



**KUZEY MARMARA OTOYOLU PROJESİ KAPSAMINDA KM:241+200
YOL DOLGUSU OTURMA DAVRANIŞININ ARAZİ ÖLÇÜMLERİ VE
SAYISAL MODELLEME İLE KARŞILAŞTIRMALI İNCELENMESİ**

Buse KILIÇOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2019

Buse KILIÇOĞLU tarafından hazırlanan “KUZEY MARMARA OTOYOLU PROJESİ KAPSAMINDA KM:241+200 YOL DOLGUSU OTURMA DAVRANIŞININ ARAZİ ÖLÇÜMLERİ VE SAYISAL MODELLEME İLE KARŞILAŞTIRMALI İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Doç. Dr. Nejan HUVAJ SARIHAN

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Nihat Sinan IŞIK

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 24/10/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Buse KILIÇOĞLU
24/10/2019

KUZEY MARMARA OTOYOLU PROJESİ KAPSAMINDA KM:241+200 YOL
DOLGUSU OTURMA DAVRANIŞININ ARAZİ ÖLÇÜMLERİ VE SAYISAL
MODELLEME İLE KARŞILAŞTIRMALI İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Buse KILIÇOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2019

ÖZET

Bu çalışmada Kuzey Marmara Otoyolu Projesi'nde, Kayalarkoyu Mevkii Kesim-6'da bulunan yol dolgularının zamana bağlı oturma davranışları incelenmiştir. Proje güzergahında taban zeminini geoteknik özelliklerini tespit etmek adına arazi deneyleri (standart penetrasyon (SPT), konik penetrasyon (CPT), pressiyometre (PMT)) ve açılan sondajlardan alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Tüm bu veriler incelendiğinde güzergahın büyük kısmında dolgunun alüvyon niteliğinde killi, kumlu, siltli birim üzerine teşkil edileceği ve ciddi mertebelere ulaşan konsolidasyon oturmaları oluşabileceği tespit edilmiştir. Yol dolgusunun oturma davranışını incelemek amacıyla Km:241+200-243+300 aralığında yüksekliği 3,5-5,5m arasında değişen bir test dolgusu imal edilmiştir. Öncelikle arazi ve laboratuvar verileri yardımıyla literatürde yer alan korelasyonlar kullanılarak alüvyon birim için kısa ve uzun dönem mukavemet parametreleri belirlenip dolgu için stabilite analizi yapılmış ve dolgunun stabilite açısından güvenli tarafta kaldığı görülmüştür. Ardından, test dolgusu imal edildikten sonra belirli zaman aralıklarıyla dolgu tabanında meydana gelen oturmalar arazide ölçülmüştür. İlgili aralıkta ölçüm için test dolgusunda yüz metrede bir on bir farklı kilometrede ve her kilometrede eksende, sol şevde ve sağ şevde olmak üzere toplamda otuz üç adet farklı referans noktası seçilmiştir. Bir yıl süreyle referans noktalarında koordinat ölçümü yapılmıştır. Alınan ölçümlerle dolgunun tabanında bir yıl sonunda her nokta için oturma-zaman ilişkisi elde edilmiştir. Arazi verileri yardımıyla dolgu tabanında beklenen konsolidasyon oturması geleneksel analitik yöntemlerle ve sonlu elemanlar programı kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar arazi ölçümleri ile parametre seçimi değerlendirilerek karşılaştırılmış. Karşılaştırmalar sonucunda birden fazla arazi ve laboratuvar deneyleri yapılmış olmasına, bu deneyleri kullanan ve literatürde birden fazla ilişki bulunmasına rağmen birçoğunun arazi davranışını tam anlamıyla yansıtamadığı tespit edilmiştir. Arazi ölçümlerine en yakın sonuçlar veren yöntemlerin PMT deney verilerini kullanan Amar (1991) ilişkisinin ve CPT deney verilerini kullanan Kulhawy & Mayne (1990) ilişkisinin olduğu belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 91105
Anahtar Kelimeler : Konsolidasyon, stabilite, oturma zamanı, kum bandı
Sayfa Adedi : 236
Danışman : Prof. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

COMPARATIVE INVESTIGATION OF TIME DEPENDENT CONSOLIDATION
BEHAVIOR OF THE EMBANKMENT ST:241+200 OF NORTHERN MARMARA
HIGHWAY PROJECT WITH LAND MEASUREMENTS AND NUMERICAL

MODELING

(M. Sc. Thesis)

Buse KILIÇOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2019

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the time dependent settlement behavior of the embankment in Kayalarkoyu Mevkii Part-6 which is under construction in the Northern Marmara Highway Project. In the scope of this project in order to determine the soil under the embankment several site investigations that include standard penetration (SPT), conic penetration (CPT), pressuremeter tests (PMT) and laboratory tests were carried out on disturbed and undisturbed samples. According to results of these tests, it is determined that the embankment will be built on alluvial clayey, sandy, silty unit in the majority of the route and for this reason, the significant consolidation settlement is expected in this unit. In order to examine the settlement behavior of the embankment, a test embankment was built between Km: 241+200-243+300 and with a height of changes between 3,5-5,5m. Firstly, strength parameters were determined for alluvium using correlations in the literature with the help of field and laboratory data and stability analysis was performed. According to this analysis, it was seen that the embankment was on the safe side for stability. Then, after the test embankment was produced, the consolidation settlements were measured in the soil with certain time intervals. In this kilometer range, thirty three different reference points were selected in eleven different kilometers in every one hundred meters and at the axis, at the left slope and at the right slope. The coordinates had been measured at these reference points for a year. As a result of these measurements, relation between consolidation and time is determined for every reference point. Then, with the help of the field data, the consolidation settlement was calculated by using the analytical and the finite element method. The results were compared with the field measurements and chosen parameters. As a result of the comparisons, it was found that although more than one field and laboratory experiments were conducted and also more than one relationship in the literature by using these experiments, many of them did not fully reflect the field behavior. It has been determined that the closest results to the field measurements are Amar (1991) using PMT test data and Kulhawy & Mayne (1990) using CPT test data.

Science Code : 91105

Key Words : Consolidation, stability, consolidation time, drainage band

Page Number : 236

Supervisor : Prof. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamda akademik bilgi birikimi yönünden bana destek olan ve beni yönlendiren saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Sami Oğuzhan AKBAŞ başta olmak üzere, sorularımı cevapsız bırakmayan Arş. Gör. Kaan YÜNKÜL'e, tez konumda yararlandığım projeye beni dahil eden Mega Mühendislik Müşavirlik A.Ş.'ye ve teknik anlamdaki tecrübeleriyle beni yönlendiren Kübra BEZGİN NAZLI'ya teşekkürü bir borç bilirim. Yaptığım çalışma sırasında her türlü desteğini benden esirgemeyen sevgili aileme, arkadaşlarım Selin GÖKCE ve Seda YENİGÜN'e ve son olarak da bugün sahip olduğum eğitim ve çalışma imkanını bana sağlayan Cumhuriyetimizin kurucusu Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK'e teşekkürlerimi ve minnetimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. PROJENİN TANITIMI.....	3
2.1. Test Dolgusu Özellikleri.....	6
3. STABİLİTE DEĞERLENDİRMELERİ.....	27
3.1. Stabilite Analizlerinde Kullanılan Mukavemet Parametrelerinin Belirlenmesi...	28
3.1.1. Laboratuvar deneyleri kullanılarak drenajsız kayma dayanımı belirlenmesi.....	30
3.1.2. SPT deneyleri kullanılarak drenajsız kayma dayanımı belirlenmesi.....	31
3.1.3. PMT deneyleri kullanılarak drenajsız kayma dayanımı belirlenmesi.....	34
3.1.4. CPT deneyleri kullanılarak drenajsız kayma dayanımı belirlenmesi.....	36
3.2. Stabilite Analizi.....	40
4. OTURMA DEĞERLENDİRMELERİ.....	45
4.1. Analitik Yöntemle Oturma Değerlendirmeleri.....	45
4.1.1. Sıkışma indisleri ile (c_c , c_r) konsolidasyon oturması değerlendirilmeleri...	48
4.1.2. Hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) ile konsolidasyon oturması değerlendirilmeleri.....	55

4.1.3. Menard ve Rousseau (1962) yarı ampirik yöntemi ile konsolidasyon oturması değerlendirmeleri.....	73
4.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Oturma Değerlendirmeleri.....	75
4.2.1. Analiz modeli oluşturulması.....	75
4.2.2. Analizde kullanılacak parametrelerin belirlenmesi.....	82
4.3. Oturma-Zaman İlişkisine Ait Değerlendirmeleri.....	97
4.3.1. Analitik yöntemle oturma-zamanı değerlendirmeleri.....	98
4.3.2. Sonlu elemanlar yöntemi ile oturma zamanı değerlendirmeleri.....	105
5.SONUÇ VE ÖNERİLER.....	113
KAYNAKLAR.....	117
EKLER.....	121
EK-1. İlgili kilometre aralığının ve çalışmada yararlanılan arazi deneyi lokasyonlarının planda gösterimi.....	122
EK-2. SPT deney logları	123
EK-3. PMT deney logları	157
EK-4. CPT deney logları	161
EK-5. Laboratuvar deney sonuçları.....	173
EK-6. Test dolgusu üzerindeki 33 farklı noktaya ait arazi ölçümleri	223
EK-7. d22 noktası için toplam konsolidasyon oturması hesabı.....	226
EK-8. CPT deney verilerini kullanan ve farklı ilişkilerle elde edilen ortalama m_v değerleri kullanılarak 5,5m yüksekliğindeki dolgu için analitik yöntemle oturma hesabı	228
EK-9. CPT deney verilerini kullanan ve farklı ilişkilerle elde edilen ortalama m_v değerleri kullanılarak 5,5m yüksekliğindeki dolgu için sonlu elemanlar yöntemiyle oturma hesabı.....	230
ÖZGEÇMİŞ.....	236

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Arazi deneyleri bilgisi.....	9
Çizelge 2.2. Ölçüm noktaları için kilometre ve dolgu yükseklikleri bilgileri.....	16
Çizelge 2.3. d23 noktasından alınan arazi ölçümleri.....	22
Çizelge 2.4. Toplam oturma hesabı.....	23
Çizelge 2.5. d23 noktası için toplamda S+17,27 oturma miktarının gerçekleştiği 212,5 gün ile diğer noktalar için yapılan işlemlere ait hesap detayları.....	24
Çizelge 3.1. Stabilite analizlerinde kullanılan analiz yöntemleri.....	27
Çizelge 3.2. İlgili kilometre aralığında açılan sondajlarda farklı derinliklerden alınan örselenmemiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli ve üç eksenli deneyler.....	30
Çizelge 3.3. Çalışma kapsamında kullanılan SPT düzeltmeleri.....	31
Çizelge 3.4. SPT-N ₆₀ – drenajsız kayma dayanımı (c _u) ilişkileri.....	32
Çizelge 3.5. PMT – drenajsız kayma dayanımı (c _u) ilişkileri.....	34
Çizelge 3.6. Derinliklerine göre ortalama parametreler.....	40
Çizelge 3.7. Hd=5,5m olan dolgu için stabilite analiz sonuçları.....	43
Çizelge 4.1. Derinlikle azalan düşey gerilme artışı hesabı.....	47
Çizelge 4.2. Hd=5,5m yüksekliğindeki dolgu taban zemininde sıkışma indisleri ile konsolidasyon oturması hesabı.....	51
Çizelge 4.5. Düzeltilmiş sıkışma indisleri ile konsolidasyon oturması hesabı.....	55
Çizelge 4.6. SK-159 sondajında UD-1 numunesinde m _v değerinin belirlenmesi.....	56
Çizelge 4.7. Laboratuvar verileriyle elde edilen ortalama hacimsel sıkışma katsayıları ile konsolidasyon oturması hesabı.....	58
Çizelge 4.8. Stroud (1974) ilişkisini kullanılarak tabakalar için ortalama m _v değerleri ve bu değerler kullanılarak her tabaka için konsolidasyon oturması hesabı.....	61

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.9. PMT deney verileri ile elde edilen hacimsel sıkışma katsayıları ve bu değerlerle yapılan oturma hesabı.....	65
Çizelge 4.10. q_c değerini kullanan ilişkiler için α_m katsayıları.....	67
Çizelge 4.11. q_t değerini kullanan ilişkiler için α_m katsayıları.....	68
Çizelge 4.12. CPT verilerini kullanan yöntemlerle her tabaka için belirlenen ortalama m_v değerleri.....	68
Çizelge 4.13. CPT verilerinden yararlanan Sanglerat (1972) yöntemi kullanılarak konsolidasyon oturması hesabı.....	70
Çizelge 4.14. Farklı yöntemlerle elde edilen konsolidasyon oturması miktarları.....	70
Çizelge 4.15. Sıkışma indileri kullanılarak yapılan konsolidasyon oturması hesabında Skempton-Bjerrum (1957) düzeltmesi.....	72
Çizelge 4.16. Farklı yöntemlerle elde edilen Skempton-Bjerrum (1957) düzeltmesi yapılmış konsolidasyon oturması miktarları.....	73
Çizelge 4.17. Sonlu elemanlar analizinde Mohr-Coulomb malzeme modelinde kullanılan geoteknik parametreler.....	83
Çizelge 4.18. Konsolidasyon deney verileri ile elde edilen hacimsel sıkışma katsayılarından yararlanılarak belirlenen deformasyon modülleri ve permeabiliteler.....	86
Çizelge 4.19. Analizde kullanılmak üzere SPT verileri ile elde edilen hacimsel sıkışma katsayılarından yararlanılarak belirlenen deformasyon modülleri ve permeabiliteler.....	88
Çizelge 4.20. Analizde kullanılmak üzere PMT verileri ile elde edilen hacimsel sıkışma katsayılarından yararlanılarak belirlenen deformasyon modülleri ve permeabiliteler.....	91
Çizelge 4.21. Analizde kullanılmak üzere CPT verilerini kullanan Sanglerat (1972) ilişkisi ile elde edilen hacimsel sıkışma katsayılarından yararlanılarak belirlenen deformasyon modülleri ve permeabiliteler.....	94
Çizelge 4.22. Farklı ilişkilerle elde edilen parametrelerle gerçekleştirilen 2 boyutlu sonlu elemanlar analizler sonucunda belirlenen konsolidasyon oturması miktarları.....	96
Çizelge 4.23. SK-238+066 sondajında UD-1 numunesinde c_v belirlenmesi.....	99

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.24. Analitik yöntem kullanılarak farklı ilişkiler için hesaplanan oturma miktarları.....	101
Çizelge 4.25. Analitik yöntem kullanılarak farklı ilişkiler için hesaplanan imalat süresinde meydana gelen oturma miktarları.....	102
Çizelge 4.26. Analitik yöntem kullanılarak farklı ilişkiler için hesaplanan oturma miktarları.....	103
Çizelge 4.27. Analitik yöntem kullanılarak farklı ilişkiler için hesaplanan imalat süresinde meydana gelen oturma miktarları (Skempton-Bjerrum düzeltmesi uygulanmış).....	105
Çizelge 4.28. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak farklı ilişkilerle d23 noktası için hesaplanan imalat süresinde meydana gelen oturma miktarları.....	107
Çizelge 4.29. Sonlu elemanlar yöntemi ile dolgu imalatı tamamlandıktan sonra d23 noktasında gerçekleşen konsolidasyon oturması miktarları.....	109
Çizelge 4.30. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak farklı ilişkilerle d22 noktası için hesaplanan imalat süresinde meydana gelen oturma miktarları,.....	111
Çizelge 4.31. Sonlu elemanlar yöntemi ile dolgu imalatı tamamlandıktan sonra d22 noktasında gerçekleşen konsolidasyon oturması miktarları.....	112

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kuzey Marmara Otoyolu Kesim-6 proje güzergahına ait uydu görüntüsü.....	3
Şekil 2.2. Proje güzergahı ve yakın çevresine ait genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesit [1-2].....	5
Şekil 2.3. SK238+066 sondajına ait sondaj deney logu.....	7
Şekil 2.4. SK-238+066 sondajında gerçekleştirilen PMT deney logu.....	8
Şekil 2.5. CPT-241-3 CPT deneyine ait deney logu.....	8
Şekil 2.6. SK-238+066 sondajına ait laboratuvar deney logu.....	9
Şekil 2.7. Su muhtevası değerlerinin derinlikle değişimi.....	11
Şekil 2.8. Plastik limit değerlerinin derinlikle değişimi.....	12
Şekil 2.9. Likit limit değerlerinin derinlikle değişimi.....	13
Şekil 2.10. İri tane yüzdelerinin (kum + çakıl) derinlikle değişimi.....	14
Şekil 2.11. Test dolgusu tip kesiti.....	15
Şekil 2.12. Test dolgusu kilometre aralığının ve ölçüm noktalarının planda gösterimi...	15
Şekil 2.13. Test dolgusunun ait koordinat okuma ölçümleri.....	17
Şekil 2.14. 1-12 numaralı noktaların oturma-zaman ilişkisi.....	18
Şekil 2.15. 13-21 numaralı noktaların oturma-zaman ilişkisi.....	18
Şekil 2.16. 22-33 numaralı noktaların oturma-zaman ilişkisi.....	19
Şekil 2.17. d22 noktasına ait araziden alınan ölçümlerle çizilen oturma-zaman ilişkisi...	20
Şekil 2.18. d23 noktasına ait araziden alınan ölçümlerle çizilen oturma-zaman ilişkisi..	20
Şekil 2.19. d22 noktası için dolgu imalat süresi ve imalat sırasındaki oturma ile birlikte oturma-zaman ilişkisi.....	25
Şekil 2.20. d23 noktası için dolgu imalat süresi ve imalat sırasındaki oturma ile birlikte oturma-zaman ilişkisi.....	25
Şekil 3.1. Dolguların dayanım parametreleri [3].....	29

Şekil	Sayfa
Şekil 3.2. SPT-N ₆₀ değerlerinin derinlikle değişimi.....	33
Şekil 3.3. P _{LN} değerinin derinlikle değişimi.....	35
Şekil 3.4. q _c değerlerinin derinlikle değişimi.....	37
Şekil 3.5. Drenajsız kayma dayanımı değerlerinin derinlikle değişimi.....	38
Şekil 3.6. Kilde uzun dönem parametreler [18].....	39
Şekil 3.7. Ortalama parametrelerle statik durum stabilite analizi – Kısa dönem.....	41
Şekil 3.8. Ortalama parametrelerle statik durum stabilite analizi – Uzun dönem.....	41
Şekil 3.9. Ortalama parametrelerle sismik durum stabilite analizi – Kısa dönem.....	42
Şekil 3.10. Ortalama parametrelerle sismik durum stabilite analizi – Uzun dönem.....	42
Şekil 4.1. Dolgu yüklemesinde derinlikle azalan düşey gerilme artışı ($\Delta\sigma$) hesabı [20]..	46
Şekil 4.2. Gerilme artışının derinlikle değişimi.....	47
Şekil 4.3. SK-164 sondajında UD-1 numunesine göre çizilen boşluk oranı-log basınç grafiğiyle aşırı konsolidasyon oranının belirlenmesi.....	49
Şekil 4.4. Derinlik-AKO ilişkisi.....	50
Şekil 4.5. Normal konsolide kilde arazi düzeltmesi.....	52
Şekil 4.6. Aşırı konsolide kilde arazi düzeltmesi.....	53
Şekil 4.8. Konsolidasyon deney verileri ile elde edilen m _v değerlerinin derinlikle değişimi.....	57
Şekil 4.9. PI ve SPT-N değerleri ile m _v arasındaki ilişki [5].....	59
Şekil 4.10. Açılan sondajlardan Stroud abağı (1974) ile belirlenen m _v değerlerinin derinlikle değişimi.....	60
Şekil 4.11. Stroud (1974) ilişkisi ve laboratuvarından elde edilen m _v değerlerinin karşılaştırması.....	61
Şekil 4.12. Menard faktörü [17].....	62
Şekil 4.13. E _M değerinin derinlikle değişimi.....	63
Şekil 4.14. PMT deney verileri ile elde edilen m _v değerlerinin derinlikle değişimi.....	64

Şekil	Sayfa
Şekil 4.15. Stroud (1974), Laboratuvar ve PMT verileri ile elde edilen m_v değerlerinin derinlikle değişimi.....	66
Şekil 4.16. Laboratuvar, SPT, CPT ve PMT verileri ile elde edilen ortalama m_v değerlerinin derinlikle değişimi.....	69
Şekil 4.17. Skempton ve Bjerrum (1957) tarafından önerilen düzeltme katsayısı, μ	71
Şekil 4.18. Kil tipine göre boşluk suyu parametresi (A).....	71
Şekil 4.19. Şekil faktörleri (Briaud, 1992).....	74
Şekil 4.20. Sonlu elemanlar programında oluşturulan analiz modeli.....	76
Şekil 4.21. SPT deney logunda rastlanan kum ve silt bantları.....	77
Şekil 4.22. İlgili kilometre aralığında yapılan SPT deney verileri ile belirlenen silt-kum geçişleri ve belirlenen ortalama drenaj mesafeleri.....	78
Şekil 4.23. Zemin sınıfı belirlemede kullanılan zemin sınıf tayini (SBT) abakları [29].....	79
Şekil 4.24. CPT-E4A deney logunda Robertson (1983) ilişkisini kullanan yer alan zemin sınıf tayini (SBT).....	80
Şekil 4.25. CPT-241-3 deney logunda Robertson (2010) ilişkisini kullanan yer alan zemin sınıf tayini (SBT).....	81
Şekil 4.26. İlgili kilometre aralığında yapılan CPT deneylerinde SBT değerlerine göre silt-kum geçişleri ve belirlenen ortalama drenaj mesafeleri.....	82
Şekil 4.27. $H_d=5,5m$ yüksekliğinde dolgu için konsolidasyon deney verilerinden yararlanılarak gerçekleştirilen oturma analizinde kullanılan parametreler....	86
Şekil 4.28. $H_d=5,5m$ yüksekliğinde dolgu için konsolidasyon deney verilerinden yararlanılarak gerçekleştirilen oturma analizi sonucu.....	87
Şekil 4.29. $H_d=5,5m$ yüksekliğinde dolgu için konsolidasyon verileriyle elde edilen konsolidasyon tamamlandıktan sonra aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı.....	87
Şekil 4.30. $H_d=5,5m$ yüksekliğinde dolgu için SPT deney verilerinden yararlanılarak gerçekleştirilen oturma analizinde kullanılan parametreler.....	89
Şekil 4.31. $H_d=5,5m$ yüksekliğinde dolgu için SPT deney verilerinden yararlanılarak gerçekleştirilen oturma analizi sonucu.....	89

Şekil	Sayfa
Şekil 4.32. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için SPT deney verileriyle elde edilen konsolidasyon miktarı tamamlandıktan sonra aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı.....	90
Şekil 4.33. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için SPT deney verilerinden yararlanılarak gerçekleştirilen oturma analizinde kullanılan parametreler.....	92
Şekil 4.34. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için PMT deney verilerinden yararlanılarak gerçekleştirilen oturma analizi sonucu.....	92
Şekil 4.35. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için PMT deney verileriyle elde edilen konsolidasyon miktarı tamamlandıktan sonra aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı.....	93
Şekil 4.36. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için Sanglerat (1972) ilişkisinden yararlanılarak gerçekleştirilen oturma analizinde kullanılan parametreler....	94
Şekil 4.37. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için Sanglerat (1972) ilişkisinden yararlanılarak gerçekleştirilen oturma analizi sonucu.....	95
Şekil 4.38. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için Sanglerat (1972) ilişkisi verileriyle elde edilen konsolidasyon miktarı tamamlandıktan sonra aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı.....	95
Şekil 4.39. d22 ve d23 noktaları için imalat sırasındaki oturma ile birlikte oturma-zaman ilişkisi.....	97
Şekil. 4.40. İmalat süresi düzeltmesi [34].....	100
Şekil 4.41. İmalat süresi düzeltmesi yapılmış oturma-zaman eğrileri.....	101
Şekil 4.42. İmalat süresi düzeltmesi yapılmış oturma-zaman eğrilerinin 5,5 gün olan imalat süresindeki detaylı gösterimi.....	102
Şekil 4.43. İmalat süresi düzeltmesi yapılmış oturma-zaman eğrileri (Skempton-Bjerrum düzeltmesi uygulanmış).....	104
Şekil 4.44. İmalat süresi düzeltmesi yapılmış oturma-zaman eğrilerinin 5,5 gün olan imalat süresindeki detaylı gösterimi (Skempton-Bjerrum düzeltmesi uygulanmış).....	104
Şekil 4.45. 5,5m yüksekliğinde dolguda d23 noktası için oturma-zaman eğrisi (Plaxis 2D).....	106
Şekil 4.46. Sonlu elemanlar programı kullanılarak d23 noktası için elde edilen oturma-zaman eğrilerinde dolgu imalat süresi detayı.....	107

Şekil	Sayfa
Şekil 4.47. Sonlu elemanlar yöntemi ile d23 noktasında dolgu imalatı tamamlandıktan sonra gerçekleşen oturmalara ait oturma-zaman ilişkisi.....	108
Şekil 4.48. 5,5m yüksekliğinde dolguda d22 noktası için oturma-zaman eğrisi (Plaxis 2D).....	110
Şekil 4.49. Sonlu elemanlar programı kullanılarak d22 noktası için elde edilen oturma-zaman eğrilerinde dolgu imalat süresi detayı.....	110
Şekil 4.50. Sonlu elemanlar yöntemi ile d22 noktasında dolgu imalatı tamamlandıktan sonra gerçekleşen oturmalara ait oturma-zaman ilişkisi.....	111
Şekil 5.1. SPT deney verileri ile elde edilen 8m aralıklarla geçen kum bantları için oturma-zaman ilişkisi.....	115

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Boşluk suyu basıncı parametresi
a	Deprem durumunda yer ivmesi
c	Kohezyon
c'	Uzun dönemde efektif kohezyon
c_c	Bakir sıkışma indisi
c_u	Drenajsız kayma dayanımı
c_r	Yeniden sıkışma indisi
c_v	Konsolidasyon katsayısı
cm	Santimetre
cm²	Santimetrekare
e₀	Boşluk suyu basıncı
E_{ref}	Elastisite (Young's) Modülü
E_M	Menard Modülü veya Presiyometre Modülü
f_s	Koni sürtünme direnci
g	Yer çekimi ivmesi
H	Tabaka kalınlığı
H_d	Dolgu yüksekliği
H_{dr}	Drenaj mesafesi
I_m	Zemin davranış modeli indisi
k_x	Yatay yönde permeabilite
k_y	Düşey yönde permeabilite
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
LL	Likit limit
μ	Skempton-Bjerrum düzeltme katsayısı
M	Ödometrik deformasyon modülü
m	Metre

Simgeler**Açıklamalar**

m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
m_v	Hacimsel sıkışma katsayısı
N_{60}	%60 enerji oranına göre düzeltilmiş SPT değeri
N_k	Koni faktörü
P_a	Atmosferik basınç
PI	Plastisite indisi
PL	Plastik limit
P_{LN}	Net limit basınç
q_c	Koni direnci
q_{net}	Net gerilme artışı
q_t	Düzeltilmiş koni direnci
q_u	Tek eksenli basınç değeri
q_o	Sürşatj yükü
Q_t	Normalize edilmiş uç direnci
S	Toplam oturma miktarı
ΔS	Toplam oturma miktarı farkı
S_{oed}	Konsolidasyon oturması
S_c	Konsolidasyon oturması
sn	Saniye
t	Zaman
T_v	Zaman faktörü
U	Konsolidasyon yüzdesi
ΔU	Konsolidasyon yüzdesi farkı
u	Boşluk suyu basıncı
u_2	Koni gerisindeki boşluk suyu basıncı
w_n	Su muhtevası
σ	Gerilme
$\Delta\sigma$	Gerilme artışı
σ_{vo}	Düşey gerilme
σ'_{vo}	Efektif düşey gerilme
σ_p	Ön konsolidasyon basıncı

Simgeler**Açıklamalar**

σ'_1	İlk durumda düşey efektif gerilme
σ'_2	İkinci durumda düşey efektif gerilme
ϕ	İçsel sürtünme açısı
ϕ'	Efektif içsel sürtünme açısı
\circ	Derece
γ	Zemin birim hacim ağırlığı
γ_d	Kuru birim hacim ağırlığı
α_m	Korelasyon katsayısı
α_M	Menard Faktörü
β_p	PMT drenajsız kayma dayanımı – net limit basıncı korelasyon katsayısı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AKO	Aşırı konsolidasyon oranı
CPT	Konik penetrasyon deneyi
GS	Güvenlik sayısı
PI	Plastisite indisi
PMT	Presiyometre deneyi
SBT	Zemin sınıfı tayini
SK	Sondaj kuyusu
SPT	Standart penetrasyon deneyi
UD	Örselenmemiş numune
UU	Konsolidasyonsuz drenajsız üç eksenli deneyi
YASS	Yeraltı su seviyesi

1. GİRİŞ

Ulaşım yapısı inşaatlarında seyahat mesafesi minimum tutulmaya çalışılırken proje güzergahına bağlı olarak otoyolların mühendislik özellikleri uygun olmayan zeminler üzerine teşkil edilmesi gerekebilmektedir. Ancak güven ve konforu sağlayabilmek adına, imal edilen yol dolgusu tasarımında her zaman belirli stabilite ve oturma şartları sağlanmalıdır. Bunun için de dolgu imalatı esnasında ve sonrasında taban zemininin davranışını öngörebilmek ve gerekli tedbirleri almak gerekmektedir. Aksi takdirde dolguda stabilite ve oturma problemleri ile karşılaşılması muhtemeldir. Bu sebeple inşaa edilecek yol güzergahındaki zemini tanımlayabilmek amacıyla çeşitli arazi ve laboratuvar deneyleri gerçekleştirilerek zeminin tipi ve davranışı tariflenmeye çalışılır. Zemin davranışının yanlış ya da yetersiz tariflenmesi sonucunda zemin olduğundan daha sağlam olarak tanımlanıp yetersiz önlem alınabildiği gibi, olduğundan daha zayıf tanımlanarak gereksiz ve pahalı iyileştirme yöntemlerine başvurulabilir. Bu da gerekli ve yeterli mühendislik çözümünden uzaklaşmak anlamına gelmektedir.

Tezin amacı

Bu çalışmada, bir vaka analizi çerçevesinde, yol dolgusu taban zemininin dolgu imalatı sonrası deformasyon-zaman davranışının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen arazi ve laboratuvar deney verilerinin yorumlanması, ilgili zemin için literatürde yer alan ve deney verilerini kullanan farklı ilişkilerden elde edilen mühendislik parametrelerinin karşılaştırmalı incelenmesi ve bu parametreler kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen sonuçların arazideki gerçek davranışı ne kadar yansıttığının kıyaslanması amaçlanmıştır.

