeli	37
4.4.2. 5 metre yumuşak kil tabakası modeli	38
4.4.3. 10 metre yumuşak kil tabakası modeli.....	39
BÖLÜM 5.	
ANALİZLER VE SONUÇLAR	41
5.1. 10 Metrelik Üst Yumuşak Kil Tabakası için Analiz Sonuçları	41
5.2. 5 Metrelik Üst Yumuşak Kil Tabakası için Analiz Sonuçları.....	50
5.3. 2 Metrelik Üst Yumuşak Kil Tabakası için Analiz Sonuçları.....	59
BÖLÜM 6.	
SONUÇ ve ÖNERİLER.....	76
KAYNAKÇA	77
ÖZGEÇMİŞ	80

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

- A : Alan
- B : Temel genişliği
- c : Temel altındaki zemin efektif kohezyonu
- c_h : Yatay konsolidasyon katsayısı
- C : 100 - 150 arasında değişen sabit bir sayı
- C_c : Sıkışma indisi
- C_r : Yeniden yükleme indisi
- d : Kum dren çapı
- D : Dinamik konsolidasyon iyileştirme derinliği
- D_e : Dren çevresinde oluşan eşdeğer silindir çapı =1.06s üçgen konum
- D_f : Gömme derinliği
- D_{10} : Ağırlıkça %10'dan geçen etkili tane çapı
- DZY : Doğal zemin yüzeyi kotu
- E : Uygulanan enerji
- E_{50}^{ref} : Referans basınç değerindeki üç eksenli yükleme rijitliği
- E_{oed}^{ref} : Referans basınç değerindeki odömetre yükleme rijitliği
- E_{ur}^{ref} : Referans basınç değerindeki üç eksenli boşaltma-yükleme rijitliği
- f_1 : Yüzeyde maksimum iyileştirme oranı
- f_2 : Sağlanabilecek en büyük iyileştirme derinliğinde iyileştirme oranı
- i : Hidrolik eğim
- K : Permeabilite
- m : Sıkışabilirlik katsayısı
- m_v : Değişken parametre
- PI : Plastisite indisi
- P_{excess} : Fazla boşluk suyu basıncı

- q_d : Taşıma gücü
 Q : Debi
 Q_n : Zeminin nihai taşıma gücü
 s : Merkezden merkeze uzaklık
 S_∞ : Oturma miktarı
 t : C^0 olarak ısı derecesi
 T_r : Radyal drenaj için zaman faktörü
 U_y : Oturma miktarı
ULS : Son limit durumu
 V : Hız
 V_o : İlk hacim
 Z : Derinlikteki iyileştirme oranı
 $\Delta\sigma$: Gerilme artışı
 ΔV : Hacimsel değişim
 γ : Zemin efektif birim hacim ağırlığı
 ρ_w : Suyun birim hacim ağırlığı
 φ : Kayma direnci açısı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Yol dolgusu altında meydana gelen oturmalar.....	2
Şekil 2.1. Yük altında zemin davranışı	4
Şekil 2.2. Konsolidasyon deney düzeneği.....	6
Şekil 2.3. Konsolidasyon deney aleti	6
Şekil 2.4. Konsolidasyon türleri zemin zaman ilişkisi	7
Şekil 2.5. Oturma zaman ilişkisi	7
Şekil 2.6. Konsolidasyon süreci	8
Şekil 2.7. Deformasyon zaman grafiği.....	9
Şekil 2.8. Konsolidasyon eğrisi.....	10
Şekil 2.9. Su akımına bağlı gösterim	12
Şekil 2.10. Terzaghi'ye göre göçme mekanizması.....	16
Şekil 2.11. Konsolidasyon süresinin düşey dren yardımıyla hızlandırılması model örneği.....	19
Şekil 2.12. Prefabrik dren örneği	20
Şekil 2.13. Yapay dren uygulama örneği.....	21
Şekil 3.1. Tek ve çift yönlü çalışabilen muhtelif yapıdaki geogrid malzemeler ve uygulaması	23
Şekil 3.2. Stabilitate hesabında geotekstilin hesaba katılması	25
Şekil 3.3. Donatısız zeminin göçme yüzeyi.....	25
Şekil 3.4. Donatılı zeminin göçme yüzeyi	26
Şekil 3.5. Geosentetiklerle sarılı kum kazık uygulaması	27
Şekil 3.6. Dolgu problemine ait şematik gösterim.....	28
Şekil 3.7. Drenler ile iyileştirilmiş zeminde farklı yükleme durumlarında meydana gelen ilave boşluk suyu basınçları	29
Şekil 4.1. Model kesiti	30
Şekil 4.2. Hiperbolik gerilme ilişkisi	33

Şekil 4.3. Model geometrisi	35
Şekil 4.4. Dolgu altında yardımcı çizgiler	35
Şekil 4.5. Çözüm aşamaları ve seçilen düğüm noktaları	36
Şekil 4.6. Analize bağlı oturma sonuçların gösterim şekli.....	37
Şekil 4.7. 2 metre yumuşak kil tabakasına ait model görünümü	38
Şekil 4.8. 2 metre yumuşak kil tabakasına ait modelde dolgu	38
Şekil 4.9. 5 metre yumuşak kil tabakasına ait model görünümü	39
Şekil 4.10. 5 metre yumuşak kil tabasına ait modelde drenler.....	39
Şekil 4.11. 10 metre yumuşak kil tabasına ait model görünümü	40
Şekil 4.12. 10 metre yumuşak kil tabasına ait modelde drenler.....	40
Şekil 5.1. 10 m yumuşak tabaka için plastik yüklemeye ait göçme durumunu gösteren plastik noktalar	41
Şekil 5.2. Plastik yükleme sonunda göçmeyi gösteren aşırı deformasyonlar	42
Şekil 5.3. Plastik yüklemeye oluşan fazla boşluk suyu basınçları	42
Şekil 5.4. 10 m'lik yumuşak kil tabakası olması durumunda dolgunun tamamının tek seferde yüklenmesiyle oluşan plastik noktalar	43
Şekil 5.5. 10 m'lik yumuşak kil tabakası olması durumunda dolgunun tamamının tek seferde yüklenmesiyle göçmeyi gösteren aşırı deformasyonlar	43
Şekil 5.6. Drenlerin aktif hale gelmesiyle göçmenin önlenmesi.....	44
Şekil 5.7. Drenlerin aktif hale gelmesiyle oluşan oturma kalıbı	44
Şekil 5.8. Drenler varken dolgunun tamamının tek seferde yüklendiği durumda sönümlenmiş	45
Şekil 5.9. 5 m dren boyu için boşluk suyu basıncı - zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 10 m)	46
Şekil 5.10. 10 m dren boyu için boşluk suyu basıncı - zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 10 m)	46
Şekil 5.11. 15 m dren boyu için boşluk suyu basıncı - zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 10 m)	46
Şekil 5.12. 5 m dren boyu için oturma - zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 10 m)	47
Şekil 5.13. 10 m dren boyu için oturma-zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 10 m)	47

Şekil 5.14. 15 m dren boyu için oturma-zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 10 m).....	48
Şekil 5.15. 5 m yumuşak tabaka için plastik yüklemeye ait göçme durumunu gösteren plastik noktalar.....	51
Şekil 5.16. 5 m yumuşak kil tabakası için plastik yüklemeye ait aşırı deformasyonlar	51
Şekil 5.17. 5 m yumuşak kil tabakası için plastik yüklemeye oluşan fazla boşluk suyu basınçları.....	51
Şekil 5.18. 5 m yumuşak kil tabakasında dolgunun tamamının tek seferde yüklenmesinden oluşan göçme durumunda plastik noktalar.....	53
Şekil 5.19. 5 m yumuşak kil tabakası için dolgunun tamamının tek seferde yüklenmesiyle göçme	53
Şekil 5.20. 5 m yumuşak kil tabakası için drenlerin aktif hale gelmesiyle göçmenin önlenmesi	54
Şekil 5.21. 5 m yumuşak kil tabakası için drenlerin aktif hale gelmesiyle oluşan oturma kalıbı.....	54
Şekil 5.22. 5 m yumuşak kil tabakasında drenler aktifken dolgunun tamamının tek seferde yüklendiği durumda sönmüş fazla boşluk suyu basınçları	55
Şekil 5.23. 5 m dren boyu için boşluk suyu basıncı-zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 5 m).....	56
Şekil 5.24. 10 m dren boyu için boşluk suyu basıncı-zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 5 m).....	56
Şekil 5.25. 5 m dren boyu için oturma-zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 5 m).....	58
Şekil 5.26. 10 m dren boyu için oturma-zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 5 m).....	58
Şekil 5.27. 2 m yumuşak tabaka için plastik yüklemeye ait göçme durumunu gösteren plastik noktalar.....	60
Şekil 5.28. 2 m yumuşak kil tabakasında plastik yükleme sonunda aşırı deformasyonlar	60

Şekil 5.29. 2 m yumuşak kil tabakası için plastik yüklemeye oluşan fazla boşluk suyu basınçları.....	61
Şekil 5.30. 2 m yumuşak tabaka için konsolidasyon yüklemesine ait oluşan plastik noktalar.....	62
Şekil 5.31. 2 m yumuşak kil tabakası için konsolidasyon yüklemesine ait oturma kalıbı.....	62
Şekil 5.32. 2 m yumuşak kil tabakası için konsolidasyonlu yüklemeye oluşan fazla boşluk suyu basınçları.....	63
Şekil 5.33. Ani yüklemeye dolguyla iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş durumda konsolidasyon etkisinde meydana gelen oturma miktarları (dolgu 1 günde inşa ediliyor)	64
Şekil 5.34. Ani yüklemeye dolguyla iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş durumda konsolidasyon etkisinde meydana gelen boşluk suyu basınçları (dolgu 1 günde inşa ediliyor)	66
Şekil 5.35. Dolguyla iyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş durumda konsolidasyon analizinde bekleme sonunda meydana gelen oturma miktarları (boşluk suyu basıncının 1 kPa'a kadar sönümlenmesi bekleniyor)...	70
Şekil 5.36. Dolguyla iyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş durumda konsolidasyon analizinde bekleme sonunda meydana gelen boşluk suyu basınçları.....	72

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Dinamik konsolidasyon sonucu erişilmesi olası taşıma güçleri	18
Tablo 3.1. Denenen yükleme modelleri	28
Tablo 4.1. Dolgu ve yol zeminine ait malzeme özellikleri	31
Tablo 4.2. Model genel bilgileri	34
Tablo 5.1. Analiz tipine bağlı dren durumu ve göçme ilişkisi	43
Tablo 5.2. Farklı yükleme koşullarına göre oluşan boşluk suyu basınçları (10 m yumuşak kil)	49
Tablo 5.3. 5 m yumuşak kil tabakası için analiz tipine bağlı dren durumu ve göçme ilişkisi.....	52
Tablo 5.4. Farklı yükleme koşullarına göre oluşan boşluk suyu basınçları (5 m yumuşak kil)	59
Tablo 5.5. Konsolidasyon analizinde iyileştirme olmadan meydana gelen oturma ve boşluk suyu basınçları	68
Tablo 5.6. Konsolidasyon analizinde iyileştirmeden sonra meydana gelen oturma ve boşluk suyu basınçları	69
Tablo 5.7. Konsolidasyon analizinde iyileştirme olmadan meydana gelen oturma ve boşluk suyu basınçları (phase_2).....	74
Tablo 5.8. Konsolidasyon analizinde iyileştirmeden sonra meydana gelen oturma ve boşluk suyu basınçları (phase_6).....	75

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Dolgu, Yumuşak Zemin, Oturma, Taşıma Gücü, Dren

Ulaşım yapılarının yumuşak zeminler üzerine inşa edilmeleri durumunda taşıma gücü ve oturma problemleriyle sıklıkla karşılaşılabilirdiği bilinen bir gerçektir. Ulaşım yapılarında inceleme noktalarının aralıklarının bina tipi yapılara göre oldukça fazla olması sondaj ve sondalama sonuçlarına göre tasarım yapıldıktan sonra bazen küçük, bazen de orta ölçekte öngörülemeyen problemleri ortaya çıkarabilmektedir. Ortam çok yumuşak olduğunda ani göçmelerle karşılaşılabilirmekte, sıkışabilirliğin fazla olması durumunda ise uzun vadede gerçekleşen oturmaların telafi edilmesine yönelik tekrar tekrar dolgu yapılması ve böylece tamir masraflarının sürekli devam etmesi yanında en azından seyahat sırasında konforun bozulması durumları ortaya çıkabilmektedir. Doğal zemin kesitinde yumuşak zeminlerin kalınlığının az ve yüzeye yakın olma durumlarında çözüm olarak zemin kaliteli dolgu malzemesiyle değiştirilebilirken, yumuşak zeminlerin kalınlığının fazla olması durumunda perdelerle zemini kısıtlama veya drenlerle konsolidasyonu hızlandırma gibi çok farklı seçenekler mümkün olabilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında üst katmanlarında farklı kalınlıklarda çok yumuşak zeminlerin bulunduğu kesitlerde çok yüksek olmayan bir kalınlıktaki dolgunun sebep olduğu problemler ve çözüm yolları irdelenmektedir. Yaklaşık elli km uzunluğa sahip Adapazarı - Karasu duble yolunun Sinanoğlu bölgesinde yaklaşık iki yüz metre uzunluğunda bir kısımda yapılan iki metrelik dolgu bir metreyi aşan oturmalara ve altında bulunan menfezlerin kırılmasına neden olmuştur. Yol imalatı bittikten sonra yapılan gözlemler yolun uzun seneler boyunca tamirat amacıyla defalarca hizmete kapatıldığını göstermektedir. Bu tez çalışmasında, Plaxis iki boyutlu yazılımı kullanılarak benzer bir kesitte üst yumuşak tabakanın farklı kalınlıklarda olması durumları için öncelikle doğal durumda taşıma gücü aşılması ve oturma problemi ortaya konmakta, sonrasında ise alternatif çözümler sunulmaktadır. Yapılan analizlerde yumuşak zeminlerde dolgunun yapım hızının önemli olduğu ve hızlı dolgu yapımının göçmelere sebep olduğu gösterilmiştir. Bunun yanında dolgu yapıldıktan sonra oluşan fazla boşluk suyu basınçlarının sönmülmesi için bekleme süresinin dren kullanımı ile radikal bir biçimde azaltılabildiği, ayrıca dren boylarının da sönmülme süresini etkilediği ortaya konmuştur.

ACCELERATING CONSOLIDATION OF ROAD FILLS ON SOFT SOILS

SUMMARY

Keywords: Embankment, Soft Soil, Settlement, Bearing Capacity, Wick Drains

It is a known fact that the bearing capacity and the settlement problems are often encountered when the transportation structures are built on soft soils. In such structures, the spaces of the investigation points are considerably higher than the building type structures, and after the design according to the drilling and probing results, small or medium sized unforeseen problems may sometimes be revealed. When the soil is too soft, the sudden failures of soil may be encountered. In the case of increasing compressibility, it is possible to fill up continuously to compensate long-term settlements. In addition to continuous repair costs, the deterioration of comfort can at least be encountered during the travel. If the thickness of soft soil is low and close to the surface, it is possible to change this soil layer; if the thickness of the soft soil is high, there are many different options such as restriction of the soil with walls or to accelerate the consolidation with drains

In this thesis, the solutions of the problems which are caused by a 2 m high embankment in a section consisting of very soft soil are examined. In Sinanoğlu region, which is on the fifty km long Adapazarı - Karasu double road, 2 m high embankment led to over one meter settlement and the breakage of the culverts on the two hundred meters long part of this road. The observations made after the road construction finished show that the road had closed for service for many times. In this thesis, in a similar section, using the Plaxis 2D software, firstly, the problems of bearing capacity and settlement are presented in the natural condition, and then the alternative solutions are presented and the results are examined. In the analyzes, the effect of the parameters such as the construction speed of the embankment, the consolidation time and the presence of drains on the results are researched and it is aimed to determine the appropriate solution depending on the thickness of the soft soil under the limited thickness of the embankment.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Amaç ve Kapsam

Geoteknik mühendisliğinde özellikle ulaşım yapılarında yumuşak zeminler üzerine yapılan dolgularda taşıma gücü aşılması ve oturma problemi çok sık karşılaşılan sorunlardandır. Problemlerin temeli, bu tip yapılarda zemin incelemelerinin bina tipi yapılara göre daha düşük hassasiyette gerçekleştirilmesi ve buna bağlı olarak kayma direnci zayıf veya sıkışabilirliği yüksek zeminlerin varlığının tespit edilememesidir. Bu tez çalışmanın çıkış noktası; yaklaşık elli km uzunluğa sahip Adapazarı - Karasu double yolunun Sinanoğlu bölgesinde yaklaşık iki yüz metre uzunluğunda bir kısımda yapılan iki metrelik dolgunun bir metreyi aşan oturmalara ve altında bulunan menfezlerin kırılmasına neden olmasıdır (Şekil 1.1.). Yol imalatı bittikten sonra yapılan gözlemler yolun uzun seneler boyunca tamirat amacıyla defalarca hizmete kapatıldığını göstermektedir. Bu çalışmada bu gibi problemlerden yola çıkılarak Plaxis iki boyutlu yazılımının kullanılmasıyla oluşturulan benzer kesitlerde öncelikle doğal durumda taşıma gücü aşılması ve oturma problemi ortaya konmakta, sonrasında ise alternatif çözümler sunularak sonuçlar irdelenmektedir.



Şekil 1.1. Yol dolgusu altında meydana gelen oturmalar

BÖLÜM 2. ULAŞIM YAPILARINDA ZAYIF ZEMİN PROBLEMİ VE ALINAN ÖNLEMLER

Ulaşım yapılarının yumuşak / gevşek zemin kısımlarında meydana gelen oturmaların tamamlanması sürecinin hızlandırılması ve taşıma gücü kayıplarına yönelik olarak bir takım tedbirler alınması gerekmektedir. Bu açıdan konsolidasyon ve taşıma gücü konularında bilgi sahibi olunması önemlidir.

2.1. Zeminlerin Sıkışması ve Konsolidasyon

Yüklenen bir zeminde oturma;

- a) Zemin danelerinin sıkışması,
- b) Zemin boşluklarındaki hava ve suyun sıkışması,
- c) Boşluklardaki hava ve suyun dışarı çıkması sonucu danelerin birbirine yaklaşması ve zeminin toplam hacminin azalmasından kaynaklandığı bilinmektedir (Özaydın, 1989).

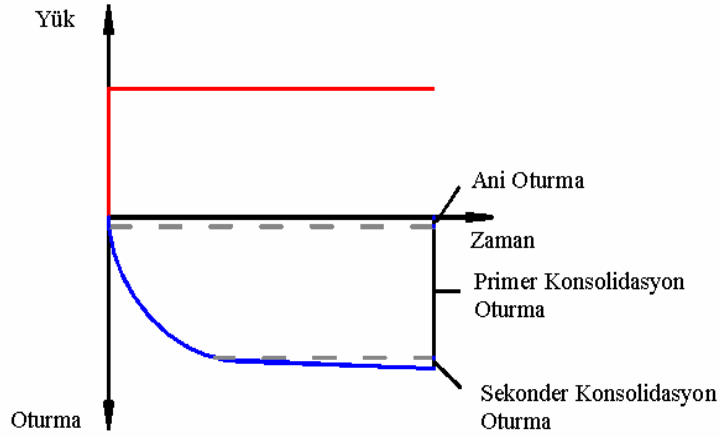
Zemin daneleri sert minerallerden oluştuğundan sıkışma potansiyelleri küçük olmaktadır. Suyu doymuş zeminlerde de suyun sıkışabilirliği ihmal edilecek kadar küçük olduğundan oturmaların etkisi azdır. Bu yüzden suya doymuş zeminlerde sıkışma suyun dışarı çıkması olarak hesaplamalara katılabilir. Sabit yükler altında boşluklardaki suyun dışarı çıkması sonucu zeminlerde meydana gelen hacimsel şekil değiştirmelere konsolidasyon adı verilmektedir (Özaydın, 1997).

Oturma; uygulanan yüke bağlı olarak zemin prizmasının sıkışması olarak tanımlanır ve üç bileşenden oluşur (Şekil 2.1.):

1. Ani elastik oturma,

2. İlksel (primary) konsolidasyon,
3. İkincil (secondary) konsolidasyon.

Bu oturmalaran ani oturma zeminin elastisite modülü kullanılarak hesaplanmaktadır.



Şekil 2.1. Yük altında zemin davranışı

2.1.1. Konsolidasyon teorisi

Konsolidasyon teorisi, zeminin konsolidasyon sürecindeki davranışı ve konsolidasyondan kaynaklanan oturmaların büyüklük ve zamanlaması hakkında bilgi veren teoremdir. Terzaghi, killerin sıkışmasında oluşan fazla boşluk suyu basınçlarının zamanla sistem dışına atılması sonucu boşluk hacminde azalmaların meydana geldiğini farkederek bu teoremi geliştirmiştir (Önalp, 2007).

İnce daneli zeminler olarak bilinen kil ve silte bakıldığında permeabilite (geçirimsizlik) çok düşük olmakla birlikte, suyun dışarı çıkması çok yavaş ve konsolidasyon süresinin de çok uzun olduğu gözlemlenmektedir.

Teori, zeminin suya doymun olması, drenajın düşey yönde olması ve zeminin yatay yönde genişlemediği gibi varsayımlar yapmaktadır. Teori, killerin yüzde yüz doymun olduğu kabul edilerek geliştirilmiştir. Böylece sıkışmanın havadan kaynaklanmadığı düşüncesi çözüme kolaylık sağlamaktadır. Zeminlerin sıkışması hesaplanırken

gerilme, şekil değiştirme ve zaman parametreleri üzerinde durulmaktadır. Teoremdede yapılan kabuller şunlardır:

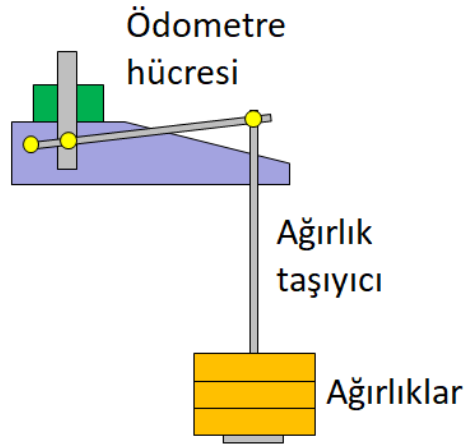
- a) Zemin homojendir,
- b) Boşlukların hepsi su ile doludur,
- c) Darcy yasası geçerlidir,
- d) Gerilme artışları ani olarak uygulanır,
- e) Sıkışmalar ve zemin hareketi tek yönde oluşur.

2.1.2. Konsolidasyon deneyi

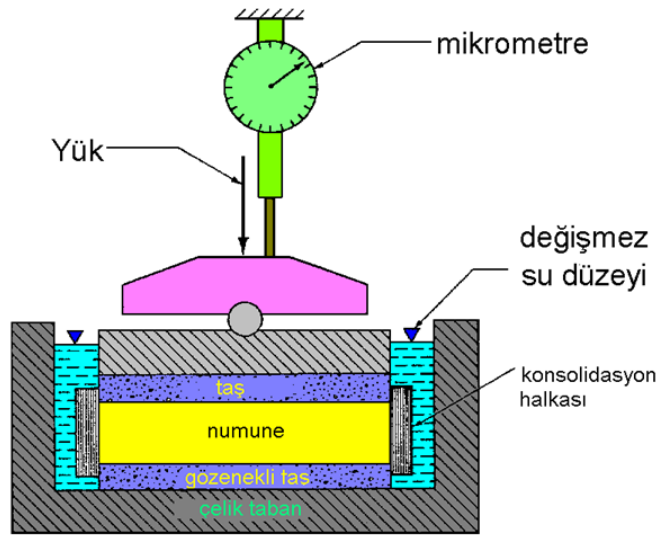
Ödometre aleti kullanılarak konsolidasyon deneyi gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.2.). Bir boyutlu ödometre deneyi ilk olarak Terzaghi tarafından uygulanmıştır. Ödometre deneyi, ince daneli zeminlerin 1 boyutlu konsolidasyon davranışının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Arazideki zemin katmanlarının düşey yüklemeler altında sıkışması esasına dayanarak laboratuvardaki doğgun zemin numunelerinin yatay genişlemelerinin engellenmesi amaçlanmaktadır. Buna yönelik olarak numuneler bir çelik halka içine yerleştirilerek bu aşama gerçekleştirilir. Numunenin alt ve üst yüzeyine konan gözenekli taşlar ile zemin içindeki suyun düşey doğrultuda dışarı çıkmasını sağlamak hedeflenmiştir (Şekil 2.3.).

Ayrıca bu deneyde zeminin tabakalarının düşey yüklemeler altındaki sıkışması tek boyutlu (düşey doğrultuda) olduğu için deney sırasında yanıl gerilmelere izin verilmemekte ve belirli düşey yükler altında zeminin boy kısalması hesaplanmaktadır.



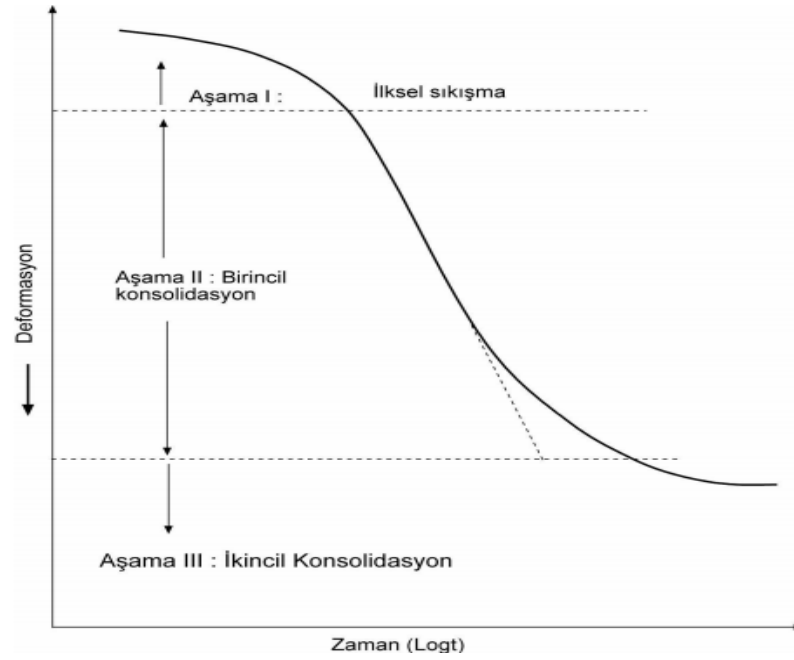
Şekil 2.2. Konsolidasyon deney düzeneği



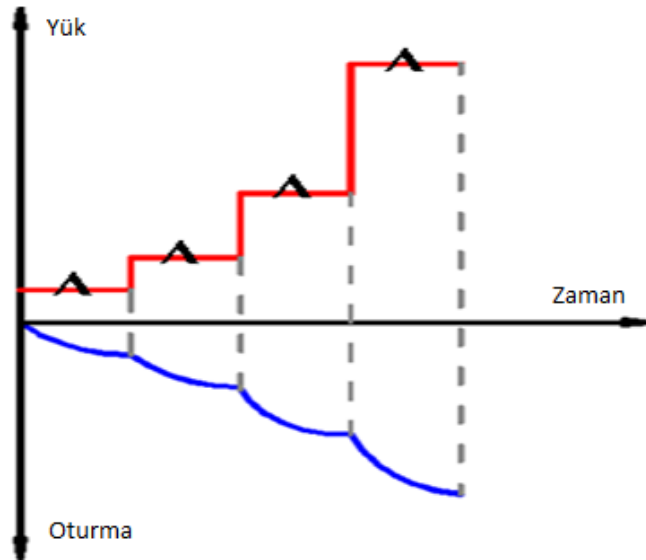
Şekil 2.3. Konsolidasyon deney aleti (Önalp, 2007)

2.1.3. Konsolidasyon süreci

Terzaghi konsolidasyon teorisi, geçirimsizliği düşük zeminlerde sıkışmaların yüklenme ile hemen gerçekleşmeyeceğini varsaymakta ve fazla boşluk suyu basınçlarının zaman içerisinde sönümlenmesiyle ortaya çıktığını öne sürmektedir (Şekil 2.4.). Zemin geçirimsizliği sıfırdan büyük ise fazla boşluk suyu basıncının zaman içinde sönümlenmesi beklenir. Başlangıçta uygulanan toplam gerilmenin tümü su tarafından taşınırken zaman içinde boşluk suyu basıncının sönümlenmesiyle birlikte boşluk suyu basıncı sıfıra yönelirken efektif gerilme toplam gerilmeye eşit olacaktır (Şekil 2.5.). Bunun sonucunda hacimsel azalma meydana gelecektir (Önalp, 2007).



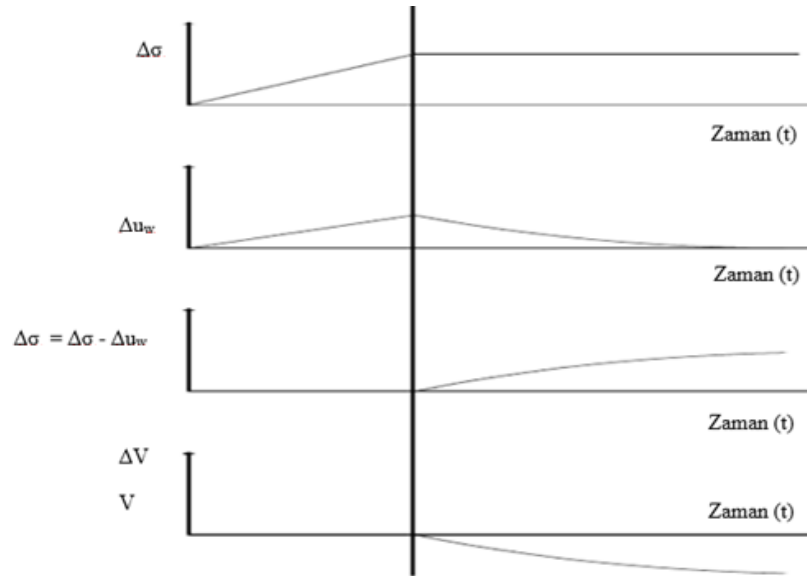
Şekil 2.4. Konsolidasyon türleri zemin zaman ilişkisi



Şekil 2.5. Oturma zaman ilişkisi

Sıkışma, boşluklardaki suyun dışarı çıkması sonucu, zemin iskeletindeki hacim değişiminden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, boşluk oranındaki değişim büyük önem kazanmaktadır.