Tezin kapsamı

Çalışma kapsamında yapılması amaçlanan kıyaslama için Kuzey Marmara Otoyolu Projesi kapsamında Km:241+200-243+300 aralığında alüvyon birim üzerinde bir test dolgusu imal edilmiş ve test dolgusunun belirli noktalarında arazi ölçümleri alınmıştır. Çalışma kapsamında Bölüm 2’de imal edilen test dolgusuna ait özellikler ve arazi ölçümlerinin değerlendirmesi, Bölüm 3’te gerçekleştirilecek stabilite analizlerinde kullanılmak üzere arazi ve laboratuvar verilerinden yararlanılan birbirinden farklı ilişkilerle mukavemet

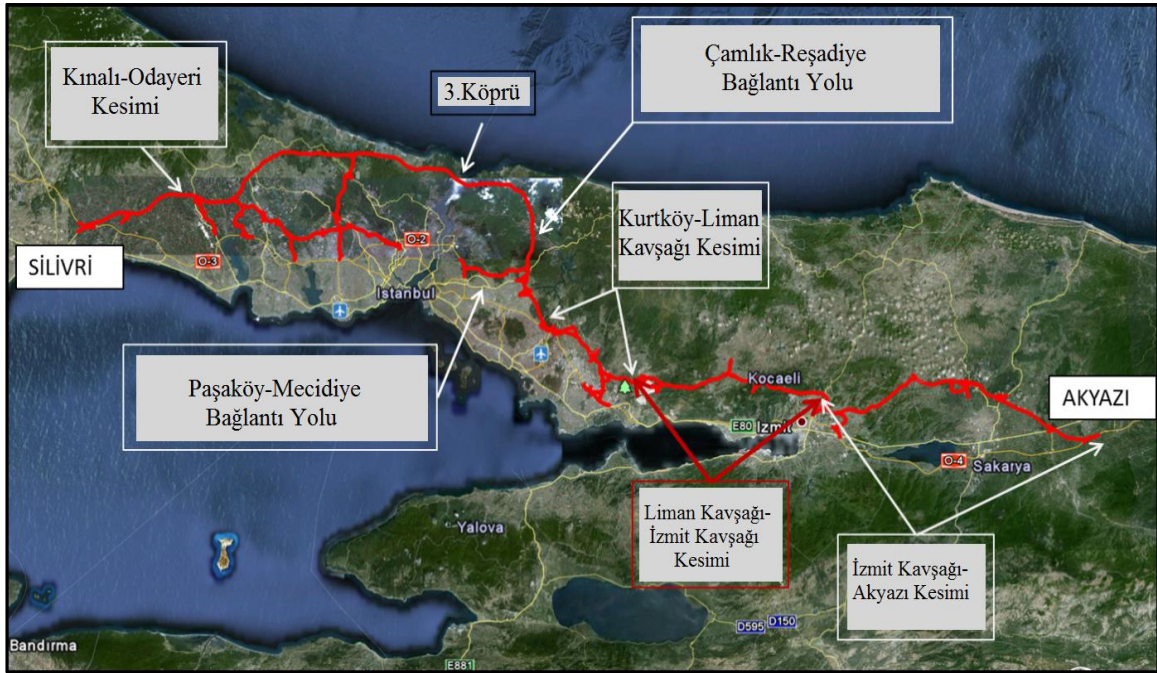
parametrelerinin belirlenmesi ve bu parametreler kullanılarak yapılan stabilite değerlendirmeleri, Bölüm 4'te gerçekleştirilecek oturma analizlerinde kullanılmak üzere arazi ve laboratuvar verilerinden yararlanılan farklı ilişkilerle konsolidasyon parametrelerinin belirlenmesi ve bu parametreler kullanılarak gerçekleştirilen analitik ve numerik yöntemlerle yapılan oturma değerlendirmeleri, Bölüm 5' te ise çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler yer almaktadır.



2. PROJENİN TANITIMI

İnceleme konusu proje, Kuzey Marmara Otoyolu Projesi kapsamında yürütülen Kurtköy-Akyazı Kesimi olarak tanımlanan, Kesim-5 Km 188+184'de Gölcük mevkiinden başlamakta olup, İzmit Kavşağı, Tem-İzmit Kavşağı, Akmeşe Kavşağı, Adapazarı Kavşağı, Akyazı Kavşağı ve TEM Akyazı direksiyonel kavşağını geçerek, Kayalarkoyu Mevkiinde Kesim-6 Km:251+111,226'da sona ermektedir. Yaklaşık olarak Km:188+000-193+500 arası Kesim-5 ve Km:193+500~251+111 arası Kesim-6 olarak isimlendirilmiş olup, proje kapsamında toplam 18,843 km uzunluğunda bağlantı yolu (İzmit Bağlantı Yolu, Tem İzmit Bağlantı Yolu, Akmeşe Bağlantı Yolu, Adapazarı Bağlantı Yolu, Karasu Bağlantı Yolu ve Akyazı Bağlantı Yolu) ve anayolda 7, bağlantı yollarında 7 olmak üzere toplam 14 adet kavşak bulunmaktadır.

Proje ile 15 Temmuz Şehitler Köprüsü ile Fatih Sultan Mehmet Köprüsü'nün aşırı derecede yüklenmiş olan trafiğini rahatlatmak, İstanbul'un ulaşım sorununu giderebilmek, taşıt işletme giderleriyle seyahat süresinden tasarruf edilmesi ve sürücülere konforlu bir seyir imkanı sağlanması amaçlanmaktadır. Söz konusu proje güzergahına ait uydu görüntüsü Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Kuzey Marmara Otoyolu Kesim-6 proje güzergahına ait uydu görüntüsü

Söz konusu proje kapsamında güzergah boyunca geçilecek olan birimlerin jeolojik-geoteknik özelliklerini belirlemek amacıyla 795 adet ve toplamda 22139,42m uzunluğunda Standart Penetrasyon deneyi (SPT) gerçekleştirilmiş, geçilen zemin formasyonlarının nitelikleri, SPT darbe adetleri, tabakalaşma ile yeraltı suyu seviyeleri belirlenmiştir. Sondajlarda örselenmiş zemin numuneleri alınarak dane boyu dağılım özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla elek analizi deneyleri yapılmış, örselenmemiş numuneler alınarak üç eksenli basınç, tek eksenli basınç ve konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca proje güzergahında yer alan köprülere ait sondajlarda Presiyometre (PMT) deneyleri ve güzergahın belirli yerlerinde toplamda 351 adet olmak üzere Konik Penetrasyon deneyleri (CPT) yapılmıştır.

Yapılan jeolojik etütler, arazi çalışmaları, yerinde deneyler ile zemin/kaya mekaniği laboratuvar deneyleri sonucunda güzergah boyunca ayırtlanan zemin birimleri, aşağıda gençten yaşlıya doğru sıralanmıştır. Proje güzergahı ve yakın çevresine ait genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesiti Şekil 2.2’de verilmiştir [1-2].

- Alüvyon (Qal)
- Örencik Formasyonu (Tplö) : Konglomera, kumtaşı, kiltası ve rezidüelleri
- Çaycuma Formasyonu (Teç): Kumtaşı, Kiltası, Siltaşı, Şeyl ve rezidüelleri
- Sarpdere Formasyonu (TRs) : Kireçtaşı-Şeyl ve rezidüelleri
- Erikli Formasyonu (Tre) : Kuvars kumtaşı, siltaşı, şeyl ve rezidüelleri

PALEZOYOYIK		MESOZOYOYIK		SENOZOYOYIK		UST SITEM	
DEVONIYEN	PERMIYEN	TRİYAS	KRETASE	PALEOJEN	NEOJEN	KUVATERNER	SITEM
Orta	Üst	Alt	Üst	PALEOSEN	PLIYOSEN		SERI
Orta	Orta	Alt	Üst	Alt	Üst		KAT
Yılanlı Formasyonu		Sarpdere Formasyonu		Akveren Formasyonu		Alüvyon - Güncel çökeller	
Çakraz Formasyonu	Erikli Formasyonu	Sarpdere Formasyonu	Akveren Formasyonu	Çaycuma Formasyonu	Örencik Formasyonu	Alüvyon - Güncel çökeller	FORMASYON
DCy	TRe	TRs	KTa	Teç	Tpö	Qal-Qg	ÜYE
PTRç	TRe	TRs	KTa	Teç	Tpö	Qal-Qg	SIMGE
							LİTOLOJİ
							AÇIKLAMA
							Alüvyon - güncel çökeller siltli kil / killi silt, çakıllı kum / kumlu çakıl ve çakıllı kumlu Moloz - Blok Uyumsuzluk
							Gevşek tutturulmuş konglomera, kumtaşı, kilitaşı Uyumsuzluk
							Kumtaşı, şeyl Uyumsuzluk
							Mikritik kireçtaşı, killi kireçtaşı, şeyl Uyumsuzluk
							Kireçtaşı, şeyl
							Kuvars kumtaşı, silttaşı, şeyl Uyumsuzluk
							Kumtaşı, çamurtaşı Uyumsuzluk
							Kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı, dolomit

*ÖLÇEKSİZ

Şekil 2.2. Proje güzergahı ve yakın çevresine ait genelleştirilmiş stratigrafik kolon kesit [1-2]

Km:188+184'te başlayıp Km:251+111' de son bulan Kuzey Marmara Otoyolunun 6. Kesiminde Km:230+000' dan sonra Akyazı Ovası başlamakta olup, bu aralıkta dolgular genel olarak alüvyon birim (Qal) üzerine inşa edilecektir. Bu bölümde yeraltı sularının yüzeye yakın ve/veya yüzeyde olması, zeminin suya doygun, genellikle yüksek plastisiteli killi-siltli seviyelerden oluşması nedeniyle oturma ve taşıma gücü ile ilgili problemler beklenebilmektedir. Bu kesimlerde yapılacak arazi çalışmalarına göre zemin profilinin net bir şekilde ortaya çıkarılması ve zemin davranışının doğru bir şekilde tariflenebilmesi gerekmektedir. Saha araştırmaları ile tariflenen zemin davranışını daha iyi etüt etmek amacıyla da Akyazı Ovası'nda Km:241+200-242+300 aralığında bir test dolgusu imal edilmiştir.

2.1. Test Dolgusu Özellikleri

Akyazı Ovası'nda alüvyon birim üzerine teşkil edilen dolgu taban zemininin stabilite ve oturma davranışını incelemek üzere Km:241+200-242+300 aralığında yol platform genişliği 45m, dolgu yüksekliği 3,5-5,5m arasında değişmekte olan bir test dolgusu imal edilmiştir. Böylelikle test dolgusunun davranışına göre ova geçişinde bulunan yol dolguları ve sanat yapıları için gerekiyorsa en ideal iyileştirme yönteminin belirlenmesi planlanmıştır.

Test dolgusu taban zemininin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 9 adet SPT deneyi, bu sondaj kuyuları arasından 4 adet sondaj kuyusunda PMT deneyi ve 12 adet CPT deneyi gerçekleştirilmiştir. Arazi deneylerinin yanı sıra, sondajlardan alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri de ilgili aralıktaki zeminin mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Yapılan arazi ve laboratuvar deneylerine ait birer adet deney logu aşağıda örnek olarak verilmiştir (Şekil 2.3, Şekil 2.4, Şekil 2.5, Şekil 2.6).

Firma Adı		MEGA MÜHENDİSLİK MÜŞAVİRLİK A.Ş.										
Proje Adı		KUZEV MARMARA OTOYOLU 6. KESİM (KM: 188+000-247+500)										
Numune Tarihi		SPT, UD										
Numune Kabul Tarihi		4.10.2016					Laboratuvar Kayıt Numarası			AKLI-10 / 10-022		
Rapor Tarihi		25.11.2016					Bakanlık Kayıt Numarası			11761019		
Sondaj No / Çukur No	Deney Standardı	SK-238-066	SK-238-066	SK-238-066	SK-238-066	SK-238-066	SK-238-066	SK-243-301	SK-243-301	SK-243-301	SK-243-301	Belirsizlik
Numune No / Adı		SPT-22	SPT-23	UD-12	SPT-24	SPT-25	SPT-26	SPT-1	UD-1	SPT-2	SPT-3	
Derinlik	m	33,00-33,45	34,50-34,95	35,50-36,00	36,00-36,45	37,50-37,95	38,55-40,00	1,50-1,95	2,50-3,00	3,00-3,45	4,50-4,95	
Özgül Ağırlık ^a	Gs	TS 1900-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Su İçeriği ^b	%	TS 1900-1	37,3	30,0	29,0	30,3	35,4	31,8	34,2	32,2	38,2	45,9
Doğal Birim Hacim Kütlesi	kN/m ³		-	-	17,41	-	-	-	-	17,80	-	-
Kuru Birim Hacim Kütlesi	kN/m ³		-	-	13,99	-	-	-	-	13,48	-	-
Hidrometre		TS 1900-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Etki Analizi ^c (% Geçen)	75 mm (3")		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	63,5 mm (2 1/2")		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	50 mm (2")		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	37,5 mm (1 1/2")		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	25 mm (1")		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	19,1 mm (3/4")		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	12,5 mm (1/2")		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	9,5 mm (3/8")		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	4,75 mm (No.4)		94,28	98,38	100,00	97,70	100,00	99,13	99,24	100,00	100,00	98,56
	2 mm (No.10)		93,83	93,82	100,00	95,54	100,00	96,53	96,58	100,00	100,00	95,33
	0,425 mm (No.42)		87,56	82,30	94,16	91,50	94,70	86,80	87,30	93,90	98,44	88,61
	0,150 mm (No.100)		76,70	67,59	63,76	81,39	72,59	71,30	72,63	63,29	93,30	77,25
	0,075 mm (No.200)		73,89	63,78	59,81	77,77	66,21	68,60	69,78	55,16	90,30	73,42
	4,75mm (No.4) ekleme kalın malzeme (%)		1,74	1,62	0,00	2,30	0,00	0,87	0,76	0,00	0,00	1,44
0,075 mm (No.200) ekleme kalın malzeme (%)		73,89	63,78	59,81	77,77	66,21	68,60	69,78	55,16	90,30	73,42	
Atterberg Limitleri ^d	Likit Limit (%)	TS 1900-1	47,8	38,8	38,9	35,9		45,7	62,2	71,1	57,5	61,7
	Plastik Limit (%)		23,6	19,5	21,8	19,3	NP	21,4	29,2	28,4	27,8	27,9
	Plastisite İndisi (%)		24,2	19,3	17,1	16,6		24,3	35,9	42,7	30,2	24,2
Zemin Türü	USCS (Birleşik Zemin Sınıflandırması)		CL	CL	CL	CL	ML	CL	CH	CH	CH	CH
	AASHTO											
Serbest Basıncı Deneyi ^e	q _v (kPa)	TS 1900-2	-	-	291	-	-	-	-	-	-	
Üç Eksenli Basıncı Deneyi (CU) ^f	C' (kPa)	TS 1900-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	φ' (°)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Üç Eksenli Basıncı Deneyi (UU) ^g	C (kPa)	TS 1900-2	-	-	-	-	-	-	78,60	-	-	
	φ (°)		-	-	-	-	-	-	9	-	-	
Konsolidasyon Deneyi ^h	Şişme Yüzdesi (%)	TS 1900-2	-	-	0,60	-	-	-	1,00	-	-	
	Şişme Basıncı (kPa)		-	-	7,142	-	-	-	11,200	-	-	
Direk Kesme Deneyi (UU) ⁱ	C (kPa)	TS 1900-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	φ (°)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Direk Kesme Deneyi (CO) Pk ^j	C _{cu} (kPa)	TS 1900-2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	φ _{cu} (°)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Direk Kesme Deneyi (CD) Rezidüel ^k	C _{cu} (kPa)	ASTM D3090	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	φ _{cu} (°)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Tek Eksenli Basıncı Deneyi ^l	q _v (MPa)	TS 2028	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Nükle Yıkılma Deneyi ^m	I _v (MPa)	TS 699	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Elastisite Modülü	E GPa	TS 2030	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Poisson Oranı	ν		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kayıda Üç Eksenli Basıncı Deneyi (UU) ⁿ	C (MPa)	ASTM D2164	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	φ (°)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Organik Madde (Toprakta) ^o	(%)	TS 8336	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Şekil 2.6. SK-238+066 sondajına ait laboratuvar deney logu

İlgili kilometre aralığında yapılan bütün arazi çalışmalarının isimlerini içeren arazi deneyi listesi Çizelge 2.1'de, planda gösterimleri ise EK-1'de verilmiştir. Çalışma kapsamında yararlanılan SPT deneylerine ait loglar EK-2'de, PMT deneylerine ait loglar EK-3'te, CPT deneylerine ait loglar EK-4'te ve laboratuvar deney sonuçlarına ait bütün föyler EK-5'te sunulmaktadır.

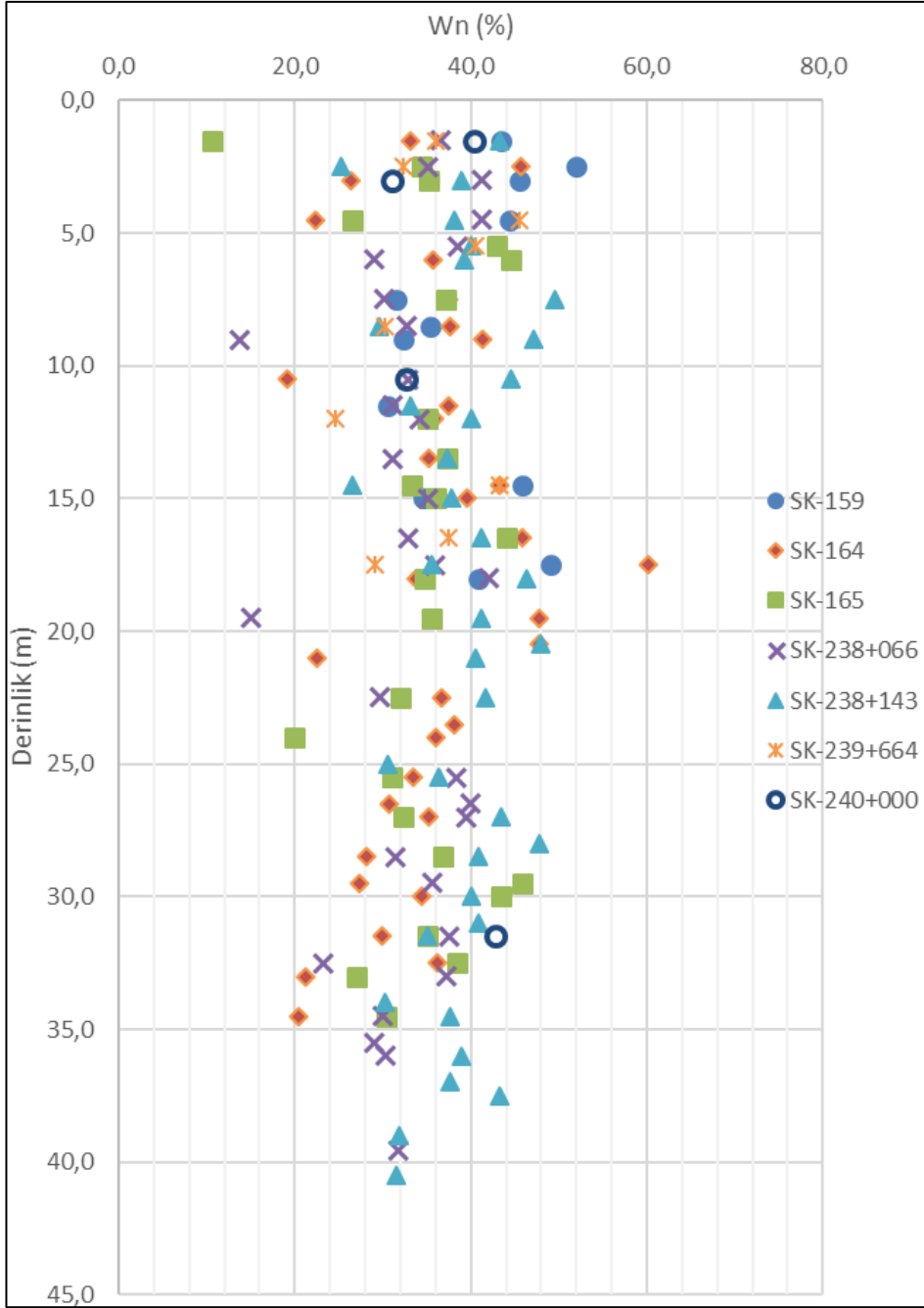
Çizelge 2.1. Arazi deneyleri bilgisi

Km Aralığı		SPT	PMT	CPT
241+200	242+300	SK-159/ SK-164 / SK-238+066 SK-238+090 / SK-238+143 SK-82 / SK-165 SK-239+664 / SK-240+000	SK-238+066 SK-82 SK-238+090 SK-238+143	CPT-241-1/3 CPT-242-2 CPT-E4-A/B/C/D/E/F/G/H/I

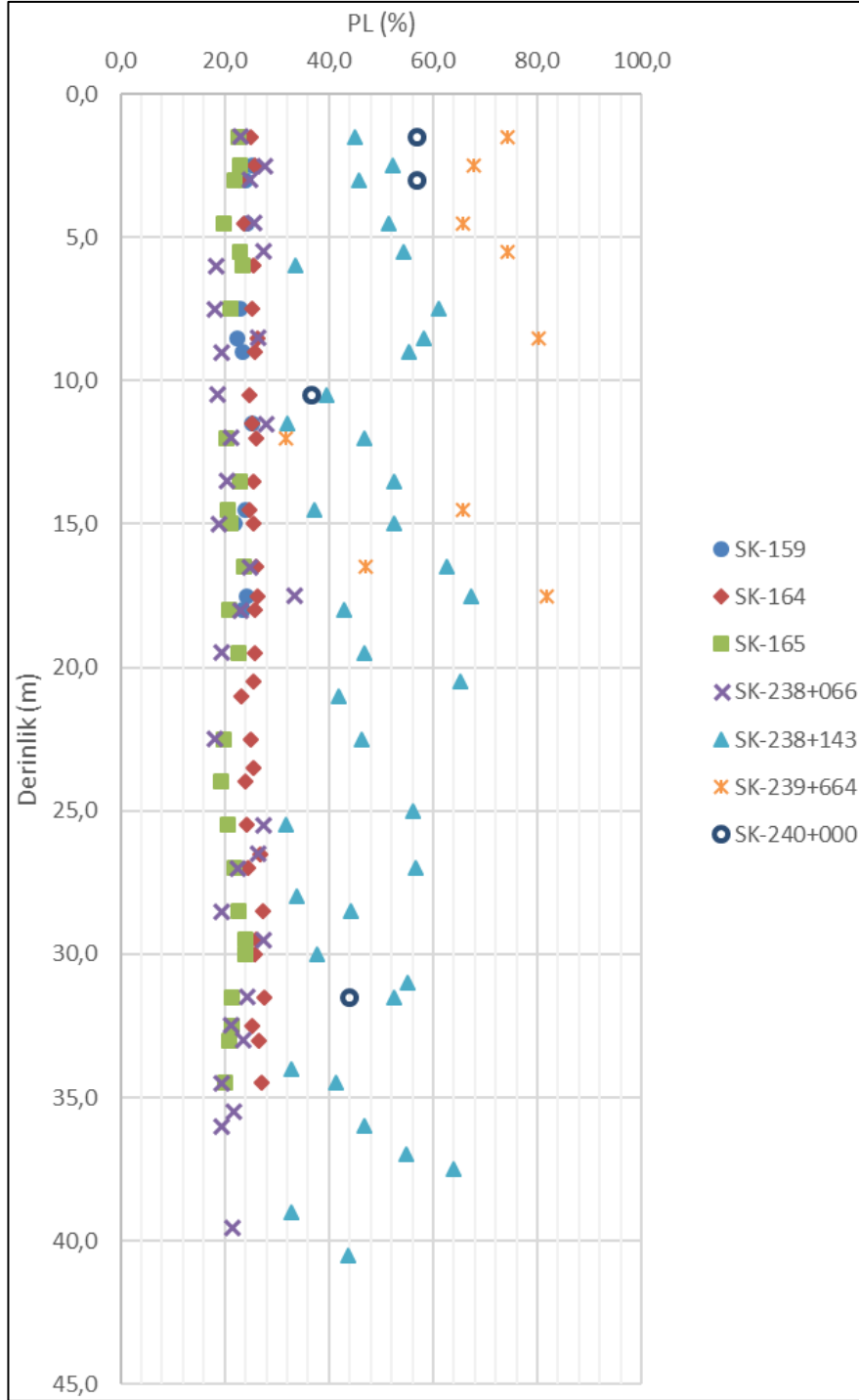
EK-1'de verilen sondaj yerleşim planında da görüldüğü gibi SK-238+090 ve SK-82 sondajları, üzerinde köprü imal edilecek olan dere yatağında açıldıkları için, bu sondajlarda, dolgu taban zeminini temsil eden diğer sondajlara göre daha zayıf ve daha kalın alüvyon birim yer almaktadır. Dolayısıyla test dolgusu taban zeminini temsil etmediği için analizlerde SK-238+090 ve SK-82 sondaj verileri kullanılmayıp çalışma kapsamında geriye kalan 7 adet sondaj verisinden yararlanılmıştır.

Sondajlarda yeraltı suyu gözlemleri yapılarak seviyesini belirlemek için 24 saat beklenerek ölçüm yapılmıştır. Ayrıca, her 1,5 m de bir SPT yapılmış, ince daneli zeminlerin uygun seviyelerinden Shelby tüpü ile örselenmemiş numuneler alınmıştır. Alınan örselenmemiş numuneler zaman kaybetmeden parafinlenerek tabii su muhtevasını kaybetmemesi sağlanmış ve üzerinde laboratuvarda zemin indeks özellikleri (tabii su muhtevası, granülometri, Atterberg limitleri), dayanım parametreleri (s_u , ϕ), sıkışma parametreleri (m_v , c_v) araştırmaları yapılmıştır.

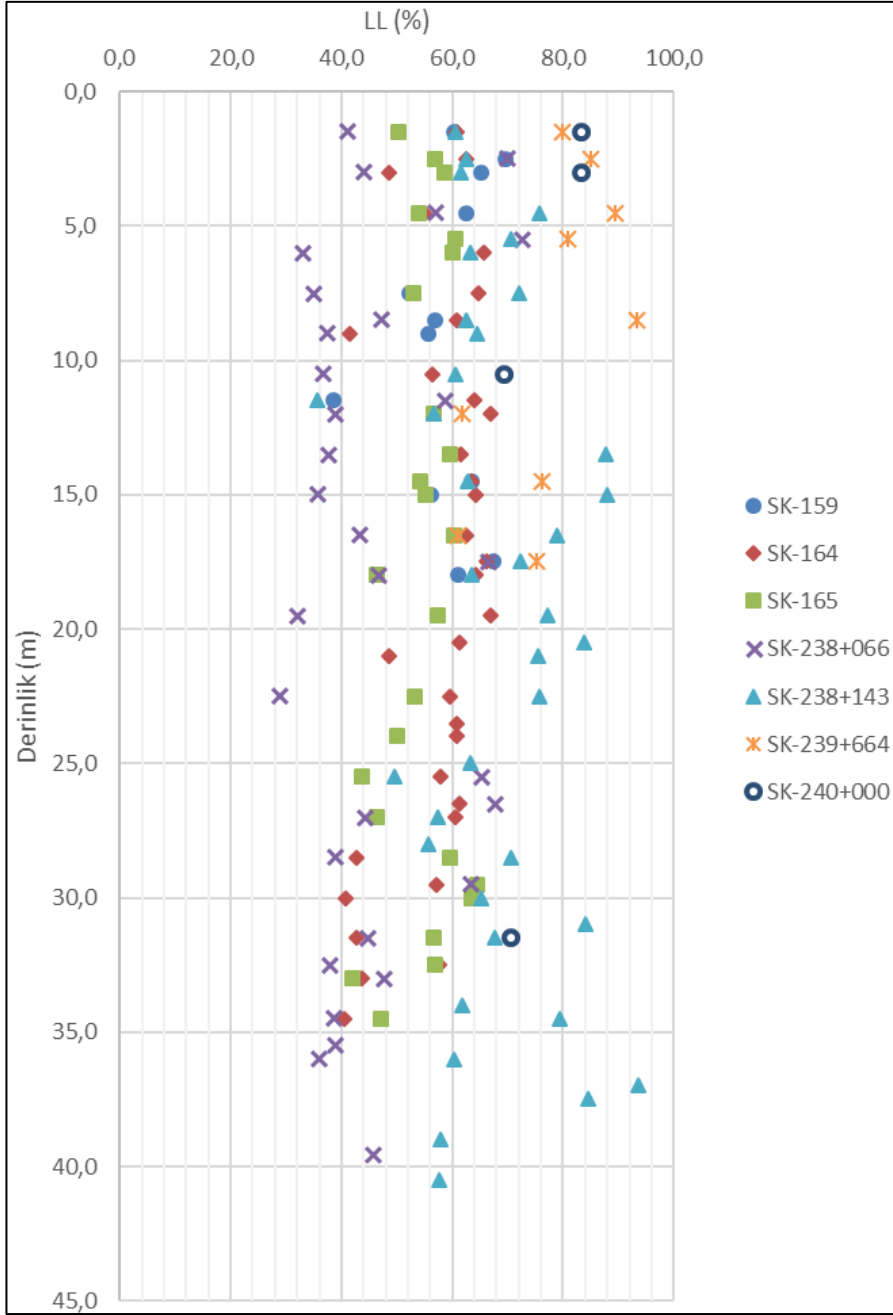
Test dolgusu analizinde yararlanılan sondajlara ait laboratuvar sonuçları incelenip su muhtevası (w_n), plastik limit (PL), likit limit (LL) ve iri dane yüzdesi (kum+çakıl) değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 2.7, Şekil 2.8, Şekil 2.9, Şekil 2.10'da verilmiştir.