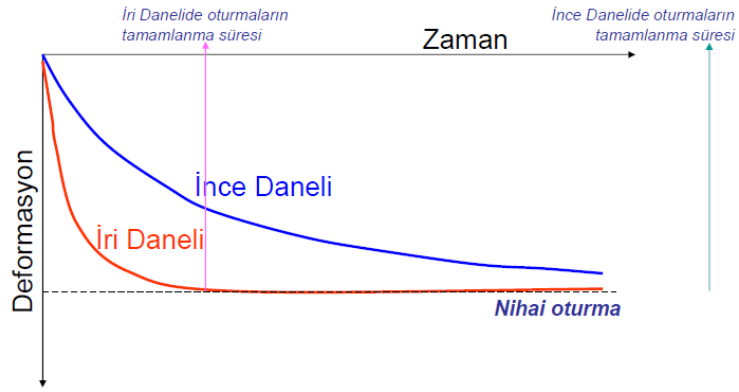
Şekil 2.6. incelendiğinde yükleme - zaman, boşluk suyu basıncının artması - zaman, efektif gerilmenin yükselmesi - zaman ve hacim azalması - zaman parametrelerine bağlı olarak konsolidasyon sürecinin tamamlanması görülmektedir.



Şekil 2.6. Konsolidasyon süreci

2.1.4. Zeminin sıkışabilirliği

Suyun zemin içinde hareket edebilme özelliği zeminin türüne göre farklılıklar göstermektedir. İnce daneli zeminlerde (silt, kil) permeabilite yani geçirimsizlik çok düşük olabildiğinden suyun dışarı çıkması çok zor ve bu nedenle de konsolidasyon süresi çok uzun olmaktadır (Şekil 2.7.). Başka bir deyişle killer yük aldıklarında hareketleri zamana bağlı ve gözle görülebilecek boyutta olmasına rağmen kumlarda mertebeler aynı bile olsa hareketler çok hızlı oluşmaktadır. Bu özellik kilin sıkışabilir, kumun ise sıkışamaz olduğu gibi hatalı bir yaklaşıma sevkeder. Araştırmalara göre gevşek kumlarda sıkışmanın birçok kile göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Buradan ulaşılabilecek sonuç; kum ve çakıllarda sıkışmanın zamandan bağımsız ve ani olarak gerçekleştiğidir. Bu sebeple killerin oturması üzerinde araştırmalar sıklaştırmıştır (Önalp, 2007).



Şekil 2.7. Deformasyon zaman grafiği

Zeminler gerilme artışı ($\Delta\sigma$) aldığıında hacimde kayıplar oluşur. Elastik bir sıkı kum için hacim kaybı;

$$\left(\frac{\Delta V}{V_0}\right) = m\sqrt{\Delta\sigma} \quad (2.1)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada;

m : sıkışabilirlik katsayısı

$\Delta\sigma$: gerilme artışı

ΔV : hacimsel değişim

V_0 : ilk hacimdir.

Bir boyutlu sıkışma ifadesi Denklem (2.2) - Denklem (2.4)'te gösterilmektedir.

$$\left(\frac{\Delta V}{V_0}\right) = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (2.2)$$

$$\left(\frac{\Delta V}{V_0}\right) = \frac{Vs + (1 + e_0) - Vs(1 + e)}{Vs(1 + e_0)} = \frac{(e_0 - e)}{(1 + e_0)} \quad (2.3)$$

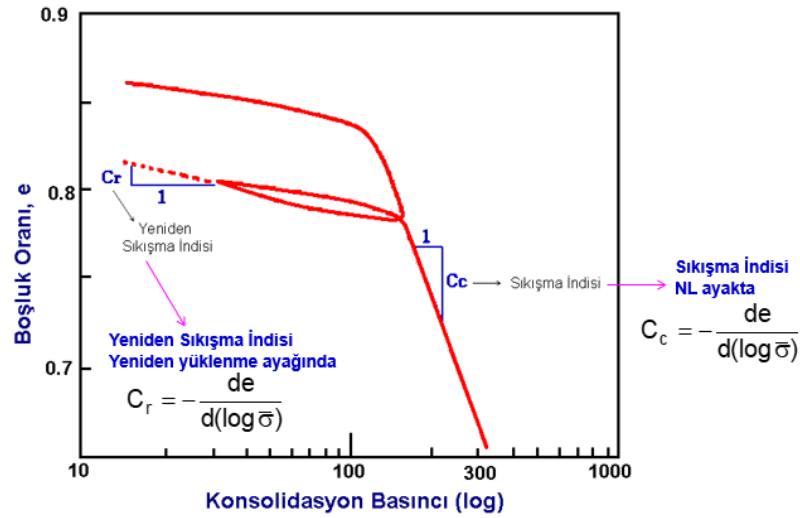
$$\left(\frac{\Delta V}{V_0}\right) = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (2.4)$$

Toplam sıkışma miktarı Denklem (2.5) yardımıyla hesaplanır. Burada m_v hacimsel sıkışma modülü olup birimi m^2/kN olarak bilinmektedir. H_0 tabaka kalınlığını, $\Delta\sigma$ ise gerilme artışını ifade etmektedir. m_v değişken bir değer olduğu için her gerilme aralığı için yeni hesap yapılması gerekmektedir.

$$(\Delta H) = S_{\infty} = H_0 \cdot m_v \cdot \Delta\sigma' \quad (2.5)$$

2.1.4.1 Sıkışma eğrisi

Şekil 2.8.'de örnek bir konsolidasyon deneyi eğrisi gösterilmektedir. Günümüzde sıkışmalar % birim boy kısalma yerine boşluk oranı cinsinden gösterilmektedir. Bir kilin doğru veya doğruya yakın şekilde beliren sıkışma eğrisine bakir eğri denilmekte olup bu eğriden yararlanılarak çözümlenmeler yapılmaktadır (Önalp, 2007).



Şekil 2.8. Konsolidasyon eğrisi

Şekil 2.8.'de bakir sıkışma eğrisinin doğrusal kısmının eğimine sıkışma indisi (C_c) denir ve Denklem 2.6'daki gibi hesaplanır.

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1} = \frac{\Delta e}{\left(\log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}\right)} \quad (2.6)$$

Şekil 2.8'de boşaltma veya yeniden yükleme bölgesinin doğrusal kısmının eğimine yeniden yükleme indisi (C_r) denir ve Denklem 2.7'deki gibi hesaplanır.

$$C_r = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1} = \frac{\Delta e}{\left(\log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}\right)} \quad (2.7)$$

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (2.8)$$

$$\Delta H = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \cdot H_0 \quad (2.9)$$

$$C_c = \frac{\Delta e}{\left(\log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}\right)} \quad (2.10)$$

$$\Delta e = C_c \cdot \log \left(\frac{\Delta \sigma' + \sigma'_1}{\sigma'_1} \right) \quad (2.11)$$

$$\Delta H = \frac{H_0}{1 + e_0} \cdot C_c \cdot \log \left(\frac{\Delta \sigma' + \sigma'_1}{\sigma'_1} \right) \quad (2.12)$$

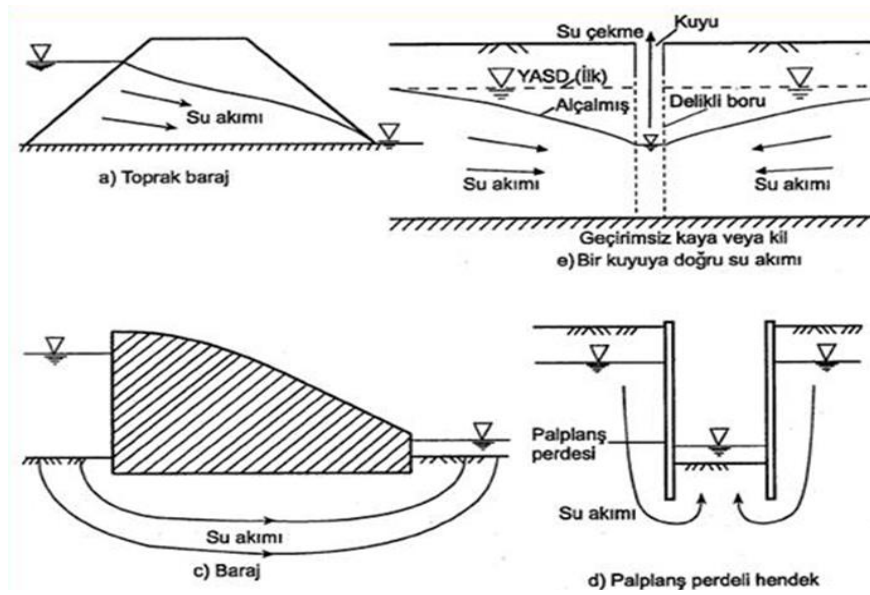
Buna göre sıkışma miktarının hesabı Denklem (2.8) - Denklem (2.12) ile yapılır. Şekil 2.8.'de C_c ve C_r değerleri sadece birer tane oldukları için toplam oturma miktarları hesaplanırken her gerilme artışı için yeni bir hesap yapmaya gerek olmamaktadır.

2.2. Zeminlerin Geçirimsizliği

Suya doygun zeminlerde belirli yük altındaki oturmayı etkileyen faktörlerden biri de permeabilitedir.

Permeabilitenin kullanım alanları (Şekil 2.9.);

1. Yeraltından (palplanş perdesi) ve toprak dolgu barajdan sızan su miktarının hesaplanması,
2. Kazı esnasında yer altı suyunun uzaklaştırılmasında doğan problemlerin çözümü,
3. Dayanma yapıları ve zemin yapılarının stabilite analizlerinde sızıntı kuvvetlerinin hesaplanması,
4. Akım anında zeminde duraylılığın belirlenmesi,
5. Geçici akım şartlarında zeminin davranışının incelenmesi,
6. Akım bölgesinin belirlenmesi şeklinde belirtilebilir (Önalp, 2007).



Şekil 2.9. Su akımına bağlı gösterim

Geçirimsizliği etkileyen faktörler;

1. Zemin boşluklarının şekli,
2. Suyun viskozitesi,
3. Suyun sıcaklığı,
4. Zemin boşluklarındaki hava miktarı,
5. Tabakaların durumu,
6. Suyun kimyasal bileşimidir (Önalp, 2007).

2.2.1 Darcy yasası

Darcy laminer akım koşullarında suya doymun bir zemin ortamında hızın hidrolik eğim ile orantılı olduğunu ispatlamıştır. Hidrolik eğim birim uzunluk başına basınç kaybı olarak ifade edilmekte olup denklemi şu şekildedir:

$$V = k \cdot i \quad (2.13)$$

$$q = k \cdot i \cdot A \quad (2.14)$$

Burada ;

V: hız

k: permeabilite

i: hidrolik eğim

q: debi

A: alandır.

Zeminlerde geçirimsizlik katsayısı değişik yöntemlerle belirlenir. Laboratuvar yöntemleri;

1. Sabit seviyeli permeametre (iri zeminlerde) deneyi,
2. Düşen seviyeli permeametre (ince taneli zeminlerde) deneyi,
3. Yatay kılcallık deneyi,
4. Diğer fiziksel özelliklerden yararlanarak hesaplama,
5. Odometre ve üç eksenli deneylerden dolaylı olarak hesaplama şeklinde belirtilebilir (Önalp, 2007).

Arazide permeabilite ölçümü;

1. Dışa pompalama,
2. İçer pompalama yöntemleriyle yapılmaktadır.

2.2.2 Geçirimsizliğin hesaplanması

Özellikle kumlarda geçirimsizliğin hesaplanabilmesi için dane boyutları belirlenerek granülometri özelliğinden yararlanılmaktadır.

Allen Hazen bağıntısına göre geçirimsizlik;

$$k = \frac{0.70 + 0.3t}{86400} \cdot C \cdot D_{10}^2 \quad (2.15)$$

denklemleri ile hesaplanır. Burada;

$$C = 150 \cdot \left(\frac{n}{0.45} \right) \quad (2.16)$$

t: C⁰ olarak ısı derecesi

C: 100 - 150 arasında değişen sabit bir sayı

D₁₀: Ağırlıkça %10'dan geçen etkili dane çapı olmaktadır ve geçirimsizlik katsayısının birimi de cm/s'dir.

2.3. Zeminlerin Taşıma Gücü

Bir temelin son taşıma gücü (q_d) denildiği zaman temelin zemine batmadan taşıyabileceği en yüksek gerilme anlaşılmaktadır. Son limit durumu ULS, temel hesaplamalarını taşıma gücüne dayandırarak yapmaktadır. Taşıma gücü belli başlı değişkenlere bağlı olup şu şekilde sıralanabilir (Önalp ve Sert, 2016).

1. Zeminin türü ile özellikleri,
2. Temelin boyutları,
3. Temel gömme derinliği,
4. Etkiyen moment ve titreşimler,
5. Temelin şekli,
6. Y.A.S.S varsa, temelin yapımından ve yüklenmesinden sonra geçen süre,

7. Taban pürüzlülüğü.

Taşıma gücü, ilk olarak 1943'te Terzaghi tarafından Prandtl teorisinden yararlanılarak açıklanmıştır. Prandtl teorisinde, sert çelik küresel bir zımbanın metal bir yüzeye bastırılması ile beliren plastik şekil değiştirmeyi inceleyerek teoriyi geliştirmiştir. Bu teoriden esinlenerek taşıma gücüyle ilgili birçok teori ve çözüm geliştirilmiştir. Bunlardan günümüze kadar gelenler Meyerhof (1951), Vesic (1975) ve Balla teorileridir.

Taşıma gücü problemleri dört farklı yöntemle incelenebilir (Önalp ve Sert, 2016).

1. Kayma çizgileri metodu
2. Limit denge metodu
3. Limit gerilme metodu
4. Sonlu eleman metodu

Sonlu eleman yöntemi yüklenen ortamda belirecek ötelenmeleri hesaplamakta kullanılırken, diğer yöntemler ise taşıma gücünü plastisite problemi olarak incelemektedir.

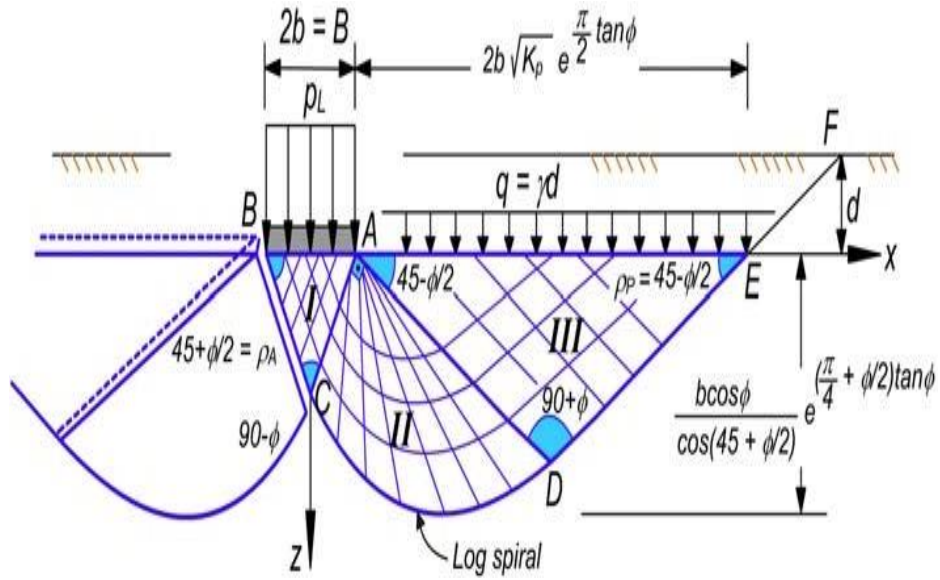
2.3.1 Taşıma gücünün hesaplanması

2.3.1.1. Terzaghi taşıma gücü hesabı

Temellerin taşıma gücü hesaplamaları ile ilgili ilk çalışmalar Terzaghi (1943) tarafından yapılmış ve günümüzde yaygın olarak kabul edilen formüller geliştirilmiştir. Terzaghi, ilk hesaplamalarını sürekli temeller için gerçekleştirmiştir. Ayrıca deneysel olarak elde ettiği sonuçları kullanarak, dikdörtgen ve kare temeller için de geometrik katsayılar geliştirmiştir. Terzaghi taşıma gücü yaklaşımı Şekil 2.9.'da verilmektedir.

Terzaghi'nin yaklaşımında yaptığı kabuller:

1. Zemin homojen, izotrop, ve ağırlıksızdır,
2. Temel aksenal ve dikey yönde yüklüdür,
3. Zemin tabakaları yataydır,
4. Y.A.S.S. çok aşağılardadır, temel tabanından çok uzaktadır,
5. Zemin c ve ϕ 'ye sahiptir,
6. Temel rijit ve sürtünmelidir,
7. Problem iki boyutludur (Arda, 2011).



Şekil 2.10. Terzaghi'ye göre göçme mekanizması (Çinicioğlu, 2005)

Terzaghi temelin şekline göre katsayılar belirleyerek hesaplama yapmıştır. Buna göre kare temeller için formül;

$$q_u = 1.3cN_c + qN_q + 0.4\gamma BN_\gamma \quad (2.17)$$

şeklinde yazılmaktadır. Burada;

- q_u : Zeminin nihai taşıma gücü,
- c : Temel altındaki zemin efektif kohezyonu,
- D_f : Gömme derinliği,
- γ : Zemin efektif birim hacim ağırlığı,
- B : Temel genişliği,

N_c , N_q ve N_γ : Terzaghi taşıma gücü faktörlerini göstermektedir.

Denklem, daire temeller için;

$$qu = 1.3cN_c + qN_q + 0.3\gamma BN_\gamma \quad (2.18)$$

ve dikdörtgen temeller için;

$$qu = \left(1 + 0.2\frac{B}{L}\right)cN_c + \gamma D_f N_q + \left(0.5 - 0.1\frac{B}{L}\right)\gamma BN_\gamma \quad (2.19)$$

şeklinde yazılmaktadır.

2.4. Zeminlerin İyileştirme Yöntemleri

Teknolojinin gelişmesiyle büyük projelerin artması (çok katlı binalar, barajlar, köprüler, tüneller, yol yapıları) nedeniyle daha problemliler zeminlerin üzerine inşaat yapılıyor olması çoğu projede derin temeller ve zemin iyileştirmesini gündeme getirmektedir. Yumuşak veya gevşek zeminlerdeki inşaatlar sırasında stabilite (taşıma gücü) ve deformasyon problemleri ortaya çıkabilmektedir. Bu tür zeminlerde zemin iyileştirmesine gidilmezse bazen yüksek deformasyonlar, bazen de kayma göçmeleri sonucunda yapı kullanılmaz hale gelebilmektedir. Yumuşak kil zeminlerde genelde taşıma gücünü artırmak, konsolidasyon oturmalarını azaltmak veya sınırlandırmak için zemin iyileştirmesine gidilmektedir.

2.4.1. Dinamik konsolidasyon

Bu yöntem dinamik kompaksiyon ve ağır tokmaklama gibi adlarla da anılmaktadır.

Bu değişkenliğin nedeni yöntemin temel zemininde ne türden bir etki yaptığı konusunda farklı görüşler olmasından kaynaklanmaktadır (Önalp ve Sert, 2016).

İlk kez Fransa’da uygulanan bu teknikte zemine 5 - 35 m yükseklikten 200 - 1700 kN ağırlıktaki yükün sık aralıklarla düşürülmesi ile iyileştirme yapılır. Alan üçgen ya da uygun kare aralıklarla işaretlendikten sonra vuruşlar bunların köşelerine atlamalı olarak uygulanır (Önalp ve Sert, 2016).

Dinamik konsolidasyonun yapıldığı alanda zemin özelliklerinin nasıl iyileştiğini değerlendirebilmek için işlemlerden önce ve sonra jeofizik ölçümler, büyük çaplı plaka taşıma deneyi gibi deneyler yapılmaktadır. SPT ve CPT gibi deneylerin her zaman başarılı olmadığı gözlemlenmiştir (Önalp ve Sert, 2016).

Tablo 2.2’de dinamik konsolidasyon sonucu erişilmesi olası taşıma güçleri gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Dinamik konsolidasyon sonucu erişilmesi olası taşıma güçleri (Önalp ve Sert, 2016)

Zemin tipi	Kabul edilen gerilme (kPa)
İnce daneli, siltli dolgu	100 - 150
Heterojen karışık dolgular	100 - 200
Hidrolik dolgu	200
İri kum, çakıl	300
Düzensiz dane dağılımlı çakıl	400

2.4.2. Kum drenler

Permeabilitesi çok düşük veya çok kalın yumuşak kil tabakasına ön yükleme tekniği tek başına uygulandığı zaman etkili olamaz. Çünkü önemli sıkışmaların meydana gelebilmesi için çok uzun zaman gereklidir. Konsolide edilen kilde drenaj boyunu kısaltan düşey drenlerin yerleştirilmesi sonucunda ön yükleme yapıldığında radikal bir iyileştirme sağlanmaktadır. Kum dreni, zemin içinde oluşturulan bir temiz kum filtresi kolonudur. Bu uygulama genelde yumuşak killere ait bir durumdur. Tipik çaplar 30 - 50 cm arasında değişmektedir (Şekil 2.11.). Kapalı ve açık mandrel yöntemleri olmak üzere iki yöntemle teşkil edilmekte olup çok büyük derinliklere kadar uygulanabilirler.

Kum drenleri tek başlarına konsolidasyon oturmasına neden olmadıklarından ön yükleme metodu ile birlikte kullanılmalıdır (Demiröz ve ark., 2009).

$$U_r = 1 - e^{-8Tr/\alpha} \quad (2.20)$$

$$Tr = \frac{ch \times t}{De^2} \quad (2.21)$$

Burada;

T_r : radyal drenaj için zaman faktörü,

c_h : yatay konsolidasyon katsayısı,

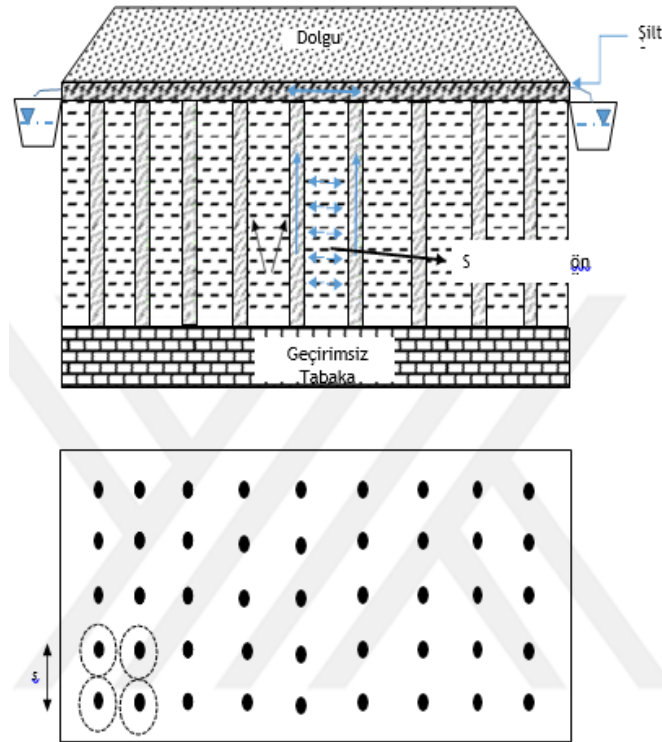
D_e : dren çevresinde oluşan eşdeğer silindir çapı = 1,06s üçgen konum,

D_e : dren çevresinde oluşan eşdeğer silindir çapı = 1,13s kare konum,

s: merkezden merkeze uzaklık,

n: D_e / d ,

d: kum dren çapı veya yapay dren eşdeğer çapı olmaktadır.



Şekil 2.11. Konsolidasyon süresinin düşey dren yardımıyla hızlandırılması model örneği (Mert, 2018)

2.4.3. Prefabrik drenler

Plastik drenler son zamanlarda popüler olan düşey drenlerdendir. Özellikle en çok bilineni geodrendir. Geodren, 100 mm genişliğinde ve 3 mm kalınlığında her iki tarafı boyunca kanalları bulunan kağıt kaplı polietilen şerittir. Geodrenin yerleştirilmesi için mandrel kullanılır. Kum drenlere göre oldukça az örselenmeye neden olan plastik drenlerin büyük oturmalarda sürekliliği bozulmaz.



Şekil 2.12. Prefabrik dren örneği

Shen ve ark. (2005), biri prefabrik düşey drenler ile iyileştirilmiş, diğeri ise iyileştirilmemiş durumu değerlendirmiş ve dren kullanımının etkisini incelemişlerdir. Bu araştırmada 19 m uzunluğunda düşey drenleri 1,5 m aralıklarla yerleştirmişler ve düşey dren kullanımının yumuşak zeminin geçirimsizliğini 30 kat artırdığını, ilave boşluk suyu basınçlarının çabuk şekilde sönmelenmesini sağladığını ortaya koymuşlardır.

Düşey dren uygulamalarına örnek olarak Port Said elektrik santral alanı gösterilmiştir. Sığ göl altındaki killerin yapıların uygulayacağı 20 - 200 kPa'lık taban basıncını taşıyamayacağı, ana bina ve yakıt depoları altına yerleşecek kazıkların aşırı yük alacak olmasından dolayı dren uygulaması yapılmasına karar verilmiştir. 32 m boyunda 53000 adet yapay dren 1,37 m aralıklarla yerleştirildikten sonra alan 8 - 16 m dolgu ile yüklenmiştir. 4 - 8 ay beklemeden sonra kilin 4 m'ye varan sıkışmalar gösterdiği gözlemlenmiştir (Önalp ve Sert, 2016).

İngiltere’de 2004 yılında eski bataklık bir alanda yapılması öngörülen yerleşim merkezinde konsolidasyonun yapay drenlerle hızlandırılması çözümünün en ekonomik yol olduğu düşünülmüş ve alana 2 m dolgu altına 1 - 1,5 m aralıklı 30000 civarında band dren yerleştirilmiştir (Önalp ve Sert, 2016).



Şekil 2.13. Yapay dren uygulama örneği

2.4.4. Vakum konsolidasyonu

İyileştirmenin temeli önyükleme ve düşey drende olduğu gibi yumuşak killerin konsolidasyonudur.

Önyükleme yönteminde uygulanan yük zemin içerisindeki toplam gerilmeyi yükseltir. Toplam gerilmenin artışı ilk başta boşluk suyu basıncı ile taşınır. Sonra aynı toplam gerilme halinde fazla boşluk suyu basıncı giderek sönümlenir. Sonuçta, uygulanan yük tamamen efektif gerilme ile taşınır. Bu işlem konsolidasyonun olağan formudur. Vakum konsolidasyonu halinde dış yük uygulamaya gerek yoktur. Bu yöntemde zemin yüzeyine membranlar serilir ve zemin yüzeyi ve membranlar arasındaki basınç vakum seviyesine kadar düşürülür.

Değişmeyen toplam gerilme ve azalan boşluk suyu basıncı efektif gerilmede artışa neden olacaktır. Konsolidasyonun hızlanması için kum drenler yöntemde kullanılabilir (Önalp ve Sert, 2016).

2.4.5. Ozmotik basınç

Yöntem temel olarak kum drenlerle yapılan vakum yöntemi ile aynıdır. Burada, yarı geçirgen membranlardan yapılmış silindirlere yumuşak kil içine yerleştirilir ve yüksek konsantrasyondaki herhangi bir solüsyon ile doldurulur. Su molekülleri yarı geçirgen membran içinden geçebilirler ancak büyük moleküller geçemezler. Bu temele dayanarak farklı konsantrasyonlardaki iki solüsyon arasında yarı geçirgen membran bulunursa ozmotik basınç oluşur. Ozmotik basınçtan dolayı zemin içerisindeki boşluk suyu basıncı azalır ve böylece dış yük olmadan efektif gerilme artırılır. Bu yöntem Japonya’da geliştirilmiştir, fakat halen deneme aşamasındadır.

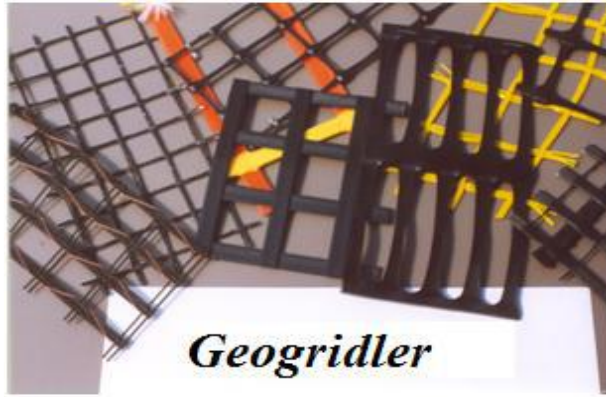
2.4.6. Sönmemiş kireç kazıkları

Bu yöntem de kum drenlerle vakum yöntemi ile aynıdır. Su muhtevası %50’nin üzerindeki ince daneli zeminlerde konsolidasyonu hızlandırmak amacıyla uygulanmaktadır. İyileştirilecek zeminde 1 - 1,5 m aralıklarla 30 - 50 cm çapında ve 10 - 15 metre derinlikte açılan kuyulara sönmemiş kireç sıkıştırılarak doldurulmaktadır. Sönmemiş kireç (CaO) kimyasal aktif bir malzemedir ve hidrate kireç oluşturmak için ağırlığının %32’si kadar suyu emer (Demiröz ve ark, 2009).