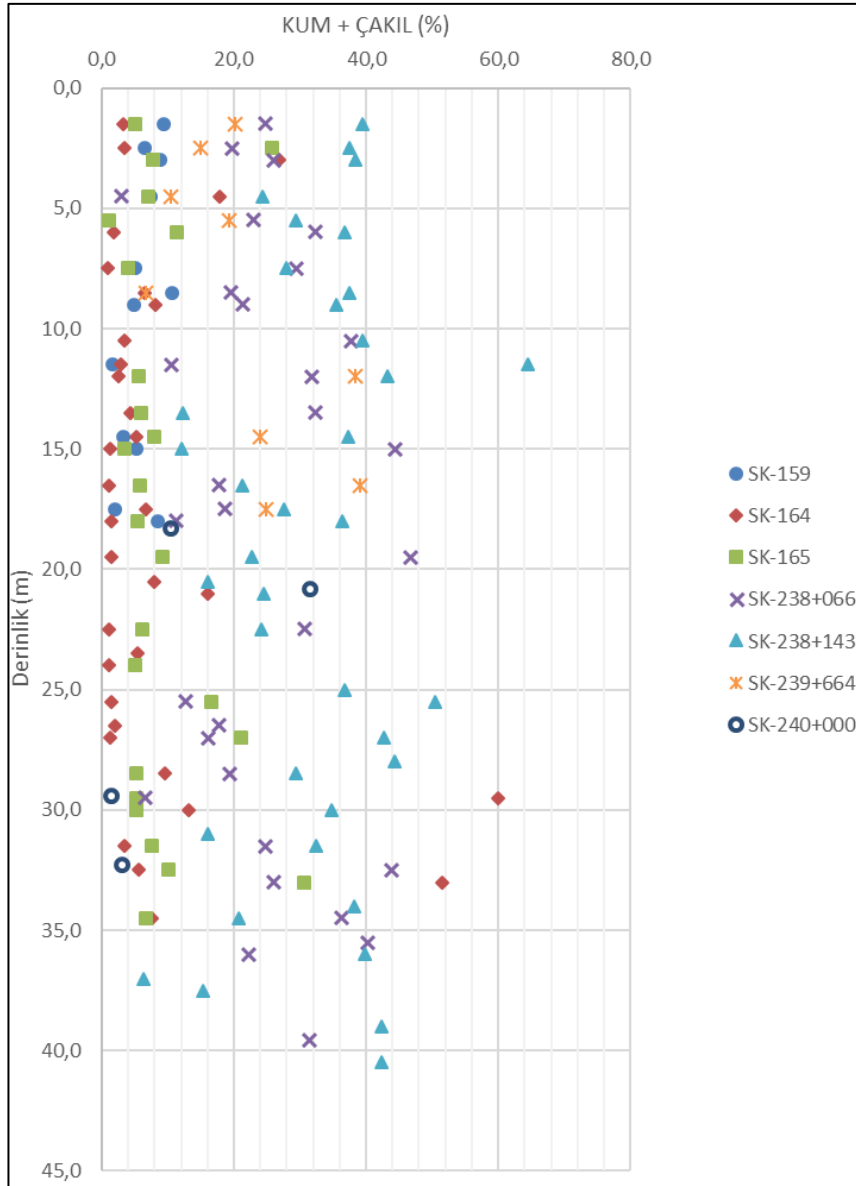
Şekil 2.7. Su muhtevası değerlerinin derinlikle değişimi



Şekil 2.8. Plastik limit değerlerinin derinlikle değişimi

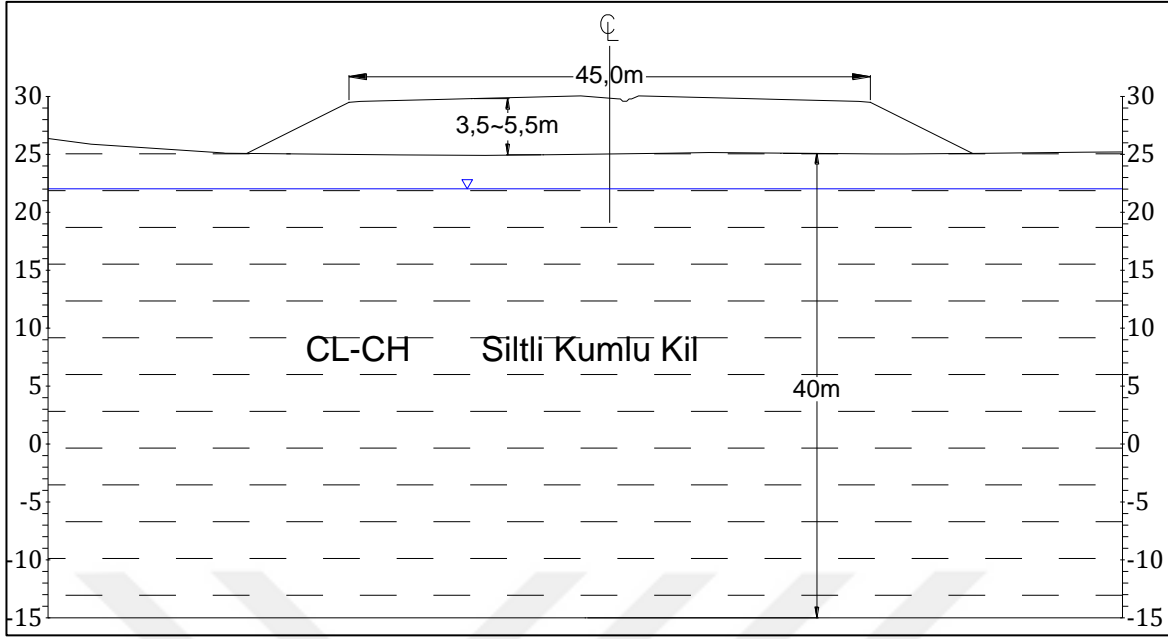


Şekil 2.9. Likit limit değerlerinin derinlikle değişimi



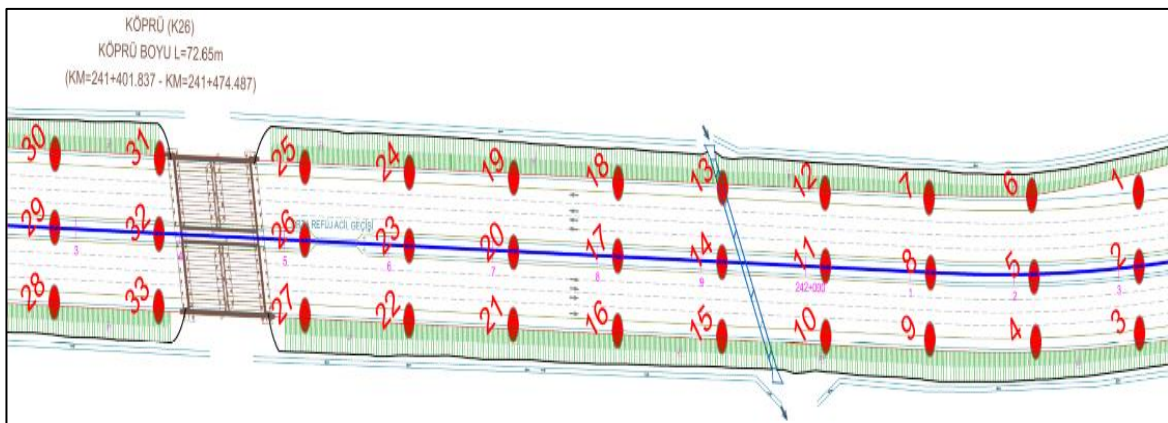
Şekil 2.10. İri tane yüzdelерinin (kum + çakıl) derinlikle değışimi

İlgili aralıkta yapılan arazi ve laboratuvar deney sonuçlarından yararlanılarak test dolgusu için idealize zemin profili belirlenmiştir. Bu profile göre test dolgusu, CL-CH zemin sınıfına ait kil birim üzerine teşkil edilmektedir. Hazırlanan idealize zemin profili ve test dolgusu tip kesiti Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11. Test dolgusu tip kesiti

Test dolgusu tabanında meydana gelecek oturmanın, arazide belirli zaman aralıklarıyla koordinat okuması yapılarak ölçülmesi planlanmıştır. İlgili kilometre aralığında oturma ölçümü için 11 farklı noktada eksende, sol şevde ve sağ şevde olmak üzere dolguda toplamda 33 adet referans noktası belirlenmiş ve dolgu imalatı tamamlandıktan hemen sonra yaklaşık bir yıl süreyle bu noktalarda koordinat ölçümü yapılmıştır. Belirlenen 33 adet referans noktasının planda gösterimi Şekil 2.12’ de verilmiştir.



Şekil 2.12. Test dolgusu kilometre aralığının ve ölçüm noktalarının planda gösterimi

Şekil 2.12’de verilen planda görülen ölçüm noktaları için kilometre ve dolgu yükseklikleri bilgileri Çizelge 2.2’de verilmiştir.

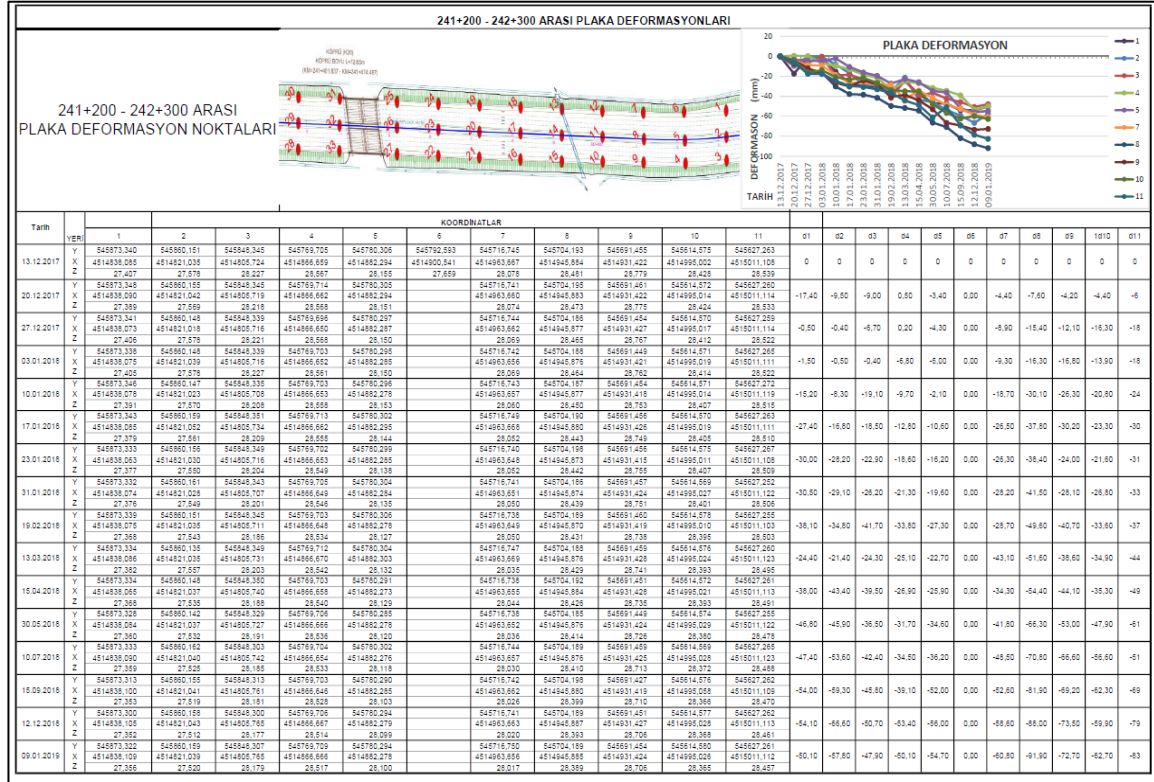
Çizelge 2.2. Ölçüm noktaları için kilometre ve dolgu yükseklikleri bilgileri

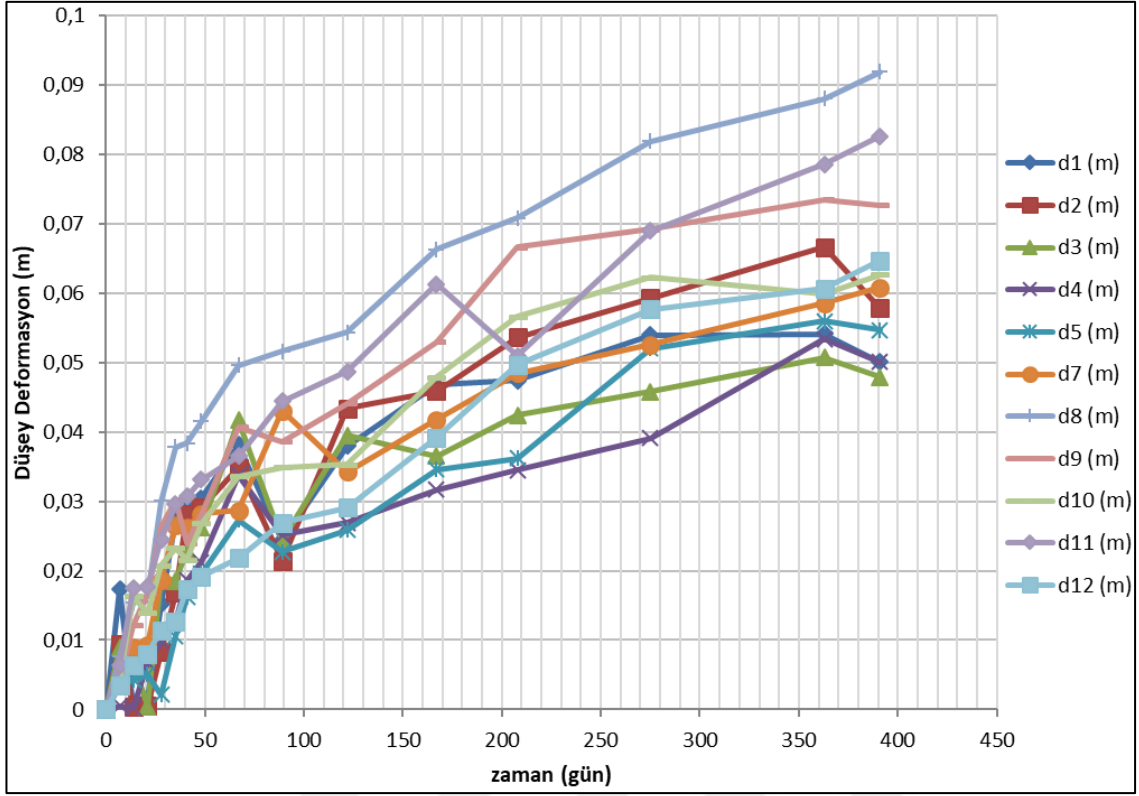
Kilometre	Nokta	Dolgu Yüksekliği
Km:241+280	d28 d29 d30	5m
Km:241+380	d31 d32 d33	5m
Km:241+520	d25 d26 d27	5,5m
Km:241+620	d22 d23 d24	5,5m
Km:241+720	d19 d20 d21	5m
Km:241+820	d16 d17 d18	5m
Km:241+920	d13 d14 d15	4,5m
Km:242+020	d10 d11 d12	4,5m
Km:242+120	d7 d8 d9	4m
Km:242+220	d4 d5 d6	3,5m
Km:242+320	d1 d2 d3	3,5m

Çizelge 2.2’de görüldüğü gibi 3,5-5,5m aralığında değişen dolgu yüksekliğine sahip test dolgusunun imalatı aşamasında, dolgu malzemesinin iş makineleri ile serilip sıkıştırılması sırasında bir seferde yaklaşık 0,5m kalınlığında dolgu tabakası imal edilebilmektedir. Bir günde bir kilometre mesafe boyunca toplamda iki tabaka dolgu imalatı yapılabilmektedir. Dolayısı ile maksimum 5,5m yüksekliğine sahip test dolgusunun imalatı yaklaşık 5,5 günde tamamlanmıştır. Araziden alınan okuma ölçümlerine de dolgu imalatı tamamlandıktan hemen sonra başlandığı için ölçüm alınmasına dolgu imalatına başlandıktan yaklaşık olarak 5,5 gün sonra başlandığı kabulü yapılmıştır.

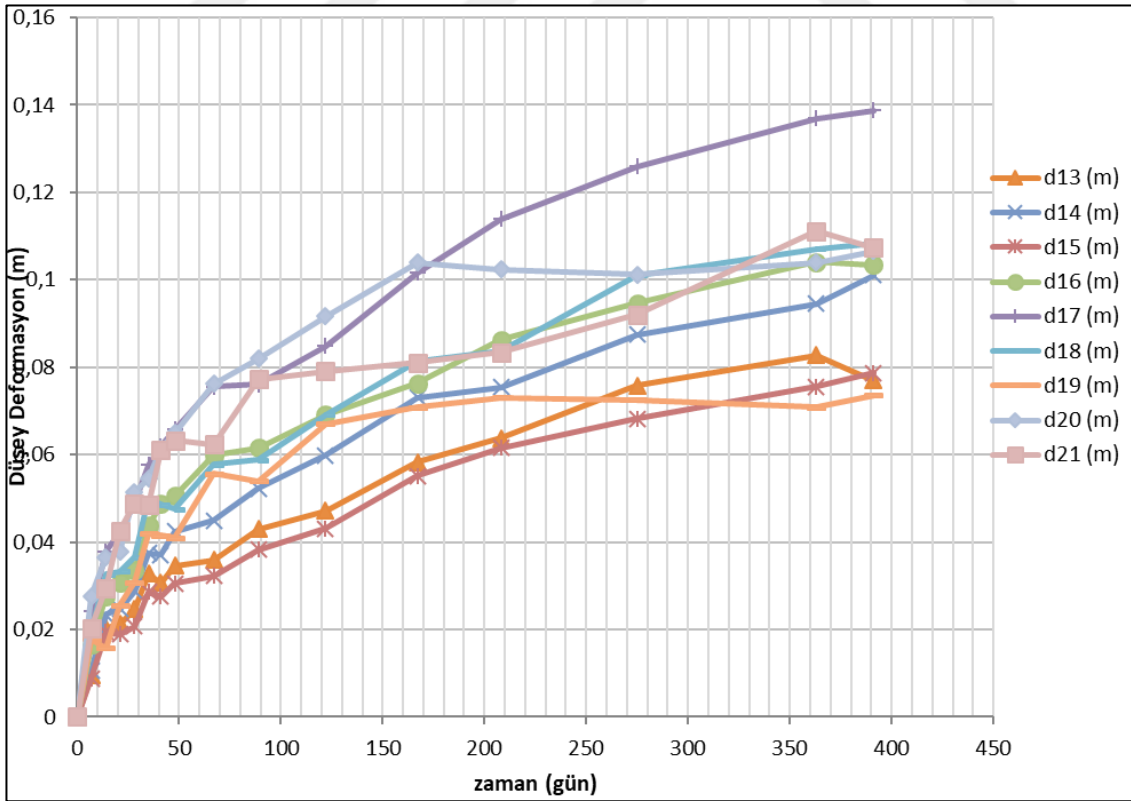
Arazide ölçüm noktalarında, dolgu imalatı tamamlandıktan sonra başlangıçta haftada bir ve yedi hafta sonrasında ise yaklaşık olarak ayda bir olmak üzere bir yıl boyunca yapılan ölçümler sonucunda her referans noktası için oturma-zaman ilişkisi elde edilmiştir.

13.12.2017 tarihinde başlanan koordinat ölçümlerine ait bir adet örnek Şekil 2.13'te verilmiş olup, farklı dolgu yüksekliklerine sahip 33 adet referans noktası için alınan detaylı okumaların tümü EK-6'da verilmiştir.

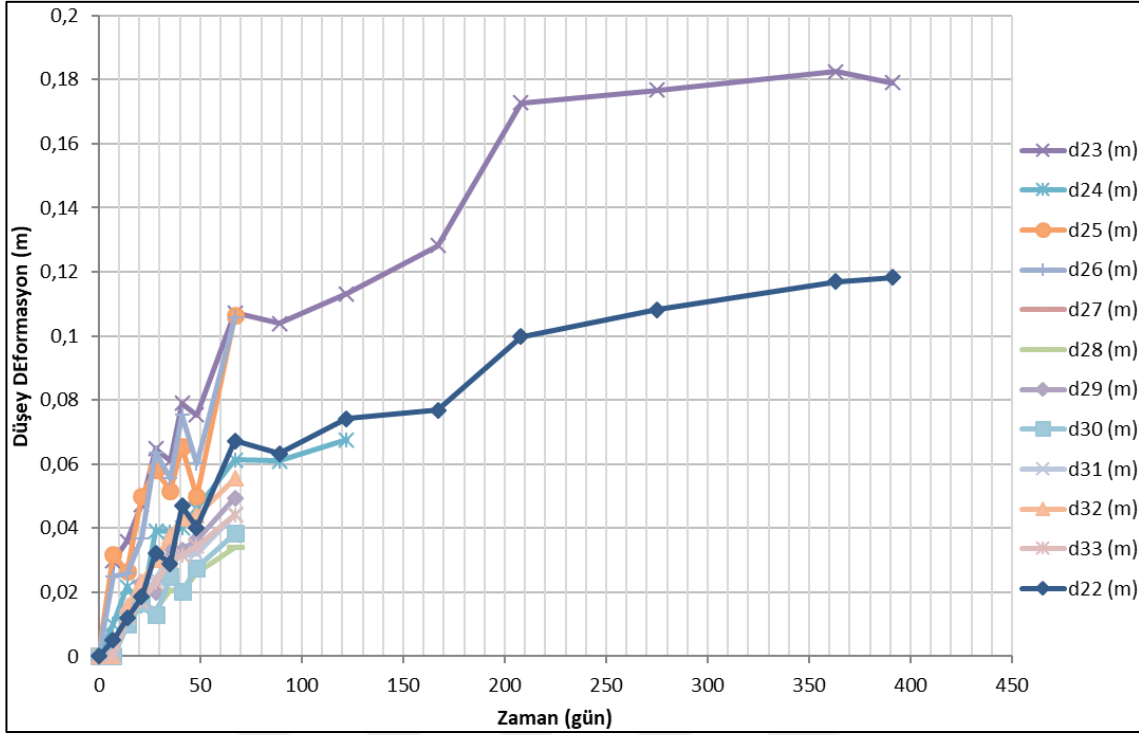




Şekil 2.14. 1-12 numaralı noktaların oturma-zaman ilişkisi



Şekil 2.15. 13-21 numaralı noktaların oturma-zaman ilişkisi

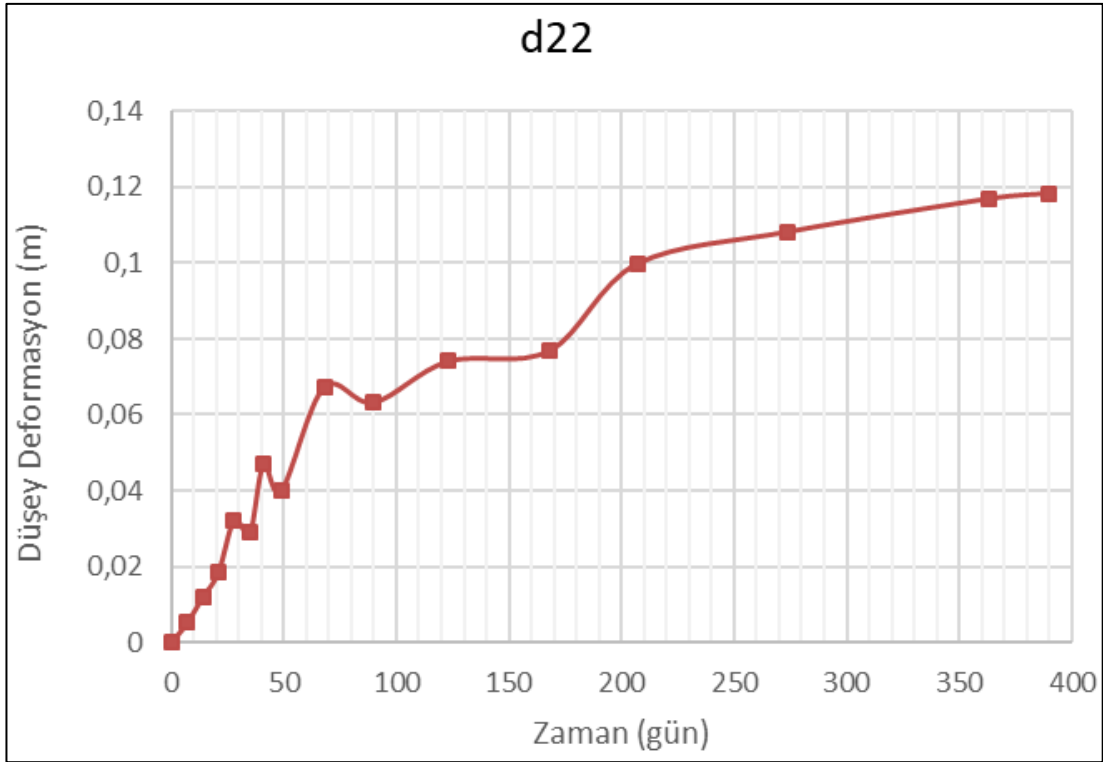


Şekil 2.16. 22-33 numaralı noktaların oturma-zaman ilişkisi

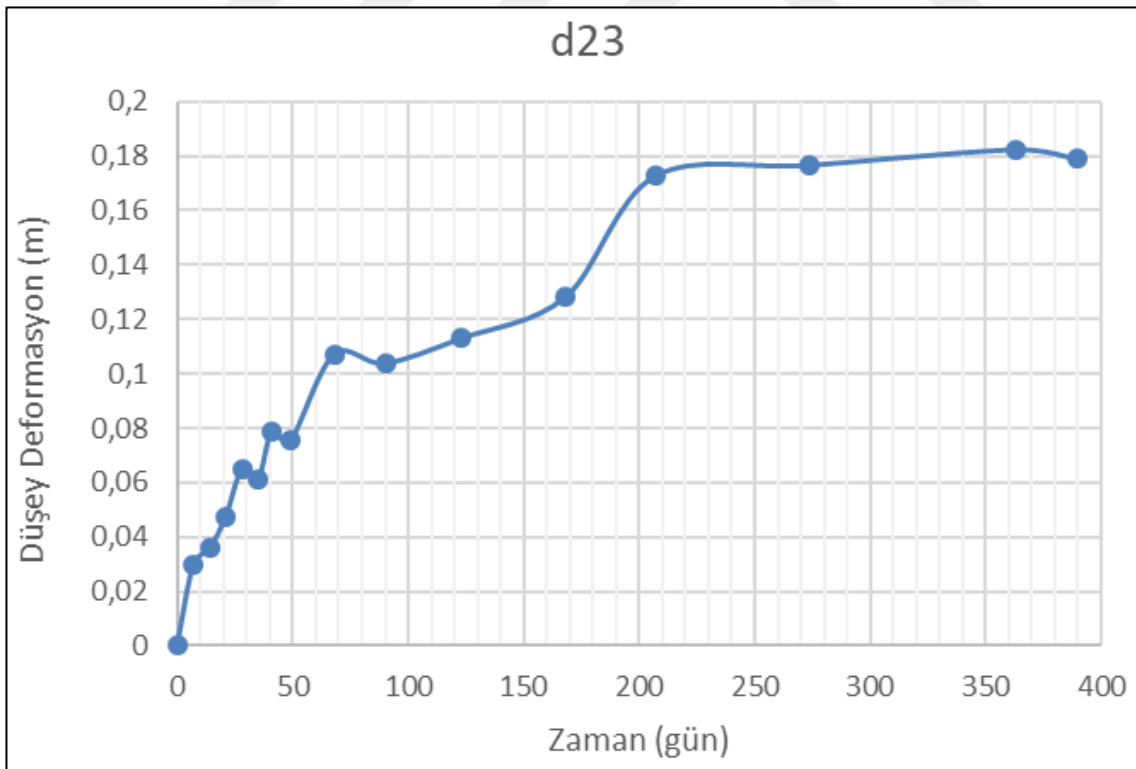
3,5-5,5m aralığında değişen farklı yüksekliklere sahip test dolgusunda yaklaşık 390 gün süre ile 33 farklı noktada ölçüm bilgilerinde belirtilen tarihlerde koordinat ölçümleri alınmıştır. Dolgu imalatı sebebiyle dolgu tabanında meydana gelen elastik oturmalar imalat sırasında çok hızlı bir şekilde tamamlandığı ve arazi ölçümlerine dolgu imalatı tamamlandıktan hemen sonra başladığı için arazi ölçümlerinin elastik oturma miktarlarını içermeyip sadece konsolidasyon oturması miktarlarını gösterdiği kabulünün yapılması uygun bulunmuştur.

Test dolgusundaki maksimum dolgu yüksekliği 5,5m olup, Km:241+620'de bulunan d22 ve d23 noktaları maksimum dolgu yüksekliğine sahip noktalardandır. d22 noktasında dolgu yükü altında meydana gelen oturma yaklaşık 12cm, d23 noktasında ise yaklaşık 18cm olup, ölçümlerin dolgu imalatı tamamlandıktan hemen sonra alınmaya başladığı düşünüldüğü için imalat sırasında meydana gelen konsolidasyon oturması miktarları da bu ölçümlere dahil değildir.

Araziden alınan ölçümlerle d22 ve d23 noktalarına ait oturma-zaman ilişkileri çizilmiştir.



Ŗekil 2.17. d22 noktasına ait araziden alınan ölçümlerle çizilen oturma-zaman iliŖkisi



Ŗekil 2.18. d23 noktasına ait araziden alınan ölçümlerle çizilen oturma-zaman iliŖkisi

Öncelikle 5,5 günde imal edilen 5,5m yüksekliğindeki Km:241+620'deki d23 noktası için Eşitlik 2.1, 2.2 ve 2.3'ten yararlanılarak dolgu imalatı sırasında meydana gelen konsolidasyon oturması tahmin edilmeye çalışılmıştır.

$$t = \frac{T_v \times H_{dr}^2}{c_v} \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte T_v zaman faktörü, H_{dr} en uzun drenaj mesafesi, c_v konsolidasyon katsayısı ve t oturmanın tamamlanma süresidir.

T_v değeri konsolidasyonun gerçekleşme oranına (U) bağlı olarak aşağıdaki denklemler yardımıyla yaklaşık olarak tahmin edilir. [33]

$$U \leq \%60, \quad T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U\%}{100} \right)^2 \quad (2.2)$$

$$U > \%60, \quad T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - U\%) \quad (2.3)$$

Şekil 2.18'de verilen oturma-zaman ilişkisi incelendiğinde, ölçüm almaya başladıktan yaklaşık 200 gün sonra, oturma miktarı yaklaşık 17cm' ye ulaştığında oturma-zaman eğrisi eğiminin azalarak düzleştiği görülmektedir. Bu sebeple de ölçüm değerlerine göre oturma değeri 17,27cm olduğunda oturmanın yaklaşık %95'inin tamamlandığı varsayılmıştır.

d23 noktasına ait oturma zaman ölçümleri Çizelge 2.3'te verilmiştir. Çizelgede S değeri 5,5gün olan dolgu imalat süresinde meydana geldiği düşünülen konsolidasyon oturması miktarı. Çizelge 2.3'te verilen dolgu imalat süresi ve bu sürede meydana geldiği düşünüle konsolidasyon oturması miktarlarını da içeren okumalardan yararlanarak d23 noktası için toplam konsolidasyon oturması miktarı tahmini yapılmıştır.

Çizelge 2.3. d23 noktasından alınan arazi ölçümleri

Arazi ölçüm değerleri			Dolgu imalat süresi (5,5gün) ve oturma miktarı (S) dikkate alınarak belirlenen oturma-zaman değerleri		
zaman - t (gün)	Oturma (m)	Oturma (cm)	t + 5,5 (gün)	t + 5,5 (sn)	Toplam Oturma (Oturma + S) (cm)
0	0	0	5,5	475200	S
7	0,0298	2,98	12,5	1080000	2,98 + S
14	0,0359	3,59	19,5	1684800	3,59 + S
21	0,0474	4,74	26,5	2289600	4,74 + S
28	0,0648	6,48	33,5	2894400	6,48 + S
35	0,0609	6,09	40,5	3499200	6,09 + S
41	0,079	7,9	46,5	4017600	7,9 + S
49	0,0753	7,53	54,5	4708800	7,53 + S
68	0,1072	10,72	73,5	6350400	10,72 + S
90	0,1039	10,039	95,5	8251200	10,39 + S
123	0,1131	11,31	128,5	11102400	11,31 + S
168	0,1282	12,82	173,5	14990400	12,82 + S
207	0,1727	17,27	212,5	18360000	17,27 + S
274	0,1767	17,67	279,5	24148800	17,64 + S
363	0,1824	18,24	368,5	31838400	18,24 + S
390	0,1789	17,89	395,5	34171200	17,89 + S

Dolgu imalat süresi ve bu sürede meydana gelen oturma da dikkate alındığı takdirde 212,5 günde S+17,27cm oturma meydana gelmektedir ve bu oturma toplam oturmanın yaklaşık %95'i olarak varsayılmıştır.