Hidratasyon sırasında kirecin hacmi orjinal hacminin iki katına çıkmaktadır. Diğer taraftan hidratasyon ile ortaya çıkan yüksek sıcaklık suyun viskozitesini azaltarak reaksiyonları hızlandırır. Drenajın ve sıkışmanın yönü radyaldır. Kolay ve ucuz olan bu yöntem son zamanlarda çok kullanılmaktadır. Uzun dönemde kirecin nasıl davranacağı ve ilk başlardaki etkisini sürdürüp sürdüremeyeceğinin tam olarak cevabı yoktur.

BÖLÜM 3. BENZER ÇALIŞMA ÖRNEKLERİ

Yılmaz ve ark. (2011) çalışmalarında; taşıma gücünü arttırabilmek için zemine yatay olarak yerleştirilen donatılar yardımıyla hareket imkanını azaltıp çekmeye karşı direnci arttırmışlardır. Bu şartlarda sentetik ürün olan ve iki yönde çalışan geogrid ile geohücre elemanları kullanmışlardır. Stabilizasyon amacıyla geliştirilip üretilen geosentetik malzemelerin özellikleri üzerinde çalışma hazırlanmıştır ve geosentetik malzeme çeşitlerinden bahsedilmiştir. Ayrıca çalışmada kaplamasız yumuşak zeminlerde oluşan problemler için donatılı zemin kullanılarak ortamın yükünü yanal olarak dağıtmak hedeflenmiştir. Bu amaçla geosentetik malzeme kullanılarak çözüm aranmıştır (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Tek ve çift yönlü çalışabilen muhtelif yapıdaki geogrid malzemeler ve uygulaması

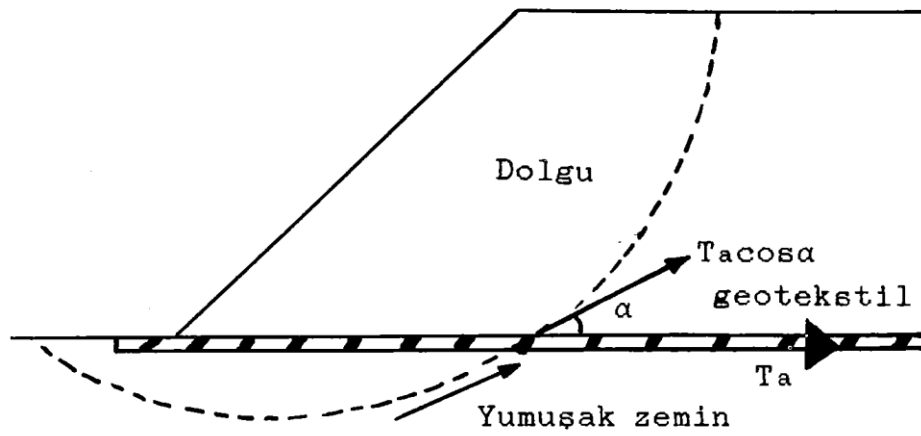
Keskin ve ark. (2009) çalışmalarında; kilin serbest basınç mukavemetine ve konsolidasyon oturma miktarına göre iki farklı geotekstil malzeme ile takviye edilmiş ortamda oturma hesaplamışlardır. Serbest basınç deneyleri sonucunda en iyi dayanım tek sıra Goo400 ve çift sıra Propex6062 kullanıldığında gerçekleşmiştir. Konsolidasyon sonuçları incelendiğinde ise takviyesiz numunede oturma miktarı daha azdır. Bunun sebebi olarak da geotekstilin yük altında esneme davranışının etkili

olabileceği düşünülmüştür. Goo400'de Propex6062'ye göre daha fazla oturma meydana gelmiştir.

Güllü ve ark. (2018), tren dolgularında taban zeminlerini geogridler ile iyileştirme çalışmaları yapmışlardır. Akarçay üzerine bir köprü yapımı gerçekleşeceği sırada bir höyük yapısının ortaya çıkması sebebiyle zemin güçlendirme yöntemlerinden birinin mümkün olmadığı dolgu tabanında geogrid ile iyileştirme yapılmıştır. Tasarımda potolinkodi adı verilen geogridler kullanılmıştır. Geogridlerin birincil olarak stabilite, ikincil olarak farklı oturmaları engellediği gösterilmeye çalışılmıştır. Uygulamada dolgu tabanında gerekli sıyırma yapılarak ardından örgüsüz ayırıcı amaçlı geotekstil serilmiştir. Daha sonra 25 cm granüler dolgu yapıp, sıkıştırılmış kopma mukavemeti 800 kN olan dört tabaka geogrid serilmiştir. Sonuç olarak oturmaların 5 cm'den az olması hedeflenmiş ve olumlu şekilde sonuçlanmıştır.

Çinicioğlu ve ark. (2011) çalışmalarında; dolgu yapımı sırasında dolgunun her yük kademesinde zemindeki gerilme izlerini takip ederek göçme olmaması için güvenli dolgu yükünü hesaplamayı amaçlamışlardır. Bu kapsamda gerilme deformasyon ilişkileri incelenmiş ve zeminde meydana gelecek oturmalar hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar arazi ölçümlerine yakın değerler olduğu için yöntemin pratikte uygulanabilir olduğu görülmüştür.

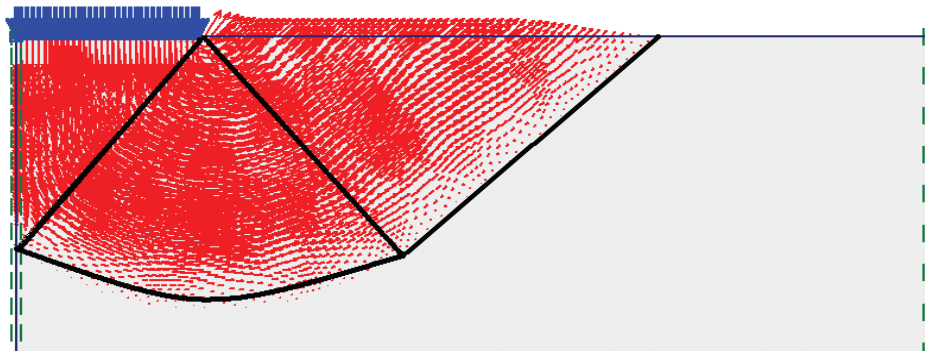
Güler ve ark. (2009) çalışmalarında; dolgu yükü altında oturan yumuşak killerin stabilizasyonunun sağlanmasını amaçlamışlardır. Sonlu eleman modellemesinde zemini temsilen elasto plastik davranış gösteren modified cam clay zemin modeli seçilmiştir. Taşıma kapasitesi düşük olan yumuşak zemin üzerine bir tabaka geotekstil serilerek stabilizasyonun sağlanması amaçlanmıştır (Şekil 3.2.). Geotekstilin dolgu inşasında kullanılmasının en önemli bir diğer amacı düşey ve yatay deformasyonları azaltmaktır. Killi bir zeminde oturma faktörü zamana bağlıdır. Bu durum göz önüne alındığında geotekstil yumuşak alt zeminde iyi bir drenaj sağlamaktadır.



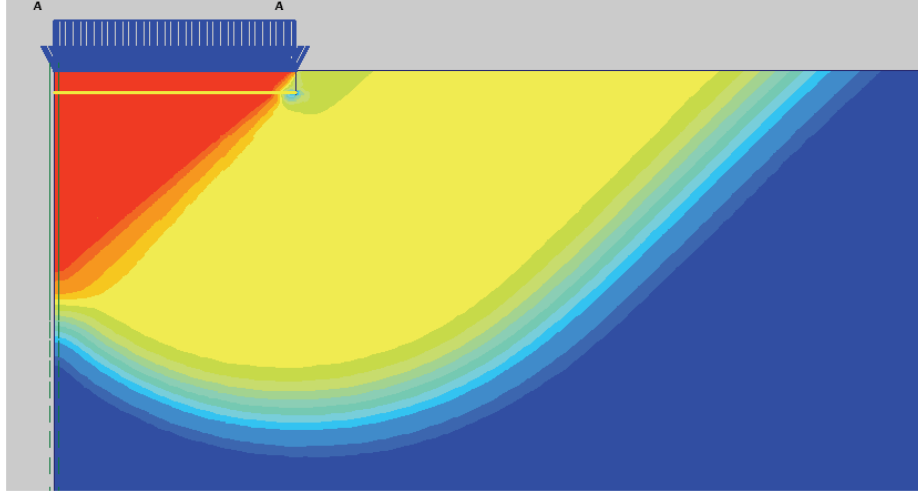
Şekil 3.2. Stabilité hesabında geotekstilin hesaba katılması

Yıldız (2009), Plaxis yazılımı ile düşey drenlerin iki ve üç boyutlu modellemesini çalışmıştır. Çalışmada ayrıca düşey drenlerin iki boyutlu olarak analizinde eksenal simetrik ve düzlem şekil değıştirme koşullarına göre modellemeler karşılaştırılmıştır.

Yetimoğlu ve ark. (2009) yapmış oldukları araştırmalarında; Plaxis sonlu elemanlar yazılımını kullanarak donatılı kil zemine oturan şerit temellerin güvenlik sayılarını hesaplamışlardır. Temel zemini Mohr Coloumb ve donatı lineer malzeme olarak modellenmiştir. Phi - c azaltma metoduyla güvenlik sayıları hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda donatı sayısı arttıkça taşıma kapasitesinin arttığı gözlemlenmiş ve taşıma kapasitesinin temel boyutundan bağımsız olduğu görülmüştür (Şekil 3.3. ve Şekil 3.4.). Sonuç olarak Terzaghi yöntemi ve sonlu elemanlar çözümü arasında iyi bir uyum yakalandığı belirtilmiştir.



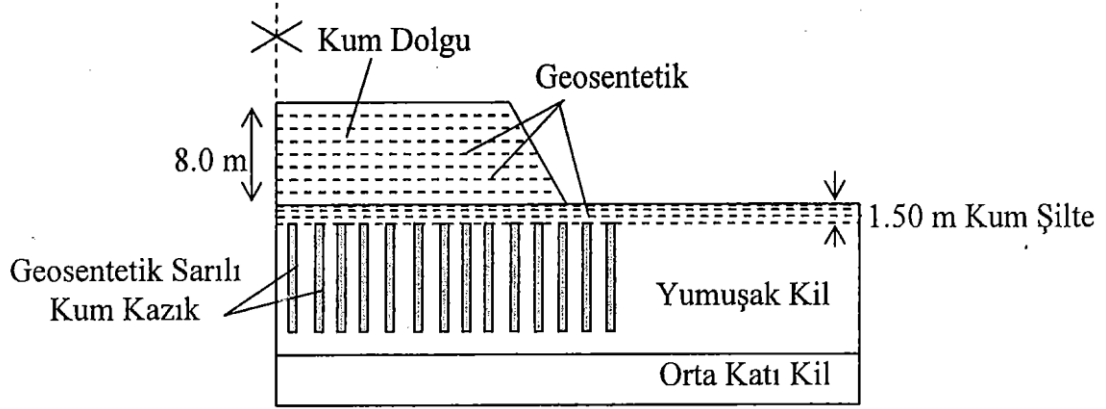
Şekil 3.3. Donatısız zeminin göçme yüzeyi



Şekil 3.4. Donatılı zeminin göçme yüzeyi

Alkaya (2009) çalışmasında; geoteknik mühendisliğinde bilişim teknolojilerinin ilerlemesiyle çalışmalarda farklı yazılımlarla karşılaştırma yapma imkanlarının ortaya çıktığını bildirmiştir. Çalışmada Plaxis, klasik elle çözüm yöntemi ve Geoslope yazılımında çözümlenmeler yapılarak karşılaştırma yapılmıştır. Sonuç olarak yazılımlardan elde edilen sonuçlarda mühendisin kararlarını etkileyecek ölçüde farklılıklar olmadığı görülmüştür. Ayrıca elle çözüme göre sonuçların daha hassas olduğu belirlenmiştir.

İncecik ve ark. (2004) çalışmalarında; yumuşak kil tabakası üzerine yapılması planlanan yüksek dolgu nedeniyle oluşacak oturmaları ve sistemin stabilizasyonunu sonlu elemanlar metoduyla üç farklı aşamada incelenmişlerdir. Öncelikle hiçbir zemin iyileştirme işlemi yapılmamış, ikinci aşamada zemin ve dolguda geosentetik kullanılarak iyileştirme yapılmış ortam modellenmiştir. Son aşamada ek olarak yumuşak killi zemine değişik çap ve aralıklarla geosentetik kılıflı kum kazıklar yerleştirilmiştir. Çalışma sonucunda suya doygun yumuşak kil tabakaları içerisine geosentetiklerle sarılı kum kazıkların yerleştirilmesi ile zemin içerisindeki suyun kolayca drene olduğu, zeminin taşıma gücünün arttığı ve dolgu nedeniyle oturmaların sınırlandırıldığı gösterilmiştir (Şekil 3.5.).



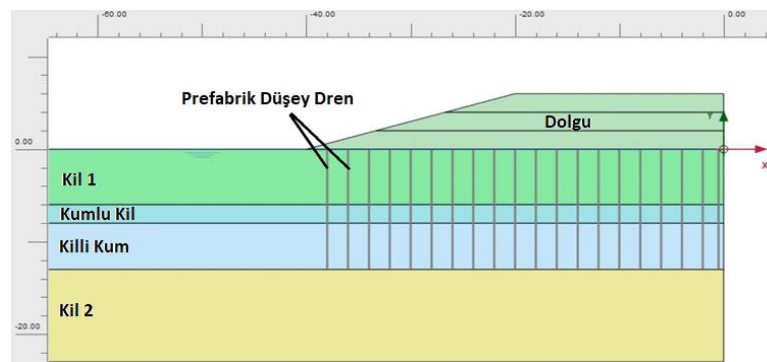
Şekil 3.5. Geosentetiklerle sarılı kum kazık uygulaması

Balkaya ve ark. (2006) çalışmalarında; yumuşak zemin üzerine inşa edilen yol dolgularının geosentetik ve taş kolon ile stabilizasyonunu incelemiştir. Bu kapsamda yumuşak kil tabakası üzerine kademeli olarak inşa edilen bir yol dolgusunun geosentetikler ve taş kolonlar ile taşıma gücü güvenliğinin artırılması ve oturmaların azaltılması modellenmiş, çalışmada Plaxis yazılımı tercih edilmiştir.

Borges (2004), yumuşak zemin üzerine inşa edilen dolgunun üç boyutlu davranışını incelemiş, ayrıca analizlerini Biot'un konsolidasyon teorisini kullanarak sonlu eleman modeli ile çözümlenmiştir. Bu çalışma kapsamında analizleri hem düşey drenli hem de düşey drensiz durum için gerçekleştirilerek inşaat süresini ve ilave boşluk suyu basınçlarını, düşey oturmaları, yatay yer değiştirmeleri ve gerilme seviyelerini incelemiştir. Sonuç olarak düşey dren kullanımının konsolidasyon süresini 10 kata kadar azalttığı, inşaat süresinde gerçekleşen oturmaya belirgin derecede artırdığı ve ilave boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesini hızlandırdığı ortaya çıkmıştır.

Shen ve ark. (2005), önce prefabrik düşey drenler ile iyileştirilmiş, sonrasında iyileştirilmemiş iki farklı durumu eşdeğer düşey geçirimsizlik yaklaşımı ile değerlendirmiş ve dren kullanımının etkisini irdelemiştir. 19 m uzunluğunda düşey drenleri 1,5 m aralıklarla yerleştirmişler ve düşey dren kullanımının yumuşak zeminin geçirimsizliğini 30 kat artırdığını, ilave boşluk suyu basınçlarının çabuk şekilde sönümlenmesini sağladığını ortaya koymuşlardır.

Akan ve ark. (2018), killi zeminler üzerinde inşa edilen yol dolgularında konsolidasyonun hızlandırılmasıyla ilgili çalışmışlardır. Bu çalışma kapsamında 6 m'lik yol dolgusunun çok düşük geçirimsizliğe sahip kil ve kumlu kil / killi kum içeren bir kesit üzerine inşa edilmesi sonucunda oluşacak ek boşluk suyu basınçları ve konsolidasyonun sonlanması için gerekli süre hesaplanmıştır. Modelde kesit, üstte 6 m kil ve onun altında sırasıyla 2 m kum, 5 m kil ve 10 m kum tabakasından oluşmaktadır. Dolgu yükseklikleri 6 m olup 2 m aralıklı düşey drenler uzunlukları 13 m olacak şekilde alttaki kum tabakasına kadar uzatılmıştır (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. Dolgu problemine ait şematik gösterim

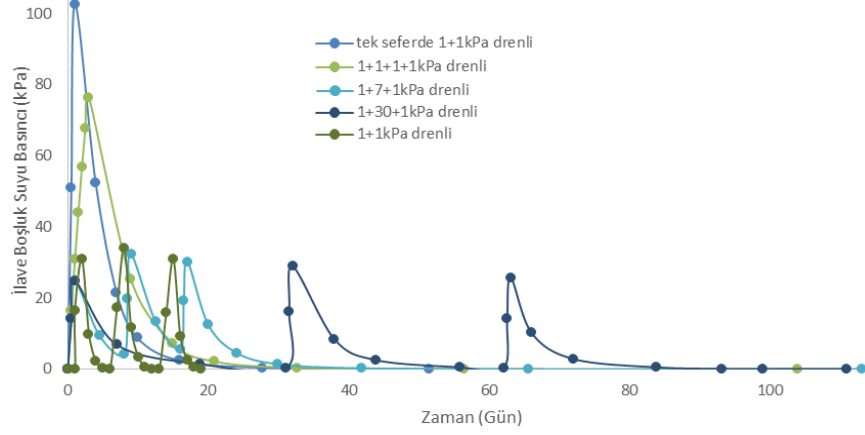
Problemin çözümü için 5 farklı yükleme durumu denenmiş ve bu yükleme modellerinin 5 farklı şekilde drenli ve drensiz olarak analizleri incelenmiştir (Tablo 3.1.).

Tablo 3.1. Denenen yükleme modelleri

Dolgu tabaka no	1		2		3	
	İnşaat süresi (gün)	Bekleme süresi	İnşaat süresi (gün)	Bekleme süresi	İnşaat süresi (gün)	Bekleme süresi
1		Tüm dolgu 1 günde inşa ediliyor.				$P_{\text{excess}} < 1 \text{ kPa}$
2	1	0	1	0	1	$P_{\text{excess}} < 1 \text{ kPa}$
3	1	7 gün	1	7 gün	1	$P_{\text{excess}} < 1 \text{ kPa}$
4	1	30 gün	1	30 gün	1	$P_{\text{excess}} < 1 \text{ kPa}$
5	1	$P_{\text{excess}} < 1 \text{ kPa}$	1	$P_{\text{excess}} < 1 \text{ kPa}$	1	$P_{\text{excess}} < 1 \text{ kPa}$

Sonlu eleman yöntemiyle çalışan Plaxis yazılımıyla yapılan analizler sonrasında drenlerin bulunmadığı durumlarda boşluk suyu basınçlarının 1 kPa'a kadar sönümlenmesi için beklenmesi için gereken süre 839 güne kadar çıkmıştır. Drenlerin

bulunduğu durumlarda ise konsolidasyonun tamamlanması için gerekli süre 98,87 güne kadar düşmektedir. Drenli durumda konsolidasyon süresi 3 tabakanın birlikte yüklendiği durumda %83, tabakalar arasında 7 gün beklenen yükleme durumunda ise %71 azalma göstermiştir (Şekil 3.7.).



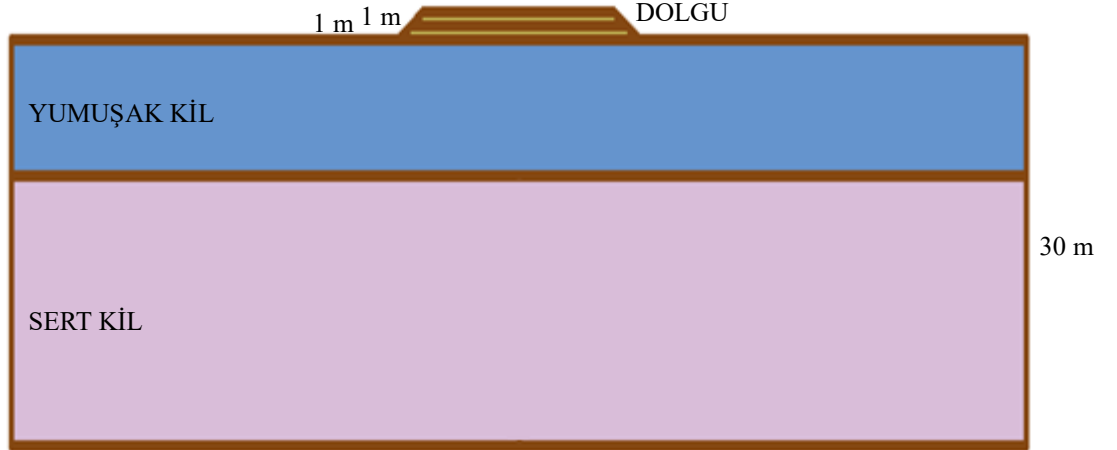
Şekil 3.7. Drenler ile iyileştirilmiş zeminde farklı yükleme durumlarında meydana gelen ilave boşluk suyu basınçları

Mert ve ark. (2018), İstanbul Halkalı’da bir bölgede yapay dren kullanarak iyileştirme modeli geliştirmiş ve konsolidasyonların sürdüğü bölgede analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında sonlu eleman yöntemini kullanan ve üç boyutlu konsolidasyon analizi yapabilen 3DCONS yazılımı ile geçirimsizlik katsayılarının farklı değerlerine karşılık araziden gelen ölçüm sonuçları ve teorik hesap sonuçları karşılaştırılmıştır. Hem teorik metod hem de arazi deneyleri dikkate alınarak konsolidasyonun %95 tamamlanması için gerekli zaman hesaplanmaya çalışılmıştır.

BÖLÜM 4. MODEL HAKKINDA BİLGİLER VE KULLANILAN METODLAR

4.1. Model Genel Bilgileri

Çalışılan model, Sakarya'ya bağlı Ferizli ilçesindeki bir yol dolgusunda meydana gelen oturma problemi dikkate alınarak kurulmuştur. Probleme ait yol ve zemin kesiti Şekil 4.1.'de görülebilir. Model genişliği 160 m ve derinliği 30 m olup sistem simetriktir. Yol tabakası yumuşak kil ve sert kil olmak üzere iki tabakadan oluşmaktadır. İyileştirme yöntemlerine karar verebilmek için yumuşak tabaka kalınlıkları 2 m, 5 m ve 10 m seçilmiş ve çözümlenmeler gerçekleştirilmiştir. Dolgu tabaka kalınlığı 2 m olup yükleme şekillerine göre değişik kombinasyonlar irdelenmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.1. Model kesiti

4.2. Malzeme Özellikleri

Modelde yol dolgusu ve temel zeminini oluşturan tabakalar için kullanılan geoteknik parametreler Tablo 4.1.'de verilmektedir.

Tablo 4.1. Dolgu ve yol zeminine ait malzeme özellikleri

Parametreler	Malzeme özellikleri		
	<i>Yumuşak kil</i>	<i>Sert kil</i>	<i>Dolgu</i>
Zemin modeli	Pekleşen zemin	Pekleşen zemin	Pekleşen zemin
Drenaj durumu	Drenajsız (A)	Drenajsız (A)	Drenajlı
Birim hacim ağırlık (γ_{unsat}) (kN/m ³)	18	18	16
Doygun birim hacim ağırlık (γ_{sat}) (kN/m ³)	18	18	19
E_{50}^{ref} (kN/m ²)	2000	10000	25000
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ (kN/m ²)	2000	10000	25000
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (kN/m ²)	6000	30000	75000
c'_{ref} (kN/m ²)	2	20	1
\dot{U}_s (m)	1	1	0,5
ϕ'_{ref} (°)	20	28	30
ψ (°)	0	0	0
k_x (m/gün)	0,07465	0,07465	3,499
k_y (m/gün)	0,07465	0,07465	3,499
K_0	0,658	0,531	0,5
OCR	1	1	1

4.3. Kullanılan Metod ve Yazılım

Bu çalışma kapsamında Plaxis 2D 2019 yazılımı kullanılarak farklı yükleme koşulları altında fazla boşluk suyu basınçları, oturma miktarları ve iyileştirme yöntemlerine göre oturmada meydana gelen değişimlerin incelenmesi hedeflenmiştir.

4.3.1. Plaxis 2D 2019 yazılımı

PLAXIS 2D 2019, 1987 yılında Hollanda'nın Delft Teknik Üniversitesinde geliştirilmiş olup, geoteknik mühendisliği projelerinde kompleks problemleri sonlu elemanlar yöntemi yardımı ile çözebilmeye yarayan, deformasyon analizleri, stabilite analizleri, dinamik analizler, zamana bağlı davranış analizleri yapan ve yapı ile zemin arasındaki ilişkiyi modelleyen bir yazılımdır. PLAXIS 2D 2019, özetle deformasyon ve stabilite analizleri için geliştirilmiş özel amaçlı iki boyutlu sonlu eleman programıdır. Basit grafiksel giriş prosedürleri karmaşık sonlu eleman modellerinin

hızlıca üretilmesini mümkün kılar ve gelişmiş çıktı olanakları hesap sonuçlarının detaylı sunumunu sağlar.

4.3.1.1 Mohr Coulomb modeli

Elasto-plastik zemin modelidir. Mohr Coulomb modeli 5 giriş parametresi ile modellenir. Bu parametrelerden; elastisite modülü (E) ve poisson oranı (ν) zeminin esnekliğini, içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyon (c) zeminin plastikliğini, dilatasyon açısı (ψ) zeminin genişebilirliğini ifade eder. Mohr Coulomb modeli zeminin ya da kayaların 1. dereceden yaklaşımını temsil etmektedir. Bu zemin modeli genellikle, var olan problemin çözümünde ilk etapta hızlı sonuçlar almak için kullanılır.

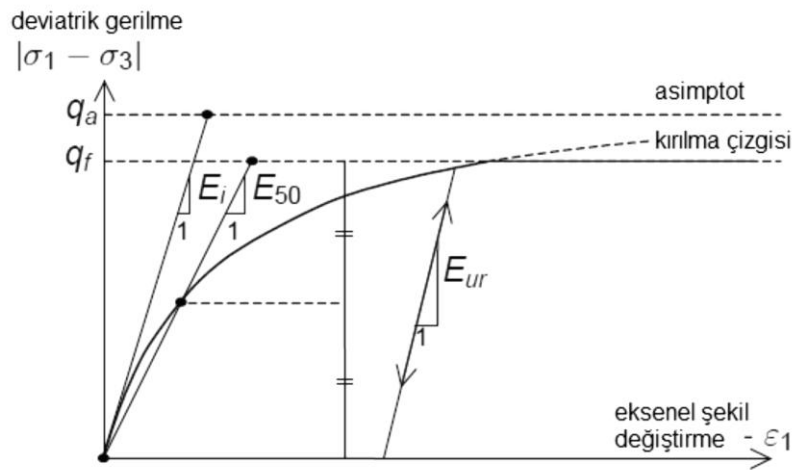
Mohr Coulomb modelinde, her katman için sabit bir ortalama rijitlik hesaplanır, bu rijitlik derinlikle doğrusal olarak arttırılabilir. Ancak lineer elastik - mükemmel plastik Mohr Coulomb model zeminlerin gerçek davranışlarını yansıtmada birçok kısıtlamalar içermektedir. Derinlik boyunca zemin rijitliğinin artımı gözönüne alınmasına rağmen, Mohr Coulomb modelde gerilme durumuna ya da anizotropik gerilme durumuna bağlı rijitlik değişimi göz önüne alınmamaktadır. Bu da zeminin davranışının tam anlamıyla ifade edilemeyeceğini gösterir. Ayrıca kazı durumunda da aynı rijitlik değerinin kullanılması nedeniyle kazı problemlerinde gerçek dışı kabarmalar elde edileceği unutulmamalıdır.

4.3.1.2 Pekleşen zemin (hardening soil) modeli

Hardening soil model, zemine ait gerilme şekil değiştirme ilişkisini yaklaşık hiperbolik şekilde tanımlayan ve farklı tipteki yumuşak ve sert zeminler için Duncan ve Chang (1970) tarafından geliştirilmiş doğrusal olmayan elastik bünye modelinin yeni bir uyarlamasıdır (Schanz ve ark., 1999). Zemin davranışının simülasyonu için geliştirilmiş ileri bir modeldir. Mohr Coulomb modeli gibi kohezyona (c), içsel sürtünme açısına (ϕ) ve dilatasyon açısına (ψ) bağlıdır. Ancak zemin rijitliği 3 farklı tür rijitlik kullanılarak tarif edilmiştir;

1. E_{50}^{ref} : referans basınç değerindeki üç eksenli yükleme rijitliği
2. E_{oed}^{ref} : referans basınç değerindeki ödometre yükleme rijitliği
3. E_{ur}^{ref} : referans basınçta üç eksenli boşaltma - tekrar yükleme rijitliği

Bu üç farklı rijitlik parametresi ile yükleme - boşaltma ve elastik - plastik ayrımının göz önüne alınması, pekleşen zemin modeli ile zemin gerilme - şekil değiştirme davranışını gerçeğe daha yakın modellemeyi sağlamaktadır. Ayrıca hiperbolik bağıntıdan gelen üstel parametre (m), referans gerilme (p_{ref}) ve nihai gerilme oranı (R_f) parametreleri kullanılmaktadır. Mohr Coulomb modelinin aksine hardening soil modeli rijitlik modülünün gerilme bağımlılığını hesaba katar. Modelin temel özellikleri arasında gerilmeye bağlı rijitlik değişim (m giriş parametresi), birincil deviatorik yüklemde plastik deformasyonlar (E_{50} giriş parametresi), birincil sıkışmaya bağlı plastik deformasyonlar (E_{oed} giriş parametresi), elastik boşaltma / yükleme (E_{ur}) ve göçme anında, Mohr Coulomb hipotezinin geçerli olması gibi durumlar sayılabilir (Şekil 4.2.). Bu rijitliklerin basınçla değiştiği anlamına gelir, dolayısıyla üç rijitliğin tümü genellikle 100 kPa (1 bar) olarak alınan referans gerilme (p_{ref}) değerine bağlı olarak verilir.