Eşitlik 2.3'ü kullanarak oturma oranı $U=95\%$ iken zaman faktörü:

$$T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - 95\%) = 1,129 \text{ olarak elde edilmiştir.}$$

Sonrasında ise Eşitlik 2.1 kullanılarak S+17,27cm oturmanın tamamlandığı 212,5gün (18360000sn) için C_v/H_{dr}^2 hesaplanmıştır.

$$t = \frac{T_v \times H_{dr}^2}{C_v}$$

$$\frac{C_v}{H_{dr}^2} = \frac{T_v}{t} = \frac{1,129}{18360000} = 0,0000000615 = 6,15E - 08 \quad 1/sn$$

C_v/H_{dr}^2 değeri sabit olup, Eşitlik 2.1 kullanılarak 54,5gün (4708800sn) için zaman faktörü (T_v) ve Eşitlik 2.3 kullanılarak oturma oranı (U) ve 54,5 ile 212,5. gün arasındaki oturma oranı farkları (ΔU) elde edilmiştir.

$$T_v = \frac{t \times c_v}{H_{dr}^2} = 4708800 \times (6,15E - 08) = 0,29$$

$$T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - U\%) = 0,29$$

$$U = 60$$

$$\Delta U = 95 - 60 = 35 (\%)$$

Çizelge 2.4. Toplam oturma hesabı

t (gün)	212,5	54,5
Oturma (cm)	S + 17,27	S+7,53
ΔS (cm)	9,74	
U	95	60
ΔU (cm)	35	
T_v	1,129	0,29
C_v/H_{dr}^2 (1/sn)	6,15E-08	

Çizelge 2.4'te oturma miktarları ve konsolidasyon oranları arasındaki fark görülebilmektedir. Buna göre toplam oturma miktarının %35' sı 9,74cm'ye karşılık gelmektedir ve buna bağlı olarak toplam konsolidasyon oturma miktarı yaklaşık olarak 28cm olarak hesaplanmaktadır.

Aynı işlemler alınan bütün ölçümler için tekrarlanmış ve d23 noktası için toplam oturma miktarı ayrı ayrı belirlenmiştir. Toplam oturma miktarı belirlenirken, Şekil 2.18'de verilen grafikte görüldüğü gibi 90 günden sonra grafikte beklendiği gibi bir artış olması yerine bir azalma olmuştur. Bu sebeple işlemler, ilk 50 gün boyunca haftada bir olmak üzere daha sık aralıklarla alınan ölçümlerin her biri ile oturma miktarının %95'inin tamamlandığı düşünülen 212,5 gün arasında yapılmıştır ve hesap detayları Çizelge 2.5'te verilmiştir.

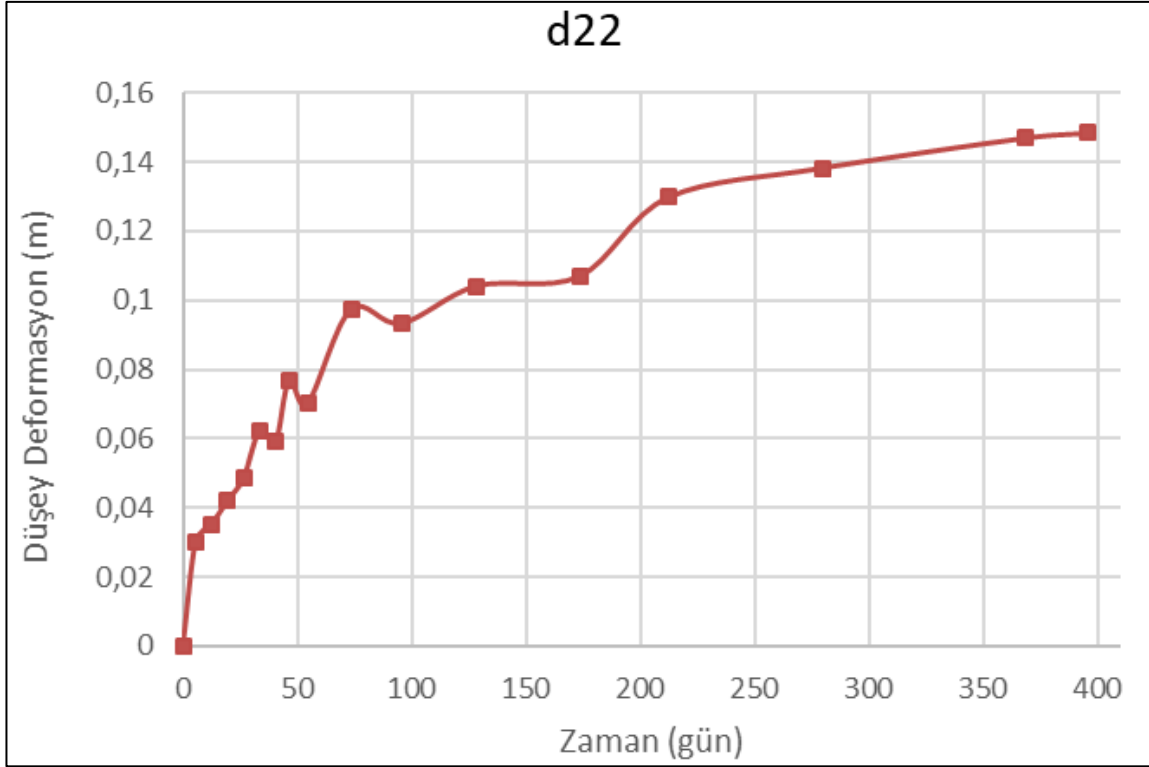
Çizelge 2.5. d23 noktası için toplamda S+17,27 oturma miktarının gerçekleştiği 212,5 gün ile diğer noktalar için yapılan işlemlere ait hesap detayları

t (Gün)	t+5,5 (Gün)	t+5,5 (sn)	Tv	U (%)	Oturma S (cm)	212,5 gün ile oturma oranı farkı - ΔU (%)	212,5 gün ile oturma miktar farkı- ΔS (cm)	Hesaplanan Toplam Oturma (cm)
0	5,5	475200	0,0292	19	S	76	17,27	22,72
7	12,5	1080000	0,0664	29	2,98 + S	66	14,29	21,65
14	19,5	1684800	0,1036	36	3,59 + S	59	13,68	23,19
21	26,5	2289600	0,1408	42	4,74 + S	53	12,53	23,64
28	33,5	2894400	0,1780	47	6,48 + S	48	10,79	22,48
35	40,5	3499200	0,2152	52	6,09 + S	43	11,18	26,00
41	46,5	4017600	0,2471	55	7,9 + S	40	9,37	23,42
49	54,5	4708800	0,2896	60	7,53 + S	35	9,74	27,83

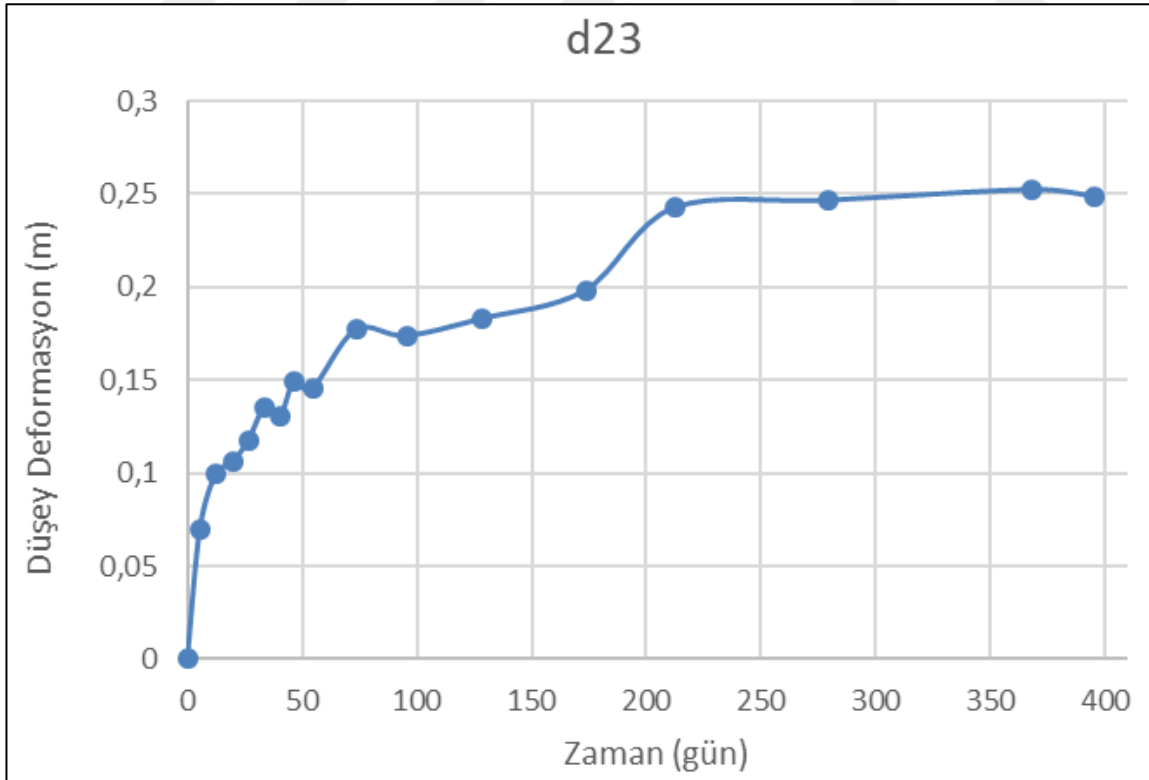
Yapılan hesaplar sonucunda d23 dolgusu için toplam konsolidasyon oturması yaklaşık olarak 25cm mertebesinde tespit edilmiştir. Dolayısı ile d23 noktasında arazide dolgu imalatı sırasında meydana gelen konsolidasyon oturması miktarı yaklaşık 7cm hesaplanmıştır.

Aynı şekilde d22 noktası için de yapılmış ve dolgu imalat sırasında meydana gelen konsolidasyon oturması yaklaşık 3cm, dolayısı ile bu noktada dolgu imalatı sebebiyle meydana gelen toplam konsolidasyon oturması yaklaşık olarak 15cm mertebesinde hesaplanmıştır. d22 noktası için hesap detayları EK-7'de verilmiştir.

İmalat süresi ve bu sürede gerçekleşen oturma miktarları da dikkate alınarak d22 ve d23 noktası için çizilen düzeltilmiş oturma-zaman ilişkileri Şekil 2.19 ve Şekil 2.20'da verilmiştir.



Şekil 2.19. d22 noktası için dolgu imalat süresi ve imalat sırasındaki oturma ile birlikte oturma-zaman ilişkisi



Şekil 2.20. d23 noktası için dolgu imalat süresi ve imalat sırasındaki oturma ile birlikte oturma-zaman ilişkisi



3. STABİLİTE DEĞERLENDİRMELERİ

Test dolgusunun yer aldığı ilgili kilometre aralığında yer alan arazi deneyleri ve açılan sondajlardan alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deneyleri incelendiğinde, dolgunun alüvyon niteliğinde killi, kumlu, siltli birim üzerine teşkil edileceği belirlenmiştir. Öncelikle yol dolgusunun önceden belirlenmiş olan 2Y/1D şev eğimi ile tespit edilen alüvyon birimin üzerine imal edilmesi durumunda stabilite problemi ile karşılaşılma durumu incelenmiş ve bu amaçla stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışma kapsamında stabilite analizleri iki boyutlu limit denge analiz yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu kapsamda “SLIDE 6.0 for stability analysis” bilgisayar programı yardımıyla Çizelge 3.1’de gösterilen analiz yöntemleri arasından Bishop yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1. Stabilite analizlerinde kullanılan analiz yöntemleri

Method	Assumptions				Comments
	Overall Moment Equilibrium	Individual Slice Moment Equilibrium	Horizontal Force Equilibrium	Vertical Force Equilibrium	
Swedish Circle	Yes	No	No	No	Circular Slip Surface Only for $\phi=0$
Ordinary Method of Slices (Fellenius 1927)	Yes	No	No	No	Circular Slip Surface Side Forces Parallel to Base Very inaccurate for high pore water pressures
Bishop's Modified Method (Bishop 1955)	Yes	No	No	Yes	Circular Slip Surfaces Side Forces Horizontal Very inaccurate for high pore water pressures
Morgenstern and Price's Method (Morganstern and Price 1965)	Yes	Yes	Yes	Yes	Slip surface of any shape Pattern of Side Force Orientations Much engineering time required to vary side force assumptions.
Spencer's Method (Spencer 1967)	Yes	Yes	Yes	Yes	Slip surface of any shape Side Forces Parallel Simplest Method
Corps of Engineers Modified Swedish (1970)	No	No	Yes	Yes	Slip surface of any shape Side Forces Parallel to Slope High factor of safety
Lowe & Karafiath (1960)	No	No	Yes	Yes	Slip surface of any shape Side Force Orientations Average of Slope and Slip Surface Best side force assumption
Janbu Simplified (Janbu 1954)	No	No	Yes	Yes	Slip surface of any shape Side Forces Horizontal Low Factor of Safety
GLE - General Limit Equilibrium	Yes	Yes	Yes	Yes	Slip surface of any shape Pattern of Side Force Orientations Much engineering time required to vary side force assumptions.
GoldNail Method* (Golder)	Yes	-	Yes	Yes	Slip surface of any shape Normal Stress Distribution Toe circles only
SNAIL Method (CALTRANS)	No	No	Yes	Yes	Slip surface of any shape Two or three wedges, with side force angle = ϕ Limited shapes of slip surfaces

Programda en kritik durumu yansıtması sebebiyle en yüksek dolgu olan 5,5m yüksekliğindeki Km:241+620 dolgusu analiz edilmiştir. Dolgu platformu 45m, tabanı ise

sondaj derinlikleri sebebiyle 40m kalınlığında modellenmiştir. Stabilité analizlerini gerçekleştirebilmek için ilk olarak analizlerde kullanılmak üzere dolgu malzemesi ve dolgu taban zemininde yer alan kil birim için arazi ve laboratuvar deney verilerinden yararlanılarak mukavemet parametreleri tahminleri yapılmış ve belirlenen bu parametrelerle stabilité analizleri gerçekleştirilmiştir.

3.1. Stabilité Analizlerinde Kullanılan Mukavemet Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu bölümde ilgili kilometre aralığında alüvyon birim üzerine imal edilen test dolgusunun stabilité yönünden değerlendirilebilmesi adına dolgu malzemesi ve taban zemindeki kil birim için arazi ve laboratuvar deney verileri kullanılarak yapılan parametre tahminleri incelenmiştir.

Stabilité analizlerinde Mohr-Coulomb yenilme ölçütü kullanılmıştır ve bu kapsamda ilk olarak 2Y/1D şev eğimi ile teşkil edilecek dolgu malzemesinin mukavemet parametrelerinin seçimi yapılmıştır.

Dolgu imalatında kullanılacak malzeme, Çaycuma Formasyonuna (Teç) ait Kumtaşı, Kıltaşı, Siltaşı birimlerinde açılacak yarmalardan ve ariyet ocaklarından temin edilecek olup, en kötü durumda parametre seçiminde SC-SM zemin sınıfında olduğu kabul edilmiştir [1-2]. Bu verilerden yola çıkarak ve Şekil 3.1'den yararlanılarak dolgu malzemesi için dayanım parametreleri kohezyon $c' = 5\text{kPa}$, içsel sürtünme açısı $\phi' = 33^\circ$ ve birim hacim ağırlık $\gamma = 20\text{kN/m}^3$ olarak belirlenmiştir.

Table 5-15
Average engineering properties of compacted inorganic soils (after USBR, 1960)

USCS	Standard Proctor Compaction (ASTM D 698/AASHTO T 99)		As Compacted	Saturated Cohesion, c'_{sat}	Friction Angle, ϕ' (deg)	Void Ratio, e [Permeability, k (ft/yr)]
	Maximum Dry Density, pcf (kN/m ³)	Optimum Moisture Content (%)	Cohesion, c' psi (kPa)	psi (kPa)		
GW	>119 (>18.7)	<13.3	*	*	>38	* [27,000±13,000]
GP	>110 (>17.3)	<12.4	*	*	>37	* [64,000±34,000]
GM	>114 (>17.9)	<14.5	*	*	>34	* [>0.3]
GC	>115 (>18.1)	<14.7	*	*	>31	* [>0.3]
SW	119±5 (18.7±0.8)	13.3±2.5	5.7±0.6 (39±4)	*	38±1	0.37±* [*]
SP	110±2 (17.3±0.3)	12.4±1.0	3.3±0.9 (23±6)	*	37±1	0.50±0.03 [>15.0]
SM	114±1 (17.9±0.2)	14.5±0.4	7.4±0.9 (51±6)	2.9±1.0 (20±7)	34±1	0.48±0.02 [7.5±4.8]
SM-SC	119±1 (18.7±0.2)	12.8±0.5	7.3±3.1 (50±21)	2.1±0.8 (14±6)	33±4	0.41±0.02 [0.8±0.6]
SC	115±1 (18.1±0.2)	14.7±0.4	10.9±2.2 (75±15)	1.6±0.9 (11±6)	31±4	0.48±0.01 [0.3±0.2]
ML	103±1 (16.2±0.2)	19.2±0.7	9.7±1.5 (67±10)	1.3±* (9±*)	32±2	0.63±0.02 [0.59±0.23]
ML-CL	109±2 (17.1±0.3)	16.8±0.7	9.2±2.4 (63±17)	3.2±* (22±*)	32±3	0.54±0.03 [0.13±0.07]
CL	108±1 (17.0±0.2)	17.3±0.3	12.6±1.5 (87±10)	1.9±0.3 (13±2)	28±2	0.56±0.01 [0.08±0.03]
MH	82±4 (12.9±0.6)	36.3±3.2	10.5±4.3 (72±30)	2.9±1.3 (20±9)	25±3	1.15±0.12 [0.16±0.10]
CH	94±2 (14.8±0.3)	25.5±1.2	14.9±4.9 (103±34)	1.6±0.86 (11±6)	19±5	0.80±0.04 [0.05±0.05]

Notes:

- The entry ± indicates 90 percent confidence limits of the average value; * denotes insufficient data.
- For permeability, 1 ft/yr ≈ 10⁻⁶ cm/sec.
- All shear strengths, void ratios and permeabilities were determined on samples prepared at Standard Proctor maximum dry density and optimum moisture content.
- The values of cohesion, c' , and friction angle, ϕ' , are based on a straight-line Mohr strength envelope on an effective stress basis. The value c'_{sat} was obtained by saturating the sample and shearing it to failure. Consolidated-undrained (CU) triaxial tests were used to determine all the shear strengths.
- Since all laboratory tests, except large-sized permeability tests, were performed on the minus No. 4 (4.75 mm) fraction of soil, data on average values for gravels are not available for most properties. However, an indication as to whether these average values will be greater than or less than the average values for the corresponding sand group are given in the table (note entries with > or < symbol).
- Void ratio was derived from the maximum dry density and specific gravity of the soil.
- In USCS, there are no upper boundaries of liquid limit of MH and CH soils. The maximum limits for MH and CH soils tested by USBR (1960) were 81% and 88%, respectively. Soils with higher liquid limits than these will have inferior engineering properties.

FHWA NHI-06-088
Soils and Foundations – Volume I

5 - 82

5 – Laboratory Tests
December 2006

Şekil 3.1. Dolguların dayanım parametreleri [3]

Dolgu taban zemininde ise geoteknik parametreler belirlenirken arazi ve laboratuvar verileri birlikte değerlendirilmiştir. Açılan sondaj ve laboratuvar çalışmalarından yararlanılarak test dolgusu için idealize zemin profili oluşturulmuştur. Bu profile göre dolgu taban zemininde yer alan kil birimde stabilite analizlerinde kullanılmak üzere drenajsız kayma dayanımı belirlenirken, SPT, PMT, CPT ve sondajlardan alınan UD numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlardan yararlanılmıştır.

3.1.1. Laboratuvar deneyleri kullanılarak drenajsız kayma dayanımı belirlenmesi

Bu bölümde drenajsız kayma dayanımı belirlenirken sondajlardan alınan örselenmemiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli ve üç eksenli basınç deneyi sonuçlarından yararlanılmıştır (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. İlgili kilometre aralığında açılan sondajlarda farklı derinliklerden alınan örselenmemiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli ve üç eksenli deneyler

Sondaj Kuyusu	Tipi ve Adı	Derinlik (m)	Tek Eksenli (Serbest) Basınç Dayanımı	Üç Eksenli Basınç Dayanımı (UU)	
			q_u (kPa)	c_u (kPa)	ϕ_u (°)
SK-159	UD-1	2,50	-	30	3
	UD-4	11,50	-	20	4
SK-164	UD-1	2,50	-	63	3
	UD-3	8,50	-	40	2
	UD-4	11,50	91	-	-
	UD-6	17,50	-	26	4
SK-238+066	UD-8	23,50	124	-	-
	UD-1	2,50	-	81	13
	UD-3	8,50	-	73	12
	UD-4	11,50	329	-	-
	UD-6	17,50	-	86	10
	UD-9	26,50	-	73	10
	UD-10	29,50	336	-	-
	UD-11	32,50	-	92	11
SK-238+143	UD-12	35,50	291	-	-
	UD-1	2,50	-	80	12
	UD-3	8,50	-	79	10
	UD-5	14,50	-	46	5
	UD-6	17,50	258	-	-
	UD-7	20,50	-	80	10
	UD-8	25,00	246	-	-
SK-165	UD-12	37,00	272	-	-
	UD-1	2,50	-	56	6
	UD-2	5,50	116	-	-
SK-239+664	UD-5	14,50	126	-	-
	UD-1	2,50	-	84	12
	UD-2	5,50	258	-	-
	UD-3	8,50	-	99	13
	UD-5	14,50	-	76	9
	UD-6	17,50	351	-	-

Tek eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen en büyük eksenel gerilme değeri (q_u) kullanılarak Eşitlik 3.1 yardımıyla drenajsız kayma dayanımı elde edilir.

$$c_u = q_u/2 \quad (3.1)$$

Üç eksenli deneyinde ise deney sonucunda elde edilen değerler direkt drenajsız kayma dayanımı (c_u) değerleridir.

3.1.2. SPT deneyleri kullanılarak drenajsız kayma dayanımı belirlenmesi

SPT halen hemen hemen tüm dünyada zemin profili ve mukavemet parametresi belirlenirken en çok yararlanılan arazi deneyi yöntemlerinden biri olup bu çalışmada da arazide elde edilen SPT N değerleri Eşitlik 3.2 ile düzeltilerek zemin parametreleri tahmininde kullanılmıştır.

$$(N_1)_{60} = N_{ort} \times C_E \times C_R \times C_B \times C_S \times C_A \times C_C \quad (3.2)$$

Çalışma kapsamına Skempton faktörleri [17] kullanılmış olup, her bir düzeltme değeri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Çalışma kapsamında kullanılan SPT düzeltmeleri

Sembol	Düzeltilme	Açıklama	Düzeltilme katsayısı
C_E	Enerji düzeltmesi	Emniyetli	1.00
C_R^*	Tij uzunluğu düzeltmesi (Derinlik+1.5m)	0.00 - 4.00m	0.75
		4.00 – 6.00m	0.85
		6.00 – 10.00m	0.95
		>10.00m	1.00
C_B	Sondaj çapı düzeltmesi:	60-120mm	1.00
C_S	Numune alıcı kılıf düzeltmesi	Kılıfsız	1.20
C_A	Çakma başlığı düzeltmesi	Halka tokmak	0.85
C_C	Tokmak yastığı düzeltmesi	Odun blok yastık yok	1.00

* Tij uzunluğu düzeltmesi SPT N değerlerinin elde edildiği ortalama derinliğe göre gerçekleştirilmiştir.

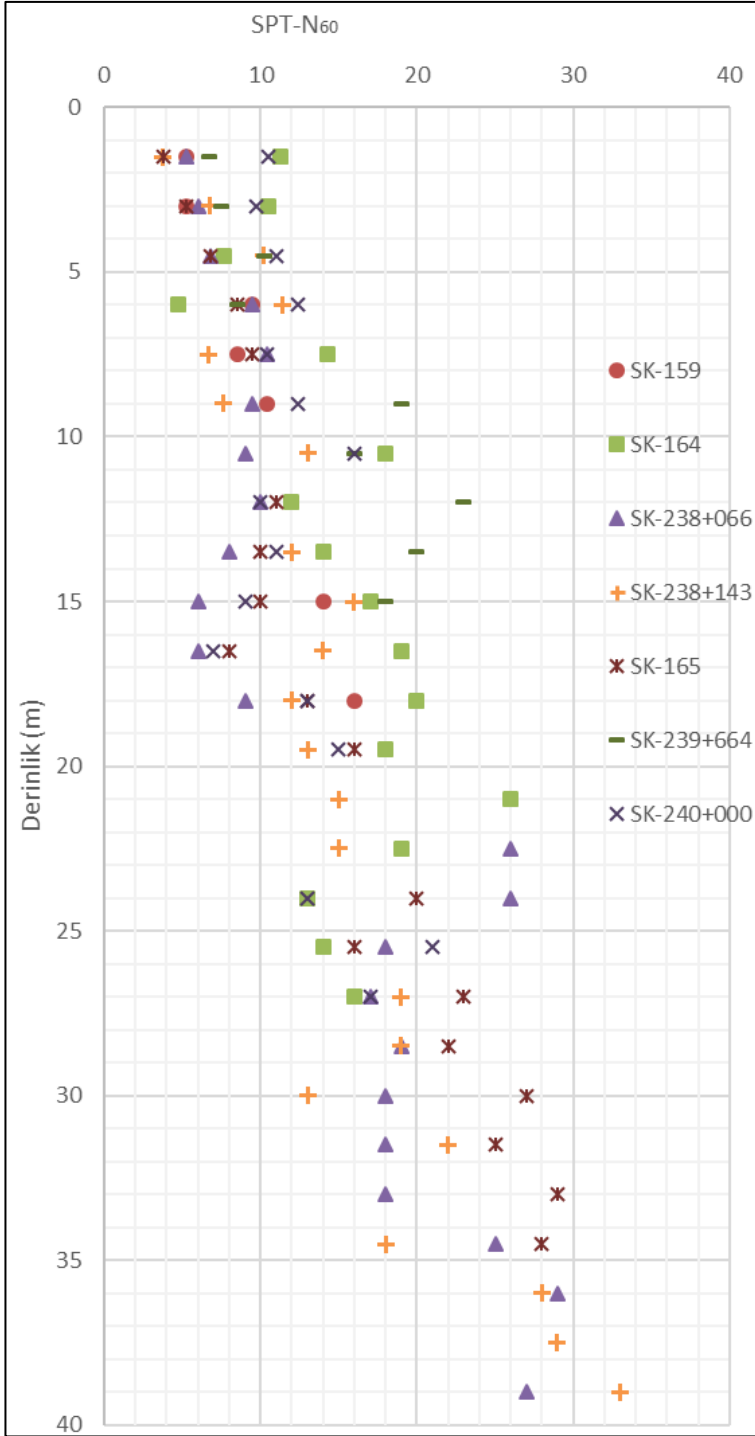
Standart Penetrasyon Deneyi verilerinden yararlanarak drenajsız kayma dayanımı belirlenirken kullanılacak literatürde birçok ampirik ilişki yer almaktadır. Bu çalışmada yararlanılan ilişkiler Çizelge 3.4'te özetlenmiştir. Verilen ilişkilerde SPT- N_{60} değeri kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. SPT-N₆₀ – drenajsız kayma dayanımı (c_u) ilişkileri

Terzaghi ve Peck (1967) [4]	
<u>SPTN</u>	<u>c_u/Pa</u>
0-2	<1/8
2-4	1/8-1/4
4-8	1/4-1/2
8-15	1/2-1
15-30	1/2-2
>30	>2
Stroud (1974) [5]	
Yüksek plastisiteli kil	(6-7)N
Orta plastisiteli kil	(4-5)N
Düşük plastisiteli kil	4.2N
Sowers (1979) [6]	
Yüksek plastisiteli kil	12.5N
Orta plastisiteli kil	7.5N
Düşük plastisiteli kil	3.75N
Kulhaw & Mayne (1990) [7]	c _u /Pa=0,06N
Sivrikaya & Toğrol (2002) [8]	
Yüksek plastisiteli kil	6.82N ₆₀
Düşük plastisiteli kil	4.93N ₆₀
İnce daneli zeminler	6.18N ₆₀

*Pa: Atmosferik basınç=100kPa

İlgili kilometre aralığında yapılan ve bu çalışmada yararlanılan 7 adet sondaj logu incelenerek elde edilen düzeltilmiş SPT-N₆₀ değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. SPT-N₆₀ değerlerinin derinlikle değişimi

Şekil 3.2’de çizilen dağılımda görüldüğü gibi, ilgili aralıkta açılan sondajlara ait SPT-N değerleri genel olarak birbiri ile uyumlu olup, eklerde verilen sondaj logları incelendiğinde kil birimde bant şeklinde geçen granüler birimler sebebiyle yer yer SPT değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir. Çizilen derinlik-SPT-N₆₀ grafiğinde ve idealize edilen dolgu taban zeminindeki kil birimde parametre belirlenirken bu yüksek değerler dikkate alınmamıştır.

3.1.3. PMT deneyleri kullanılarak drenajsız kayma dayanımı belirlenmesi

Presiyometre deneyi (PMT) sondaj kuyusu çeperindeki zemine radyal yönde gerilme uygulanması ve bu gerilmenin kuyu çeperinde sebep olduğu deformasyonun ölçülmesi şeklinde gerçekleştirilen bir arazi deney yöntemidir [17]. Kuyu çeperinde ölçülen gerilme ve deformasyon ilişkilerinden yola çıkılarak zemin mühendislik parametreleri ve deformasyon modülleriyle birlikte temel taşıma kapasitesi ve oturma miktarı tahmin edilebilmektedir.