Şekil 4.2. Hiperbolik gerilme ilişkisi

4.4 Plaxis Modelleme

Çalışılan modeller düzlem zorlanma modeli olarak kurulmuş ve 15 düğümlü elemanlar kullanılmıştır (Tablo 4.2.). Modellerde dolgu kalınlığı 2 m olup üst yumuşak tabaka kalınlığı 2 m, 5 m ve 10 m olacak şekilde 3 temel model üzerinde çözümler yapılmıştır. Buna göre alt kil tabakasının kalınlığı 28 m, 25 m ve 20 m olarak alınmıştır. Plaxis'te sondaj logları bu kabullere göre oluşturulmuştur. Tüm modellerde pekleşen zemin modeli tercih edilmiştir. Bu modelin tercih edilme nedeni gerilmeye bağlı rijitlik değişiminin dikkate alınması sayesinde gerçek durumun daha doğru bir şekilde modellenmesidir. Bunun yanında konsolidasyon çözümü yapıldığında zemin özelliğinin “drenajlı” veya “drenajsız” seçilmesinin sonuçları etkilemediği, bu çözümlerde geçirimsizlik katsayısının kullanıldığı bilgisinden hareketle zeminler drenajlı seçilmiştir.

Tablo 4.2. Model genel bilgileri

Model	Düzlem zorlanma (plane strain)
Elemanlar	15 düğümlü
x_{min}	-80 metre
x_{max}	80 metre
y_{min}	-30 metre
y_{max}	0 metre

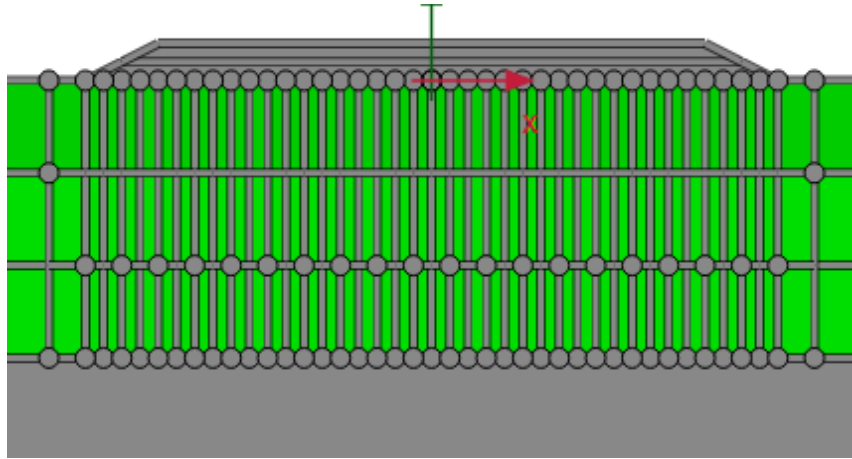
Sisteme model özellikleri girildikten sonra modelin sondaj logları oluşturulup malzeme özellikleri girilerek zemin katmanları oluşturulmuştur (Şekil 4.3.). Burada zemin modelleri yumuşak zeminin tabaka kalınlığına göre 3 ayrı şekilde incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.3.'te Plaxis'te modellenmesi yapılan yol yapısının geometrisi görülmektedir. Zemin kesiti “Soil” sekmesinde oluşturulurken, dolgu ve benzeri ek yapılar “Structures” menüsünden yararlanılarak zemin üzerine veya içine tanımlanmaktadır.



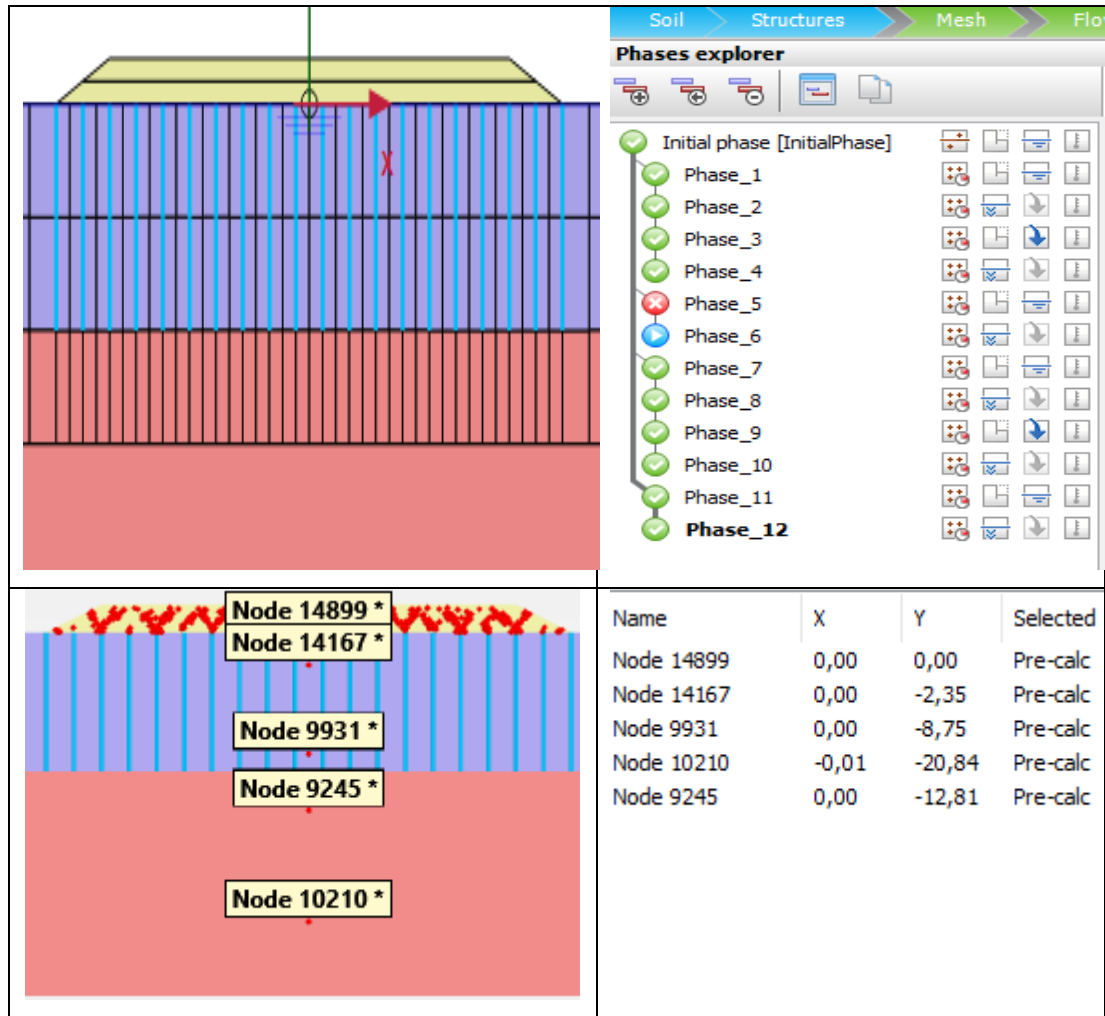
Şekil 4.3. Model geometrisi

Sonlu eleman yöntemiyle yapılan çözümlerde sonuçlar sonlu eleman ağının yapısından etkilenmektedir. Buradan hareketle farklı tabaka kalınlıklarına sahip modellerde benzer ağlar (*mesh*) elde edilebilmesi için Şekil 4.4.'te görüldüğü gibi "line" komutuyla ilave çizgiler oluşturulmuştur. Çözüm yapılan modellerde dolgu altında bu yardımcı çizgilerle aynı geometri oluşturulmuş, eleman sayısı 2500, düğüm sayısı 20500 civarında tutularak sonlu eleman ağının sonuçlar üzerindeki etkisi ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.4. Dolgu altında yardımcı çizgiler

Şekil 4.5.'te gösterilen faz gezgininde (*phase explorer*) çözüm aşamaları bulunmaktadır. Aynı yumuşak tabaka kalınlığına sahip modellerde farklı yükleme bekleme zamanlarının etkilerini görmek için ayrı modeller kurulmamış, bunun yerine bir başlık altında tüm analizler gerçekleştirilip sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçların karşılaştırılması amacıyla dolgu altında seçilen noktalar da Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



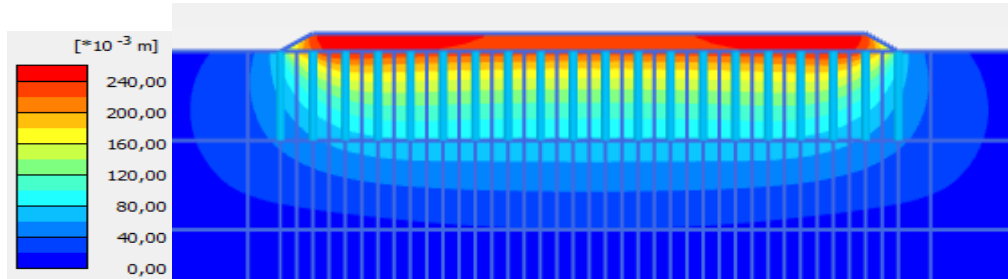
Şekil 4.5. Çözüm aşamaları ve seçilen düğüm noktaları

Çalışma sırasında öncelikle yükleme şekli ve hızının etkisi irdelenmiştir. Buna göre ilk analiz, 2 m yüksekliğindeki dolgunun tek kademede yüklenerek plastik analiz şeklinde gerçekleştirilmiştir. Bu çözümde hızlı yüklemeyi temsil etmek üzere kil zeminler drenajsız kabul edilmiştir. Buradaki amaç drenajsız (undrained) özellik gösterdiği kabul edilen zemin kesitinde hızlı yükleme ile göçmenin olabileceğini göstermektir. İkinci grup çözümlerde ise zeminlerin geçirimsizlik katsayılarını dikkate alan konsolidasyon yüklemesi seçeneği kullanılmıştır. Buna yönelik olarak öncelikle dolgu gene tek kademede ancak 1 gün sonunda tamamlanmak üzere modellenmiş ve sonrasında konsolidasyon süreci işletilmiştir. Son olarak da her bir yükleme 0.5 günde tamamlanmak üzere dolgu 1'er m yüksekliğinde iki kademede inşa edilmiş ve yükleme aralarında fazla boşluk suyu basıncının 1 kPa'a sönmülmesi için gerekli süreler hesaplanmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında yumuşak zemin kalınlığının 2 m olduğu durumda iyileştirme olarak zemin değiştirme modellenmiştir. Yumuşak tabaka kalınlığının 5 m ve 10 m olduğu durumlar için ise zemin parametreleri sabit tutularak drenler modellere dahil edilmiş, dren boyları ve aralıklarında yapılan değişimlerle dren boyunun ve aralığının konsolidasyon sürecine etkisi incelenmiştir. Dren boyu seçilirken bir modelde drenler sıkışabilirliği yüksek olan kilin ortasına kadar (5 m) uzatılarak bunun yetersiz kalacağı gösterilmek istenmiştir.

Plaxis yazılımında konsolidasyon analizi; belirli bir süre sonunda ek boşluk suyu basınçlarının belirlenmesi (staged construction), ek boşluk suyu basınçlarının belli bir değere (minimum excess pore pressure) düşmesi için gereken süre ve son olarak da konsolidasyon oranının (degree of consolidation) belli bir değere yükselmesi için gereken süre olmak üzere üç farklı şekilde yapılabilmektedir. Bu çalışmada modellerde ek boşluk suyu basınçlarının 1 kPa'a kadar sönümlenmesi için geçecek olan sürenin hesaplanması hedeflenmiştir.

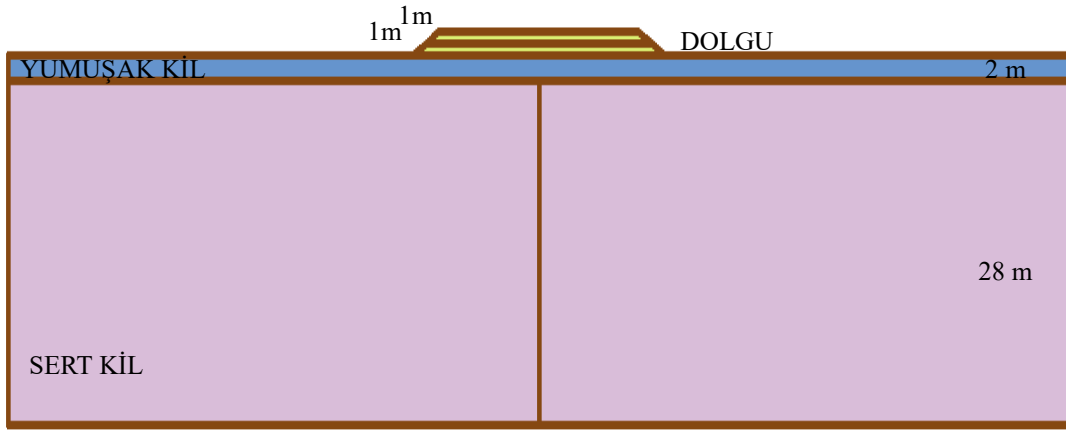
Şekil 4.6.'da gerçekleşen oturmalar için örnek bir sonuç gösterilmektedir. İstenen faz için oturma ve fazla boşluk suyu basınçları görsel olarak sunulabilmektedir.



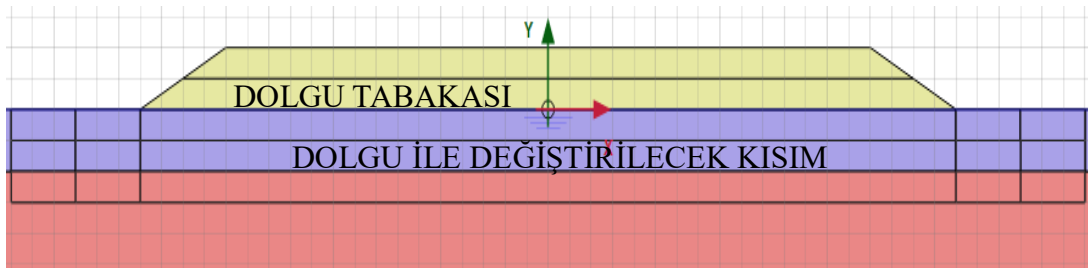
Şekil 4.6. Analize bağlı oturma sonuçlarının gösterim şekli

4.4.1. 2 metre yumuşak kil tabakası modeli

Şekil 4.7.'de yumuşak kil tabaka kalınlığının 2 metre gibi çok düşük sayılabilecek bir değerde olduğu kesit gösterilmektedir.



Şekil 4.7. 2 metre yumuşak kil tabakasına ait model görünümü



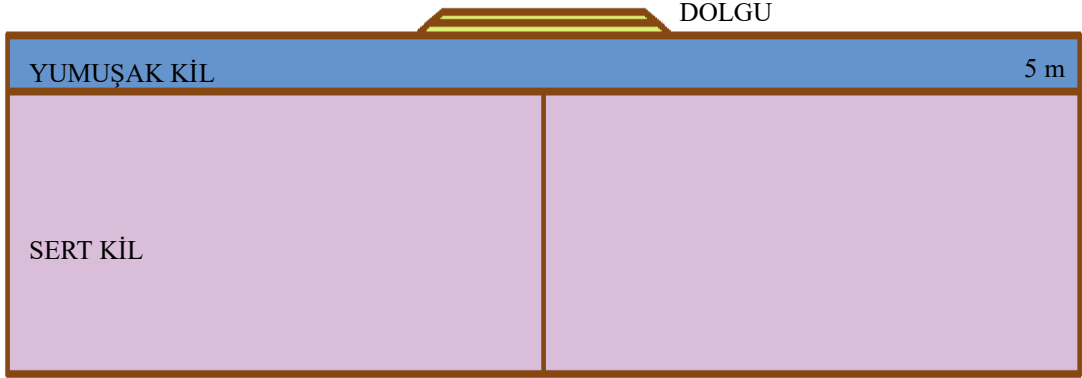
Şekil 4.8. 2 metre yumuşak kil tabakasına ait modelde dolgu

Bu modelde dolgu tabakasının alt genişliği 38 metre olup iyileştirmede 2 metre yumuşak kil tabakası içine dren yapmanın pratik olmadığı düşünülmüştür. Bu modelde iyileştirme olarak yumuşak tabakanın kazılarak yerine dolgu malzemesi özelliklerine sahip zemin sıkıştırılması seçilmiştir. Buna yönelik olarak dolgu altında kazı derinliği 1 m, 2 m ve 3 m olacak şekilde ayrı modeller oluşturulmuştur. Dolgu ile değiştirilecek zemin genişliği de 38 m, 44 m ve 50 m olarak alınmıştır. Bu şekilde 9 farklı seçenek denenmiştir.

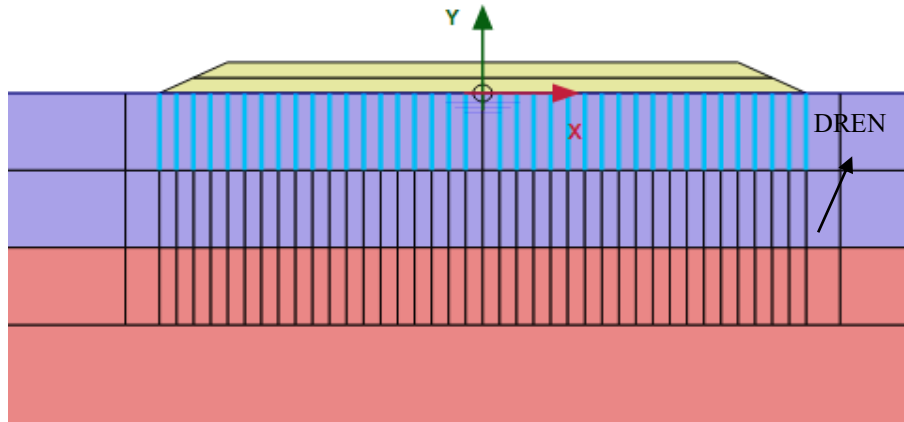
4.4.2. 5 metre yumuşak kil tabakası modeli

Yumuşak kil tabaka kalınlığının 5 metre olduğu modellerde oluşacak boşluk suyu basınçlarını sönmüleyerek oturma sürecini hızlandırmak amacıyla modellerde drenler kullanılmıştır. Şekil 4.9.'da model geometrisinin Plaxis yazılımına ait görüntüsü verilmektedir. Dren boylarının 5 metre ve 10 metre olması durumları için çözümler

yapılırken aynı zamanda da dren aralıklarının da etkisini inceleyebilmek üzere dren aralıkları 1 metre ve 2 metre olarak değiştirilmiştir (Şekil 4.10.).



Şekil 4.9. 5 metre yumuşak kil tabakasına ait model görünümü



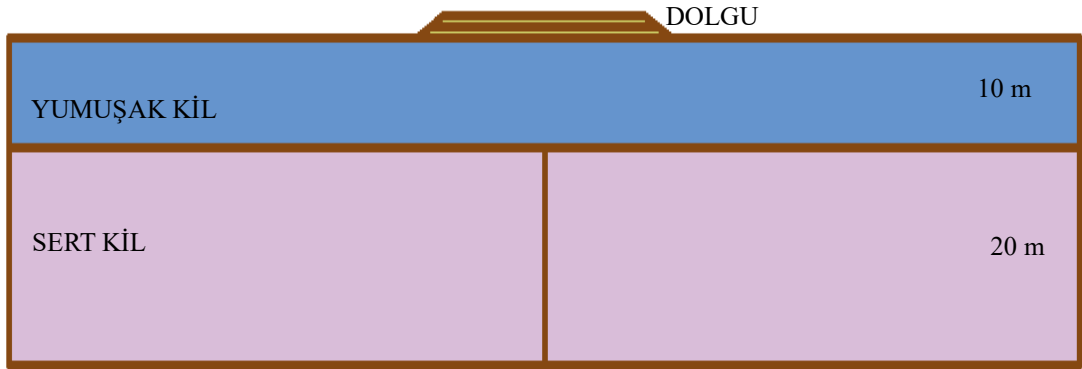
Şekil 4.10. 5 metre yumuşak kil tabasına ait modelde drenler

Çözümlerde öncelikle iki dolgu kademesi aynı anda ani olarak yüklenerek plastik analizler gerçekleştirilmiştir. Plastik analize bağlı olarak göçme yüzeyleri tespit edilmiştir. Daha sonra yapılan konsolidasyon analizlerinde drensiz yükleme, dolgunun tek kademe yüklenmesi ve dolgunun iki kademe yüklenmesi denenerek drenlerin etkisi incelenmiştir.

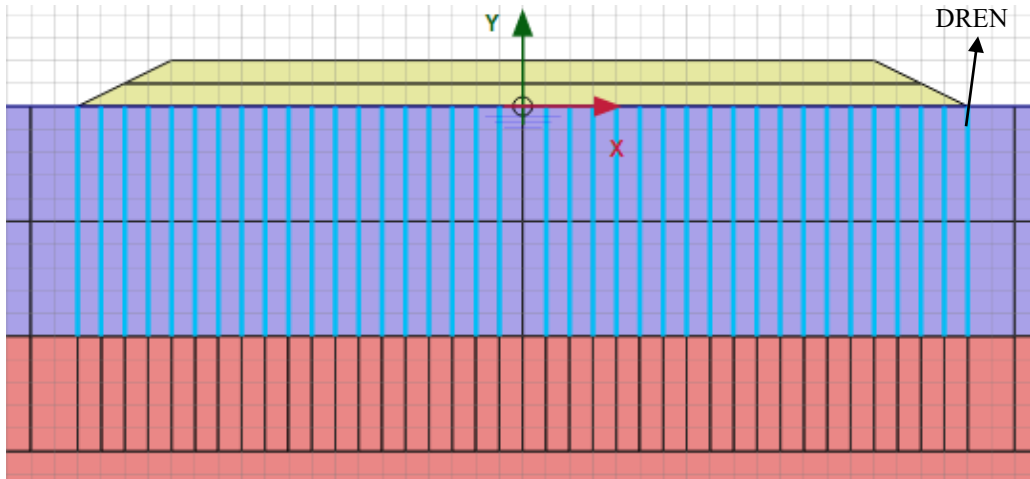
4.4.3. 10 metre yumuşak kil tabakası modeli

Yumuşak kil tabaka kalınlığının 10 metre olduğu durum için model görüntüsü Şekil 4.11.'de verilmiştir. Bu modellerde de öncelikle drenajsız ve drenajlı durum için

yüklemeler yapılarak göçme durumu ortaya konmuştur. Konsolidasyon analizlerinde ise drensiz duruma ilave olarak yapılan çözümlerde dren boyları 5 metre, 10 metre ve 15 metre, dren aralıkları ise 1 metre ve 2 metre olarak seçilmiştir. Burada amaç plastik analizde göçmelerin olduğunun ortaya konmasından sonra drenler yardımıyla boşluk suyu basınçlarının yükselmesini ve dolayısıyla göçmenin önlenmesini sağlayacak optimum dren boyu ve aralığını ortaya koymaktır (Şekil 4.12.).



Şekil 4.11. 10 metre yumuşak kil tabasına ait model görünümü



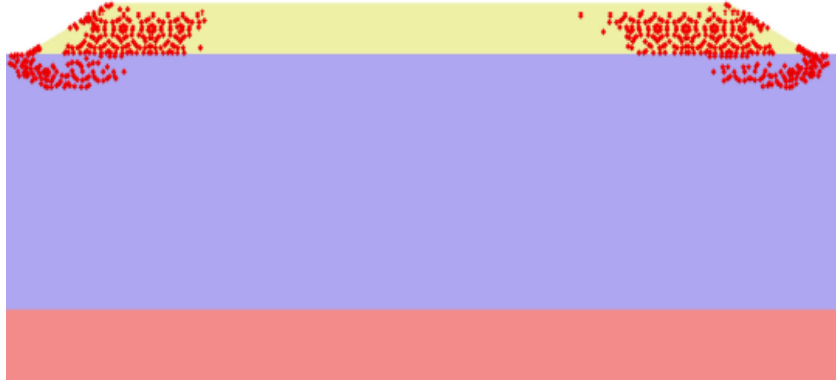
Şekil 4.12. 10 metre yumuşak kil tabasına ait modelde drenler

BÖLÜM 5. ANALİZLER VE SONUÇLAR

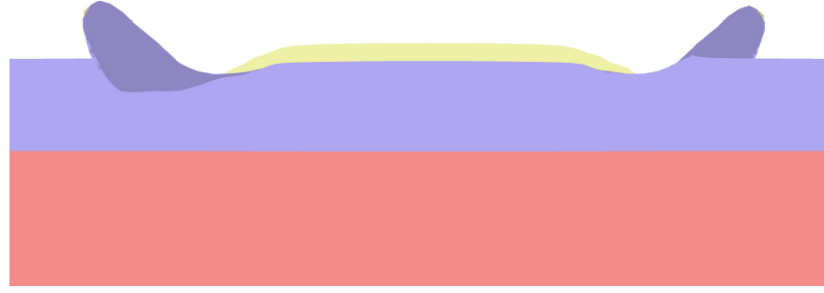
5.1. 10 Metrelik Üst Yumuşak Kil Tabakası için Analiz Sonuçları

Çalışma kapsamında yumuşak kil tabakası için farklı dren boyları ve aralıklarına bağlı oturma ve boşluk suyu basınçları karşılaştırılmıştır. Öncelikle yapılan plastik analizle oturmaların ve boşluk suyu basıncı artışlarının en fazla olacağı noktalar bulunmuş, önceki bölümde Şekil 4.5.'te görüleceği üzere oturma için yüzeyde A(0,0) noktası, boşluk suyu basıncı artışları için B(0,-8.75) noktası seçilerek grafikler bu noktalar üzerinden hazırlanmıştır.

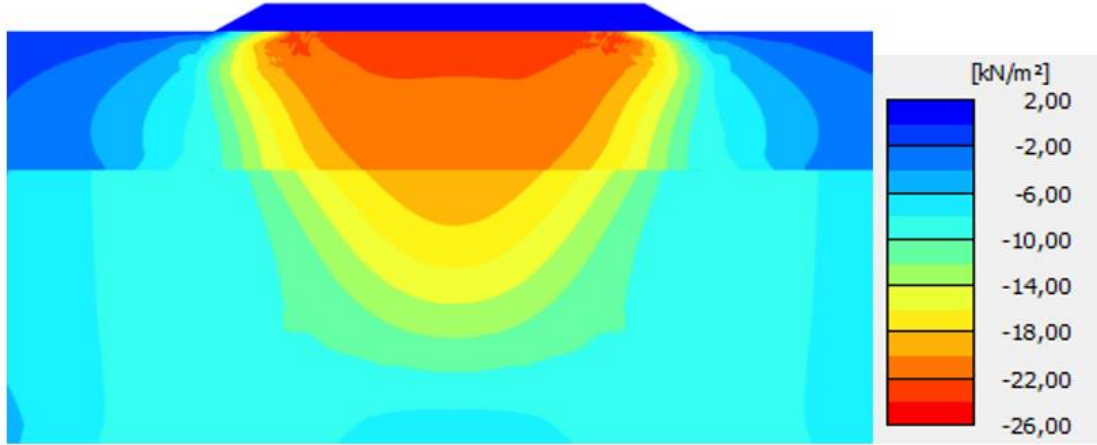
Şekil 5.1.'de plastik analiz sonrasında oluşan göçmeyi gösteren plastik noktalar, Şekil 5.2.'de aşırı deformasyonlar ve Şekil 5.3.'te fazla boşluk suyu basınçları görülmektedir. Plastik yükleme sırasında dolgunun %71'i ($M_{stage}=0,7059$) yükseldiğinde program göçme mesajı vermiştir (*soil body seems to collapse*). Buradan böylesi yumuşak bir zeminde hızlı yüklemenin (drenajsız durum) yapılamayacağı ortaya konmuştur.



Şekil 5.1. 10 m yumuşak tabaka için plastik yüklemeye ait göçme durumunu gösteren plastik noktalar



Şekil 5.2. Plastik yükleme sonunda göçmeyi gösteren aşırı deformasyonlar



$$P_{\text{excess, max}}: 25,80 \cdot \text{kPa} \cdot (M_{\text{stage}}: 0.7059)$$

Şekil 5.3. Plastik yüklemeye oluşan fazla boşluk suyu basınçları

Konsolidasyonlu analizlerde 2 farklı yükleme durumu için yapılan çözümlerde şu sonuçlar elde edilmiştir:

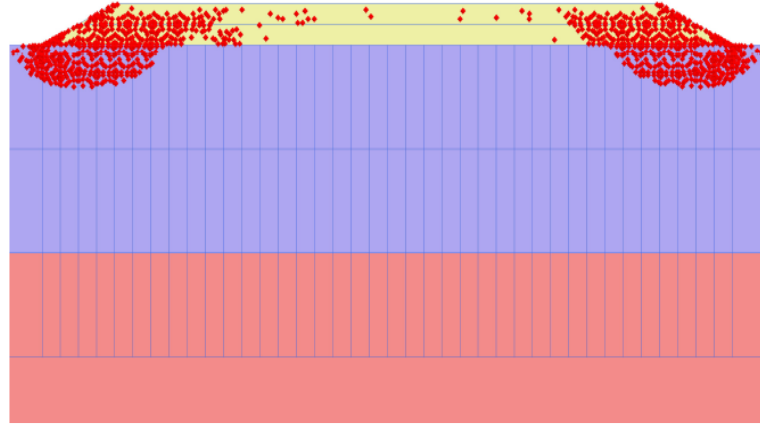
Drensiz durumda dolgunun tek kademede (2 m dolgu 1 günde) inşa edildiği durumda plastik analize benzer olarak göçme durumu meydana gelmiştir. Ancak burada zeminin geçirimsizliği dikkate alındığı için dolgu %90 seviyesine ($M_{\text{stage}}: 0,8955$) kadar yüklenebilmiştir (Şekil 5.4.). Bu çözüm sonrasında drenler modele dahil edildiğinde bütün dren boyları için dolgunun inşaatı tamamlanmış, hiçbir durumda göçme olmamıştır.

Dolgunun 1'er metrelik iki kademede (her bir yükleme 0,5 gün) yüklendiği çözümlerin hepsinde hesaplamalar tamamlanmış ve göçme ile karşılaşılmamıştır. Tablo 5.1.'de tüm konsolidasyon analizi çözümleri için göçme durumunun olup olmadığı gösterilmektedir.

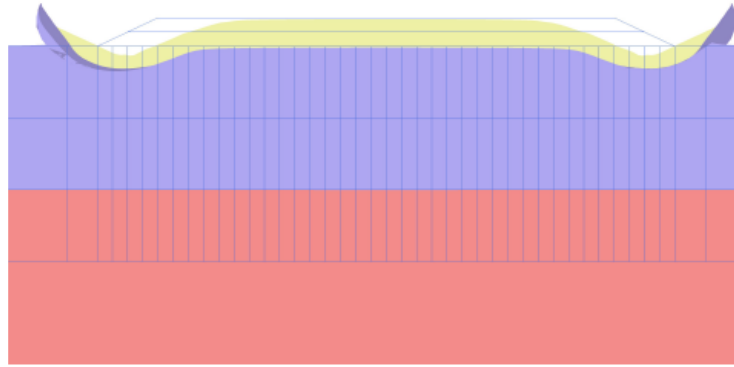
Tablo 5.1. Analiz tipine bağlı dren durumu ve göçme ilişkisi

Analiz Tipi	Dren durumu	Göçme durumu
Plastik	Yok	Var
Konsolidasyon (tek kademe)	Yok	Var
	Var	Yok
Konsolidasyon (iki kademe)	Yok	Yok
	Var	Yok

Şekil 5.4. ve Şekil 5.5.'de konsolidasyonlu çözümde drensiz durumda dolgu tabakasının tamamının tek seferde 1 günde inşa edildiği durumda yumuşak zemin tabakasında oluşan plastik noktalar ve göçme yüzeyleri gösterilmektedir. Buradan yüklemenin hızlı olduğu ve oluşan fazla boşluk suyu basınçlarının göçmeye sebep olduğu söylenebilir.

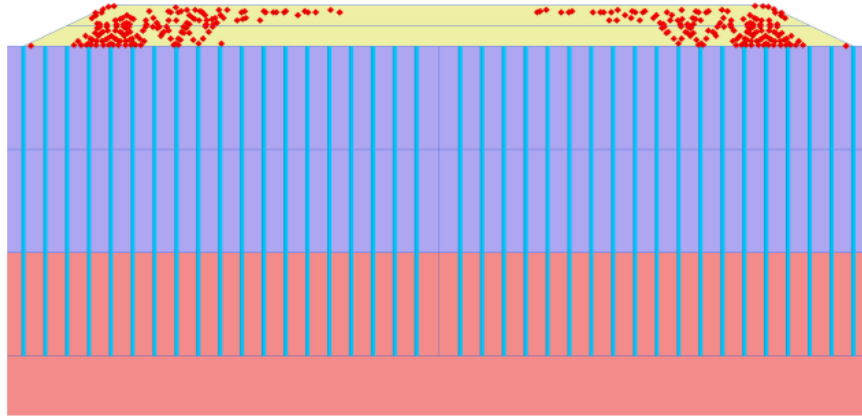


Şekil 5.4. 10 m'lik yumuşak kil tabakası olması durumunda dolgunun tamamının tek seferde yüklenmesiyle oluşan plastik noktalar



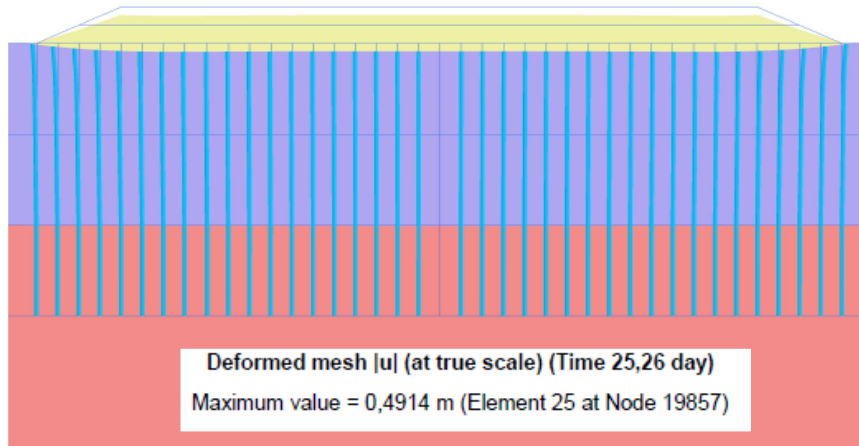
Şekil 5.5. 10 m'lik yumuşak kil tabakası olması durumunda dolgunun tamamının tek seferde yüklenmesiyle göçmeyi gösteren aşırı deformasyonlar

Konsolidasyon çözümlerinin yapıldığı modelde drenlerin aktif hale getirilmesinden sonra yükleme yapıldığında drenlerin kil içinde ek boşluk suyu basıncını kısa sürede söndürmesiyle göçmenin önlenildiği Şekil 5.6.'da görülebilmektedir. Şekil 5.6.'da sunulan kesitte dren boyu 15 m ve dren aralığı da 1 m'dir. Drenlerin olduğu bölgede plastik nokta oluşmaması drenlerin konsolidasyonu hızlandırma yanında göçmenin önlenmesi işlevini gördüğünü de ispatlamaktadır.

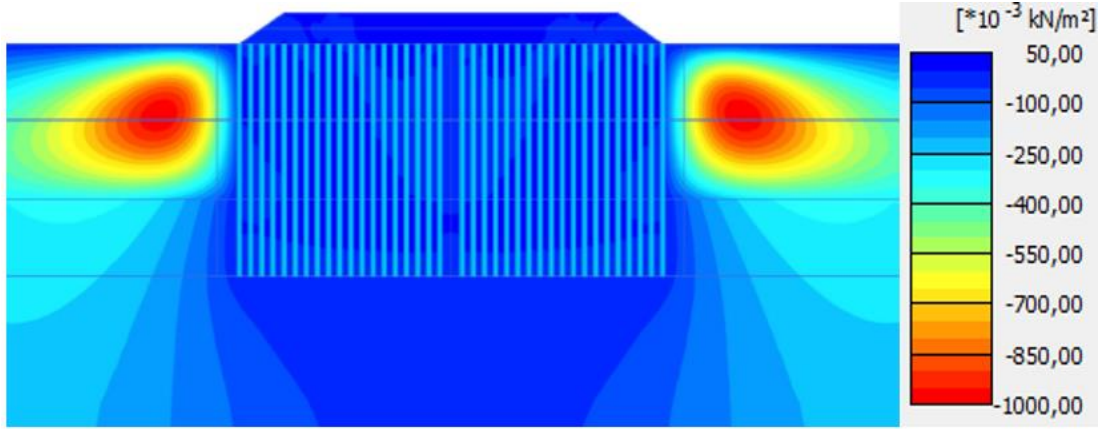


Şekil 5.6. Drenlerin aktif hale gelmesiyle göçmenin önlenmesi

Şekil 5.7.'de gösterilen oturma kalıbının oluşması 25,26 gün sürmüştür olup bu süre sonunda modelin tamamında fazla boşluk suyu basıncı değerleri 1 kPa'ın altına düşmüştür. Şekil 5.8.'de fazla boşluk suyu basınçlarının dağılımı gösterilmektedir. Drenlerin olduğu bölümde fazla boşluk suyu basınçlarının çok önceden tamamen söndüldüğü anlaşılmaktadır.

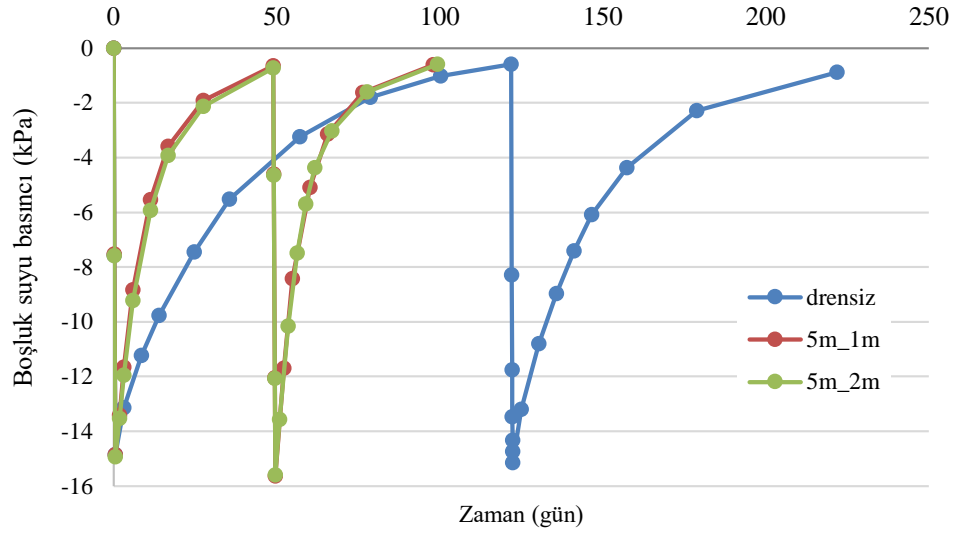


Şekil 5.7. Drenlerin aktif hale gelmesiyle oluşan oturma kalıbı

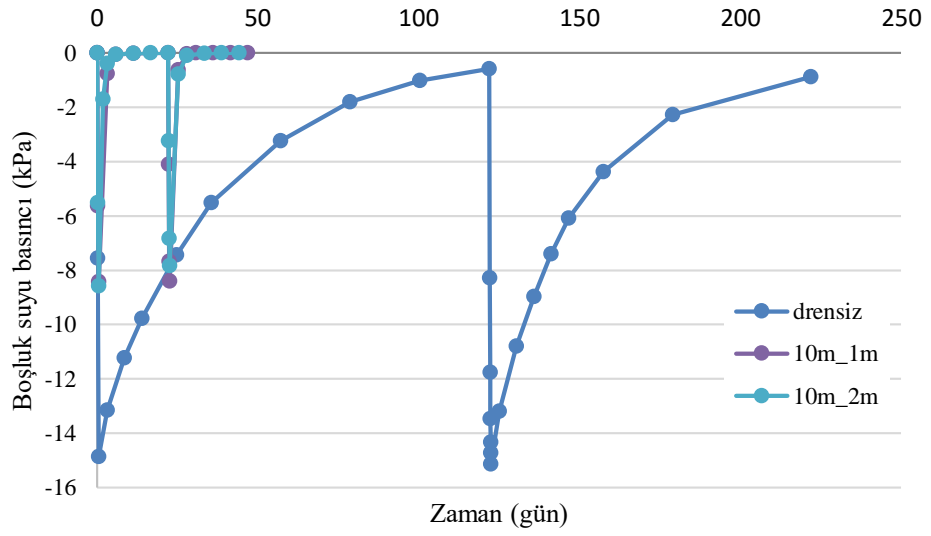


Şekil 5.8. Drenler varken dolgunun tamamının tek seferde yüklendiği durumda sönümlenmiş fazla boşluk suyu basınçları

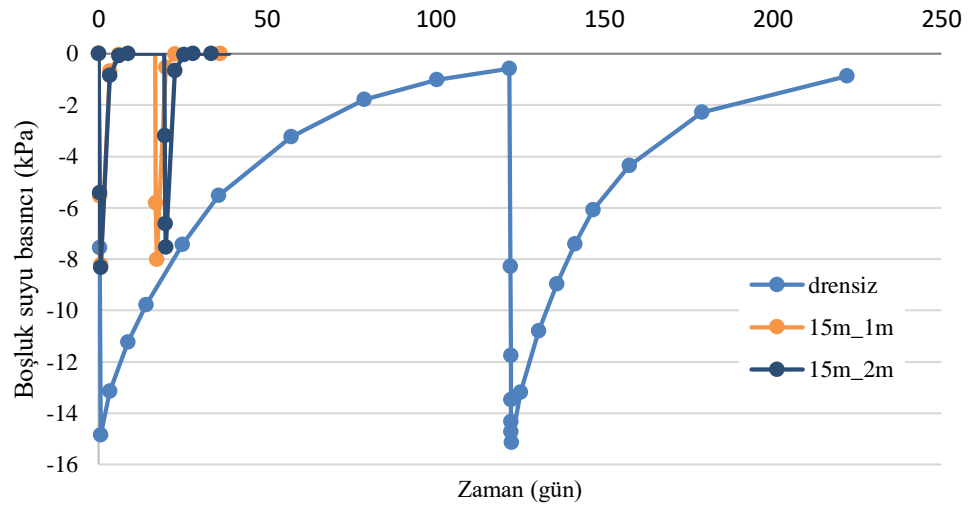
Şekil 5.9. ve Şekil 5.10.'da dolgunun 1'er metrelik iki kademe yüklendiği modellerin sonuçları yorumlanmaktadır. Şekil 5.9.'da dren boyunun 5 m olduğu durumda elde edilen ek boşluk suyu basınçlarının gelişimi ve sönümlenmesi zamana bağlı olarak gösterilmektedir. Bu çözümlerden drenlerin olmaması durumunda konsolidasyonun tamamlanması için gereken süre 222 gün iken, drenlerin kullanılması durumunda 99 gün civarına düşmüştür. Burada konsolidasyon sürecinin yeteri kadar hızlanmamasının nedeni dren boyunun yumuşak zemin kalınlığının ancak yarısına kadar seçilmesidir. Burada ayrıca dren aralıklarının 2 m'den 1 m'ye düşürülmesinin de kayda değer bir fayda sağlayamadığı da dikkat çekmektedir. Şekil 5.10.'da dren boyunun 10 m olması durumunda fazla boşluk suyu basınçlarının zamana bağlı değişimi görülmektedir. Bu çözümlerde drenlerin yumuşak tabaka boyunca (10 m) yerleştirilmesinin sönümlenme süresine radikal etkisi göze çarpmaktadır. Şekil 5.11.'de ise dren boyunun 15 m olması durumunda fazla boşluk suyu basınçlarının zamana karşı değişimi sunulmaktadır. Bu çözümlerde sönümlenme zamanının 10 m dren boyuna oranla daha az olduğu ancak aradaki farkın dren boyunun 5 m'den 10 m'ye çıkarken elde edilenden çok daha az olduğu dikkat çekmektedir. Şekil 5.9., Şekil 5.10. ve Şekil 5.11.'den dren boyu uzadıkça modelde oluşan fazla boşluk suyu basıncının maksimum değerinin de azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.9. 5 m dren boyu için boşluk suyu basıncı - zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 10 m)



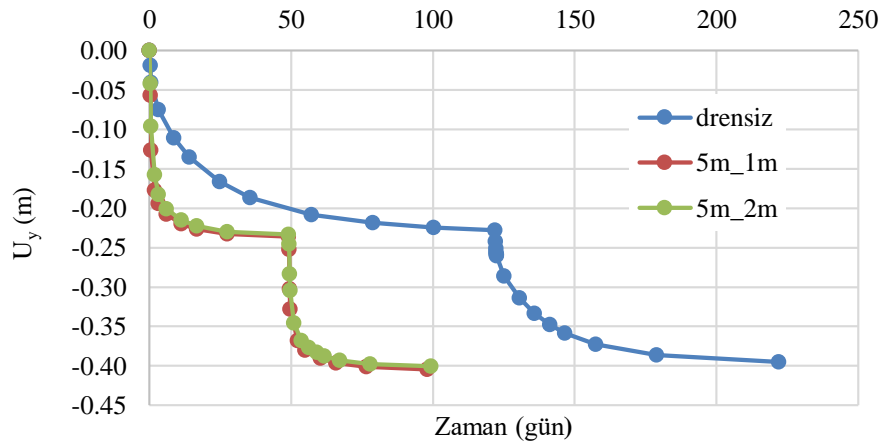
Şekil 5.10. 10 m dren boyu için boşluk suyu basıncı - zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 10 m)



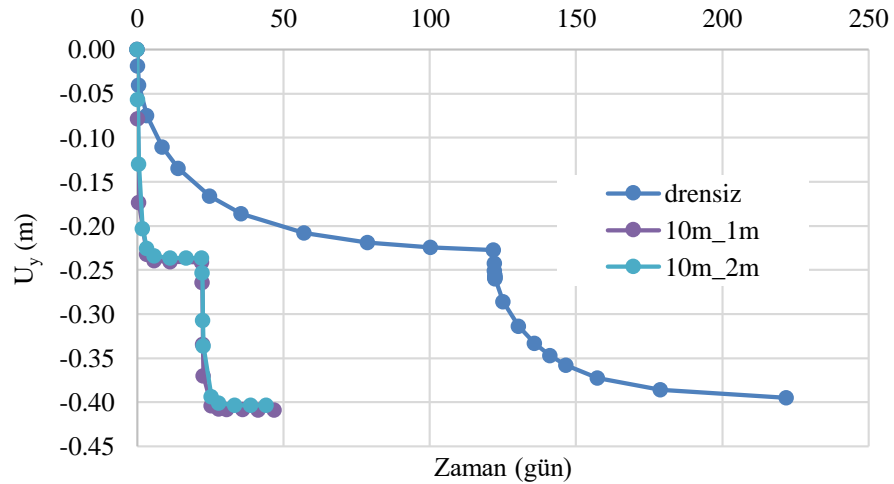
Şekil 5.11. 15 m dren boyu için boşluk suyu basıncı - zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 10 m)

Şekil 5.12., Şekil 5.13. ve Şekil 5.14.'te sırasıyla dren boyunun 5 m, 10 m ve 15 m olması durumlarında oturmaların gelişim süreci görülmekte olup tüm çözümlerde toplam oturmanın 40 cm civarlarında hesaplandığı anlaşılmaktadır. Dren boyunun 5 m seçilmesi durumunda oturmaların tamamlanması için geçen sürenin drensiz duruma göre yarıya düştüğü görülmektedir. Buna göre 22 cm oturma 16,69 günde tamamlanırken 23 cm civarındaki kademe oturmasına 27,5 gün civarında ulaşılmakta, daha sonra oturmalar çok yavaşlamaktadır (Şekil 5.12.).

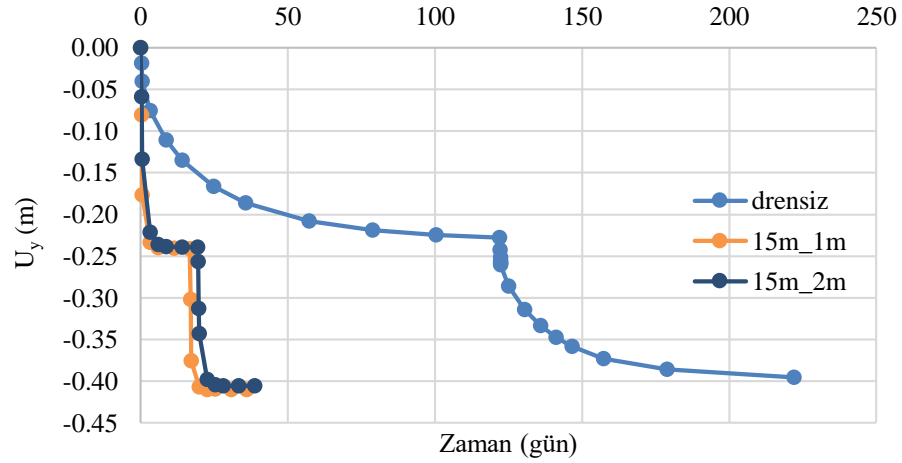
Dren boyunun 10 m ve 15 m olması durumunda ise 3 günde 22 cm'lik oturma değerlerine ulaşılabilir. Dren boyunun 10 m'den 15 m'ye çıkarılması çok büyük bir katkı sağlamamaktadır (Şekil 5.13. ve Şekil 5.14.).



Şekil 5.12. 5 m dren boyu için oturma - zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 10 m)



Şekil 5.13. 10 m dren boyu için oturma-zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 10 m)



Şekil 5.14. 15 m dren boyu için oturma-zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 10 m)

Dolgu tabakalarının kademeli yüklenmesiyle oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmelerini ayrıntılı görebilmek amacıyla dolgunun orta kısmına denk gelen C(0,0) ve C'(0,-30) noktaları arasında alınan kesit sonuçları Tablo 5.2.'de özetlenmiştir. Buna göre ikinci yükleme sonrasında oluşan fazla boşluk suyu basıncı değerlerinin 1 kPa'a kadar sönümlenmesi için gereken süreler görülmektedir.

Drensiz analiz yapıldığında konsolidasyon 222 günde tamamlanmakta ve süre sonunda fazla boşluk suyu basınçları 1 kPa'ın altına düşmektedir.

Dren boyu 5 metre, dren aralıkları 2 metre seçildiği takdirde konsolidasyon 99,34 günde tamamlanmakta ve süre sonunda fazla boşluk suyu basınçları 0,84 kN/m² değerine kadar sönümlenmektedir. Konsolidasyon süresi drensiz duruma göre %55,4 azalmaktadır. Dren aralıkları 1 m'ye düşürüldüğünde süre 98 gün ve fazla boşluk suyu basınçlarının sönümlenmiş değeri 0,87 kN/m² olarak bulunmaktadır.

Dren boyu 10 metre, dren aralıkları 2 metre seçildiği takdirde konsolidasyon 44,13 günde tamamlanmakta ve süre sonunda fazla boşluk suyu basınçları 0,86 kN/m² değerine kadar sönümlenmektedir. Konsolidasyon süresi drensiz duruma göre beşte bir civarlarına azalmaktadır. Dren aralıkları 1 m'ye düşürüldüğünde süre 46,83 gün ve fazla boşluk suyu basınçlarının sönümlenmiş değeri 0,73 kN/m² olarak bulunmaktadır.

Dren boyu 15 metre, dren aralıkları 2 metre seçildiği takdirde konsolidasyon 38,75 günde tamamlanmakta ve süre sonunda fazla boşluk suyu basınçları $0,91 \text{ kN/m}^2$ değerine kadar sönümlenmektedir. Konsolidasyon süresi drensiz duruma göre altıda bir civarlarına azalmaktadır. Dren aralıkları 1 m'ye düşürüldüğünde süre 36,05 gün ve fazla boşluk suyu basınçlarının sönümlenmiş değeri $0,96 \text{ kN/m}^2$ olarak bulunmaktadır. Kesitlerden çıkarılan sonuca göre dren boylarındaki artışın konsolidasyon sürecine olumlu etkisi oldukça fazla olmaktadır. Dren boyunun 15 metre seçildiği analizde konsolidasyonun en kısa sürede tamamlandığı görülmüştür.

Tablo 5.2. Farklı yükleme koşullarına göre oluşan boşluk suyu basınçları (10 m yumuşak kil)

Dren durumu	Drensiz	Drenli	Drenli	Drenli	Drenli	Drenli	Drenli
Dren boyu (m)	-	5	5	10	10	15	15
Dren aralığı (m)	-	2	1	2	1	2	1
U_{\max} (kPa)	<1	0,84	0,87	0,86	0,73	0,91	0,96
Süre (gün)	222,00	99,34	98	44,13	46,83	38,75	36,05
Ölçek	*10	*10	*10	*10	*10	*10	*10
C-C kesitinde boşluk suyu basıncı değişimi							

Yumuşak kil tabakası kalınlığının 10 metre olduğu modellerde yapılan analizler sonucunda şu çıkarımlara ulaşılmaktadır;

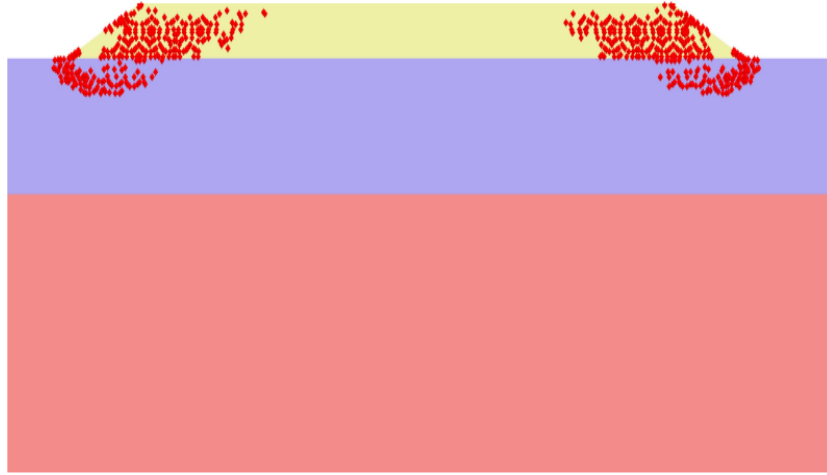
1. Kısıtlı yükseklikte bir dolgu olmasına rağmen ani (drenajsız) yükleme yumuşak zeminde göçmelere yol açmaktadır.
2. Konsolidasyona izin verilen durumlarda dolgunun drenler olmadan tek seferde yapılmasının ardından da yükleme hızına bağlı olarak zeminde göçmelerin meydana geldiği gözlemlenmektedir.
3. Drenli çözümlerde göçme olmamaktadır.

4. Drensiz yapılan analizlerde yükleme ile drenli çözümlemelere göre daha fazla ilave boşluk suyu basınçları oluşmakta ve sönümlenme için çok daha fazla zamana ihtiyaç duyulmaktadır.
5. Dren kullanımı konsolidasyon süresini altıda bire kadar düşürmektedir.
6. Dren aralığının 2 m olması sönümlenme için yeterli olmaktadır. Dren aralığının 1 m olması sonuçlarda kayda değer bir gelişme sağlamamaktadır.
7. Drenler konsolidasyonun tamamlanma sürecini hızlandırma yanında göçmenin engellenmesi için de çok büyük işlev görmektedir.

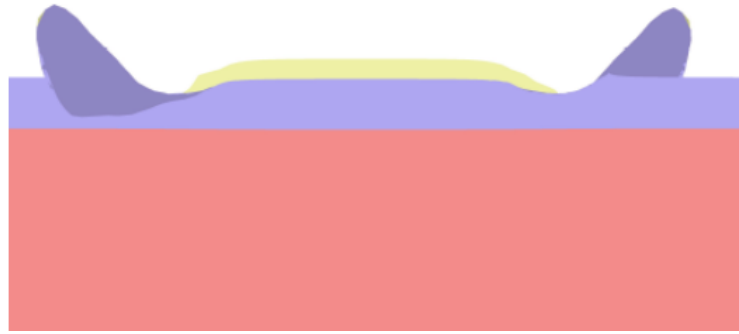
5.2. 5 Metrelik Üst Yumuşak Kil Tabakası için Analiz Sonuçları

Yumuşak kil tabakası kalınlığının 5 m olması durumunda gerçekleştirilen analizlerde de önceki örnekte olduğu gibi farklı dren boyları ve aralıklarına bağlı oturma ve boşluk suyu basınçları karşılaştırılmıştır. İlk olarak yapılan plastik analizle oturmaların ve boşluk suyu basıncı artışlarının en fazla olacağı noktalar bulunmuş, oturma için yüzeyde A(0,0) noktası, boşluk suyu basıncı artışları için B(0,-8.75) noktası seçilerek (10 metre yumuşak kil tabakasıyla karşılaştırma yapılabilmesinin kolaylaşması amacıyla) grafikler bu noktalar üzerinden hazırlanmıştır. Yapılan analizler oturma miktarlarının yüzeye yakın bölgelerde maksimum olduğunu göstermektedir. Boşluk suyu basınçları ise drenlerin olduğu bölgelerde sönümlenmekte iken drenlerin ulaşmadığı alt bölgelerde daha fazla olmaktadır.

Şekil 5.15.'de plastik analiz sonrasında oluşan göçmeyi gösteren plastik noktalar, Şekil 5.16.'da aşırı deformasyonlar ve Şekil 5.17.'de fazla boşluk suyu basınçları görülmektedir. Plastik yükleme sırasında dolgunun %71'i ($M_{stage}=0,7058$) yükseldiğinde program göçme mesajı vermiştir (*soil body seems to collapse*). Buradan çıkarılabilecek sonuç yumuşak zemin tabakası kalınlığı azalsa bile hızlı yüklemenin (drenajsız durum) yapılamayacağıdır.