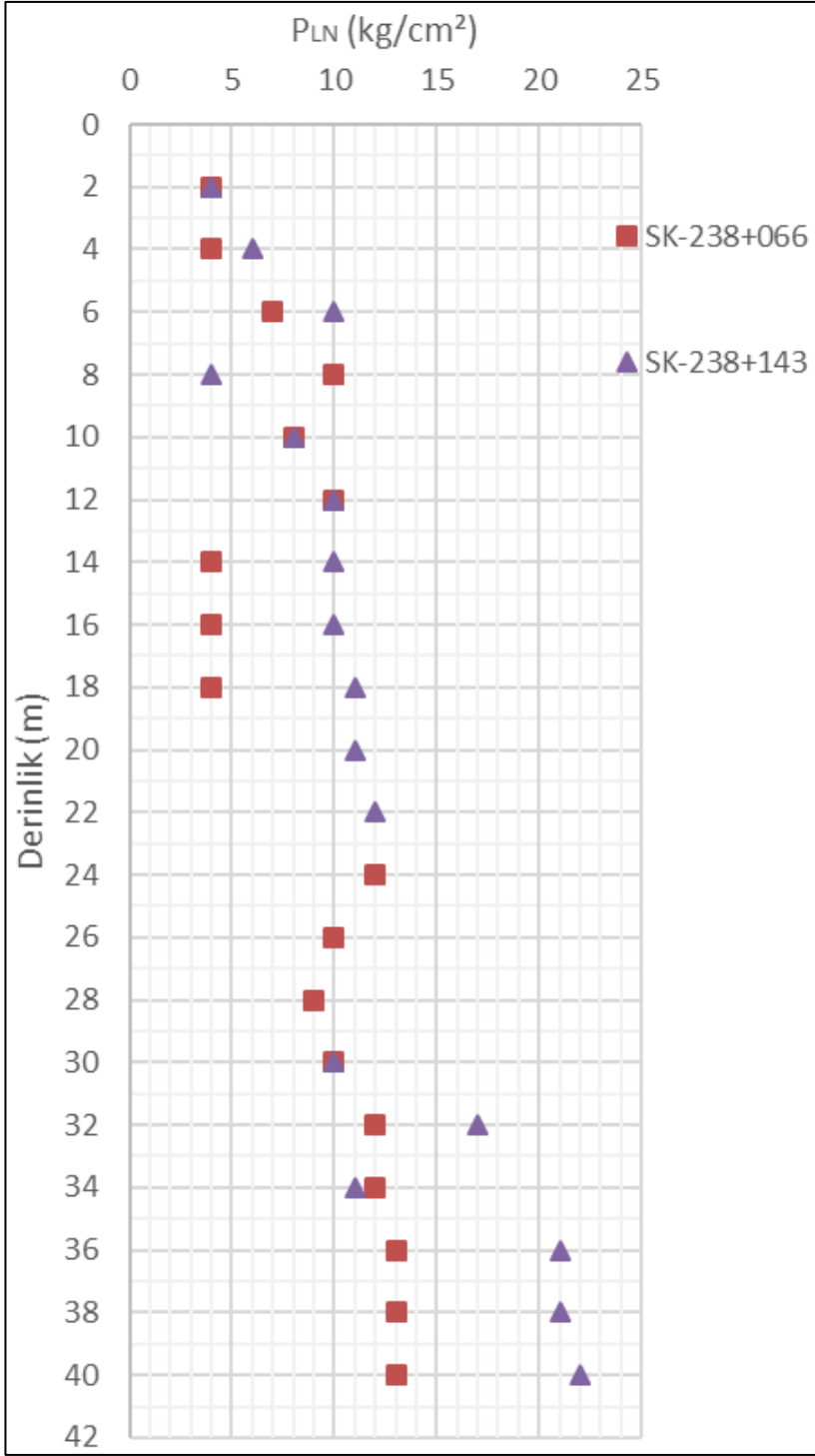
Proje alanında özellikle köprü geçişlerinin olduğu ve birim olarak kritik görülen kesimlerde sondaj kuyularında PMT deneyi uygulanmış ve geoteknik değerlendirmelerde kullanılmıştır.

Presiyometre deneyinden elde edilen net limit basınç (P_{LN}) değerlerini kullanılarak kohezyonlu zeminlerde drenajsız kayma dayanımı belirlemeye yönelik literatürde yer alan ve bu çalışmada yararlanılan ampirik ilişkiler Çizelge 3.5'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.5. PMT – drenajsız kayma dayanımı (c_u) ilişkileri

Livneh ve Uzan (1970) [9] Kati killer Çok Kati killer	$c_u = P_{LN}/\beta_p$ $\beta_p = 6,5$ $\beta_p = 12$
Amar ve Jezequel. (1972) [10]	$c_u = 0,25 + (P_{LN}/10)$
Baguelin vd. (1978) [11]	$c_u = 0,67x(P_{LN})^{0,75}$
Amar vd. (1991) [12] $P_{LN} < 300\text{kPa}$ $P_{LN} > 300\text{kPa}$	$c_u = P_{LN}/\beta_p$ $\beta_p = 5,5$ $\beta_p = 10$
Briudad (1992) [13]	$c_u = 0,21xP_{LN}^{0,75}$

PMT loglarından yararlanılarak belirlenen net limit basıncı değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. P_{LN} değerinin derinlikle değişimi

PMT deneylerine ait loglar incelendiğinde P_{LN} değerlerinin kil birimde bant şeklinde geçilen granüler birimler sebebiyle yer yer yükseldiği gözlenmiştir. Ancak Şekil 3.3'te verilen grafikte ve idealize edilen dolgu taban zeminindeki kil birim için drenajsız kayma dayanımı belirlenirken güvenli tarafta kalmak adına yüksek değerler göz ardı edilmiş olup, minimum değerlerle işlemler gerçekleştirilmiştir.

3.1.4. CPT deneyleri kullanılarak drenajsız kayma dayanımı belirlenmesi

CPT deneyi, SPT deneyine kıyasla sürekli bir zemin profili sağlamaktadır ve deney sırasında koni ucu direnci (q_c), koni sürtünme direnci (f_s), koni gerisindeki boşluk suyu basıncı (u_2) başta olmak üzere tek seferde birden fazla okuma toplanmaktadır. Bu okumalar, yeraltı stratigrafisini değerlendirmek için kullanılan zemin parametrelerini vermek üzere yorumlanmaktadır.

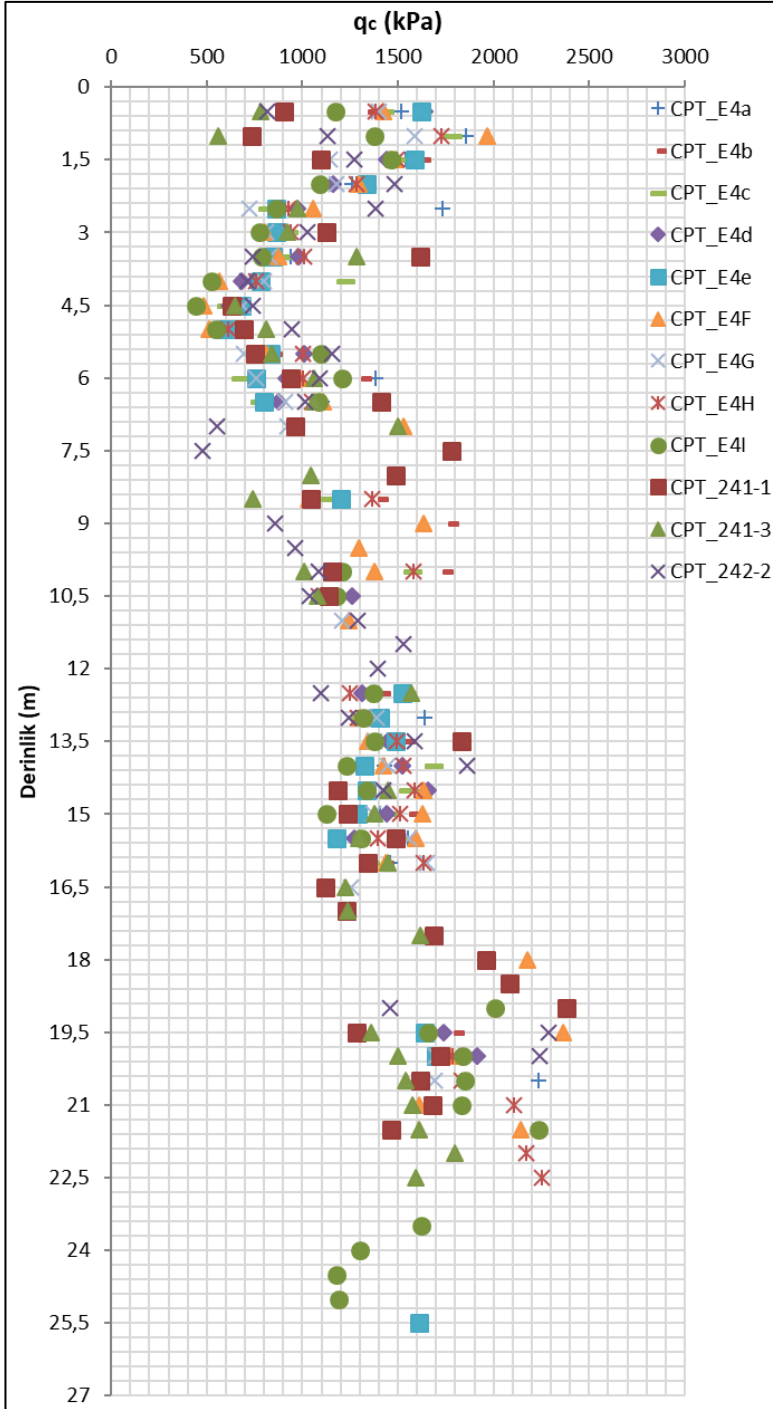
Proje alanında özellikle zayıf birimlerin görüldüğü ova geçişlerinde zemin profilini, kil birimin drenajsız kayma dayanımını ve oturma miktarını belirlemede CPT deney verileri kullanılmıştır.

CPT deneyi ile elde edilen koni direnci (q_c) ile drenajsız kayma dayanımı arasındaki ilişkiyi veren en genel formül Eşitlik 3.3'te verilmiştir. Eşitlikte verilen σ_{vo} toplam örtü yükü ve N_k koni faktörüdür. [14-15]

$$c_u = \frac{(q_c - \sigma_{vo})}{N_k} \quad (3.3)$$

Fugro (2004) koni faktörünü normal konsolide killer için $N_k=15-16$, aşırı konsolide killer için $N_k=18-19$ olarak önerdiğinden [16-17], ilerleyen bölümlerde yapılan incelemeler ile belirlendiği üzere (Şekil 4.4) yaklaşık 20m derinliğe kadar aşırı konsolide killerin yer aldığı çalışma alanında 20m derinliğe kadar killerde drenajsız kayma dayanımı hesaplamalarında koni faktörü $N_k=18$ olarak, 20m'den sonra killerde drenajsız kayma dayanımı hesaplamalarında koni faktörü $N_k=15$ olarak seçilmiştir.

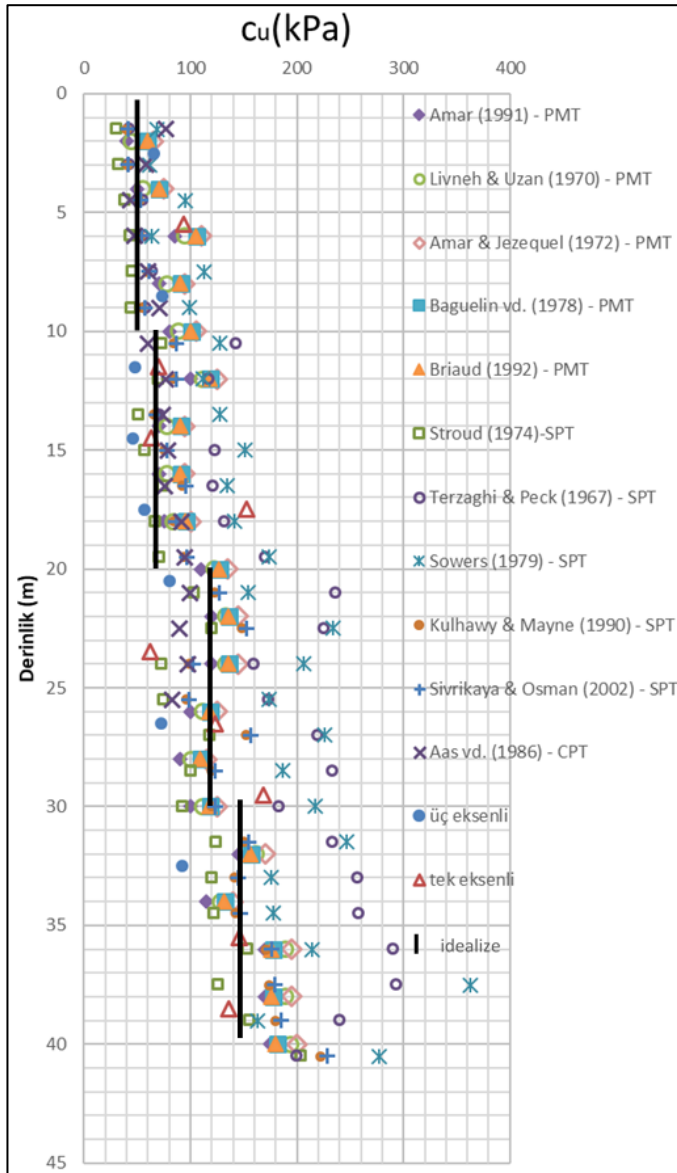
CPT deneyi arazide düşeyde 2cm aralıkla uygulanmış olup dolgu taban zemininde mukavemet parametreleri belirlenirken 0,5m kalınlığında tabakaların koni direnci değerlerinin ortalaması alınarak her bir tabaka için ortalama drenajsız kayma dayanımı elde edilmiştir. CPT deney verilerinden elde edilen her 0,5m kalınlığındaki tabakanın ortalama koni direncinin derinlikle değişimi Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. q_c değerlerinin derinlikle değişimi

Şekil 3.4'te çizilen dağılımda görüldüğü gibi ilgili aralıkta yapılan CPT deneyleri birbiri ile uyumlu q_c değerleri vermiş olup, CPT logları incelendiğinde kil birimde bant şeklinde geçilen granüler birimler sebebiyle bu değerlerde yer yer artış olduğu gözlenmesine rağmen idealize edilen dolgu taban zeminindeki kil birimde parametre belirlenirken geçilen bu yüksek değerler dikkate alınmadan bütün CPT deneylerinin kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen arazi deneylerinin her biri kullanılarak dolgu tabanındaki kil birim için farklı yöntemlerle ayrı ayrı drenajsız kayma dayanımları belirlenmiştir ve bu yöntemleri karşılaştırmak amacıyla her bir yöntemden elde edilen drenajsız kayma dayanımlarının ortalamaları alınarak elde edilen ortalama drenajsız kayma dayanımı değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

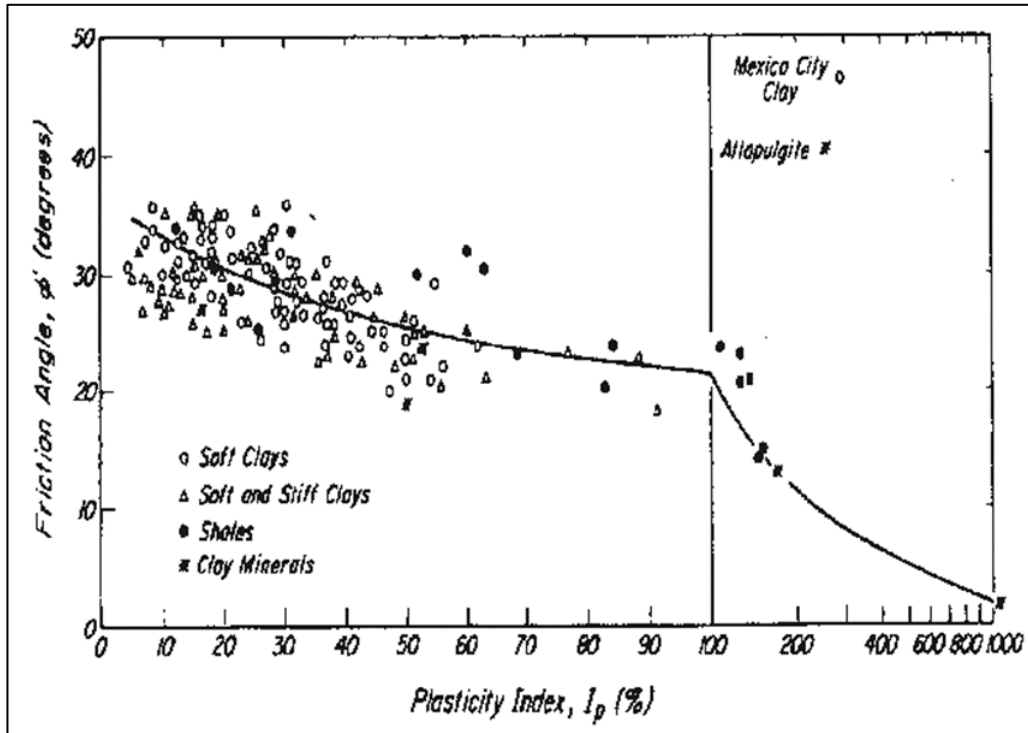


Şekil 3.5. Drenajsız kayma dayanımı değerlerinin derinlikle değişimi

Farklı yöntemler kullanılarak elde edilen ortalama drenajsız kayma dayanımlarının derinlikle değişimleri incelendiğinde dolgu tabanı 10m kalınlığında kil tabakalara ayrılmış ve her tabaka için idealize drenajsız kayma dayanımı belirlenmiştir.

Şekil 3.5 incelendiğinde proje alanındaki killer için SPT deney verilerinden yararlanılan Terzaghi ve Peck (1967) ve Sowers (1979) ilişkilerinin diğerlerine kıyasla genellikle daha yüksek drenajsız kayma dayanımı değerleri verdiği tespit edilmiştir. CPT ve PMT verilerinin ortalama değerlere yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu sebeple idealize drenajsız kayma dayanımı belirlenirken, tüm sondajlarda daha dar bir aralıkta yer alan ve laboratuvar sonuçları ile daha uyumlu olan, aynı zamanda daha güvenli tarafta kalınmasına sebep olacak SPT verilerini kullanan Stroud (1974), Kulhawy ve Mayne (1990), Sivrikaya ve Toğrol (2002) ilişkilerinden, CPT ve PMT verilerinden elde edilen değerlere yakın değerler belirlenmiştir. Belirlenen idealize drenajsız kayma dayanımlarıyla kısa dönem stabilite analizleri yapılmıştır.

Uzun dönem ve sismik durum analizlerinde ise drenajlı durumda kilin davranışında içsel sürtünme açısı ve efektif kohezyon değeri birlikte etkili olacağı için içsel sürtünme açısı plastisite indisi (PI) değerine göre Terzaghi, Peck ve Mesri (1996)'nin geliştirdiği ve Şekil 3.6'da verilen ilişki yardımıyla belirlenmiştir. Efektif kohezyon değerinin ise Danish Standarts DS415 kaynağında önerildiği üzere drenajsız kayma dayanımı değerinin yaklaşık olarak onda biri değerine eşit olduğu kabul edilmiştir [19].



Şekil 3.6. Kilde uzun dönem parametreler [18]

Kil tabakaları için belirlenen ve analizlerde kullanılan kısa dönem ve uzun dönem mukavemet parametreleri ile laboratuvar sonuçlarından yararlanılarak elde edilen doymun birim hacim ağırlık değerleri (γ_d) Çizelge 3.6'da verilmiştir.

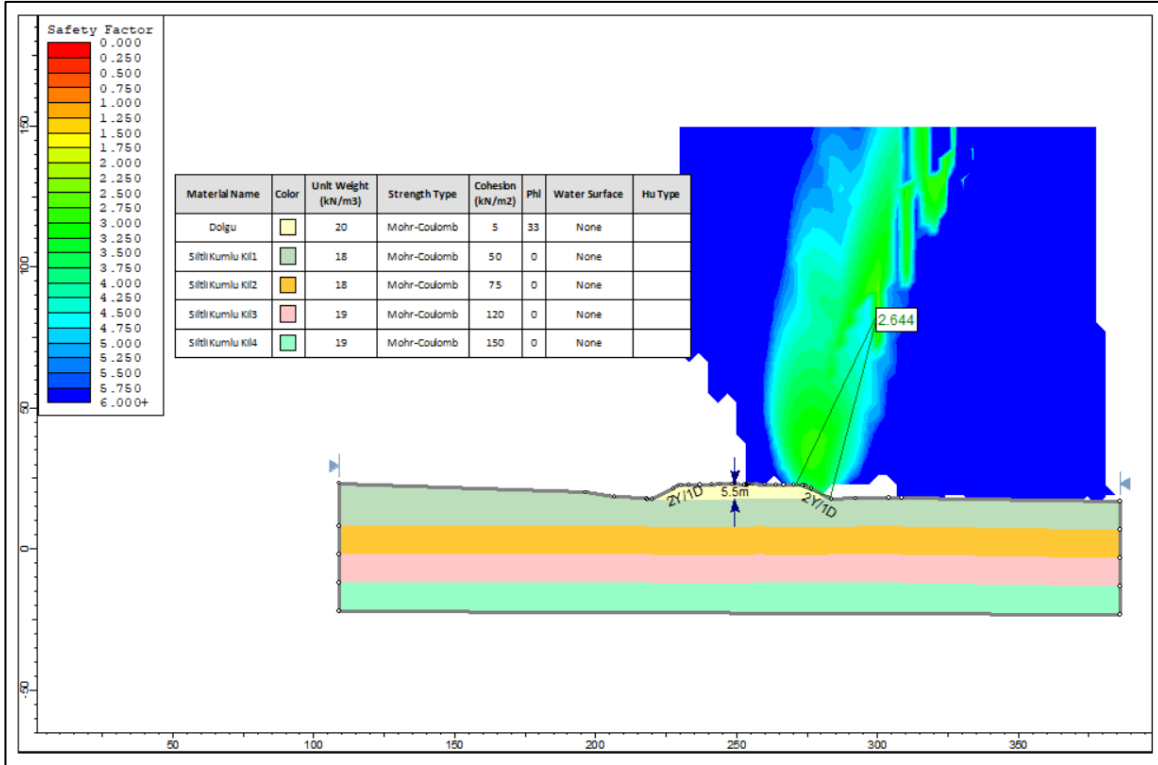
Çizelge 3.6. Derinliklerine göre ortalama parametreler

Derinlik	Birim	γ_d (kN/m ³)	SPT-N ₆₀	PI	Parametre	
					Kısa Dönem	Uzun Dönem
0-10m	Siltli Kil	18	8	35	$c_u = 50\text{kPa}$	$c'=5\text{kPa}$ ve $\phi'=26^\circ$
10-20m	Siltli Kil	18	14	35	$c_u = 75\text{kPa}$	$c'=5\text{kPa}$ ve $\phi'=26^\circ$
20-30m	Siltli Kil	19	21	30	$c_u = 120\text{kPa}$	$c'=10\text{kPa}$ ve $\phi'=26^\circ$
30-40m	Siltli Kil	19	22	25	$c_u = 150\text{kPa}$	$c'=15\text{kPa}$ ve $\phi'=27^\circ$

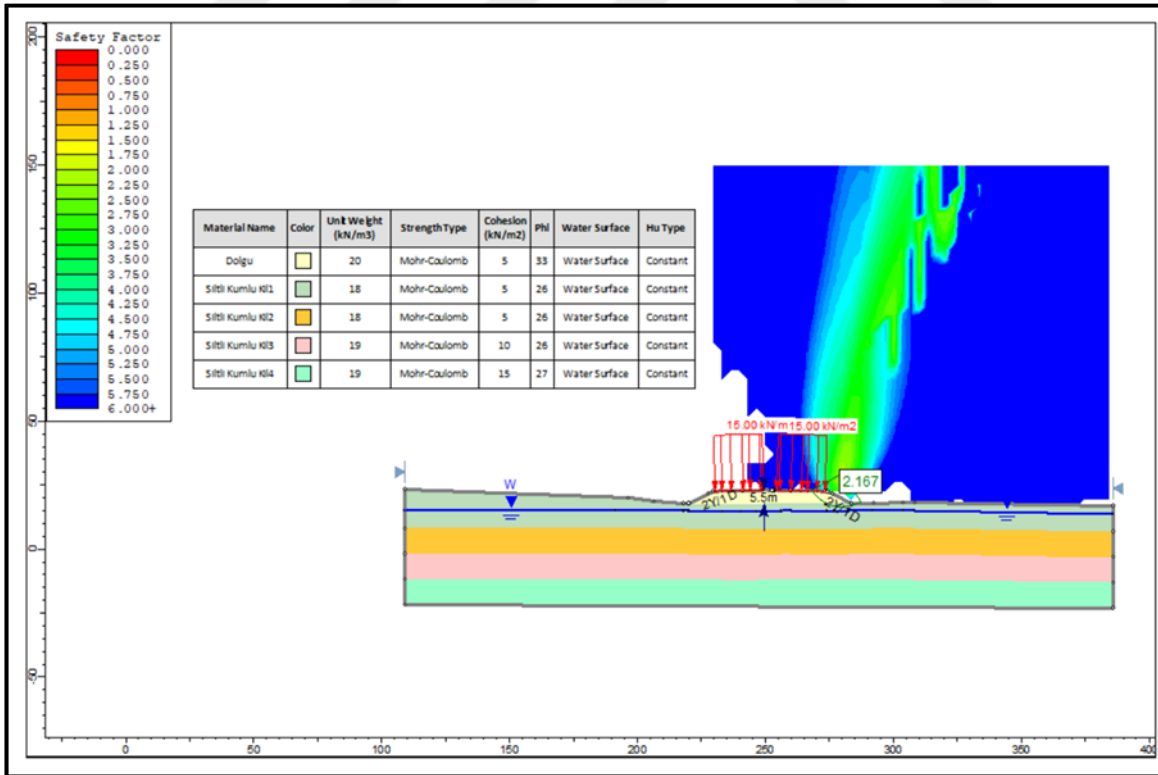
3.2. Stabilité Analizi

Stabilite analizlerinde yol dolgusu üzerine kısa dönem için araç geçişi olmayacağı öngörülerek trafik yükü etki ettirilmemiş olup, uzun dönem ve sismik yükleme durumunda trafik yükü 15kN/m² olarak etki ettirilmiştir. Ayrıca sismik durumda yatay yönde ivme uygulanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Deprem tehlike haritasından yararlanılarak ilgili kilometre aralığında sismik durum için yatay deprem ivmesi $a=0,2g$ olarak analizlerde kullanılmıştır.

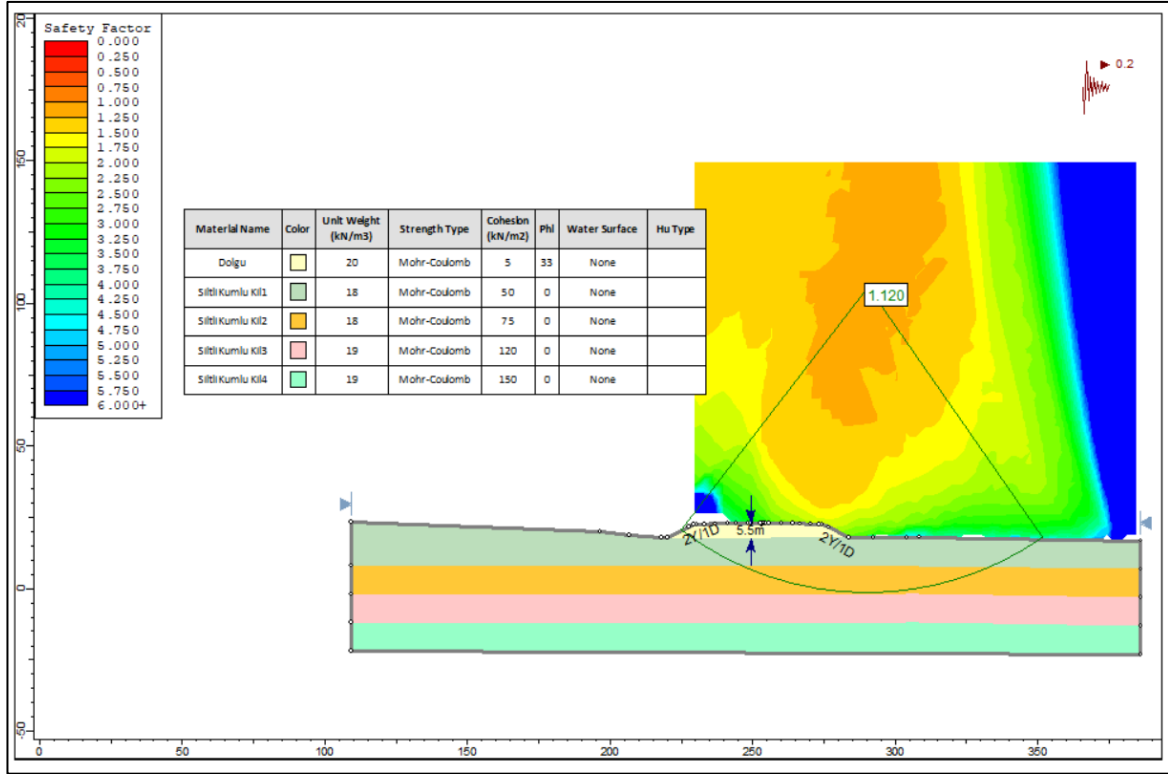
Sondajlar incelendiğinde dolgu taban zemininde yaklaşık olarak 3m derinliğinde yeraltı suyuna rastlanmış olup, Km:241+200-242+300 aralığında 3,5-5,5m arasında değişen dolgu yükseklikleri arasından en kritik durumu yansıtmaması sebebiyle en yüksek dolgu olan 5,5m yüksekliğindeki Km:241+620 dolgusu için stabilite analizleri gerçekleştirilmiş ve analizlerde yararlanılan sondaj derinlikleri 40m olduğu için dolgu tabanı maksimum 40m derinlikte modellenmiştir. Kısa dönem, uzun dönem ve sismik durum analiz sonuçları Şekil 3.7, Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da verilmiştir.



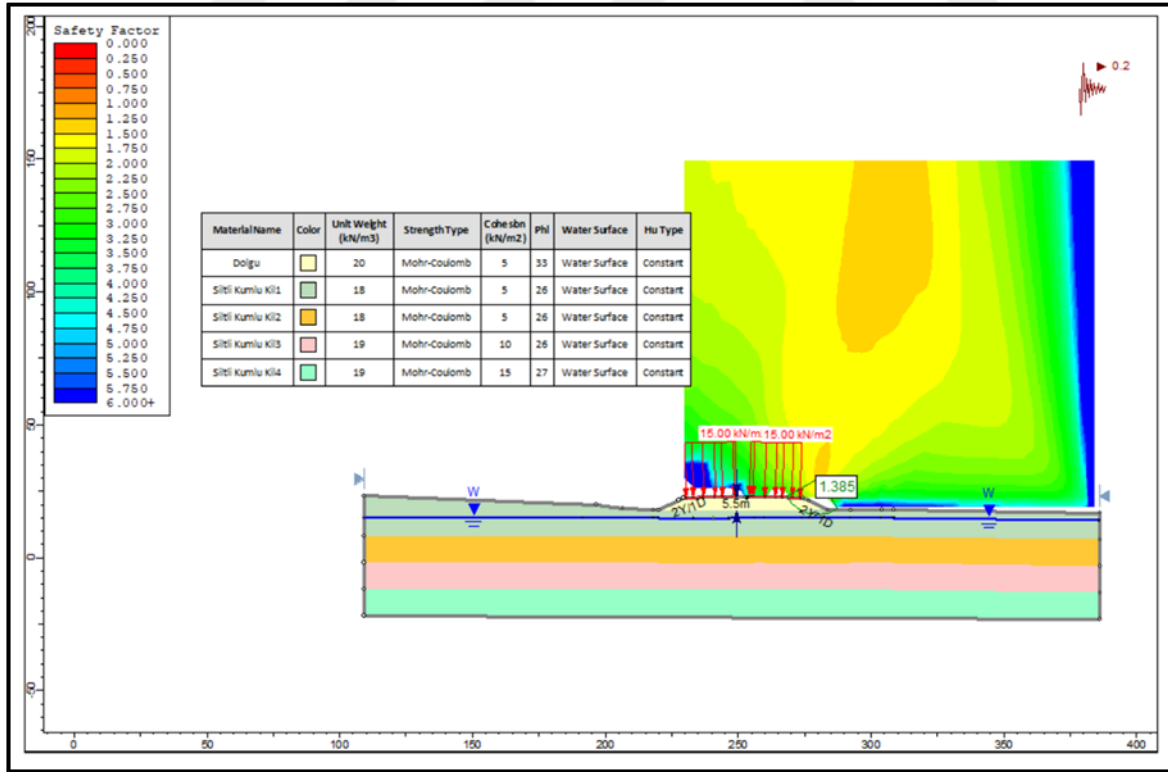
Şekil 3.7. Ortalama parametrelerle statik durum stabilite analizi – Kısa dönem



Şekil 3.8. Ortalama parametrelerle statik durum stabilite analizi – Uzun dönem



Şekil 3.9. Ortalama parametrelerle sismik durum stabilite analizi – Kısa dönem



Şekil 3.10. Ortalama parametrelerle sismik durum stabilite analizi – Uzun dönem

Test dolgusu için ortalama parametrelerle yapılan kısa dönem, uzun dönem ve sismik durum analizleri sonucunda elde edilen kayma yenilmesine karşı güvenlik sayıları Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Hd=5,5m olan dolgu için stabilite analiz sonuçları

Dolgu Km	Hmax (m)	Şev eğimi (Y/D)	Statik Durum		Sismik Durum	
			Kısa	Uzun	Kısa	Uzun
Km:241+620	5,5	2/1	2,6	2,1	1,1	1,3

Farklı deneylerle ve yöntemlerle elde edilen drenajsız kayma dayanımlarıyla yapılan analizlerin sonuçları incelendiği zaman kayma dairesinin tüm analizlerde dolgudan geçtiği ve tasarımı dolgu şev eğiminin kontrol ettiği gözlenmiştir. Dolayısı ile kalın alüvyon tabaka üzerine 2Y/1D şev eğimi ile imal edilen dolgularda herhangi bir stabilite problemi beklenmediği tespit edilmiştir.