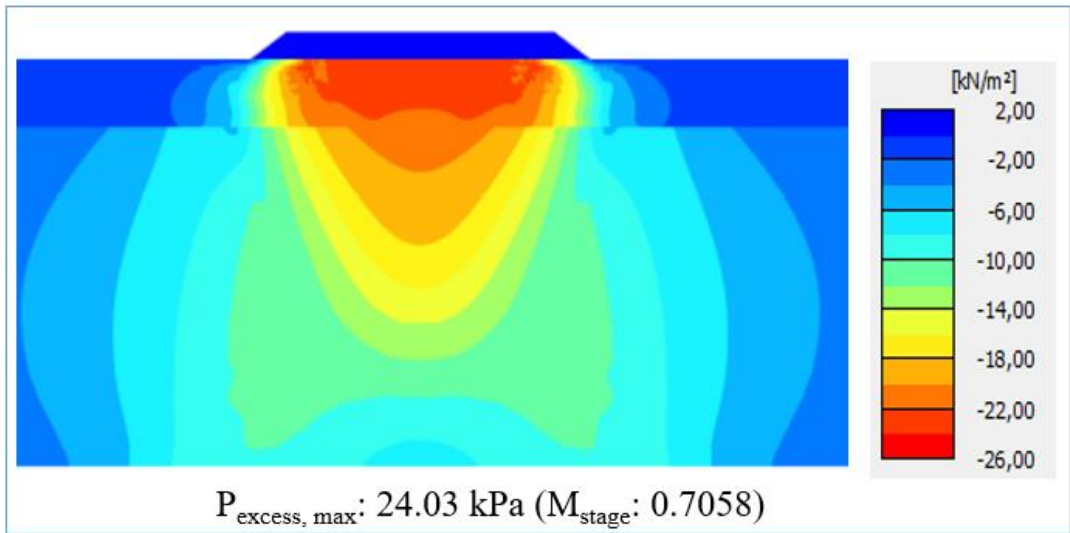


Şekil 5.15. 5 m yumuşak tabaka için plastik yüklemeye ait göçme durumunu gösteren plastik noktalar



Deformed mesh |u| (scaled up 5,00 times)
Maximum value = 2,412 m (Element 113 at Node 2368)

Şekil 5.16. 5 m yumuşak kil tabakası için plastik yüklemeye ait aşırı deformasyonlar



Şekil 5.17. 5 m yumuşak kil tabakası için plastik yüklemeye oluşan fazla boşluk suyu basınçları

Plastik analizlerden sonra konsolidasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler gerçekleştirilirken 2 farklı yükleme durumu dikkate alınarak sonuçlar incelenmiştir.

Dolgunun tek kademedede yani (2 m dolgu 1 günde) inşa edildiği durumda plastik analize benzer olarak göçme durumu meydana gelmiştir. Ancak burada zeminin geçirimsizliği dikkate alındığı için dolgu %90 seviyesine ($M_{stage}: 0,8983$) kadar yüklenebilmiştir (Şekil 5.18.). Bu çözüm sonrasında drenler modelde aktif edildiğinde bütün dren boyları için dolgunun inşası tamamlanmış, hiçbir durumda göçme olmamıştır. Tablo 5.3.'te tüm konsolidasyon analizi çözümleri için göçme durumu gösterilmektedir.

Tablo 5.3. 5 m yumuşak kil tabakası için analiz tipine bağlı dren durumu ve göçme ilişkisi

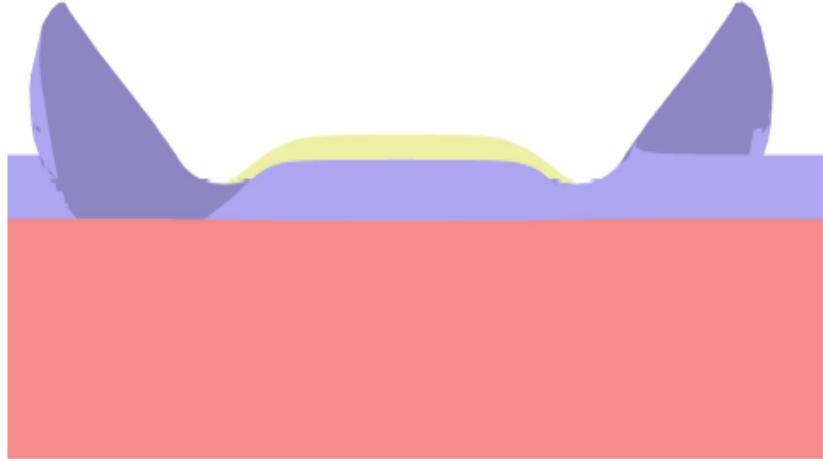
Analiz Tipi	Dren durumu	Göçme durumu
Plastik	Yok	Var
Konsolidasyon (tek kademe)	Yok	Var
	Var	Yok
Konsolidasyon (iki kademe)	Yok	Yok
	Var	Yok

Dolgunun 1'er metrelik iki kademedede (her bir yükleme 0,5 gün) yüklendiği çözümlerin hepsinde hesaplamalar tamamlanmış ve hiçbir durumda göçme ile karşılaşılmamıştır.

Şekil 5.18. ve Şekil 5.19.'da konsolidasyonlu çözümde drenler yokken dolgu tabakasının tamamının tek seferde 1 günde inşa edildiği durumda yumuşak zemin tabakasında oluşan plastik noktalar ve göçme yüzeyleri gösterilmektedir. Plastik yüklemeye benzer şekilde göçme yüzeylerinin oluştuğu incelenebilmektedir.



Şekil 5.18. 5 m yumuşak kil tabakasında dolgunun tamamının tek seferde yüklenmesinden oluşan göçme durumunda plastik noktalar

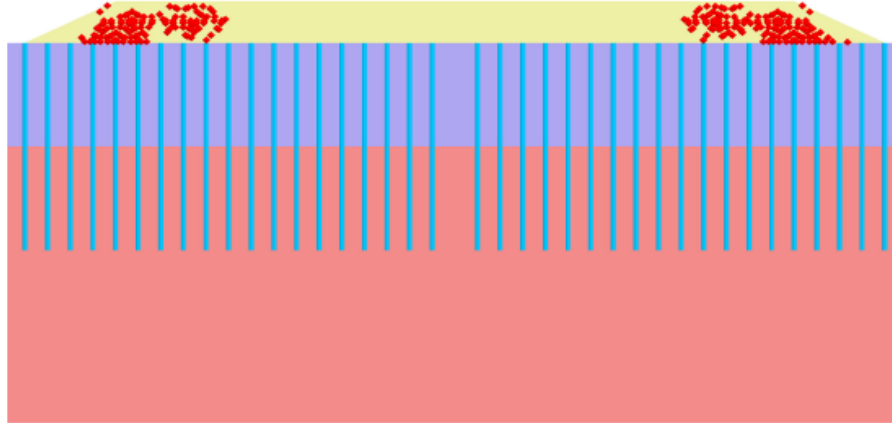


Şekil 5.19. 5 m yumuşak kil tabakası için dolgunun tamamının tek seferde yüklenmesiyle göçme

Dolgunun tek seferde yüklenmesi durumunda konsolidasyonlu analiz yapılmasına rağmen yumuşak kil tabakasının kalınlığı farketmeksizin göçmelerin meydana geldiği görülmektedir. Buradan yüklemenin hızlı olduğu ve oluşan fazla boşluk suyu basınçlarının göçmeye sebep olduğu söylenebilir. Buna göre tabaka kalınlığı fazla ise yükleme hızının düşürülmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.

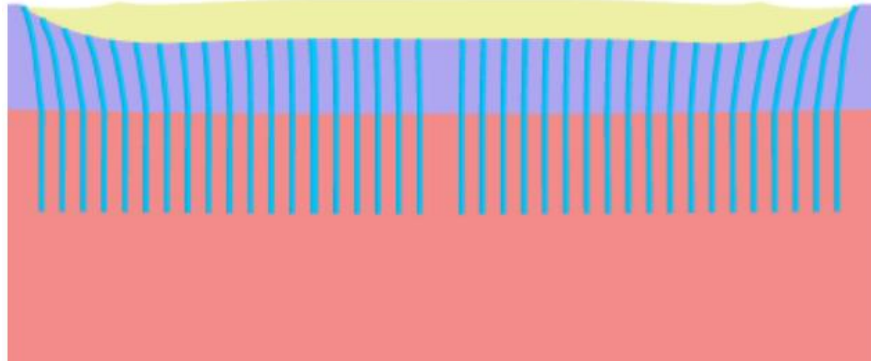
Bu modelde drenlerin aktif hale getirilmesinden sonra yükleme yapıldığında drenlerin kil içinde ek boşluk suyu basıncını kısa sürede sönmemesiyle göçmenin önlenmesi Şekil 5.20.'de incelenebilmektedir. Drenlerin olduğu bölgede plastik noktanın

oluşmaması drenlerin konsolidasyonu hızlandırma yanında göçmenin önlenmesi işlevini gördüğünü de ispatlamaktadır.



Şekil 5.20. 5 m yumuşak kil tabakası için drenlerin aktif hale gelmesiyle göçmenin önlenmesi

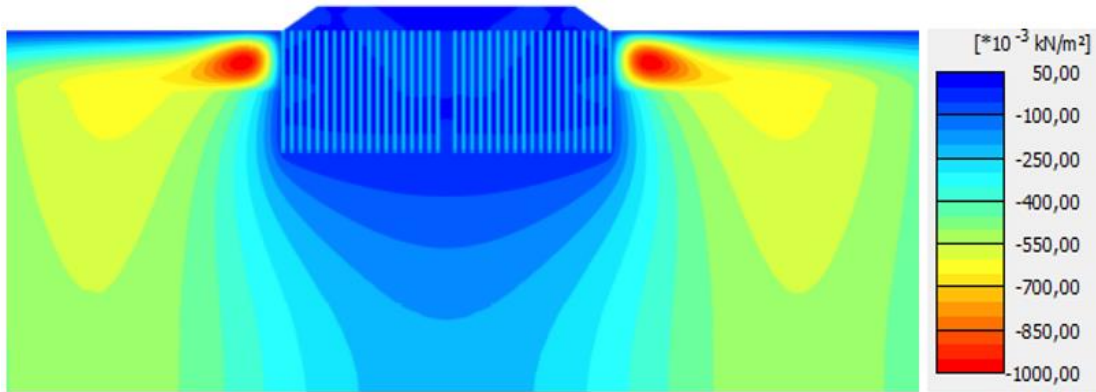
Şekil 5.21.'de gösterilen oturma kalıbının oluşması 14,48 gün sürmüştür ve bu süre sonunda modelin tamamında fazla boşluk suyu basıncı değerleri 1 kPa'ın altına düşmüştür. Şekil 5.22.'de ise fazla boşluk suyu basınçlarının dağılımı gösterilmektedir. Drenlerin olduğu bölümde fazla boşluk suyu basınçlarının çok önceden tamamen sönmüştüğü anlaşılmaktadır. Bu durum drenlerin oturmaya olan olumlu etkisini göstermektedir.



Deformed mesh |u| (scaled up 5,00 times) (Time 14,48 day)

Maximum value = 0,4003 m (Element 26 at Node 7177)

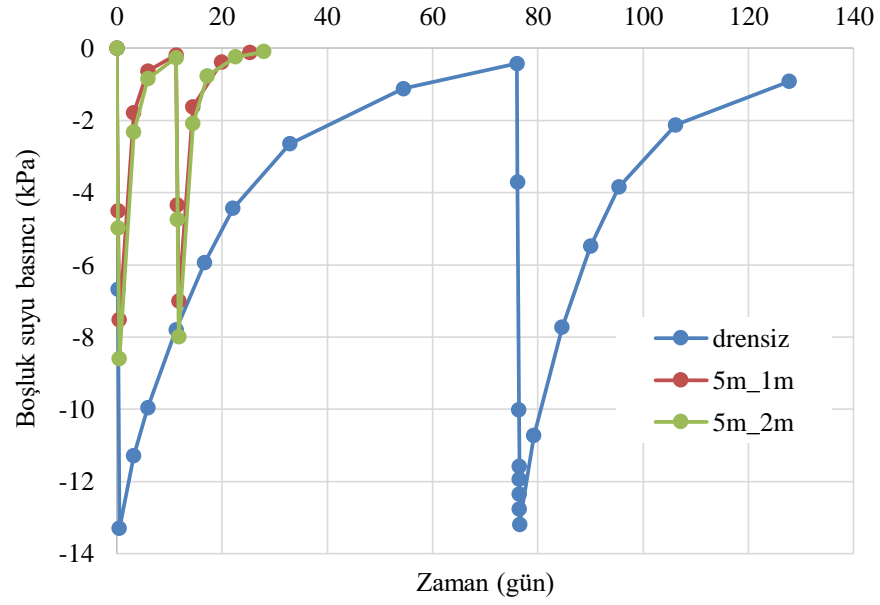
Şekil 5.21. 5 m yumuşak kil tabakası için drenlerin aktif hale gelmesiyle oluşan oturma kalıbı



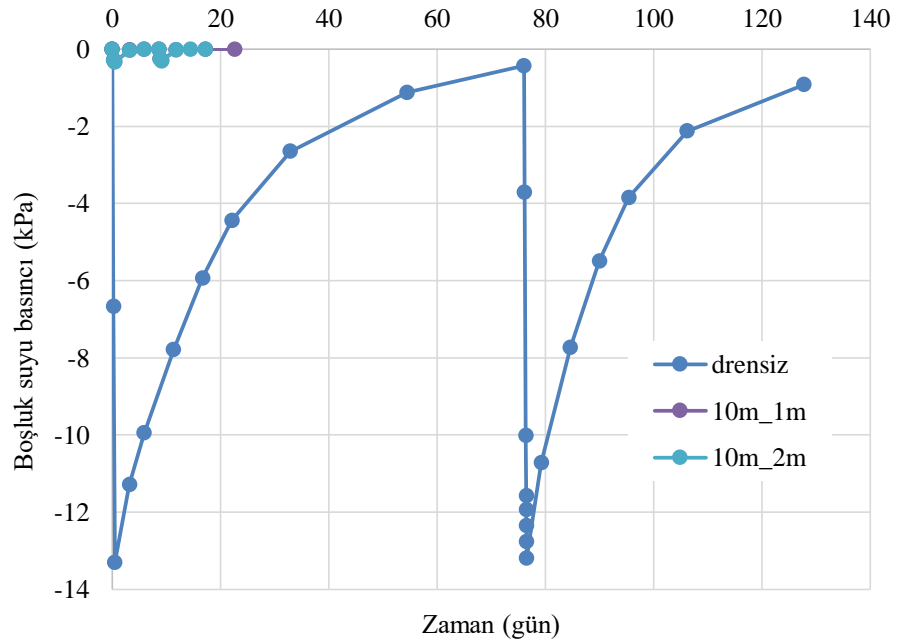
Şekil 5.22. 5 m yumuşak kil tabakasında drenler aktifken dolgunun tamamının tek seferde yüklendiği durumda sönümlenmiş fazla boşluk suyu basınçları

Şekil 5.23., Şekil 5.24., Şekil 5.25. ve Şekil 5.26.'da dolgunun 1'er metrelik iki kademe yüklediği modellerin sonuçları gösterilmektedir. Şekil 5.23.'de dren boyunun 5 m olduğu durumda elde edilen ek boşluk suyu basınçlarının gelişimi ve sönümlenmesi zamana bağlı olarak gösterilmektedir. Bu çözümlerden drenlerin olmaması durumunda konsolidasyonun tamamlanması için gereken sürenin 127,7 gün olduğu, drenlerin kullanılması durumunda ise 28 gün civarına düştüğü anlaşılmaktadır. Burada da konsolidasyon sürecinin yeteri kadar hızlanmamasının nedeni dren boyunun yumuşak zemin kalınlığıyla eşit seçilmesidir. Ayrıca dren aralıklarının 2 m'den 1 m'ye düşürülmesinin de kayda değer bir fayda sağlayamadığı, konsolidasyonun tamamlanması için gerekli sürenin 26 gün civarında elde edilmesinden anlaşılmaktadır.

Şekil 5.24.'de dren boyunun 10 m olması durumunda fazla boşluk suyu basınçlarının zamana bağlı değişimi görülmektedir. Bu çözümlerde drenlerin boyunun yumuşak tabaka boyunun 2 katına çıkarılmasıyla sönümlenme süresinin 18 gün civarına düştüğü anlaşılmaktadır. Dren aralığının 2 m'den 1 m'ye düşürülmesinin iyi yönde çok fazla bir değişim sağlamadığı anlaşılmakta olup bu problemde dren aralığının 2 m olmasının yeterli olduğu söylenebilir. Şekil 5.23. ve Şekil 5.24.'ten dren boyu arttıkça modelde oluşan fazla boşluk suyu basıncının maksimum değerinin de azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.23. 5 m dren boyu için boşluk suyu basıncı-zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 5 m)



Şekil 5.24. 10 m dren boyu için boşluk suyu basıncı-zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 5 m)

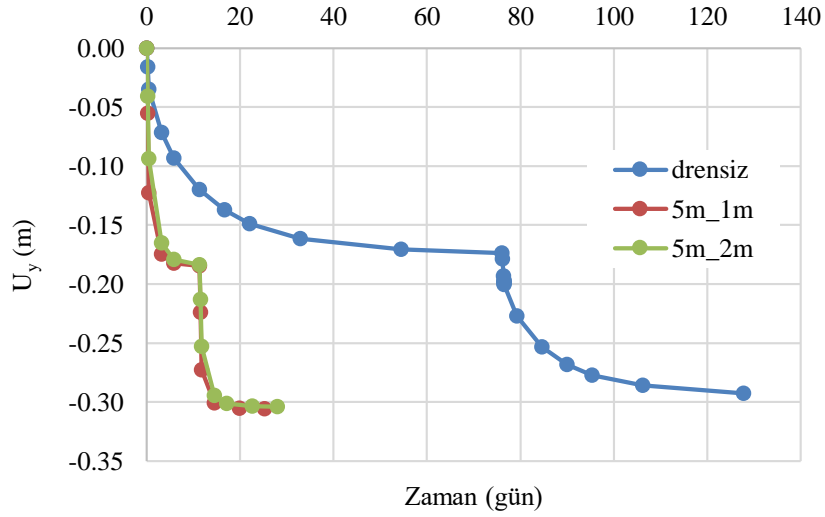
Şekil 5.25. ve Şekil 5.26.'da sırasıyla dren boyunun 5 m ve 10 m olması durumlarında oturmaların gelişim süreci drensiz durumla beraber görülmektedir. Drensiz çözümlerde toplam oturma 29 cm civarlarında ve oturmanın tamamlanması için gerekli süre 127,7 gün olarak hesaplanmaktadır.

Dren boyunun 5 m seçilmesi durumunda oturmaların tamamlanması için geçen sürenin drensiz duruma göre onda birine düştüğü görülmektedir. Buna göre ilk yükleme sonunda 18 cm oturma 5,90 günde tamamlanırken sonrasında oturmalar yavaşlamakta, ikinci yükleme sonunda 29 cm civarındaki oturmaya 14,49 gün civarında ulaşılmakta, daha sonra oturmalar gene çok yavaşlamaktadır (Şekil 5.25.).

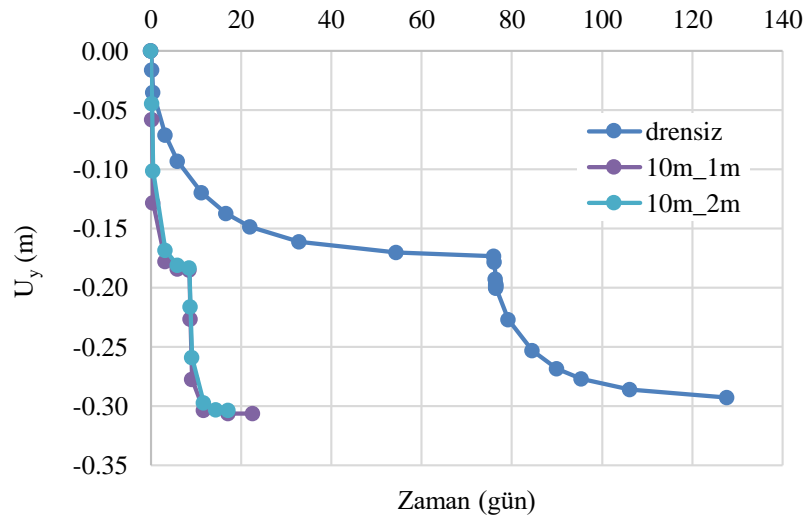
Dren boyunun 10 m olması durumunda ise (Şekil 5.26.) ilk yükleme sonrasında 17 cm oturmanın 3,20 günde tamamlanmasıyla konsolidasyon süresinin oldukça azaldığı görülmektedir. İkinci yükleme sonrasında da 30 cm'lik oturmaya 11,79 gün sonunda ulaşılmaktadır. Dren aralıklarının 2 m'den 1 m'ye indirilmesinin oturma ve boşluk suyu basıncı değişimine pek faydası olmadığı analiz sonucunda açıkça gözlenmektedir.

Dolgu tabakalarının kademeli yüklenmesiyle oluşan boşluk suyu basınçlarının sönümlenmelerini ayrıntılı görebilmek amacıyla ve 10 metre yumuşak kil tabasındaki sonuçlarla karşılaştırma yapabilmek amacıyla C(0,0) ve C'(0,-30) noktaları arasında alınan kesit sonuçları Tablo 5.4.'te özetlenmiştir. Buna göre ikinci yükleme sonrasında oluşan fazla boşluk suyu basıncı değerlerinin 1 kPa'a kadar sönümlenmesi için gereken süreler görülmektedir. Sonuç olarak;

- a) Drensiz analiz yapıldığında konsolidasyon 127,7 günde tamamlanmakta ve süre sonunda fazla boşluk suyu basınçları 1 kPa'ın altına düşmektedir.
- b) Dren boyu 5 metre, dren aralıkları 2 metre seçildiği takdirde konsolidasyon 27,96 günde tamamlanmakta ve süre sonunda fazla boşluk suyu basınçları 0,58 kN/m² değerine kadar sönümlenmektedir. Konsolidasyon süresi drensiz duruma göre %45,6 azalmaktadır. Dren aralıkları 1 m'ye düşürüldüğünde süre 25,27 gün ve fazla boşluk suyu basınçlarının sönümlenmiş değeri 0,77 kN/m² olarak hesaplanmaktadır.
- c) Dren boyu 10 metre, dren aralıkları 2 metre seçildiği takdirde konsolidasyon 17,18 günde tamamlanmakta ve süre sonunda fazla boşluk suyu basınçları 1,013 kN/m² değerine kadar sönümlenmektedir. Konsolidasyon süresi



Şekil 5.25. 5 m dren boyu için oturma-zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 5 m)



Şekil 5.26. 10 m dren boyu için oturma-zaman grafiği (yumuşak kil kalınlığı: 5 m)

drensiz duruma göre beşte bir civarlarına azalmaktadır. Dren aralıkları 1 m'ye düşürüldüğünde süre 22,57 gün ve fazla boşluk suyu basınçlarının sönmüş değeri $0,59 \text{ kN/m}^2$ olarak bulunmaktadır.

Dren boylarına ve aralıklarına göre yorumlamalar yapıldığında;

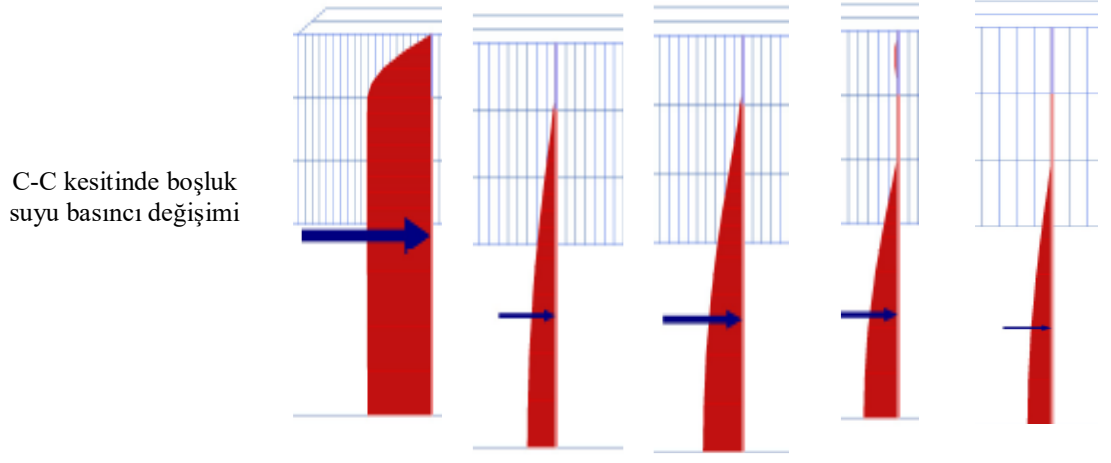
- 5 m dren boyunun drensiz modele göre oturmaları istenilen ölçüde azalttığı ve konsolidasyon süresine olan etkisinin gözle görülür bir fark oluşturduğu görülmektedir. Bunun yanında dren aralıklarının 2 m'den 1 m'ye

azaltılmasının bu çalışmada oluşturulan modelde pek önem arz etmediği değerlendirilmiştir.

- b) 10 m dren boyu sonuçları 5 m dren boyu ile kıyaslandığında oturmaların çok fazla azalma göstermediği izlenmektedir.

Tablo 5.4. Farklı yükleme koşullarına göre oluşan boşluk suyu basınçları (5 m yumuşak kil)

Dren durumu	Drensiz	Drenli	Drenli	Drenli	Drenli
Dren boyu (m)	-	5	5	10	10
Dren aralığı (m)	-	2	1	2	1
U_{max} (kPa)	<1	0,58	0,77	1,01	0,59
Süre (gün)	127,7	27,96	25,27	17,18	22,57
Ölçek	*10	*10	*10	*10	*10

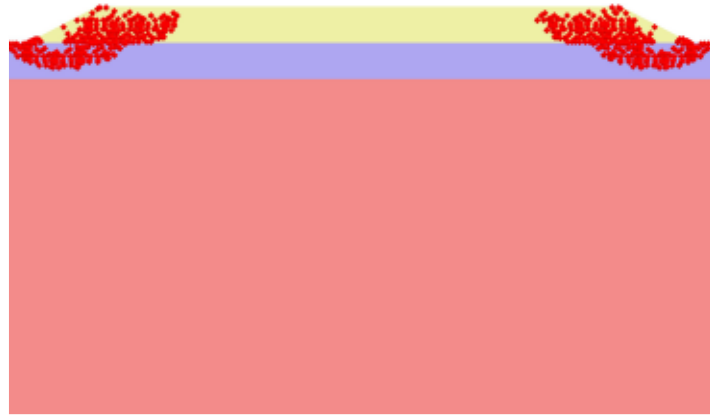


5.3. 2 Metrelik Üst Yumuşak Kil Tabakası için Analiz Sonuçları

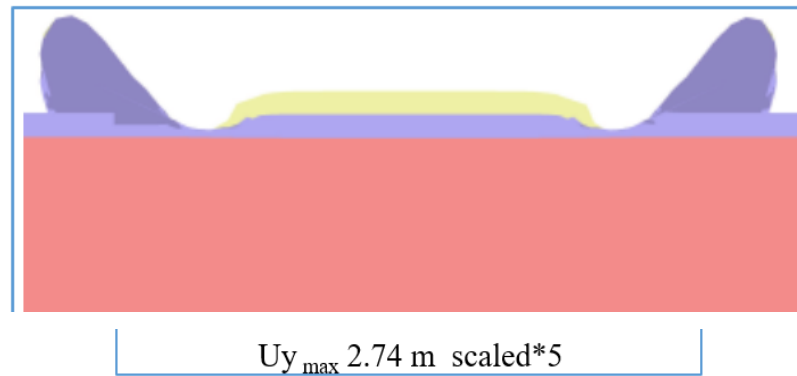
Sonuncu olarak 2 metrelik yumuşak kil tabakası üzerine yapılan yol dolgusunun ani yükleme ve kademeli yükleme altında davranışları incelenmiştir. 2 metrelik yumuşak kil tabakası olan durumda tabaka kalınlığı az olduğu için dren kullanılarak gerçekleştirilecek iyileştirmenin pratik olmayacağı araştırmalar ve gerçekleşen analizler sonucunda görülmektedir. Bu nedenle yumuşak tabaka kalınlığı az olan bir durumda yapılacak kazı ve dolgu ile zemin iyileştirilmesinin daha mantıklı olacağı düşünülmüştür. Bu modelde de ilk olarak yapılan plastik analizle oturmaların ve boşluk suyu basıncı artışlarının en fazla olacağı noktalar bulunmuş, oturma için

yüzeyde A(0,0) noktası, boşluk suyu basıncı artışları için B(0,-2) noktası seçilerek grafikler bu noktalar üzerinden hazırlanmıştır.

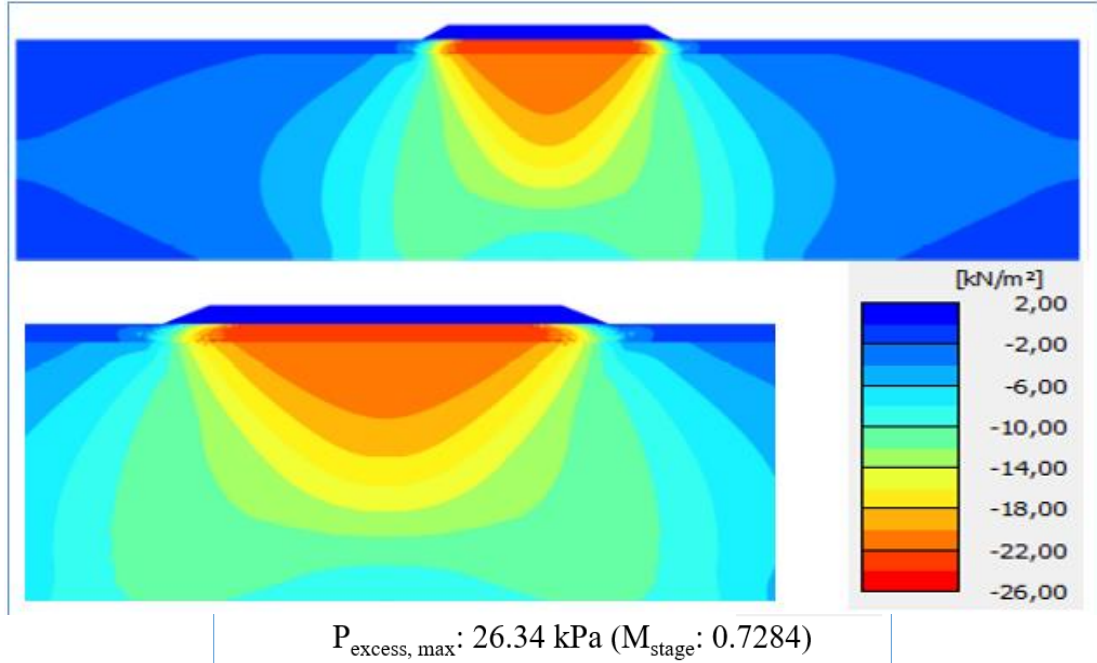
Plastik analiz sonrasında oluşan göçmeyi gösteren plastik noktalar Şekil 5.27.'de, aşırı deformasyonlar Şekil 5.28.'de ve fazla boşluk suyu basınçları Şekil 5.29.'da görülmektedir. Plastik yükleme sırasında dolgunun %73'ü ($M_{stage}=0,7284$) yükseldiğinde program göçme mesajı vermiştir (*soil body seems to collapse*). Buradan anlaşılacağı üzere yumuşak zemin kalınlığı az olsa bile alttaki sağlam tabakanın katkısı görülemeden hızlı yükleme (drenajsız durum) sonucunda göçme meydana gelmektedir. Ancak konsolidasyon analizleri yapılırken dolgunun iki kademe yüklenmesinin göçmelere neden olmadığı görülmektedir.