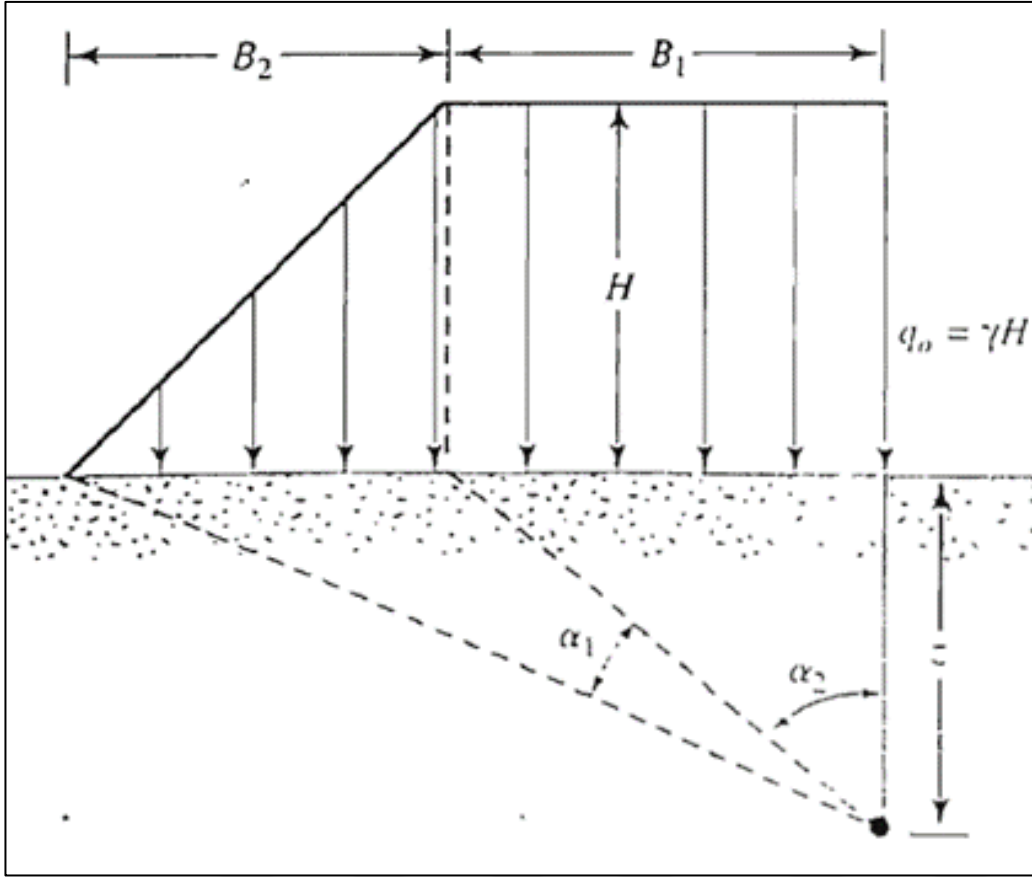
4. OTURMA DEĞERLENDİRMELERİ

İlgili kilometre aralığında yapılan arazi çalışmaları ve laboratuvar verilerine göre dolgu; killi, kumlu, siltli alüvyon niteliğinde kohezyonlu birim üzerine teşkil edilecektir. Buna bağlı olarak dolgu imalatının sebep olduğu gerilme artışı altında dolgu tabanında özellikle 0-40m derinlik aralığındaki alüvyon birimde elastik oturmanın yanında ciddi mertebelerde konsolidasyon oturması beklenmektedir. Elastik oturmalar dolgu imalatı sırasında hızlı bir şekilde tamamlanacağı için dolgu tabanında sadece zamana bağlı konsolidasyon oturması hesabı yapılmıştır.

Bu bölümde arazi ve laboratuvar verileri kullanılarak farklı yöntemlerle elde edilen konsolidasyon parametrelerinden yararlanılarak 1-boyutlu konsolidasyon analizi ve sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanan oturma miktarları ile hesaplanan oturma miktarlarının ve tamamlanma sürelerinin, test dolgusundan alınan arazi ölçümleri ile karşılaştırmalı olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

4.1. Analitik Yöntemle Oturma Değerlendirmeleri

Kohezyonlu zeminde gerilme artışı altında meydana gelen konsolidasyon oturması belirlenirken öncelikle dolgu taban zemininde oturması beklenen kil tabakası kalınlığını belirlemek adına sondaj loglarından yararlanılmış ve Şekil 3.2’de verilen SPT-N₆₀ değerlerinin derinlikle değişimi incelendiğinde 40m derinlikte SPT-N₆₀ değerlerinin yaklaşık olarak 30’a ulaştığı görülmüştür. Derinlikle artan bir eğilim gösteren grafikte 40m derinlikten sonra da SPT-N₆₀ değerlerinin 30’un üzerine çıkacağı öngörülmüş ve bu sebeple de oturma hesaplarında oturması beklenen tabaka kalınlığı 40m olarak alınmıştır. Ardından dolgu taban zemini tabakalara ayrılmış olup, her bir tabakanın orta noktasında meydana gelen gerilme artışını belirlenmiştir. Gerilme artışı belirlenirken 45m platform genişliğine sahip dolgunun taban zemininde oturması beklenen 0-40m aralığı boyunca gerilme artışının derinlik ile azalacağı göz önünde bulundurulmuştur. Bu sebeple derinlikle azalan gerilme artışını hesaplarken Osterberg’ in 1957 ‘de geliştirdiği H yüksekliğindeki dolgu yükünün z kadar derinlikte sebep olduğu gerilme artışını veren Eşitlik 4.1 kullanılmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Dolgu yüklemesinde derinlikle azalan düşey gerilme artışı ($\Delta\sigma$) hesabı [20]

$$\Delta\sigma = \frac{q_o}{\pi} \left[\left[\frac{B_1+B_2}{B_2} \right] (\alpha_1+\alpha_2) - \frac{B_1}{B_2} (\alpha_2) \right] \quad (4.1)$$

$$q_o = H_d \times \gamma \text{ (kPa)} \quad (4.2)$$

Burada;

H_d : Dolgu yüksekliği (m)

γ =Dolgu birim hacim ağırlığı = 20kN/m³

α_1, α_2 = Gerilme artışının hesaplandığı noktanın, şevin başladığı ve bittiği yerle yaptıkları açılar (radian)

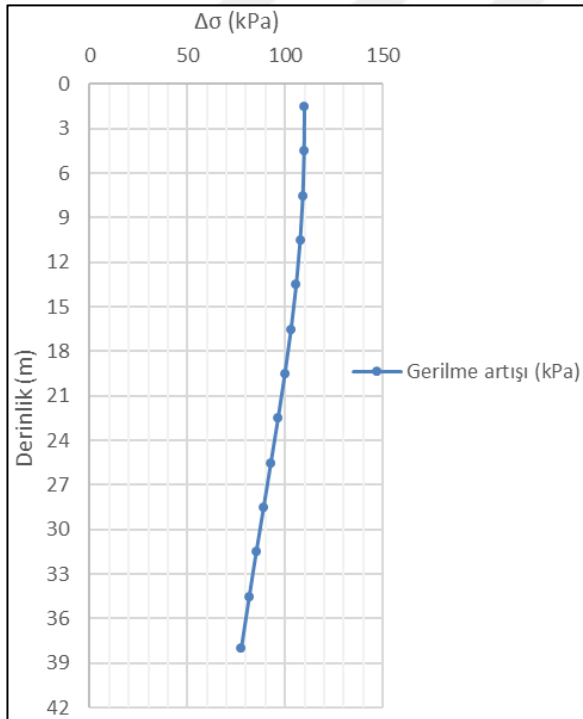
$\Delta\sigma$ = Tabii arazide z kadar derinlik altında H yüksekliğindeki yol dolgusunun sebep olacağı gerilme artışı (kPa)' dır.

Test dolgusunda maksimum dolgu yüksekliğine sahip Km:241+620'de dolgu yüksekliği 5,5m, platform genişliği ise 45m'dir. Dolayısıyla dolgu için $B_1=22,5m$ ve $B_2=11m$ olarak belirlenmiştir. 3m kalınlığında tabakalara ayrılan dolgu tabanı için tabakaların orta noktaları

ve bu noktalara etki eden gerilme artışları Çizelge 4.1’de, gerilme artışının derinlikle değişimi Şekil 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Derinlikle azalan düşey gerilme artışı hesabı

Tabaka Aralığı (m)	Tabaka Orta Noktası (m)	α_1 (rad)	α_2 (rad)	$\Delta\sigma$ (kPa)
0 - 3,0	1,5	0,02	1,50	110,0
3,0 - 6,0	4,5	0,06	1,37	109,8
6,0 - 9,0	7,5	0,10	1,25	109,1
9,0 - 12,0	10,5	0,13	1,13	107,8
12,0 - 15,0	13,5	0,16	1,03	105,7
15,0 - 18,0	16,5	0,18	0,94	103,0
18,0 - 21,0	19,5	0,19	0,86	99,9
21,0 - 24,0	22,5	0,19	0,79	96,4
24,0 - 27,0	25,5	0,20	0,72	92,7
27,0 - 30,0	28,5	0,20	0,67	88,9
30,0 - 33,0	31,5	0,20	0,62	85,2
33,0 - 36,0	34,5	0,19	0,58	81,6
36,0 - 40,0	38,0	0,19	0,53	77,5



Şekil 4.2. Gerilme artışının derinlikle değişimi

Bu çalışma kapsamında kohezyonlu zeminde gerilme artışı altında meydana gelen konsolidasyon oturması, sıkışma indisleri, hacimsel sıkışma katsayıları ve Menar vd. (1962)’nin geliştirdiği yarı ampirik yöntem kullanılarak hesaplanmıştır.

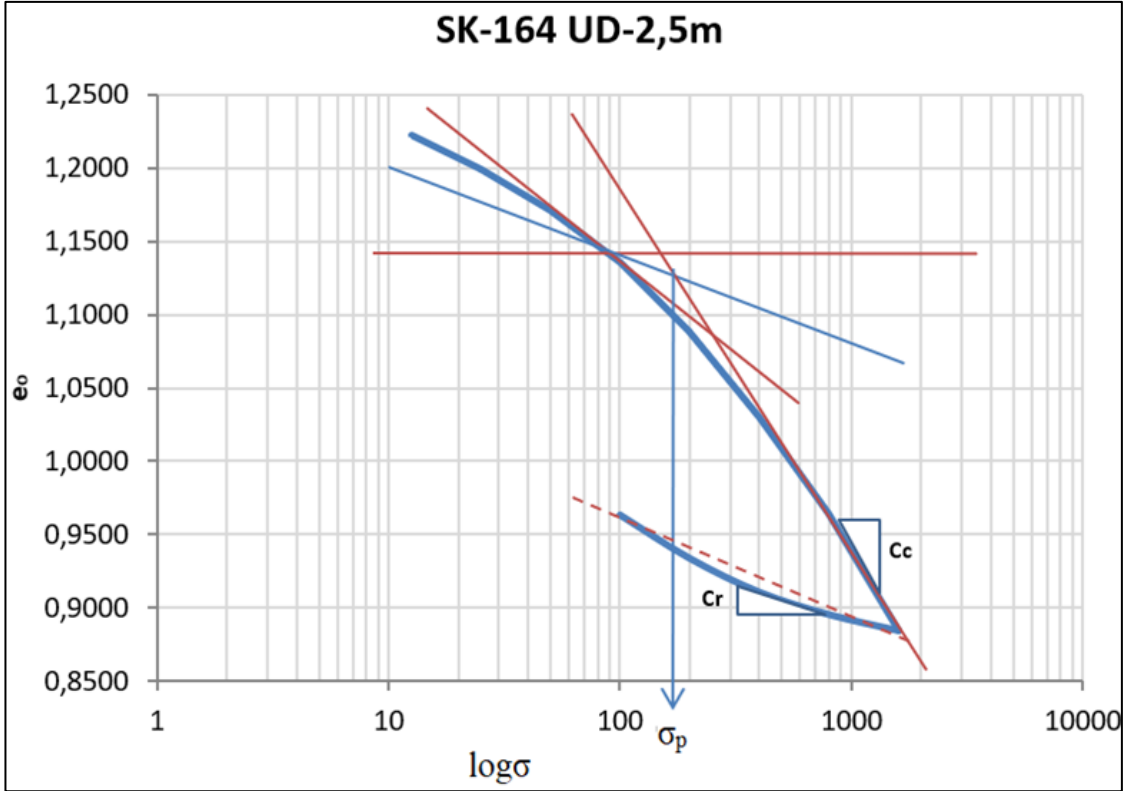
4.1.1. Sıkışma indisleri ile (c_c , c_r) konsolidasyon oturması değerlendirmeleri

Sıkışma indisleri kullanılarak dolgu taban zemininde meydana gelen konsolidasyon oturmasını hesaplamak amacıyla öncelikle ilgili kilometre aralığındaki sondajlardan alınan her UD numunesi üzerinde laboratuvarında gerçekleştirilen konsolidasyon deney verilerinden yararlanılarak boşluk oranı (e_0), sıkışma indisi (c_c), yeniden sıkışma indisi (c_r) ve aşırı konsolidasyon oranı (AKO) tespit edilmiştir.

UD numuneleri 2,5m derinlikten itibaren her 3m'de bir alınmakta olup, 40m kalınlığındaki dolgu taban zemini için konsolidasyon parametreleri belirlenirken her tabaka için sondajlarda ilgili derinlikten alınan numunelerden elde edilen değerlerin ortalamaları alınmıştır. Örneğin 0-3m aralığındaki tabaka için boşluk oranı belirlenirken, ilgili kilometre aralığında açılan sondajlar arasında 2,5m derinlikten numune alınan sondajlar kullanılarak elde edilen boşluk oranlarının ortalamaları alınmış ve bu tabaka için bütün konsolidasyon parametreleri (e_0 , c_c , c_r) bu şekilde hesaplanmıştır. Bu sebeple oturma hesaplanırken dolgu tabanı 3m kalınlığında tabakalara ayrılmış ve her tabaka için aynı şekilde ortalama konsolidasyon parametreleri belirlenmiştir.

Örnek olarak SK-164 sondajına ait 2,5m derinlikteki UD-1 numunesi için konsolidasyon parametrelerinin tespiti burada detaylı olarak verilmiştir. Bu numune için başlangıç efektif örtü yükü gerilmesi;

$\sigma'_{ov}=2,5 \times 18=45\text{kPa}$ olarak hesaplanmış olup SK-164 sondajına ait konsolidasyon deney verilerinden UD-1 numunesine ait boşluk oranı-log basınç grafiği çizilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. SK-164 sondajında UD-1 numunesine göre çizilen boşluk oranı-log basınç grafiğiyle aşırı konsolidasyon oranının belirlenmesi

Casagrande (1963b) yöntemi ile ön konsolidasyon basıncı $\sigma_p=150\text{kPa}$ olarak belirlenmiştir. Ön konsolidasyon basıncı değerlerinin, ilgili numunenin alındığı derinlikteki efektif düşey gerilmeye oranı ile aşırı konsolidasyon oranı (AKO) elde edilmiştir (Eşitlik 4.3). Sıkışma indisi (c_c) sıkışma eğrisinin, yeniden sıkışma indisi (c_r) ise boşalma eğrisinin eğimine eşittir. [21]

$$AKO = \frac{\sigma_p}{\sigma'_{vo}} \quad (4.3)$$

Tüm bu veriler ışığında SK-165 sondajına ait UD-1 numunesi için belirlenen AKO, c_c , c_r değerleri aşağıda verilmiştir.

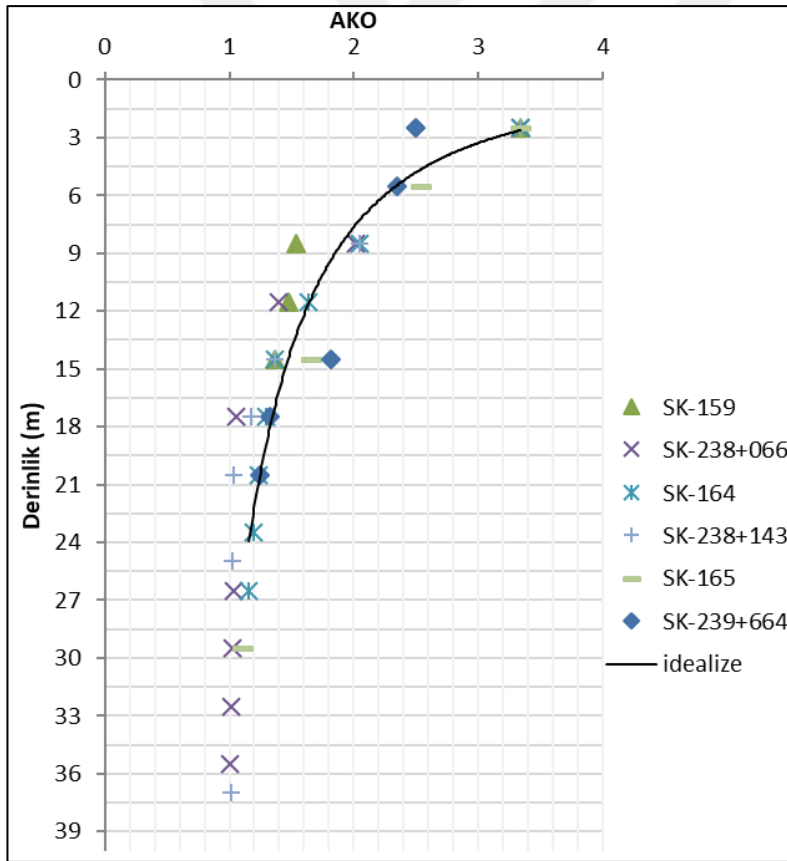
$$AKO = \frac{\sigma_p}{\sigma'_{vo}} = \frac{150}{45} = 3,33$$

$$c_c = \frac{0,9644 - 0,8849}{\log 1600 - \log 800} = 0,264$$

$$c_r = \frac{0,8958 - 0,8849}{\log 1600 - \log 800} = 0,036$$

$\frac{c_r}{c_c} = \frac{0,036}{0,264} = 0,136$ olarak hesaplanmıştır. Terzaghi ve Peck (1967) bu oranın $c_r/c_c=0,02-0,2$ aralığında değişiklik gösterdiğini ileri sürmüştür [4]. İlgili kilometre aralığında açılan sondajlardan alınan numuneler üzerinde yapılan konsolidasyon deney sonuçları incelendiğinde hesaplanan bu oran 0,05-0,2 arasında değişmekte olup literatür verileriyle uyumlu sonuçlar vermektedir.

İlgili kilometre aralığında açılan sondajlardan alınan her bir numune için örnekte anlatıldığı gibi aşırı konsolidasyon oranları belirlendikten sonra, AKO-derinlik ilişkisi çizilmiş ve derinlikle azalan AKO değeri idealize edilerek her 3m kalınlığındaki tabaka için yaklaşık olarak AKO oranı kabulü yapılmıştır. Konsolidasyon deney verilerinden yararlanılarak çizilen derinlik-AKO ilişkisi Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Derinlik-AKO ilişkisi

Şekil 4.4'te verilen derinlik-AKO ilişkisinden yola çıkılarak proje alanındaki kil birimin yaklaşık 20m derinliğe kadar aşırı konsolide olduğu belirlenmiş ve 5,5m yüksekliğindeki yol dolgusunun tabakaların orta noktasında sebep olduğu gerilme artışı altında taban

zemininde meydana gelen konsolidasyon oturması miktarı Casagrande (1936b)'nin geliştirdiği yöntemle hesaplanmıştır. Hesap detayları Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Hd=5,5m yüksekliğindeki dolgu taban zemininde sıkışma indisleri ile konsolidasyon oturması hesabı

Hd (m)	YASS (m)	Tabaka Aralığı (m)		H (m)	σ_v (kPa)	eo	Cc	Cr	AKO	σ_p (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	Sc (cm)
5,5	3,0	0	3,0	3,0	27,0	1,051	0,240	0,040	2,96	80	110,0	10,93
5,5	3,0	3,0	6,0	3,0	66,0	1,112	0,277	0,047	2,42	160	109,8	4,20
5,5	3,0	6,0	9,0	3,0	90,0	1,008	0,261	0,036	1,89	170	109,1	4,16
5,5	3,0	9,0	12,0	3,0	114,0	1,046	0,518	0,039	1,58	180	107,8	8,02
5,5	3,0	12,0	15,0	3,0	138,0	0,957	0,275	0,056	1,45	200	105,7	5,00
5,5	3,0	15,0	18,0	3,0	162,0	1,119	0,292	0,042	1,30	210	103,0	4,85
5,5	3,0	18,0	21,0	3,0	186,0	1,240	0,296	0,040	1,18	220	99,9	4,90
5,5	3,0	21,0	24,0	3,0	210,0	1,008	0,214	0,033	1,10	230	96,4	4,17
5,5	3,0	24,0	27,0	3,0	234,0	1,057	0,235	0,033	1,03	240	92,7	4,64
5,5	3,0	27,0	30,0	3,0	258,0	1,187	0,356	0,061	1,01	260	88,9	6,14
5,5	3,0	30,0	33,0	3,0	282,0	0,838	0,169	0,024	1,00	282	85,2	3,17
5,5	3,0	33,0	36,0	3,0	306,0	0,925	0,302	0,014	1,00	306	81,6	4,84
5,5	3,0	36,0	40,0	4,0	334,0	1,188	0,319	0,042	1,00	334	77,5	5,28
Toplam Oturma (cm):												70,3

Yapılan kabuller ile d23 noktasında 5,5m dolgu yüksekliği altında beklenen konsolidasyon oturması sıkışma indisleri kullanılarak yaklaşık 70cm mertebesinde hesaplanmıştır.

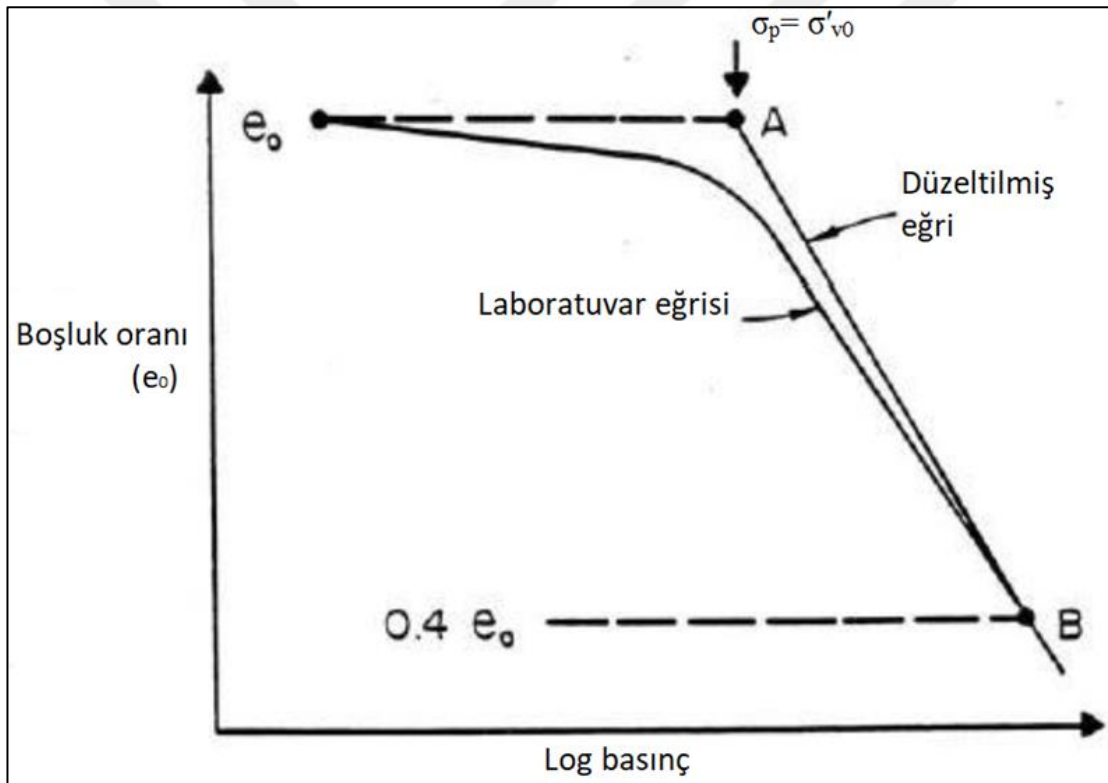
Sıkışma indisi arazi düzeltmesi

Sıkışma indisleri ile yapılan oturma hesaplarında, araziden numune alımı sırasında gerçekleşen örselenme miktarının etkisini en aza indirmek ve arazi davranışına en yakın davranışı tespit edebilmek amacıyla konsolidasyon deney verilerinden elde edilen ve sıkışma indisi değerini veren bakir sıkışma eğrisine bir arazi düzeltmesi uygulanmaktadır. Bu çalışma kapsamında düzeltilmiş arazi eğrileri elde edilirken Duncan & Buchignani (1976) yönteminden yararlanılmıştır.

Geotechnical Design Manual (GDM-Ch-12) kaynağında tariflendiği üzere Duncan & Buchignani (1976) yöntemi normal konsolide ve aşırı konsolide killerde farklı prosedürlerde uygulanmakta olup, her iki durum için gerekli düzeltme adımları aşağıda verilmiştir [22].

Normal konsolide killerde ($\sigma_p = \sigma'_{v0}$);

1. e_0 - $\log \sigma_0$ grafiğinde Casagrande (1936b) yöntemi ile ön konsolidasyon basıncını (σ_p) belirledikten sonra e_0 değerinden başlayarak ön konsolidasyon basıncı ve dolayısı ile efektif düşey gerilme (σ'_{v0}) değerine doğru yatay bir doğru çiziniz ve kesiştikleri yeri işaretleyiniz (A).
2. $0,4e_0$ değerinden yatay bir doğru çiziniz ve bu doğru ile konsolidasyon deney verilerinden elde edilen bakır sıkışma eğrisinin uzantısının kesiştiği noktayı işaretleyiniz (B).
3. İşaretlemiş olduğunuz bu iki noktayı (A ile B) birleştiriniz. Elde ettiğiniz bu eğrinin eğimi düzeltilmiş arazi sıkışma indisine eşittir (Şekil 4.5).

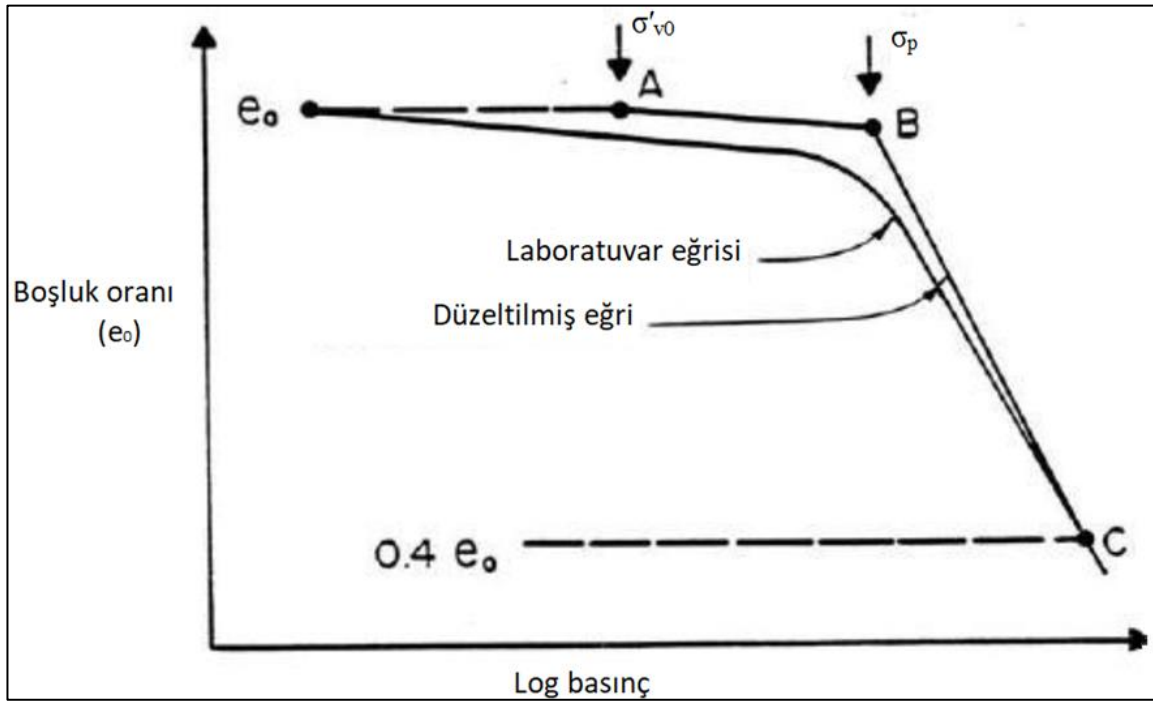


Şekil 4.5. Normal konsolide kilde arazi düzeltmesi

Aşırı konsolide killerde ($\sigma_p > \sigma'_{v0}$);

1. e_0 - $\log \sigma_0$ grafiğinde Casagrande (1936b) yöntemi ile ön konsolidasyon basıncını (σ_p) belirledikten sonra e_0 değerinden başlayarak efektif düşey gerilme (σ'_{v0}) değerine doğru yatay bir doğru çiziniz ve kesiştikleri yeri işaretleyiniz (A).