Şekil 5.27. 2 m yumuşak tabaka için plastik yüklemeye ait göçme durumunu gösteren plastik noktalar



Şekil 5.28. 2 m yumuşak kil tabakasında plastik yükleme sonunda aşırı deformasyonlar

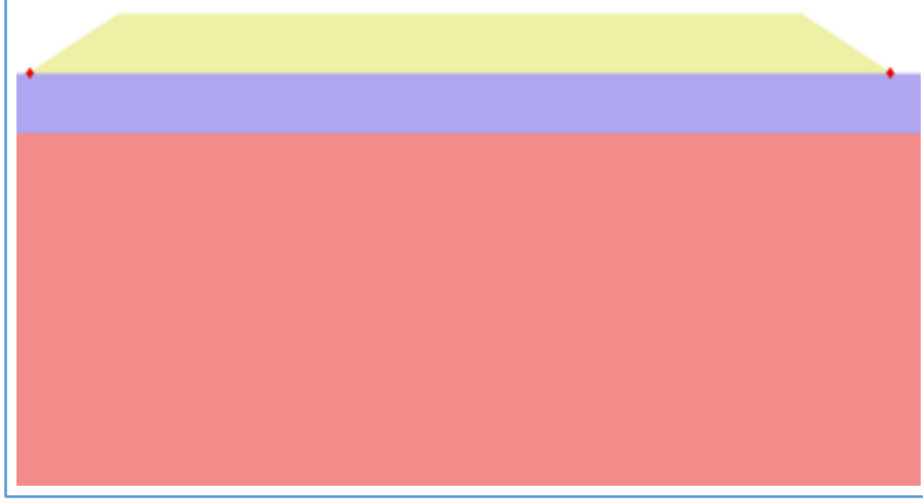


Şekil 5.29. 2 m yumuşak kil tabakası için plastik yüklemeye oluşan fazla boşluk suyu basınçları

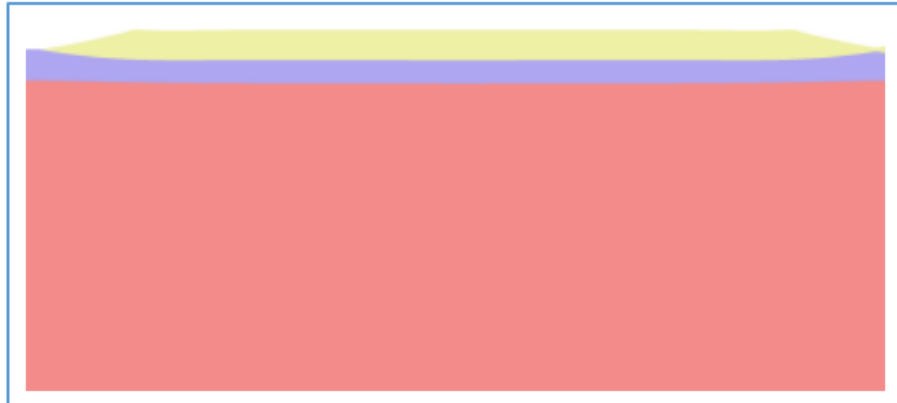
Plastik analizlerden yapıldıktan sonra modelin konsolidasyon analizleri de gerçekleştirilmiştir. Konsolidasyon analizinde ise dolgu ile iyileştirme yapılmamasına rağmen tek seferde 1 günde üst tabaka dolgunun inşasıyla göçme meydana gelmemiştir. Fakat oturma miktarlarının fazla olmasından dolayı dolguyla iyileştirme modeli üzerine araştırma yapılmıştır. Bu kapsamda yumuşak zemin tabakası için kazı yapılarak aynı anda doldurma işlemi gerçekleştirilip oturma değerleri ve boşluk suyu basınçlarının sönümlenme süreleri incelenmiştir. Analizlerde iyileştirme yapılan kazı ve dolgu miktarları 1 metre, 2 metre ve 3 metre olarak modellenirken dolgu genişlikleri ise 38 m, 44 m ve 50 m olarak alınmıştır.

Dolgunun tek kademede yani (2 m dolgu 1 günde) inşa edildiği durumda plastik analizden farklı olarak göçme durumunun meydana gelmediği gözlenmiştir. Şekil 5.30. ve Şekil 5.31.'de konsolidasyonlu çözümde dolgu tabakasının tamamının tek seferde 1 günde inşa edildiği durumda yumuşak zemin tabakasında oluşan plastik noktalar ve deformasyonlar gösterilmektedir. Konsolidasyon analizleri sonucunda yumuşak zemin tabakasının çok kalın olmaması nedeniyle oturmaların görece kısa sürede gerçekleştiği ve plastik noktaların yok denecek kadar azaldığı görülmektedir. Ayrıca konsolidasyonla birlikte; plastik analizde meydana gelen ve göçmeyi ifade eden

maksimum 2,744 m oturma miktarının 19,44 cm değerine kadar düşmüş olduğu gözlenmektedir. Şekil 5.32.'de oluşan fazla boşluk suyu basınçlarının plastik yüklemde 26,34 kPa iken konsolidasyon analiziyle birlikte 17,23 kPa'a kadar düştüğü görülmektedir.

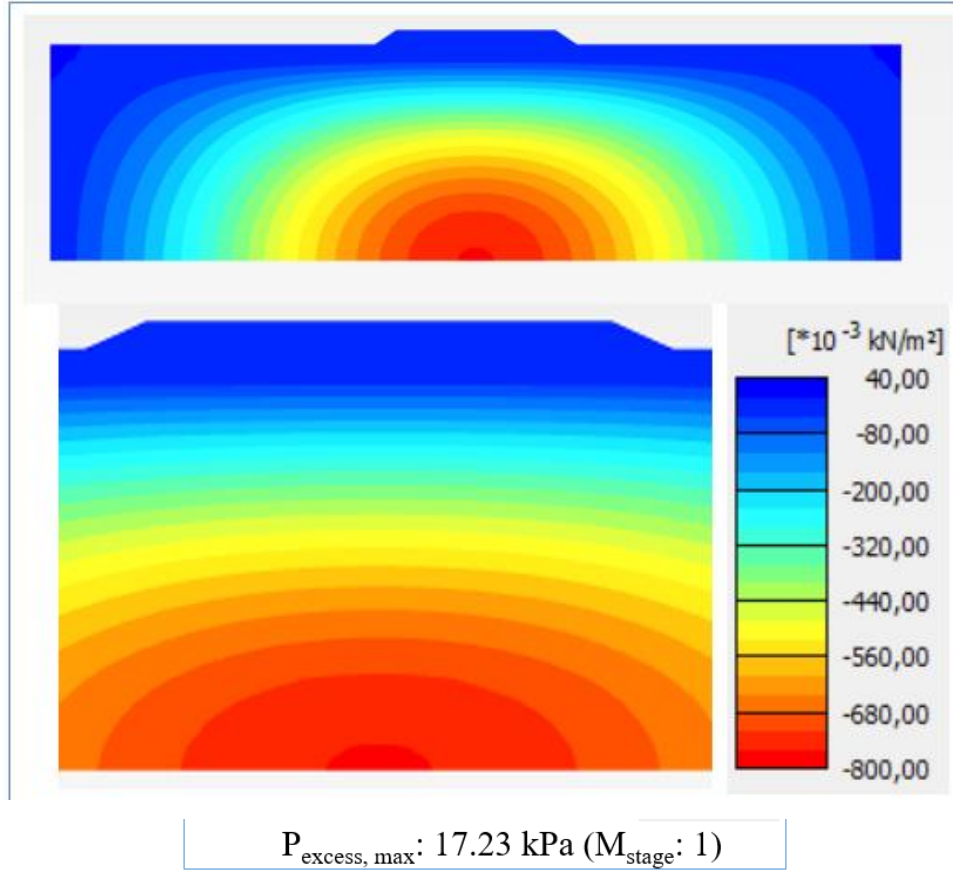


Şekil 5.30. 2 m yumuşak tabaka için konsolidasyon yüklemesine ait oluşan plastik noktalar



$$U_{y_{\max}} = 0.1944 \text{ m scaled*5}$$

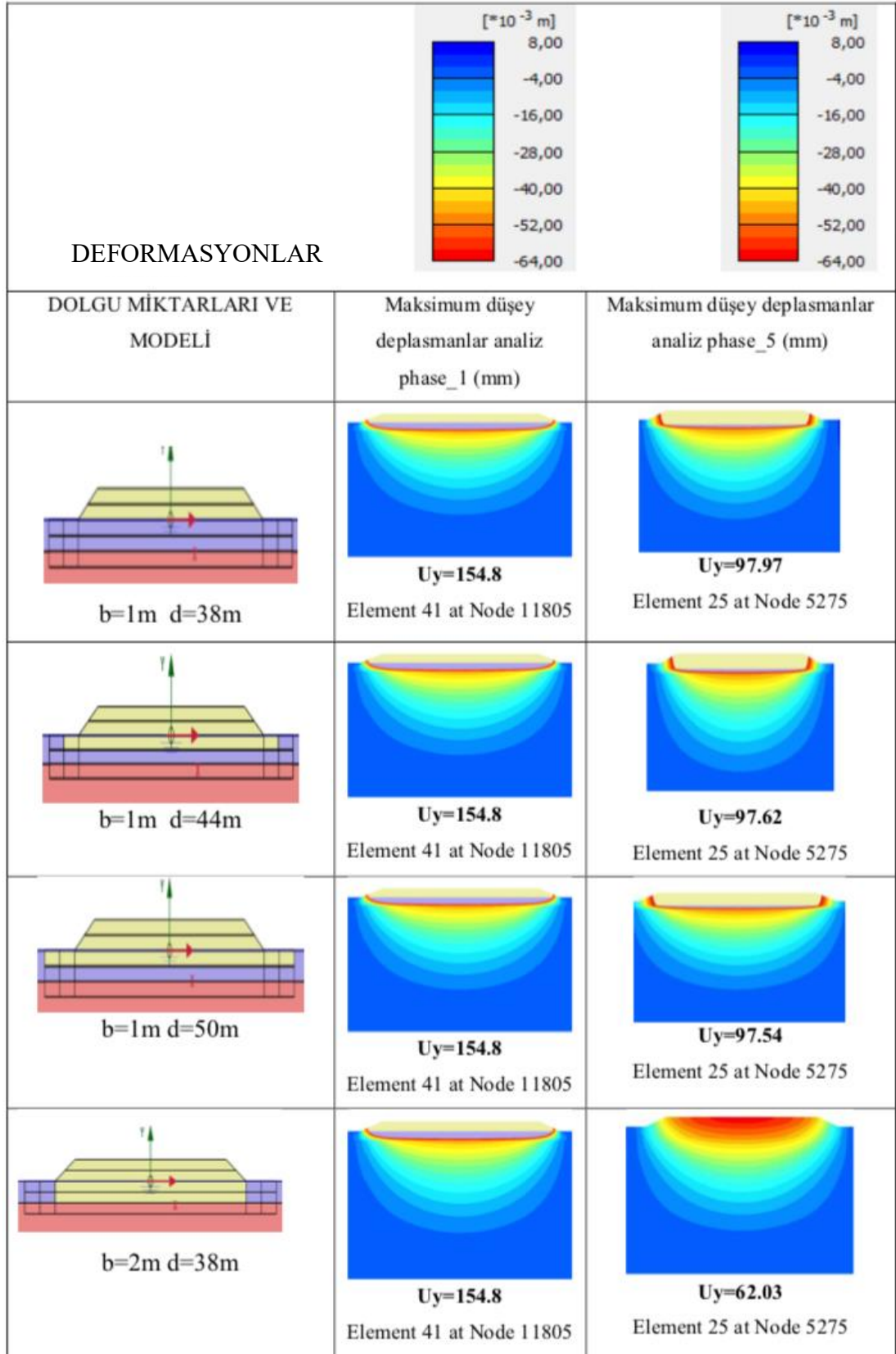
Şekil 5.31. 2 m yumuşak kil tabakası için konsolidasyon yüklemesine ait oturma kalıbı



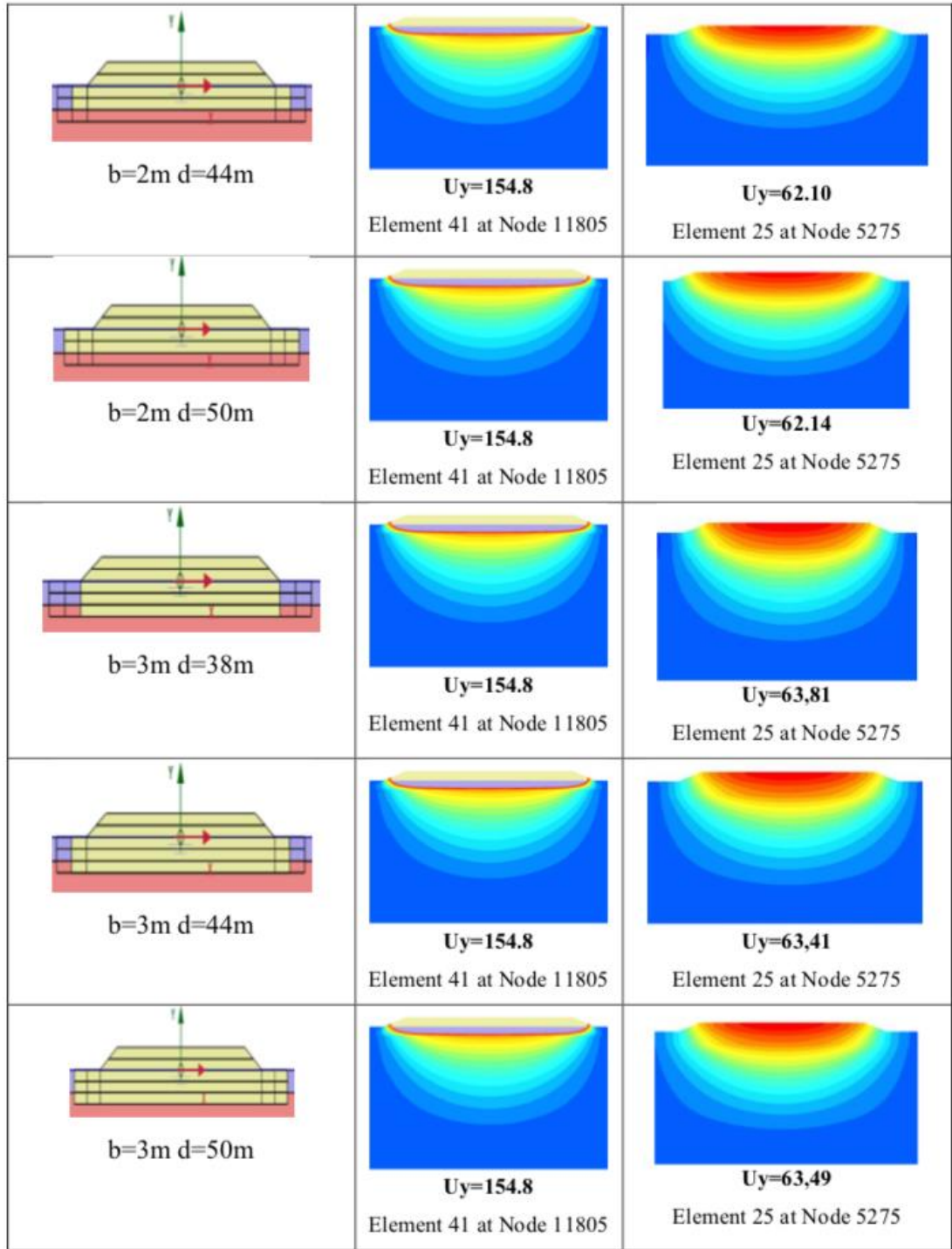
Şekil 5.32. 2 m yumuşak kil tabakası için konsolidasyonlu yüklemeye oluşan fazla boşluk suyu basınçları

Kazı - dolgu yüksekliği ve genişliklerinin farklı değerleri için yapılan konsolidasyon analizleri ile elde edilen oturmalar Şekil 5.33 ve Şekil 5.35'te, ek boşluk suyu basınçları ise Şekil 5.34 ve Şekil 5.36'da gösterilmektedir.

Şekil 5.33.'te Phase 1 ve Phase 5 durumlarında oluşan oturmalar gösterilmiştir. Tüm modellerde Phase 1; 2 metrelik dolgu tabakasının iyileştirme olmadan 1 günde inşa edilmesiyle gerçekleşen oturmaları göstermekte olup oturma değeri 154,8 mm'dir. Phase 5 ise dolgu ile iyileştirme yapılmış durumda 2 metrelik yol dolgusunun konsolidasyonlu analizde 1 günde inşa edilmesiyle oluşan oturmaları göstermektedir. Kazı - dolgu kalınlığı 1 metre olduğunda 97,97 mm oturma oluşurken kazı - dolgu miktarı 2 metreye çıktığında oturma miktarı 62,03 mm'ye düşmüştür. Kazı - dolgu kalınlığının 3 m'ye çıkartılması yani zayıf tabakanın altındaki görece sağlam kil tabakasının da kazılması oturmaların azalması yönünde fayda sağlamamıştır. Bunun yanında kazı - dolgu genişliğinde meydana gelen artışların oturmaya etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır.



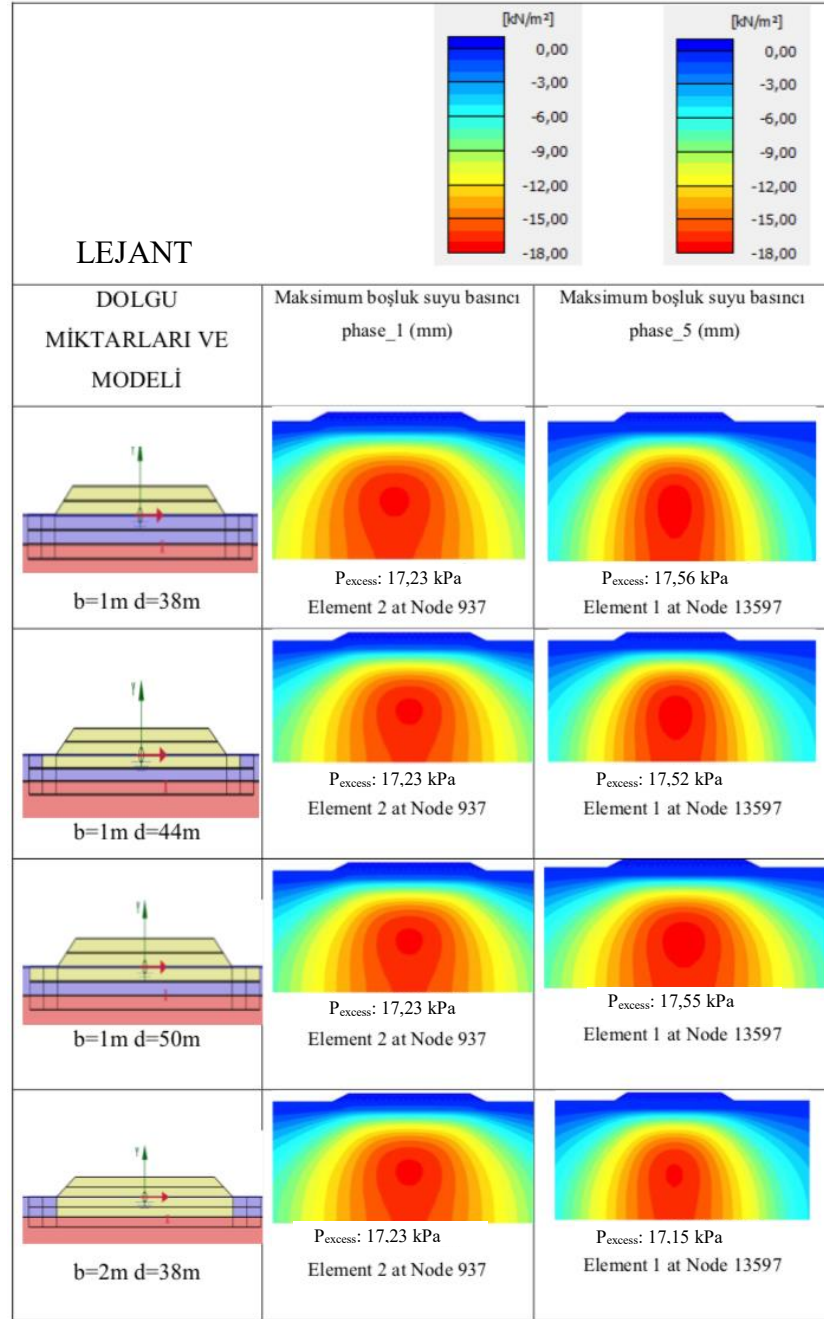
Şekil 5.33. Ani yüklemde dolguyla iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş durumda konsolidasyon etkisinde meydana gelen oturma miktarları (dolgu 1 günde inşaa ediliyor)



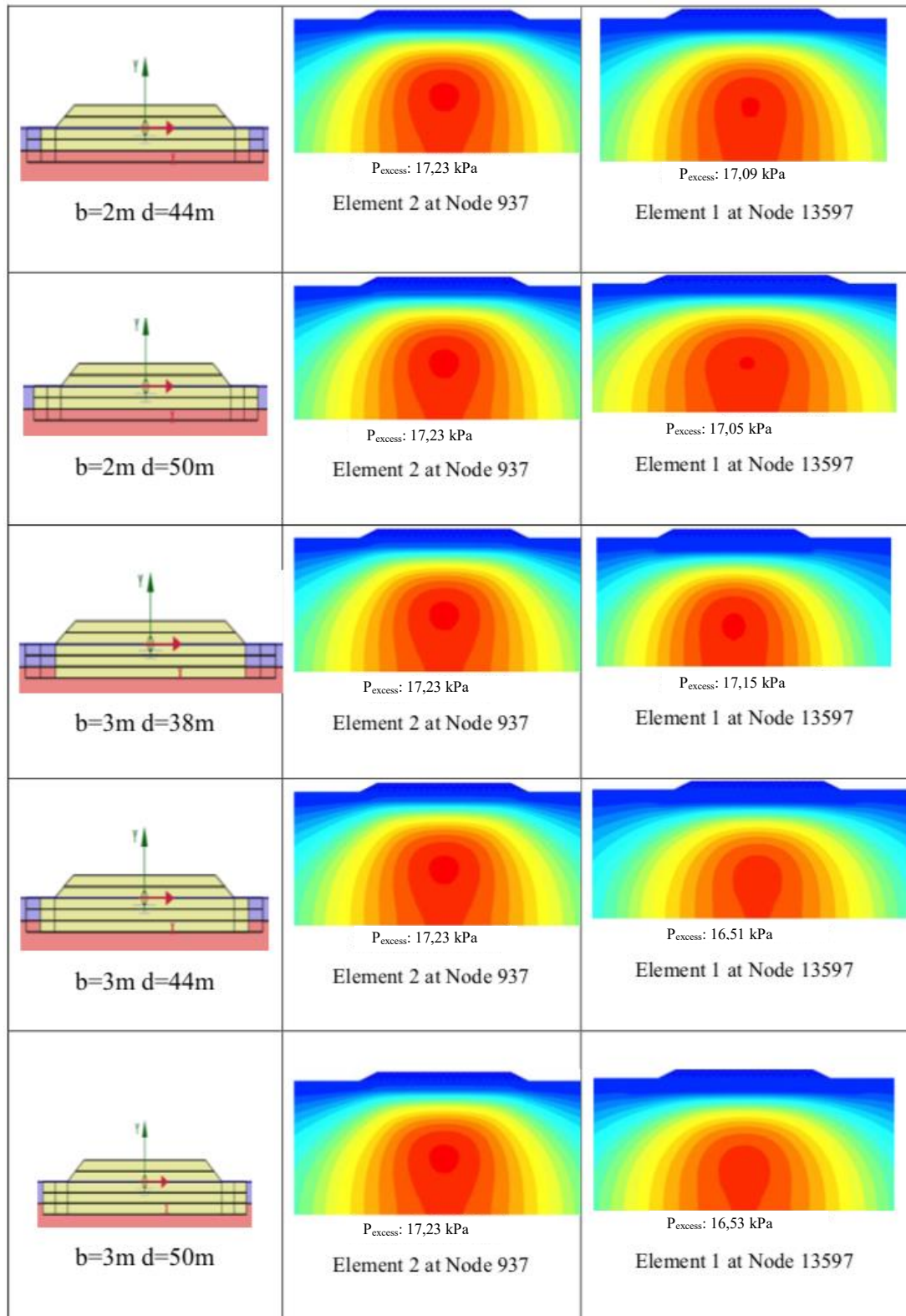
Şekil 5.33. (Devamı)

Şekil 5.34.'te Phase 1 ve Phase 5 durumlarında ek boşluk suyu basınçları gösterilmiştir. Tüm modellerde Phase 1; 2 metrelik dolgu tabakasının iyileştirme olmadan 1 günde inşa edilmesiyle oluşan ek boşluk suyu basınçlarını göstermekte olup bu değeri 17,23 kPa'dır. Phase 5 ise dolgu ile iyileştirme yapılmış durumda 2 metrelik

yol dolgusunun konsolidasyonlu analizde 1 günde inşa edilmesiyle oluşan ek boşluk suyu basınçlarını göstermektedir. Değiştirilen zemin miktarı 1 metre olduğunda max 17,56 kPa boşluk suyu basıncı oluşurken; dolgu miktarı 2 metreye çıktığında boşluk suyu basıncı değeri 17,15 kPa'a düşmüştür. Genişlikte meydana gelen artışların ek su basınçlarına da bir etkisinin olmadığı görülmektedir.



Şekil 5.34. Ani yüklemde dolguyla iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş durumda konsolidasyon etkisinde meydana gelen boşluk suyu basınçları (dolgu 1 günde inşa ediliyor)



Şekil 5.34. (Devamı)

Görsellerden farklı olarak Tablo 5.5.'te Phase 1'de meydana gelen oturma ve boşluk suyu basınçları tek kalem halinde gösterilmiştir. Phase 1'de tüm boşluk suyu basınçlarının ve oturma miktarlarının iyileştirme olmadığı için aynı çıktığı görülmektedir.