2. Efektif düşey gerilme (σ'_{v0}) değerinden (A noktasından) başlayarak, grafikteki boşaltma eğrisine paralel (c_r eğimi ile) ön konsolidasyon basıncı değerine doğru bir doğru çiziniz ve kesiştikleri yeri işaretleyiniz (B).
3. $0,4e_0$ değerinden yatay bir doğru çiziniz ve bu doğru ile konsolidasyon deney verilerinden elde edilen bakir sıkışma eğrisinin uzantısının kesiştiği noktayı işaretleyiniz (C).
4. İşaretlemiş olduğunuz bu iki noktayı (B ile C) birleştiriniz. Elde ettiğiniz bu eğrinin eğimi düzeltilmiş arazi sıkışma indisine eşittir (Şekil 4.6).



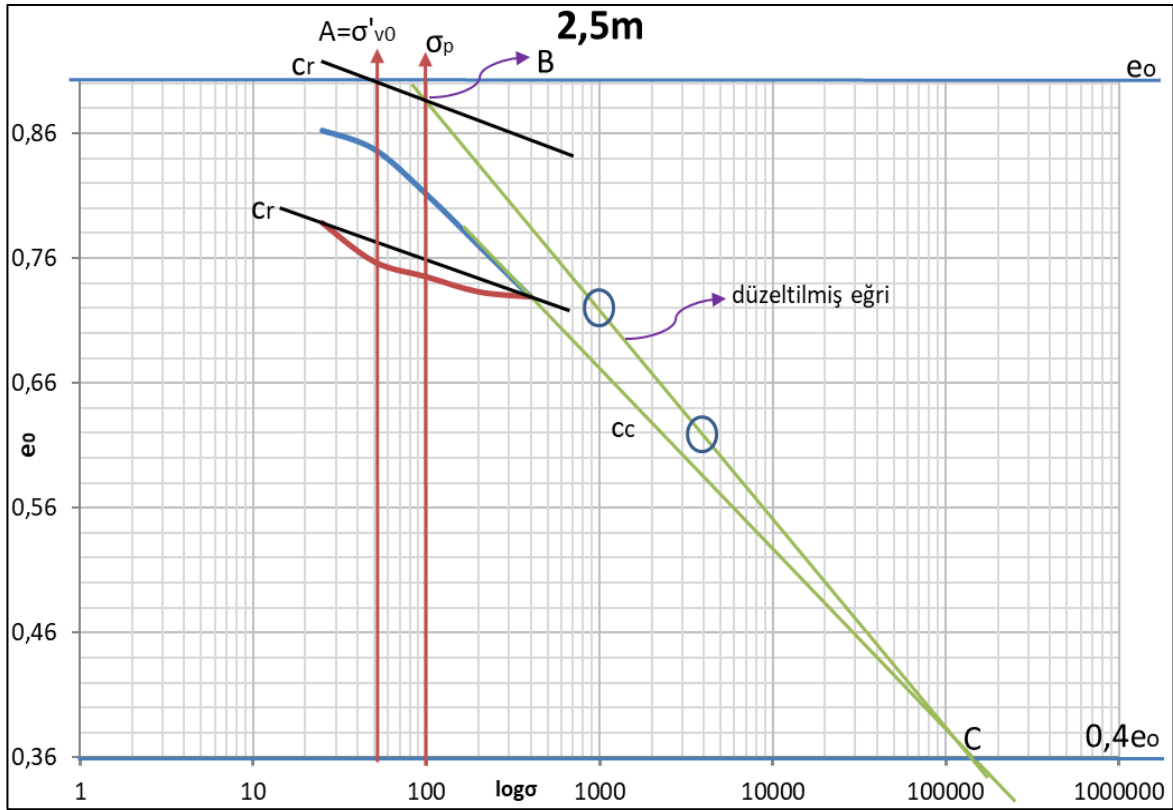
Şekil 4.6. Aşırı konsolide kilde arazi düzeltmesi

Duncan & Buchignani (1976) yöntemi ile yaklaşık 20m derinliğe kadar aşırı konsolide, 20m derinlikten sonra normal konsolide killerin bulunduğu çalışma alanında açılan sondajlardan alınan UD numuneleri üzerinde gerçekleştirilen konsolidasyon deney sonuçlarından elde edilen e_0 - $\log\sigma$ eğrileri kullanılarak her UD numunesi için arazi düzeltmesi uygulanmış ve 3m kalınlığında tabakalara ayrılan dolgu taban zemininde aynı derinlikten alınan numunelerden elde edilen değerlerin ortalamaları alınarak her tabaka için düzeltilmiş sıkışma indileri belirlenmiştir.

Düzeltilmiş sıkışma indisinin tespiti, örnek olarak sadece SK-239+664 sondajına ait 2,5m derinlikten alınan UD-1 numunesi üzerinde gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. SK-239+664 sondajı UD-1 numunesi

SK-239+664	
UD-1	
Derinlik	2,5m
e_0	0,904
$0,4e_0$	0,36
YASS (m)	5,0
σ'_{v0} (kPa)	54
σ_p (kPa)	100



Şekil 4.7. SK-239+664 sondajı UD-1 numunesinde sıkışma indisi arazi düzeltmesi

Şekil 4.7'de yuvarlak içine alınan iki nokta arasında işlem yapılarak grafikte gösterilen düzeltilmiş eğrinin eğimi yani düzeltilmiş arazi sıkışma indisleri belirlenmiş ve Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Düzeltilmiş sıkışma indisi belirlenmesi

Birinci nokta		İkinci nokta	
e_0	$\log \sigma$	e_0	$\log \sigma$
0,72	1000	0,62	4000
Eğim = düzeltilmiş c_c		0,166	

İlgili kilometre aralığında yer alan sondajlardan alınan UD numunelerinin hepsinde aynı işlem gerçekleştirilerek her tabaka için belirlenen ortalama düzeltilmiş sıkışma indisleri ve bu değerlerle yapılan konsolidasyon oturması hesabı Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Düzeltilmiş sıkışma indisleri ile konsolidasyon oturması hesabı

Hd (m)	YASS (m)	Tabaka Aralığı (m)		H (m)	σ_v (kPa)	eo	Cc	Cr	AKO	σ_p (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	Sc (cm)
5,5	3,0	0	3,0	3,0	27,0	1,051	0,260	0,040	2,96	80	110,0	10,93
5,5	3,0	3,0	6,0	3,0	66,0	1,112	0,268	0,047	2,42	160	109,8	4,20
5,5	3,0	6,0	9,0	3,0	90,0	1,008	0,333	0,036	1,89	170	109,1	4,16
5,5	3,0	9,0	12,0	3,0	114,0	1,046	0,271	0,039	1,58	180	107,8	8,02
5,5	3,0	12,0	15,0	3,0	138,0	0,957	0,447	0,056	1,45	200	105,7	5,00
5,5	3,0	15,0	18,0	3,0	162,0	1,119	0,383	0,042	1,30	210	103,0	4,85
5,5	3,0	18,0	21,0	3,0	186,0	1,240	0,242	0,040	1,18	220	99,9	4,90
5,5	3,0	21,0	24,0	3,0	210,0	1,008	0,299	0,033	1,10	230	96,4	4,17
5,5	3,0	24,0	27,0	3,0	234,0	1,057	0,309	0,033	1,03	240	92,7	4,64
5,5	3,0	27,0	30,0	3,0	258,0	1,187	0,353	0,061	1,01	260	88,9	6,14
5,5	3,0	30,0	33,0	3,0	282,0	0,838	0,242	0,024	1,00	282	85,2	3,17
5,5	3,0	33,0	36,0	3,0	306,0	0,925	0,520	0,014	1,00	306	81,6	4,84
5,5	3,0	36,0	40,0	4,0	334,0	1,188	0,597	0,042	1,00	334	77,5	5,28
Toplam Oturma (cm):												83,6

Yapılan arazi düzeltmesi sonucunda 5,5m yüksekliğindeki dolgunun sebep olduğu gerilme artışı altında düzeltilmiş sıkışma indisleri ile dolgu taban zemininde hesaplanan oturma miktarı yaklaşık 84cm'dir.

4.1.2. Hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) ile konsolidasyon oturması değerlendirmeleri

Dolgu taban zemininde meydana gelen konsolidasyon oturmasını hesaplamak için öncelikle arazi ve laboratuvar deney verilerinden yararlanılarak farklı yöntemlerle hacimsel sıkışma katsayıları belirlenmiştir.

Laboratuvar deney verileri kullanılarak belirlenen hacimsel sıkışma katsayıları ile oturma değerlendirmeleri

Hacimsel sıkışma katsayısını belirlemenin yollarından biri laboratuvarda yapılan konsolidasyon deneyleridir. EK-5'te verilen konsolidasyon deney sonuçları kullanılarak her bir derinlikten alınan örselenmemiş UD numuneleri için maruz kaldığı gerilme artışına göre

m_v değeri belirlenmektedir. Örneğin SK-159 sondajında 2,5m derinlikten alınan UD-1 numunesi için başlangıç efektif örtü gerilmesi;

$$\sigma'_{v_0}=2,5 \times 18=45\text{kPa olup,}$$

$H_d=5,5\text{m}$ yüksekliğindeki dolgu yüksekliği altında maruz kaldığı gerilme artışı,

$$q_0=5,5 \times 20=110\text{kPa}$$

$$\Delta\sigma = \frac{110}{\pi} \left[\left[\frac{22,5+11}{11} \right] (0,04 + 1,46) - \frac{22,5}{11} (1,46) \right] = 110 \text{ kPa olarak hesaplanır.}$$

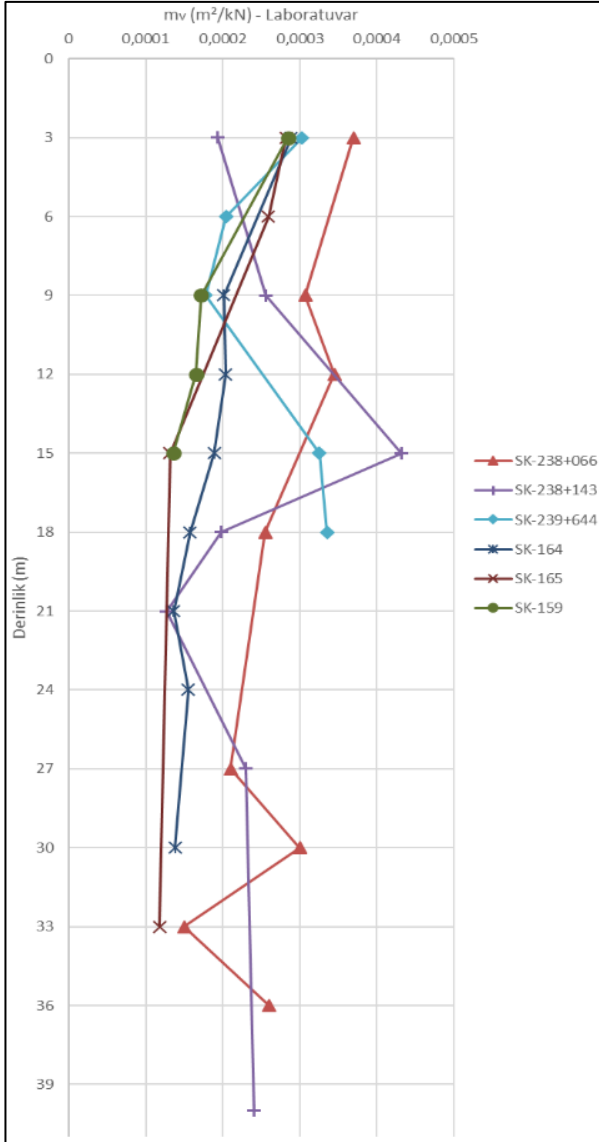
İlgili derinlikte gerilme değişimi 45-155kPa aralığında olup hacimsel sıkışma katsayısı bu aralıkta bulunan m_v değerlerin ağırlıklı ortalaması olarak alınmıştır. Çizelge 4.6 verilerinden yararlanılarak belirlenen gerilme aralığındaki m_v değeri 2,5m derinliğindeki numune için;

Çizelge 4.6. SK-159 sondajında UD-1 numunesinde m_v değerinin belirlenmesi

SK-159	
UD-1	
Derinlik	2,5m
Basınç (kPa)	m_v (m^2/kN)
0-12,5	0,00060
12,5-25	0,00081
25-50	0,00055
50-100	0,00034
100-200	0,00021
200-400	0,00012
400-800	0,00007
800-1600	0,00005

$$m_v=(5 \times 0,00055+50 \times 0,00034+55 \times 0,00021)/110=0,000285\text{m}^2/\text{kN} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

İlgili aralıkta açılan sondajlardan her 3m'de bir alınan UD numunesi üzerinde gerçekleştirilen konsolidasyon deney verileri kullanılarak Çizelge 4.6'te belirtilen şekilde elde edilen hacimsel sıkışma katsayılarının derinlikle değişimi Şekil 4.8' de verilmiştir.



Şekil 4.8. Konsolidasyon deney verileri ile elde edilen m_v değerlerinin derinlikle değişimi

Konsolidasyon oturması hesaplanırken dolgu tabanı 3m kalınlığında tabakalara ayrılmış olup, Şekil 4.8 incelendiğinde her 3m kalınlığındaki tabaka için ortalama hacimsel sıkışma katsayısı değerleri belirlenmiş ve bu değerlerle konsolidasyon oturması hesaplanmıştır. Belirlenen hacimsel sıkışma katsayısı değerleri ve oturma hesap detayı Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Laboratuvar verileriyle elde edilen ortalama hacimsel sıkışma katsayıları ile konsolidasyon oturması hesabı

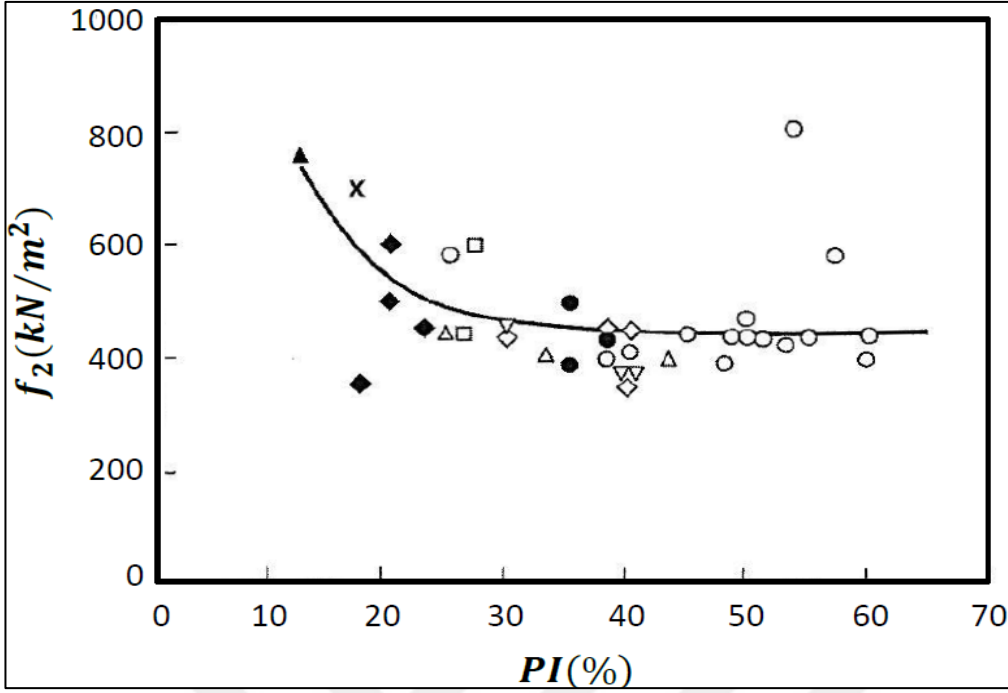
Hd (m)	YASS (m)	Tabaka Aralığı (m)		H tabaka (m)	Efektif gerilme (kPa)	m_v (m^2/kN)	$\Delta\sigma$ (kPa)	$\sigma_0+\Delta\sigma$ (kPa)	Oturma (cm)
5,5	3,0	0,0	3,0	3,0	27,0	0,000287	110,0	137,0	9,46
5,5	3,0	3,0	6,0	3,0	66,0	0,000232	109,8	175,8	7,63
5,5	3,0	6,0	9,0	3,0	90,0	0,000223	109,1	199,1	7,29
5,5	3,0	9,0	12,0	3,0	114,0	0,000238	107,8	221,8	7,69
5,5	3,0	12,0	15,0	3,0	138,0	0,000243	105,7	243,7	7,70
5,5	3,0	15,0	18,0	3,0	162,0	0,000236	103,0	265,0	7,31
5,5	3,0	18,0	21,0	3,0	186,0	0,000131	99,9	285,9	3,93
5,5	3,0	21,0	24,0	3,0	210,0	0,000155	96,4	306,4	4,48
5,5	3,0	24,0	27,0	3,0	234,0	0,000230	92,7	326,7	6,40
5,5	3,0	27,0	30,0	3,0	258,0	0,000209	88,9	346,9	5,58
5,5	3,0	30,0	33,0	3,0	282,0	0,000150	85,2	367,2	3,83
5,5	3,0	33,0	36,0	3,0	302,0	0,000260	81,6	387,6	6,36
5,5	3,0	36,0	40,0	4,0	334,0	0,000240	77,5	411,5	7,44
Toplam Oturma (cm):									85,1

Laboratuvar verilerini kullanarak elde edilen hacimsel sıkışma katsayıları ile yapılan hesap sonuçlarına göre yaklaşık 85cm oturma hesaplanmıştır.

SPT deney verileri kullanılarak belirlenen hacimsel sıkışma katsayıları ile oturma değerlendirmeleri

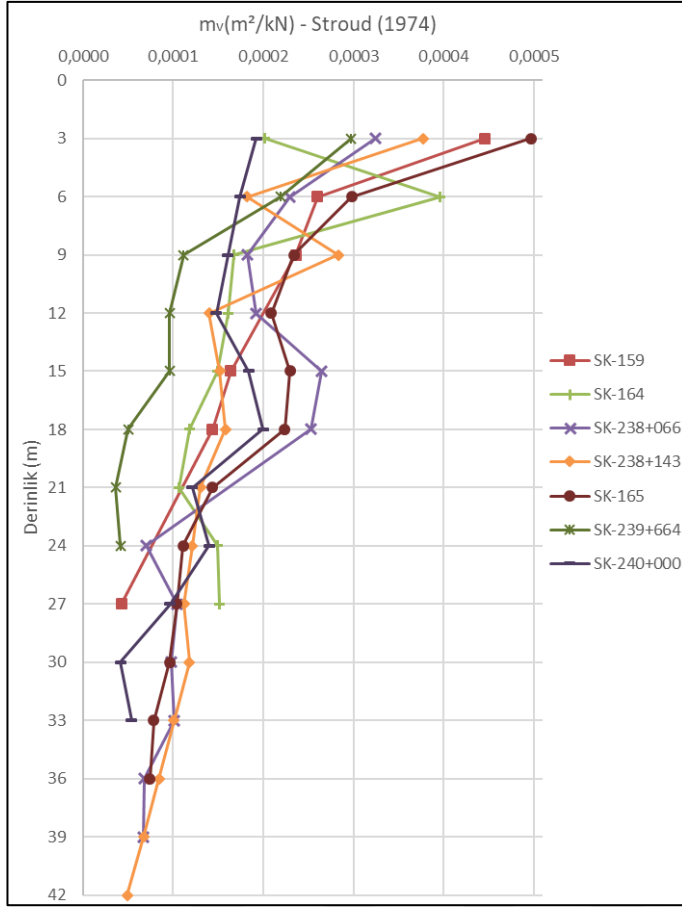
Stroud (1974) İngiltere’de yaptığı çalışmalar sonucunda m_v değerini killere ait PI ve SPT-N değerleri ile ilişkilendirmiştir (Şekil 4.9). Atterberg limitleri deneyi ile elde edilen plastisite indisi ve SPT deneyinden elde edilen N değerlerini kullandığı bu yöntemde hacimsel sıkışma katsayısının birimi m^2/kN ’dur. Şekil 4.9’ da verilen grafikte PI değerine göre katsayı (f_2) belirlenip, Eşitlik 4.4 kullanılarak bu katsayı yardımıyla hacimsel sıkışma katsayısı hesaplanmaktadır. Denklemden yer alan M değeri ödometrik deformasyon modülüdür.

$$M = 1/m_v = f_2 \times N \quad (4.4)$$



Şekil 4.9. PI ve SPT-N değerleri ile m_v arasındaki ilişki [5]

İlgili kilometre aralığında açılan sondajlarda kil birimde her 3m kalınlığındaki tabaka için ortalama SPT-N ve plastisite indisi değerleri belirlenmiş ve Stroud (1974) abağı yardımıyla ortalama eğri kullanılarak hacimsel sıkışma katsayıları tespit edilmiştir. Kil birimdeki granüler tabaka geçişlerinde SPT-N değerleri yer yer artmış olup hacimsel sıkışma katsayıları belirlenirken bu değerler göz ardı edilmiştir. Stroud (1974) ilişkisi ile belirlenen hacimsel sıkışma katsayısının derinlikle değişimi Şekil 4.10' da verilmiştir.



Şekil 4.10. Açılan sondajlardan Stroud abağı (1974) ile belirlenen m_v değerlerinin derinlikle değişimi

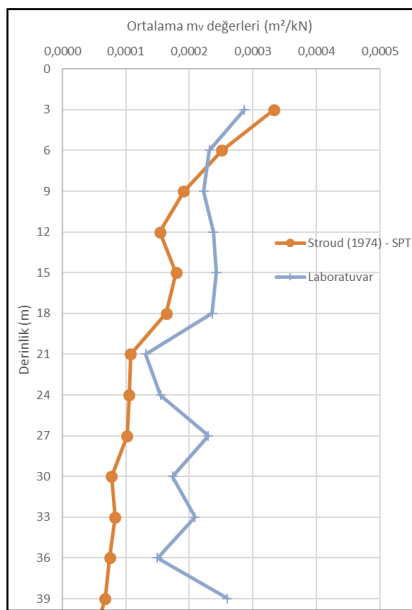
SPT verileri kullanarak dolgu tabanındaki 3m kalınlığındaki tabakalar için belirlenen ortalama hacimsel sıkışma katsayısı değerleri ve bu değerler kullanılarak 5,5m yüksekliğindeki dolgu için yapılan konsolidasyon oturmasına ait hesap detayları Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Stroud (1974) ilişkisini kullanarak tabakalar için ortalama m_v değerleri ve bu değerler kullanılarak her tabaka için konsolidasyon oturması hesabı

Hd (m)	YASS (m)	Tabaka Aralığı (m)		H tabaka (m)	Efektif gerilme (kPa)	m_v (kN/m ²)	$\Delta\sigma$ (kPa)	$\sigma_0+\Delta\sigma$ (kPa)	Oturma (cm)
5,5	3,0	0,0	3,0	3,0	27,0	0,000334	110,0	137,0	11,01
5,5	3,0	3,0	6,0	3,0	66,0	0,000251	109,8	175,8	8,27
5,5	3,0	6,0	9,0	3,0	90,0	0,000193	109,1	199,1	6,33
5,5	3,0	9,0	12,0	3,0	114,0	0,000154	107,8	221,8	4,96
5,5	3,0	12,0	15,0	3,0	138,0	0,000177	105,7	243,7	5,62
5,5	3,0	15,0	18,0	3,0	162,0	0,000183	103,0	265,0	5,64
5,5	3,0	18,0	21,0	3,0	186,0	0,000132	99,9	285,9	3,95
5,5	3,0	21,0	24,0	3,0	210,0	0,000118	96,4	306,4	3,42
5,5	3,0	24,0	27,0	3,0	234,0	0,000102	92,7	326,7	2,83
5,5	3,0	27,0	30,0	3,0	258,0	0,000089	88,9	346,9	2,36
5,5	3,0	30,0	33,0	3,0	282,0	0,000084	85,2	367,2	2,14
5,5	3,0	33,0	36,0	3,0	306,0	0,000075	81,6	387,6	1,85
5,5	3,0	36,0	40,0	4,0	334,0	0,000067	77,5	411,5	2,09
Toplam Oturma (cm):									60,5

Yapılan hesaplar sonucunda SPT deney verileri ile belirlenen hacimsel sıkışma katsayıları ile yaklaşık 60cm oturma tahmini yapılmıştır.

Stroud (1974) ilişkisi kullanılarak elde edilen ortalama hacimsel sıkışma katsayısı değerlerini konsolidasyon deneyinden elde edilen değerlerle karşılaştırmak amacıyla farklı iki yöntemle elde edilen ortalama hacimsel sıkışma katsayısı değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Stroud (1974) ilişkisi ve laboratuvardan elde edilen m_v değerlerinin karşılaştırması

Şekil 4.11 incelendiğinde Stroud (1974) ve laboratuvaradan elde edilen hacimsel sıkışma katsayısı değerlerinin üst tabakalarda birbiri ile daha uyumlu iken, alt tabakalara doğru inildikçe aralarındaki farkın arttığı tespit edilmiştir. Laboratuvara gönderilmek üzere numune alımı sırasında derine inildikçe örselenme miktarının artması veya SPT verilerini kullanan ilişkide düşey efektif gerilme artışı etkisinin göz önünde bulundurulmaması, bu farkın sebepleri arasında görülmektedir.

PMT deney verileri kullanılarak belirlenen hacimsel sıkışma katsayıları ile konsolidasyon oturması değerlendirmeleri

Presiyometre deneyinden elde edilen Menard modülü (E_M) kullanılarak oturma hesaplarında kullanılmak üzere ödometrik deformasyon modülü elde edilebilir.

Amar vd. (1991)

Amar (1991), $M=1/m_v$ olarak tanımlanan ödometrik deformasyon modülü değerinin Menard Presiyometre modülü ile Eşitlik 4.5 kullanılarak bulunabileceğini vurgulamıştır [12].

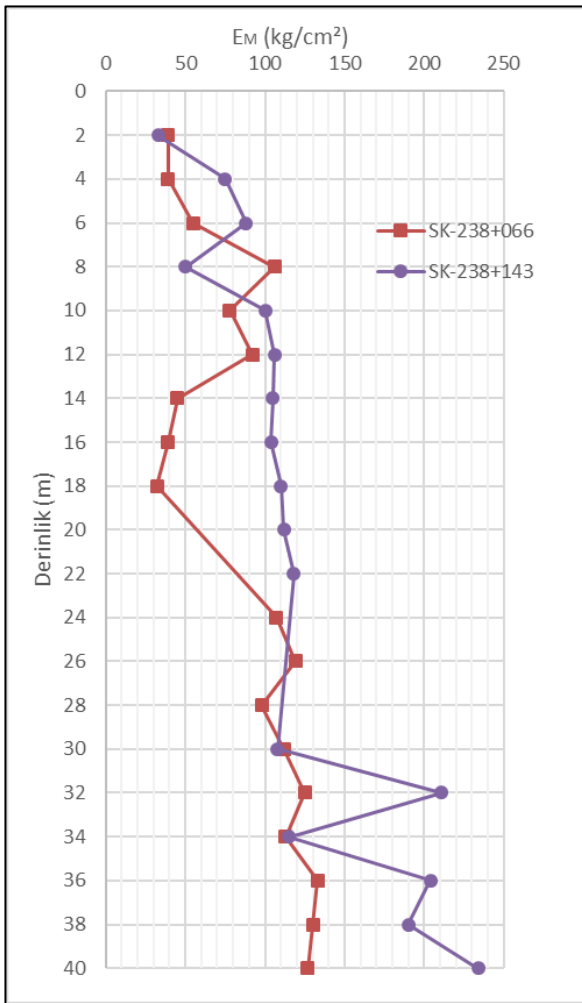
$$M = E_M / \alpha_M \quad (4.5)$$

Denklemden yer alan α_M değeri Menard faktörü olup Menard modülünün net limit basıncına oranına (E_M / P_{LN}) göre Şekil 4.12'den elde edilir.

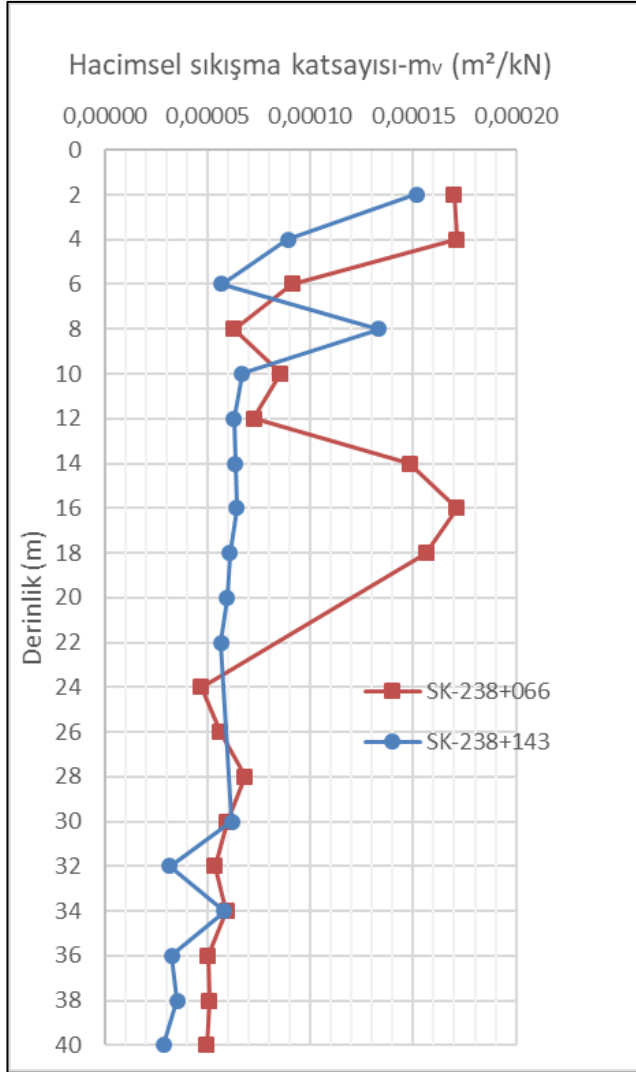
Zemin Tipi	Turba		Kil		Silt		Kum		Kum ve çakıl	
	E_M/P_{LN}	α_M	E_M/P_{LN}	α_M	E_M/P_{LN}	α_M	E_M/P_{LN}	α_M	E_M/P_{LN}	α_M
Aşırı konsolide	Tüm değerler	1	> 16	1	> 14	2/3	> 12	1/2	> 10	1/3
Normal Konsolide		1	9-16	2/3	8-14	1/2	7-12	1/3	6-10	1/4
Ayrışmış ve/veya yoğurulmuş		1	7-9	1/2		1/2		1/3		1/4
Kaya	Çok çatıaklı		Diğer koşullar				Az çatıaklı veya aşırı ayrışmış			
	$\alpha_M = 1/3$		$\alpha_M = 1/2$				$\alpha_M = 2/3$			

Şekil 4.12. Menard faktörü [17]

Hacimsel sıkışma katsayısı belirlenirken sondaj kuyularında yapılan presiyometre deneyi verilerinden elde edilen Menard modülünün (E_M) derinlikle değişimi Şekil 4.13’de, Menard modülü kullanılarak elde edilen hacimsel sıkışma katsayısı değerlerinin derinlikle değişimi ise Şekil 4.14’te verilmiştir. EK-3’te verilen PMT logları incelendiği zaman dolgu tabanında yer alan kil birimdeki granüler tabaka geçişlerinde modüllerde yer yer artış tespit edilmiş olup, grafik oluşturulurken ve hacimsel sıkışma katsayısı belirlenirken bu değerler göz ardı edilerek hesaba dahil edilmemiştir.