Tablo 5.5. Konsolidasyon analizinde iyileştirme olmadan meydana gelen oturma ve boşluk suyu basınçları

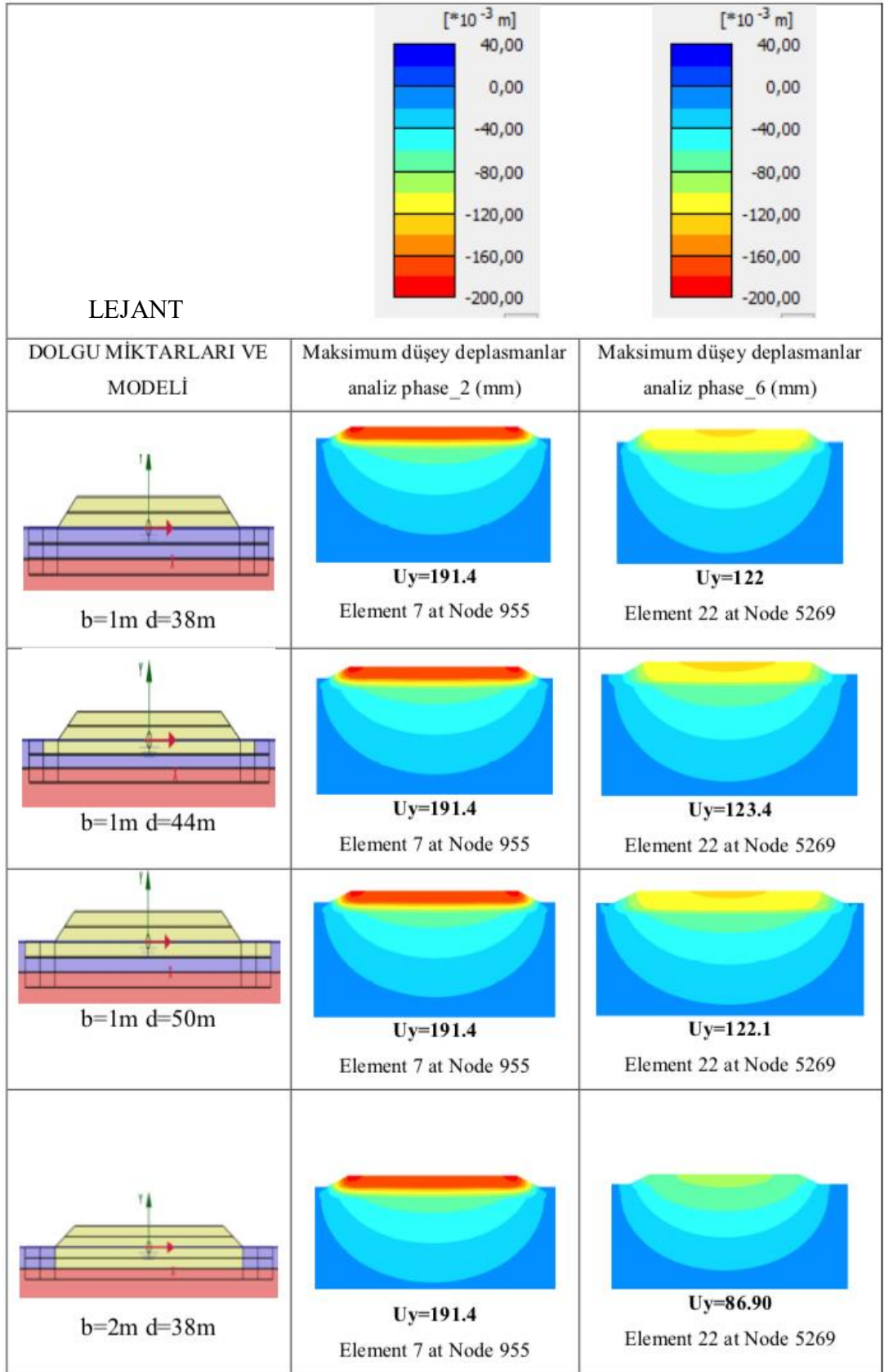
Model no	Genişlik (m)	Kalınlık (m)	Maksimum deplasman (mm)	Eleman no	Düğüm no	Max. boşluk suyu basıncı (kPa)	Zaman (gün)
1	-	-	154,8	41	11805	17,23	1
2	-	-	154,8	41	11805	17,23	1
3	-	-	154,8	41	11805	17,23	1
4	-	-	154,8	41	11805	17,23	1
5	-	-	154,8	41	11805	17,23	1
6	-	-	154,8	41	11805	17,23	1
7	-	-	154,8	41	11805	17,23	1
8	-	-	154,8	41	11805	17,23	1
9	-	-	154,8	41	11805	17,23	1

Tablo 5.6.'da Phase 5'e ait oturma ve ek boşluk suyu basıncı değerleri gösterilmektedir. Buradan kazı - dolgu miktarının 1 m olmasıyla oturma miktarı 154,8 mm'den 97,97 mm civarına düşerken, kazı - dolgunun 2 m'ye yükseltilmesi durumunda oturmanın 62 mm'ye kadar düşmüş olduğu gözlenmektedir. Ancak kazı - dolgunun 3 m'ye yükseltilmesi iyi yönde bir sonuç getirmemiştir. Ayrıca dolgu kalınlığındaki değişimin yanında genişlikte de değişimler yapılarak incelemeler yapılmış ve genişlik arttıkça oturmada bir azalma olmadığı görülmüştür. Aynı zamanda boşluk suyu basınçları incelendiğinde 1 m kazı - dolgu sonunda oluşan ek boşluk suyu basıncı 17,56 kPa iken; 2 m kazı - dolgu sonunda 17,15 kPa'a kadar düştüğü görülmektedir. Kazı - dolgu kalınlığı 3 m olduğunda bu değer 17,15 kPa olarak karşımıza çıkmaktadır.

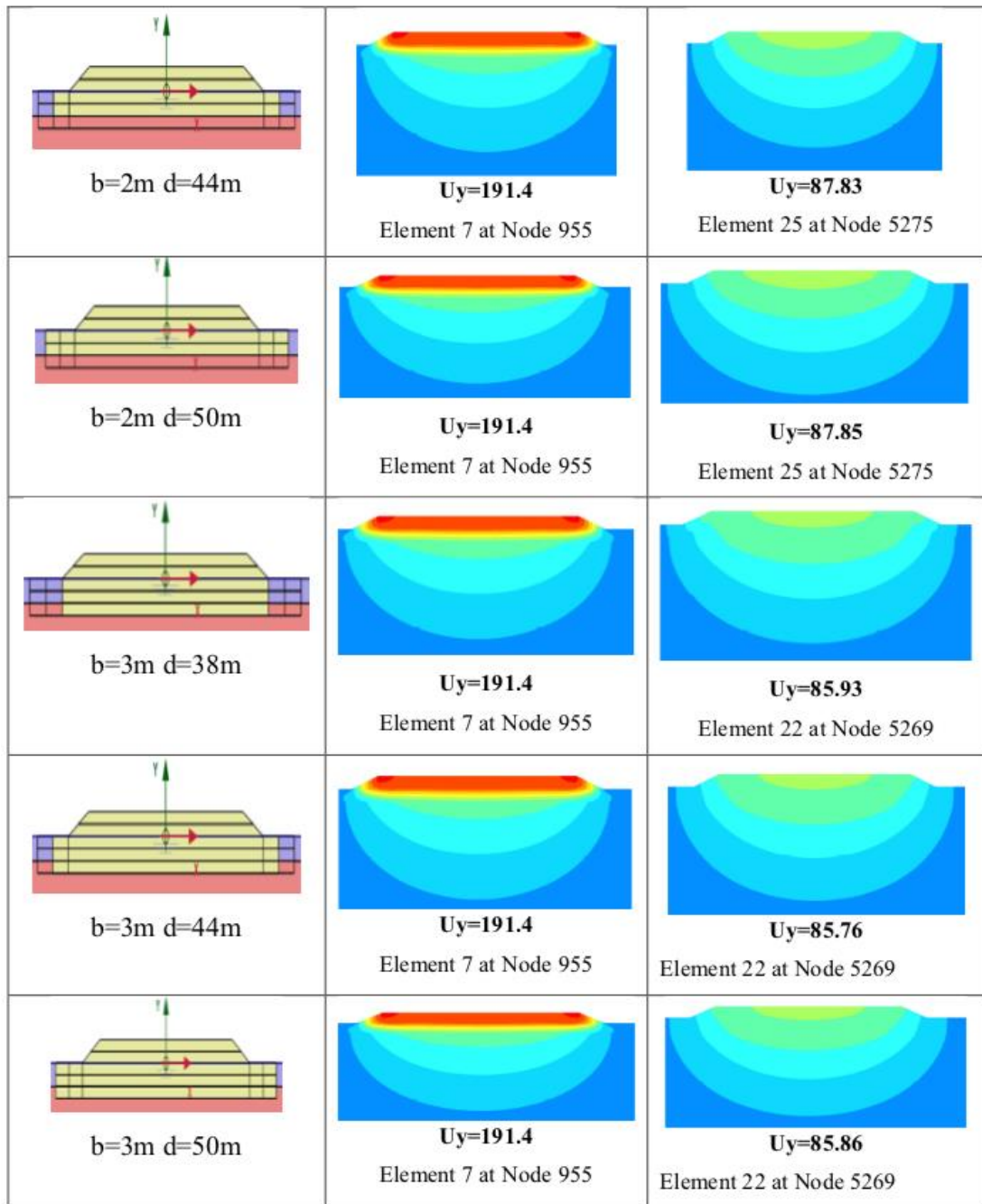
Tablo 5.6. Konsolidasyon analizinde iyileştirmeden sonra meydana gelen oturma ve boşluk suyu basınçları

Model no	Genişlik (m)	Kalınlık (m)	Maksimum deplasman (mm)	Eleman no	Düğüm no	Max. boşluk suyu basıncı (kPa)	Zaman (gün)
1	38	1	97,97	25	5275	17,56	1
2	44	1	97,62	25	5275	17,52	1
3	50	1	97,54	25	5275	17,55	1
4	38	2	62,03	25	5275	17,15	1
5	44	2	62,10	25	5275	17,09	1
6	50	2	62,14	25	5275	17,05	1
7	38	3	63,81	25	5275	17,15	1
8	44	3	63,41	25	5275	16,51	1
9	50	3	63,49	25	5275	16,53	1

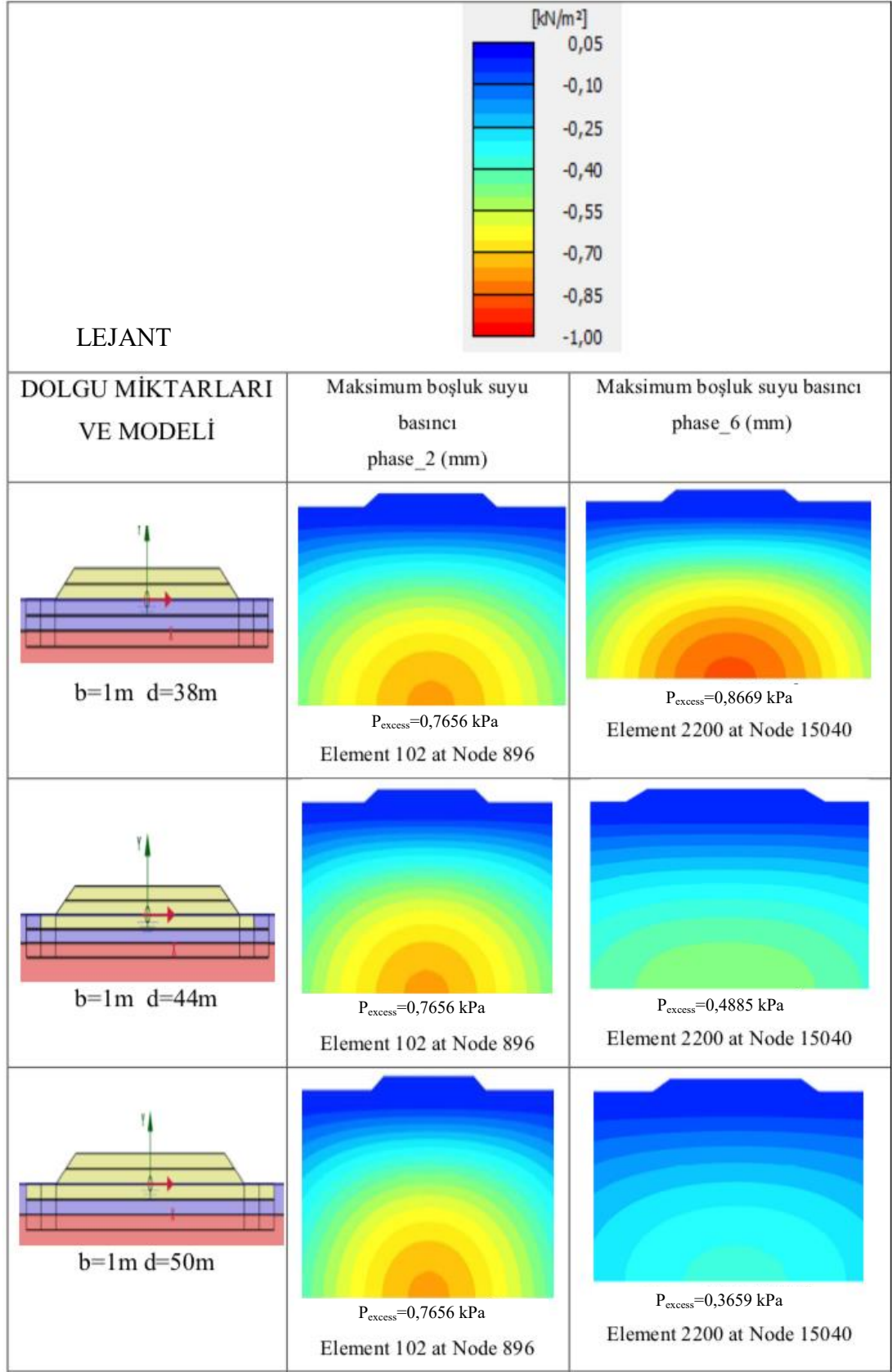
Şekil 5.35.'da Phase 2 ve Phase 6 durumlarında oluşan oturmalar gösterilmiştir. Phase 2'de 2 metrelik dolgu tabakasının iyileştirme olmadan yüklenmesi sonrasında oluşan ek boşluk suyu basınçlarının 1 kPa'a kadar sönümlenmesi beklenmiştir. Burada meydana gelen oturma miktarı 191,4 mm ölçülmüştür. Phase 6'da ise kazı - dolgu ile iyileştirme yapıldıktan sonra 2 metrelik dolgu tabakasının yüklenmesi sonrasında oluşan ek boşluk suyu basınçlarının 1 kPa'a kadar sönümlenmesi beklenmiştir. İyileştirilen zemin kalınlığı 1 metre olduğunda 122 mm oturma oluşurken dolgu miktarı 2 metreye çıktığında oturma miktarı 86,90 mm'ye düşmüş, oturmaların 3 m dolgu tabakası altında ise 85,93 mm civarında olduğu hesaplanmıştır. Buna göre yumuşak tabaka kalınlığından fazla zemin değişimi yapmanın bir getirisinin olmadığı anlaşılmaktadır. Bunun yanında kazı - dolgu genişliğinde yapılan artışların da oturmaları azaltmada hiçbir etkisinin olmadığı görülmektedir.



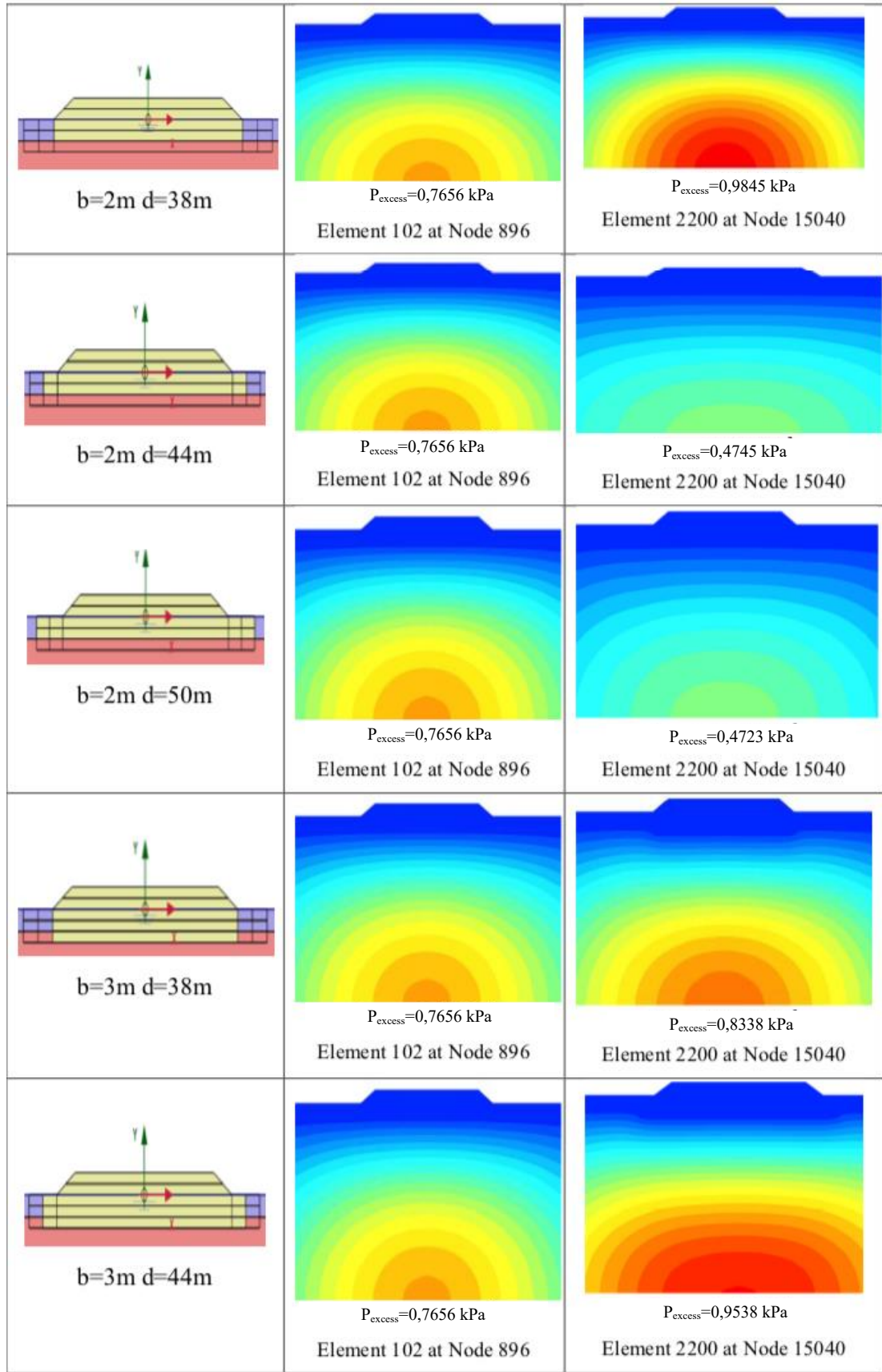
Şekil 5.35. Dolguyla iyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş durumda konsolidasyon analizinde bekleme sonunda meydana gelen oturma miktarları (boşluk suyu basıncının 1 kPa'a kadar sönümlenmesi bekleniyor)



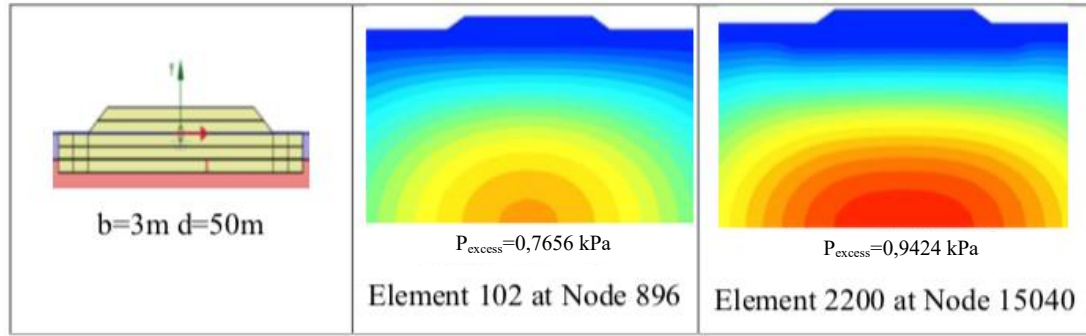
Şekil 5.35. (Devamı)



Şekil 5.36. Dolguyla iyileştirilmemiş ve iyileştirilmiş durumda konsolidasyon analizinde bekleme sonunda meydana gelen boşluk suyu basınçları



Şekil 5.36. (Devamı)



Şekil 5.36. (Devamı)

Şekil 5.36.'da Phase 2 ve Phase 6 durumlarında oluşan boşluk suyu basınçları gösterilmiştir. Phase 2'de 2 metrelik dolgu tabakasının iyileştirme olmadan yüklenmesi sonrasında oluşan ek boşluk suyu basınçlarının 1 kPa'a kadar sönümlenmesi beklenmiştir. Bu durumda ek boşluk suyu basınçları ölçüm noktasında 0,7656 kPa değerine kadar düşmüştür. Phase 6'da ise kazı - dolgu ile iyileştirme yapıldıktan sonra 2 metrelik dolgu tabakasının yüklenmesi sonrasında oluşan ek boşluk suyu basınçlarının 1 kPa'a kadar sönümlenmesi beklenmiştir. Ek boşluk suyu basınçları iyileştirilen zemin kalınlığı 1 metre olduğunda 0,8669 kPa değerine sönümlenmiştir. Bu değer, dolgu miktarı 2 metreye çıktığında 0,9845 kPa, 3 m dolgu altında ise 0,8338 kPa olarak hesaplanmıştır. Tüm analizler sonrasında boşluk suyu basınçlarının sönümlenmesi için gereken süre 9 ile 14 gün arasında değişmiştir.

Tablo 5.7.'de Phase 2'ye ait, Tablo 5.8 de ise Phase 6'ya ait sonuçlar özet halinde verilmiştir.

Tablo 5.7. Konsolidasyon analizinde iyileştirme olmadan meydana gelen oturma ve boşluk suyu basınçları (phase_2)

Model no	Genişlik (m)	Kalınlık (m)	Maksimum deplasman (mm)	Eleman no	Düğüm no	Max. boşluk suyu basıncı (kPa)	Zaman (gün)
1	-	-	191,4	7	955	0,7656	9,25
2	-	-	191,4	7	955	0,7656	9,25
3	-	-	191,4	7	955	0,7656	9,25
4	-	-	191,4	7	955	0,7656	9,25
5	-	-	191,4	7	955	0,7656	9,25
6	-	-	191,4	7	955	0,7656	9,25
7	-	-	191,4	7	955	0,7656	9,25
8	-	-	191,4	7	955	0,7656	9,25
9	-	-	191,4	7	955	0,7656	9,25

Tablo 5.8. Konsolidasyon analizinde iyileştirmeden sonra meydana gelen oturma ve boşluk suyu basınçları (phase_6)

Model no	Genişlik (m)	Kalınlık (m)	Maksimum deplasman (mm)	Eleman no	Düğüm no	Max. boşluk suyu basıncı (kPa)	Zaman (gün)
1	38	1	122	22	5269	0,8669	9,31
2	44	1	123,4	22	5269	0,4885	12,95
3	50	1	122,1	22	5269	0,3659	12,95
4	38	2	86,90	22	5269	0,9845	9,77
5	44	2	87,83	25	5275	0,4745	13,64
6	50	2	87,85	25	5275	0,4723	13,87
7	38	3	85,93	22	5269	0,8338	10,68
8	44	3	85,76	22	5269	0,9538	11,14
9	50	3	85,86	22	5269	0,9424	11,14

BÖLÜM 6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında üst katmanlarında sırasıyla 2 m, 5 m ve 10 m kalınlığında yumuşak kil bulunan ve altta görece sert kilden oluşan ve toplam kalınlığı 30 m olan farklı kesitlerde öncelikle 2 m'lik dolgu nedeniyle oluşacak ek boşluk suyu basınçları, sönümlenme süresi ve oturma değerleri Plaxis 2D 2019 yazılımıyla analiz edilmiştir. Daha sonra 2 m'lik yumuşak tabakanın bulunduğu kesitte kazı - dolgu, 5 m ve 10 m yumuşak tabakanın bulunduğu kesitlerde ise farklı uzunluk ve aralıkta drenler kullanılarak yeni durumda oluşacak ek boşluk suyu basınçları, sönümlenme süresi ve oturma değerleri irdelenmiştir. Çalışma sonunda şu sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Kısıtlı yükseklikte bir dolgu olmasına rağmen ani (drenajsız) yükleme yumuşak zeminin kalınlığı farketmeksizin göçmelere yol açmaktadır.
2. Konsolidasyona izin verilen durumlarda dolgunun drenler olmadan tek seferde yapılmasının ardından da yükleme hızına bağlı olarak zeminde göçmelerin meydana geldiği gözlemlenmektedir.
3. Drensiz yapılan analizlerde yükleme ile drenli çözümlere göre daha fazla ilave boşluk suyu basınçları oluşmakta ve sönümlenme için çok daha fazla zamana ihtiyaç duyulmaktadır.
4. Dren kullanımı konsolidasyon süresini onda bire kadar düşürmektedir.
5. Dren aralığının 2 m olması sönümlenme için yeterli olmaktadır. Dren aralığının 1 m olması sonuçlarda kayda değer bir gelişme sağlamamaktadır.
6. Drenler konsolidasyonun tamamlanma sürecini hızlandırma yanında göçmenin engellenmesi için de çok büyük işlev görmektedir. Drenli çözümlerde göçme olmamaktadır.
7. Yumuşak tabaka kalınlığının 2 m olması durumunda kazı - dolgu işleminin tabaka kalınlığı kadar ve dolgu taban genişliği kadar yapılması göçmenin önlenmesi ve oturmaların azaltılması için yeterli olmaktadır. Yumuşak tabaka kalınlığından fazla ve dolgu taban genişliğinden fazla kazı - dolgu yapılması iyi yönde neredeyse hiçbir katkı yapmamaktadır.

KAYNAKÇA

- Akan, R., Sert, S., Bol, E. Killi zeminler üzerindeki yol dolgularında konsolidasyonun hızlandırılması, 6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, sf: 782 - 787, 2018.
- Alkaya, D. Geoteknik mühendisliğinde bilişim teknolojileri, yazılımların kullanımı ve sonuçların karşılaştırılması, 3. Geoteknik Sempozyumu, 2009.
- Bergado, D. T., Anderson, L.R., Miura, N., Balasubramaniam, A. S. Soft ground improvement, in Lowland and other Environments. ASCE Press, 1996; 427.
- Borges, J. L. Three-dimensional analysis of embankments on soft soils incorporating vertical drains by finite element method. Computers and Geotechnics 2004; 31:665 - 676.
- Chai, J. C., Miura, N., Zhu, H. H., Yudhbir, S. Compression and consolidation characteristics of structured natural clay. Canadian Geotechnical Journal 2004; 41:12:1250 - 1258.
- Das, B. M. Principles of foundation engineering, Third Edition, PWS Publishing Company, 1995.
- Demiröz, A., Karaduman, M. Zemin iyileştirme metotları, 2009.
- Güler, E., Edinçliler, A. Dolguların geotekstil ile takviyesinin sonlu elemanlar metodu ile incelenmesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 3. Ulusal Kongresi, İstanbul, 1990, sf: 341 - 356.
- Güler, E., Yetimoğlu, T., Çiçek, E. Geosentetik donatının kil zeminde taşıma gücüne olan etkileri, 3. Geoteknik Sempozyumu, 2009.
- Güllü, S., Gökçeoğlu, C., Ekiz, M., Nalçakan, M. S., Özçelik, H., Gündoğdu, D. Tren yolu dolgularında taban zeminlerinin geogridler ile iyileştirilmesi, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 17. Ulusal Kongresi, 2018.
- Hansbo, S. Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. Proceedings of the Tenth International Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm, 1981; 3:677-682.
- Holtz, R. D., Shang, J. Q., Bergado, D. T. Soil improvement. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Handbook. Kluwer Academic Publishing, Norwell, USA, 2001; 429-462 (Chapter 15).

- İncecik, M., Balkaya, M., Afatoğlu, H. A. Yumuşak zemin üzerine inşa edilen yol dolgularının geosentetiker ve taş kolonlar ile stabilizasyonu , Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi, 2006.
- İncecik, M., Balkaya, M., İyisan, R., Afatoğlu, H. A. Yumuşak kil zemin üzerine uygulanan dolguların stabilitesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, 2004.
- Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., Wolski, W. Pre-compression and speeding up consolidation, general report. Special Session 6, Proceedings of Eight European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Balkema, Rotterdam, 1983; 1201-1226.
- Keskin, S. N., Göksan, T. S., Uzundurukan, S., Çimen, Ö., Karpuzcu, M. Bir kilin serbest basınç mukavemetine ve konsolidasyon oturma miktarına geotekstil takviyesinin etkisi, 4. Geoteknik Sempozyumu, 2009.
- Mert, A. C. Düşey drenlerle (PVD) iyileştirilmiş kilde konsolidasyon oturmalarının analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı, 2018.
- Önalp, A., Arel, E. Geoteknik Bilgisi 1 Çözümlü Problemlerle Zeminler Mekaniği, Güncelleştirilmiş baskı, İstanbul, Birsan Yayınevi, 2007.
- Önalp, A., Sert, S. Geoteknik Bilgisi 3 Bina Temelleri, Genişletilmiş baskı, İstanbul, Birsan Yayınevi, 2016.
- Öser, C., Çinicioğlu, S. F. Dolgu inşaatı altındaki yumuşak temel zemininin gerilme deformasyon davranışı ve göçme güvenliği ilişkisi, 4. Geoteknik Sempozyumu, 2011.
- Özaydın, K. Zemin Mekaniği, İstanbul, Birsan Yayınevi, 1989.
- Özaydın, K. Zemin Mekaniği, İstanbul, Birsan Yayınevi, 1997.
- Plaxis, Plaxis 2D – Reference Manual 2019. Plaxis B.V, Delft, Netherlands, 2019.
- Rixner, J. J., Kraemer, S. R., Smith, A. D. Prefabricated vertical drains. Engineering Guidelines, FWHA/RD-86/168, Federal Highway Administration. Washington DC, 1986, vol. 1.
- Shen, S.-L., Chai, J.-C., Hong, Z.-S., Cai, F.-X. Analysis of field performance of embankments on soft clay deposit with and without PVD-improvement. Geotextiles and Geomembranes 2005; 23:463 - 485.
- Şenbahar, Ö. Yumuşak kil zemin üzerine oturan dolguların sayısal analizi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı, 2013.
- Şengül, T., Edil, T., Özaydın, K. Prefabrik düşey drenlerin (PDD) boşaltma kapasitesini etkileyen faktörlerin belirlenmesi. Teknik Dergi, 2013, 24(119).
- Terzaghi, K.V., Evaluation of coefficient of subgrade reaction, Geotechnique 1955; 5:4:297 - 326.

- Tülümen Arda, H. Yüzeysel temellerde taşıma gücünün iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı, 2011.
- Vesic, A. B., Beams on elastic subgrade and Winkler's hypothesis, Proc. 5 th. Int. Conf. on Soil Mech. Found. Engrg., Paris, 1961, pp: 845 - 850.
- Wheeler S.J., Näätänen A., Karstunen M., Lojander M., An anisotropic elasto-plastic model for soft clays." Can. Geotechnical Journal, 2003; 40: 403-418.
- Yıldız, A. Düşey drenlerin sayısal analizi, 2. Geoteknik Sempozyumu, Adana, sf: 373 - 386.

ÖZGEÇMİŞ

Özge Öncü Bali, 1992 yılında Sakarya'da doğdu. İlkokul eğitimini Sakarya Büyükşehir İ.Ö.O.'da tamamladı. Lise öğrenimini Tes-İş Adapazarı Anadolu Lisesi'nde bitirdikten sonra 2010 yılında Anadolu Üniversitesi'nde eğitime başlayıp oradan 2013 yılında Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümüne geçip bu bölümden 2016 yılında mezun oldu. Öğrenciyken kendini geliştirmek adına çalışmaya başlamış olduğu özel sektörde halen daha inşaat mühendisi olarak çalışmaktadır. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi'nde Geoteknik programında yüksek lisans eğitimine başlamıştır.