Şekil 4.13. E_M değerinin derinlikle değişimi



Şekil 4.14. PMT deney verileri ile elde edilen m_v değerlerinin derinlikle değişimi

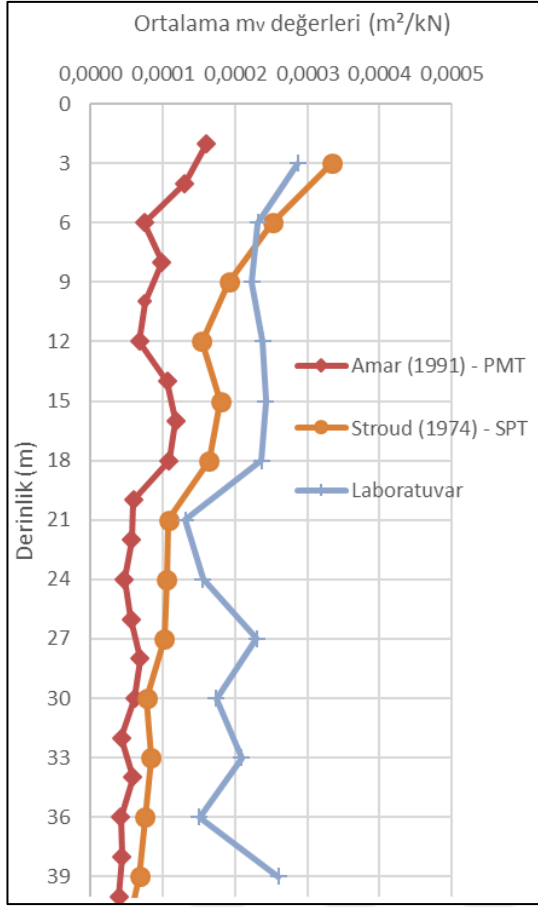
PMT deneyi her 2m' de bir uygulandığı için parametre belirlenirken ve oturma hesabında dolgu tabanı 2m kalınlığında tabakalara ayrılmıştır. Her tabaka için belirlenen ortalama hacimsel sıkışma katsayıları ve bu değerler kullanılarak yapılan konsolidasyon hesabına ait hesap detayları Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. PMT deney verileri ile elde edilen hacimsel sıkışma katsayıları ve bu değerlerle yapılan oturma hesabı

Hd (m)	YASS (m)	Tabaka Aralığı (m)		H tabaka (m)	Efektif gerilme (kPa)	mv kN/m ²)	$\Delta\sigma$ (kPa)	$\sigma_0+\Delta\sigma$ (kPa)	Oturma (cm)
5,5	3,0	0,0	2,0	2,0	18,0	0,00016	110,0	128,0	3,54
5,5	3,0	2,0	4,0	2,0	54,0	0,00013	109,9	163,9	2,86
5,5	3,0	4,0	6,0	2,0	70,0	0,00007	109,7	179,7	1,62
5,5	3,0	6,0	8,0	2,0	86,0	0,00010	109,3	195,3	2,15
5,5	3,0	8,0	10,0	2,0	102,0	0,00008	108,5	210,5	1,65
5,5	3,0	10,0	12,0	2,0	118,0	0,00007	107,5	225,5	1,46
5,5	3,0	12,0	14,0	2,0	134,0	0,00011	106,1	240,1	2,25
5,5	3,0	14,0	16,0	2,0	150,0	0,00012	104,4	254,4	2,46
5,5	3,0	16,0	18,0	2,0	166,0	0,00011	102,5	268,5	2,22
5,5	3,0	18,0	20,0	2,0	182,0	0,00006	100,4	282,4	1,20
5,5	3,0	20,0	22,0	2,0	198,0	0,00006	98,1	296,1	1,11
5,5	3,0	22,0	24,0	2,0	214,0	0,00005	95,8	309,8	0,89
5,5	3,0	24,0	26,0	2,0	230,0	0,00006	93,3	323,3	1,05
5,5	3,0	26,0	28,0	2,0	246,0	0,00007	90,8	336,8	1,24
5,5	3,0	28,0	30,0	2,0	262,0	0,00006	88,3	350,3	1,07
5,5	3,0	30,0	32,0	2,0	278,0	0,00004	85,8	363,8	0,73
5,5	3,0	32,0	34,0	2,0	294,0	0,00006	83,4	377,4	0,98
5,5	3,0	34,0	36,0	2,0	310,0	0,00004	81,0	391,0	0,67
5,5	3,0	36,0	38,0	2,0	326,0	0,00004	78,7	404,7	0,68
5,5	3,0	38,0	40,0	2,0	342,0	0,00004	76,4	418,4	0,59
Toplam Oturma (cm)									30,4

Yapılan hesaplar sonucunda PMT deney verileri ile belirlenen hacimsel sıkışma katsayıları ile yaklaşık 30cm oturma elde edilmiştir.

Stroud (1974) ilişkisi kullanılarak elde edilen ortalama hacimsel sıkışma katsayısı değerlerini ve konsolidasyon deneyinden elde edilen ortalama hacimsel sıkışma katsayısı değerlerini, PMT deney verileri ile elde edilen değerlerle karşılaştırmak amacıyla üç yöntemle elde edilen ortalama değerlerin derinlikle değişimi Şekil 4.15'te tek bir grafik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Stroud (1974), Laboratuvar ve PMT verileri ile elde edilen m_v değerlerinin derinlikle değişimi

Şekil 4.15 incelendiğinde PMT verileri ile elde edilen hacimsel sıkışma katsayısı değerlerinin Stroud (1974) ve laboratuvardan elde edilen değerlerinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

CPT deney verileri kullanılarak belirlenen hacimsel sıkışma katsayıları ile konsolidasyon oturması değerlendirmeleri

CPT verilerinden elde edilen koni direnci (q_c) ve düzeltilmiş koni direnci (q_t) değerleri kullanılarak deformasyon modülü (M) veren korelasyonlar (Eşitlik 4.6 ve Eşitlik 4.7) bu bölümde incelenmiştir.

$$M = 1/m_v = \alpha_m \times q_c \quad (4.6)$$

Denklemden yer alan α_m korelasyon katsayısıdır.

Hacimsel sıkışma katsayısı elde edilirken koni direncini (q_c) kullanan Sanglerat (1972), Mahesh ve Vikash (1995) ve Erol vd (2004)'nin korelasyon katsayısı için önerdiği aralıklar Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10. q_c değerini kullanan ilişkiler için α_m katsayıları

Sanglerat (1972) [23]	
Düşük Plastisiteli Killer (CL) $q_c < 0,7 \text{ MN/m}^2$ $0,7 \text{ MN/m}^2 < q_c < 2,0 \text{ MN/m}^2$ $q_c > 2,0 \text{ MN/m}^2$	$\frac{\alpha_m}{3 < \alpha_m < 8}$ $2 < \alpha_m < 5$ $1 < \alpha_m < 2,5$
Düşük Plastisiteli Siltler (ML) $q_c > 2 \text{ MN/m}^2$ $q_c < 2,0 \text{ MN/m}^2$	$\frac{\alpha_m}{3 < \alpha_m < 6}$ $1 < \alpha_m < 3$
Yüksek Plastisiteli Siltler ve Killer (MH ve CH) $q_c < 2,0 \text{ MN/m}^2$	$\frac{\alpha_m}{2 < \alpha_m < 6}$
Organik Silt (OL) $q_c < 1,2 \text{ MN/m}^2$	$\frac{\alpha_m}{2 < \alpha_m < 8}$
Turba ve Organik Kil (Pt, OH) $q_c < 0,7 \text{ MN/m}^2$ $50 < w < 100$ $100 < w < 200$ $w > 100$	$\frac{\alpha_m}{1,5 < \alpha_m < 4}$ $1 < \alpha_m < 1,5$ $0,4 < \alpha_m < 1$
<i>(w: su içeriği)</i>	
Mahesh ve Vikash (1995) [24]	
Düşük Plastisiteli Killer (CL) $4,5 \text{ MN/m}^2 < q_c < 6,0 \text{ MN/m}^2$ $4,0 \text{ MN/m}^2 < q_c < 4,5 \text{ MN/m}^2$ $2,5 \text{ MN/m}^2 < q_c < 4,0 \text{ MN/m}^2$	$\frac{\alpha_m}{\alpha_m = 1,37}$ $\alpha_m = 1,67$ $\alpha_m = 1,7-2,8$
Yüksek Plastisiteli Killer (CH) $0,5 \text{ MN/m}^2 < q_c < 2,5 \text{ MN/m}^2$	$\frac{\alpha_m}{\alpha_m = 2,8-6,1}$
Erol vd. (2004) [25]	
$0,2 \text{ MN/m}^2 < q_c < 0,75 \text{ MN/m}^2$ $0,75 \text{ MN/m}^2 < q_c < 2,4 \text{ MN/m}^2$	$\frac{\alpha_m}{4 < \alpha_m < 12}$ $2,7 < \alpha_m < 4,7$

$$M = \alpha_m (q_t - \sigma_{v0}) \quad (4.7)$$

Denklemden yer alan α_m korelasyon katsayısıdır.

Hacimsel sıkışma katsayısı elde ederken düzeltilmiş koni direncini (q_t) kullanan Kulhawy ve Mayne (1990) ve Robertson (2009)'ın korelasyon katsayısı için önerdiği aralıklar ise Çizelge 4.11'de verilmiştir.

Çizelge 4.11. q_t değerini kullanan ilişkiler için α_m katsayıları

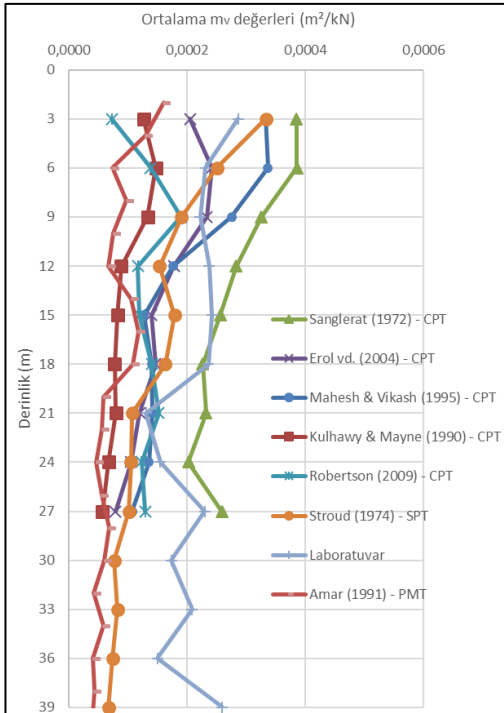
Kulhawy & Mayne (1990) [7]	$\alpha_m=8,25$
Robertson (2009) [26]	
$I_m < 2,2$; $Q_t < 14$ $Q_t > 14$	$\frac{\alpha_m}{Q_t}$ $\alpha_m = Q_t$ $\alpha_m = 14$
$I_m > 2,2$; <i>(I_m ve Q_t: CPT deneyinden elde edilir. I_m: zemin davranış modeli Q_t=normalize edilmiş uç direnci)</i>	$\alpha_m = 0,0188(10^{0,55I_m+1,68})$

CPT deneyleri 2cm aralıklarla uygulanmakta olup, laboratuvar deney sonuçlarına göre CL-CH zemin sınıfına ait olan taban zemini için hacimsel sıkışma katsayısı belirlenirken, Çizelge 4.10 ile Çizelge 4.11’de belirtilen daların eksik olması sebebiyle CPT-E4 deneyleri kullanılamamıştır. Dolayısı ile hacimsel sıkışma katsayısı tespitinde CPT-241-1, CPT-241-3 ve CPT-242-2 olmak üzere üç adet CPT deney verilerinden yararlanılabilmektedir. Dolgu taban zemininde 3m kalınlığındaki tabakalar için ortalama q_c , q_t değerleri kullanılarak her yöntem için ortalama m_v değerleri belirlenmiş Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12. CPT verilerini kullanan yöntemlerle her tabaka için belirlenen ortalama m_v değerleri

Derinlik	Ortalama m_v değerleri (m^2/kN)				
	Sanglerat (1972)	Kulhawy & Mayne (1990)	Mahesh & Vikash (1995)	Erol vd. (2004)	Robertson (2009)
0-3	0,000386	0,000127	0,000334	0,000205	0,000073
3-6	0,000386	0,000148	0,000337	0,000242	0,000139
6-9	0,000326	0,000134	0,000276	0,000234	0,000190
9-12	0,000283	0,000089	0,000176	0,000178	0,000117
12-15	0,000256	0,000083	0,000128	0,000140	0,000120
15-18	0,000227	0,000078	0,000140	0,000147	0,000140
18-21	0,000232	0,000080	0,000141	0,000120	0,000152
21-24	0,000202	0,000067	0,000136	0,000105	0,000123
24-27	0,000259	0,000057	0,000107	0,000079	0,000129

CPT verilerinin ortalaması ile farklı ilişkiler kullanılarak elde edilen hacimsel sıkışma katsayılarını diğer yöntemlerle elde edilen değerlerle kıyaslamak amacıyla Çizelge 4.12’de verilen hacimsel sıkışma katsayıları ile Stroud (1974), laboratuvardan ve PMT deney verilerinden elde edilen ortalama hacimsel sıkışma katsayılarını derinlikle değişimi Şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4.16. Laboratuvar, SPT, CPT ve PMT verileri ile elde edilen ortalama m_v değerlerinin derinlikle değişimi

Şekil 4.16 incelendiğinde PMT verilerini kullanan Amar (1991) ilişkisi ile CPT verilerini kullanan Kulhawy ve Mayne (1990)' in geliştirdiği ilişkilerden elde edilen değerler birbirine yakın olup bu ilişkilerin diğer değerlere kıyasla düşük kaldıkları belirlenmiştir. CPT verilerini kullanan yöntemlerden olan Sanglerat (1972)' in geliştirdiği ilişki laboratuvar değerlerine yakinken diğer ilişkilere kıyasla yüksek değerlerler vermektedirler. Mahesh ve Vikash (1995), Erol vd. (2004) ve Robertson (2009)'ın geliştirdiği yöntemlerin ise Stroud (1974) ilişkisi ile elde edilen değerlere yakın olduğu tespit edilmiştir.

CPT deneyleri maksimum 27m derinliğe kadar uzanmaktadır ve Şekil 4.16'de görüldüğü gibi derinlik arttıkça farklı yöntemlerle elde edilen hacimsel sıkışma katsayısı değerleri birbirine yaklaşmaktadır. Bu sebeple CPT deney verileri ile oturma hesaplanırken 27m derinlikten sonrası için Sanglerat ilişkisini kullanırken laboratuvar verilerinden, diğer CPT ilişkilerini kullanırken de Stroud (1974) ilişkisi ile elde edilen verilerden yararlanılmıştır. CPT deney verilerinden yararlanan farklı yöntemlerle belirlenen ortalama hacimsel sıkışma katsayıları kullanılarak 5,5m yüksekliğindeki dolgu için oturma miktarı hesaplanmıştır. Hesap detayları sadece Sanglerat (1972) yöntemi için Çizelge 4.13'te gösterilmiş olup diğer yöntemlere ait hesap detayları EK-8'de, farklı yöntemlerle yapılan hesaplar sonucunda elde edilen oturma miktarları Çizelge 4.14'ye verilmiştir.

Çizelge 4.13. CPT verilerinden yararlanılan Sanglerat (1972) yöntemi kullanılarak konsolidasyon oturması hesabı

Hd (m)	YASS (m)	Tabaka Aralığı (m)		H tabaka (m)	Efektif gerilme (kPa)	mv (kN/m ²)	$\Delta\sigma$ (kPa)	$\sigma_0 + \Delta\sigma$ (kPa)	Oturma (cm)
5,5	3,0	0,0	3,0	3,0	27,0	0,000386	110,0	137,0	12,73
5,5	3,0	3,0	6,0	3,0	66,0	0,000386	109,8	175,8	12,72
5,5	3,0	6,0	9,0	3,0	90,0	0,000326	109,1	199,1	10,68
5,5	3,0	9,0	12,0	3,0	114,0	0,000283	107,8	221,8	9,16
5,5	3,0	12,0	15,0	3,0	138,0	0,000256	105,7	243,7	8,13
5,5	3,0	15,0	18,0	3,0	162,0	0,000227	103,0	265,0	7,02
5,5	3,0	18,0	21,0	3,0	186,0	0,000232	99,9	285,9	6,95
5,5	3,0	21,0	24,0	3,0	210,0	0,000202	96,4	306,4	5,85
5,5	3,0	24,0	27,0	3,0	234,0	0,000259	92,7	326,7	7,21
5,5	3,0	27,0	30,0	3,0	258,0	0,000210	88,9	346,9	5,58
5,5	3,0	30,0	33,0	3,0	282,0	0,000150	85,2	367,2	3,83
5,5	3,0	33,0	36,0	3,0	306,0	0,000260	81,6	387,6	6,36
5,5	3,0	36,0	40,0	4,0	334,0	0,000240	77,5	411,5	7,44
Toplam Oturma (cm):									103,7

Çizelge 4.14. Farklı yöntemlerle elde edilen konsolidasyon oturması miktarları

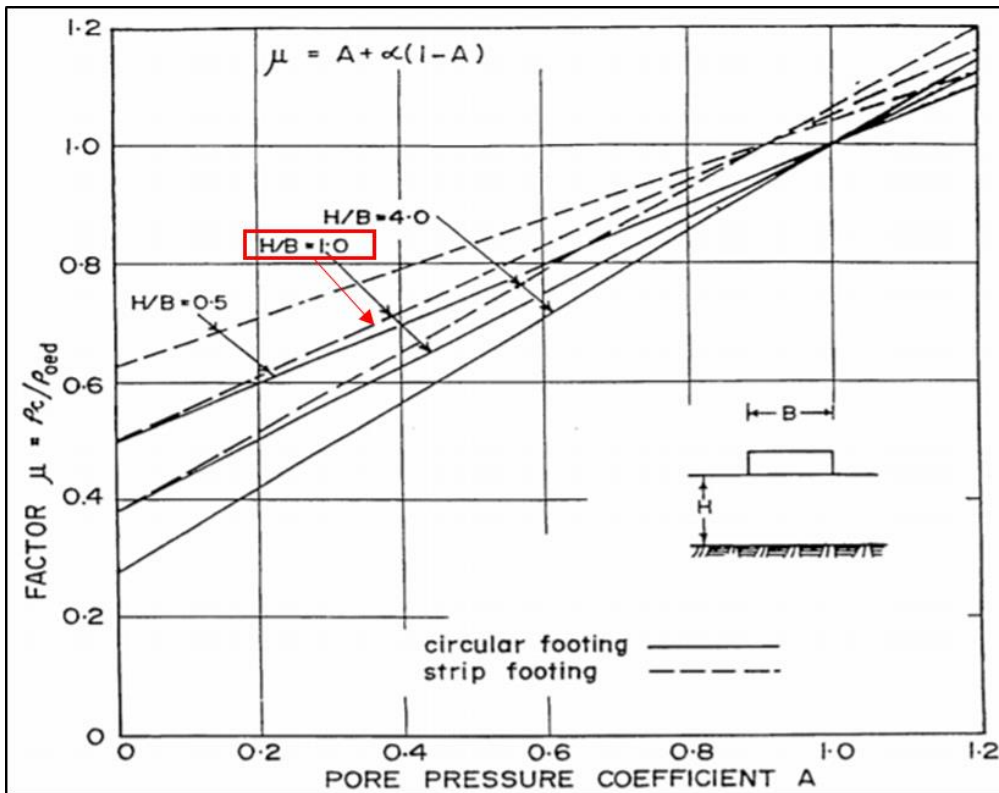
Yöntem	Hesaplanan Konsolidasyon Oturması (cm)
Laboratuvar c_c , c_r (arazi düzeltmesi ile)	84
Laboratuvar m_v	85
Stroud (1974) – SPT	60
Sanglerat (1972) – CPT	104
Kulhawy & Mayne (1990) – CPT	35
Mahesh & Vikash (1995) – CPT	65
Erol vd (2004) – CPT	54
Roberton (2009) – CPT	45
Amar (1991) – PMT	30
Ortalama	61
Standart Sapma	22
Arazi ölçümleriyle hesaplanan	25

Analitik yöntemde farklı ilişkiler kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda, 5,5m yüksekliğindeki dolgu yükünün sebep olduğu gerilme artışı altında hesaplanan oturma miktarı 29-104cm arasında değişmektedir.

Farklı ilişkiler kullanılarak elde edilen sıkışma indileri ve hacimsel sıkışma katsayıları ile işlemler gerçekleştirilmiştir. Ardından hesaplanan konsolidasyon oturması miktarlarına Skempton-Bjerrum (1957) düzeltmesi uygulanmıştır. Zemin numunesinde ödometre deneyi koşullarında yanıl deformasyonu önlenmiş haldeki durumunu yansıtmaktadır. Skempton ve Bjerrum (1957) ise gerçekte zeminin uygulanan yük sonucunda yanıl deformasyona da maruz kaldığını ileri sürmüşler ve üç boyutlu deformasyon etkisi için zeminin boşluk suyu

parametresi A ve incelenen problemin geometrisine bağlı bir düzeltme faktörü (μ) geliştirmişlerdir [27]. Konsolidasyon deneyinden elde edilen oturmalar Eşitlik 4.8' de verilen şekilde düzeltilmektedir. Denklemden S_{oed} değeri konsolidasyon deney verileri ile elde edilen oturma miktarıdır.

$$S = \mu S_{oed} \quad (4.8)$$



Şekil 4.17. Skempton ve Bjerrum (1957) tarafından önerilen düzeltme katsayısı, μ

Boşluk suyu parametresi ise kil birimin aşırı konsolidasyon oranına göre Şekil 4.18 yardımıyla belirlenmiştir.

Type of clay	A
Very sensitive soft clays	> 1
Normally-consolidated clays	$\frac{1}{2} - 1$
Overconsolidated clays	$\frac{1}{4} - \frac{1}{2}$
Heavily overconsolidated sandy clays ..	$0 - \frac{1}{4}$

Şekil 4.18. Kil tipine göre boşluk suyu parametresi (A)

Şekil 4.18’de verilen tabloya göre aşırı konsolide killere için A değeri 0,25-0,5 arasında değişiyorken, normal konsolide killerde bu değer 0,5-1 arasında değişmektedir. İlgili kilometre aralığında gerçekleştirilen konsolidasyon deney verileri sonucunda yaklaşık 20m derinliğe kadar aşırı konsolide killerin yer aldığı belirlenen test dolgusu taban zemini için 20m derinliğe kadar A değeri ortalama 0,375 ve normal konsolide killerin yer aldığı 20m derinlikten sonrası için A değeri ortalama 0,75 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.17’de verilen grafikte H değeri oturan kil tabakası kalınlığı, B değeri ise temel genişliği olup, 45m platform genişliğine sahip ve 40m kalınlığında oturan kil tabakası üzerine teşkil ettirilen test dolgusu için H/B değeri yaklaşık olarak 1 alınmıştır. Dolayısıyla Şekil 4.17 yardımıyla aşırı konsolide yapılan konsolidasyon oturması hesaplarında 20m derinliğe kadar $\mu=0,7$, 20m derinlikten sonra ise $\mu=0,95$ alınarak Skempton Bjerrum (1957) düzeltmesi uygulanmıştır.

Hesap detayları sadece Duncan & Buchignani (1976) arazi düzeltmesi uygulanmış sıkışma indisleri ile yapılan yöntem için Çizelge 4.15’te verilmiş olup, farklı yöntemlerle elde edilen oturma miktarlarına düzeltme uygulanması sonucunda hesaplanan oturma miktarları Çizelge 4.16’da verilmiştir.

Çizelge 4.15. Sıkışma indisleri kullanılarak yapılan konsolidasyon oturması hesabında Skempton-Bjerrum (1957) düzeltmesi

Hd (m)	YASS (m)	Tabaka Aralığı (m)		H (m)	σ_v (kPa)	eo	Cc	Cr	AKO	μ	σ_p (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	Sc (cm)
5,5	3,0	0	3,0	3,0	27,0	1,051	0,260	0,040	2,96	0,7	80	110,0	8,13
5,5	3,0	3,0	6,0	3,0	66,0	1,112	0,268	0,047	2,42	0,7	160	109,8	2,91
5,5	3,0	6,0	9,0	3,0	90,0	1,008	0,333	0,036	1,89	0,7	170	109,1	3,42
5,5	3,0	9,0	12,0	3,0	114,0	1,046	0,271	0,039	1,58	0,7	180	107,8	3,13
5,5	3,0	12,0	15,0	3,0	138,0	0,957	0,447	0,056	1,45	0,7	200	105,7	5,09
5,5	3,0	15,0	18,0	3,0	162,0	1,119	0,383	0,042	1,30	0,7	210	103,0	4,30
5,5	3,0	18,0	21,0	3,0	186,0	1,240	0,242	0,040	1,18	0,7	220	99,9	2,85
5,5	3,0	21,0	24,0	3,0	210,0	1,008	0,299	0,033	1,10	0,95	230	96,4	5,47
5,5	3,0	24,0	27,0	3,0	234,0	1,057	0,309	0,033	1,03	0,95	240	92,7	5,78
5,5	3,0	27,0	30,0	3,0	258,0	1,187	0,353	0,061	1,01	0,95	260	88,9	5,79
5,5	3,0	30,0	33,0	3,0	282,0	0,838	0,242	0,024	1,00	0,95	282	85,2	4,30
5,5	3,0	33,0	36,0	3,0	306,0	0,925	0,520	0,014	1,00	0,95	306	81,6	7,90
5,5	3,0	36,0	40,0	4,0	334,0	1,188	0,597	0,042	1,00	0,95	334	77,5	9,40
Toplam Oturma (cm):													68,7

Çizelge 4.16. Farklı yöntemlerle elde edilen Skempton-Bjerrum (1957) düzeltmesi yapılmış konsolidasyon oturması miktarları

Yöntem	Hesaplanan Konsolidasyon Oturması (cm)	Skempton & Bjerrum (1957) düzeltmesi uygulanmış konsolidasyon oturması (cm)
Laboratuvar c_c, c_r (arazi düzeltmesi ile)	84	69
Laboratuvar m_v	85	70
Stroud (1974) – SPT	60	47
Sanglerat (1972) – CPT	104	83
Kulhawy & Mayne (1990) – CPT	35	29
Mahesh & Vikash (1995) – CPT	65	50
Erol vd (2004) – CPT	54	42
Roberton (2009) – CPT	45	36
Amar (1991) – PMT	30	24
Ortalama	61	49
Standart Sapma	22	18
Arazi ölçümleriyle hesaplanan (d_{23})	25	

Hesaplanan oturma miktarları incelendiğinde Skempton-Bjerrum (1957) düzeltmesi uygulanan oturma miktarları, düzeltme uygulanmayan duruma göre araziye daha yakın sonuçlar vermekte olup arazi ölçümlerine en yakın değerleri veren yöntemlerin PMT verilerini kullanan Amar (1991) ilişkisi olduğu tespit edilmiştir. CPT verilerini kullanan ilişkiler arasında da arazi davranışına en yakın sonuç veren ilişkinin Kulhawy & Mayne (1990) ilişkisi olduğu belirlenmiştir.

Konsolidasyon deney verilerinden yararlanılarak (sıkışma indisleri ve hacimsel sıkışma katsayıları ile) hesaplanan oturma miktarları incelendiği zaman arazi deney verilerinden yararlanılarak (SPT,CPT ve PMT korelasyonları ile) hesaplanan oturma miktarlarına kıyasla daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Bunun sebeplerinden biri de, laboratuvara gönderilen deney numunelerinde, numunenin alındığı derinlik arttıkça örselenme miktarında ortaya çıkan artış olarak görülmektedir. Oturma hesaplarında derine inildikçe laboratuvar ve arazi deney verilerini kullanan yöntemlerle hesaplanan oturma miktarları arasındaki farkın artması da bu düşüncüyü desteklemektedir.

4.1.3. Menard ve Rousseau (1962) yarı ampirik yöntemi ile konsolidasyon oturması değerlendirmeleri

Menard ve Rousseau (1962), PMT deney verilerinin kullanarak, düşey gerilme artışı altında zeminde meydana gelen konsolidasyon oturması miktarını veren yarı ampirik yöntem geliştirmişlerdir (Eşitlik 4.9) [17].

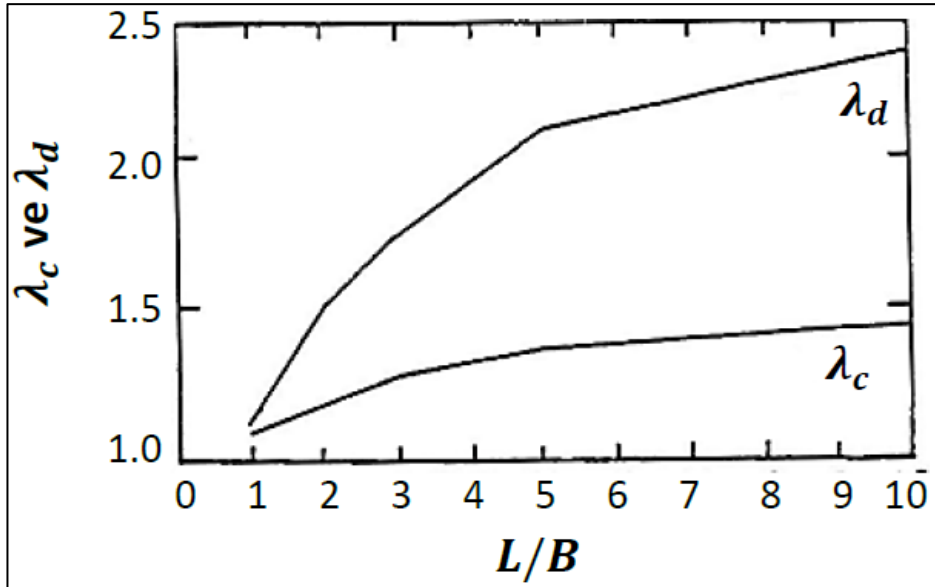
$$S_c = \frac{\alpha}{9E_C} q_{net} \lambda_c B \quad (4.9)$$

Denklemden yer alan E_C değeri dolgu tabanında 0-0,5B derinlikleri arasındaki Menard modüllerinin ortalamasıdır. Dolayısıyla presiyometre logları incelendiğinde 0-22,0m aralığında Menard modüllerinin ortalaması $E_{Mort}=E_C=80\text{kg/cm}^2=785\text{kPa}$ olarak hesaplanmıştır.

α değeri ise Menard faktörü olup Menard modülünün net limit basıncına oranına (E_M/ P_{LN}) göre Şekil 4.12 yardımıyla belirlenir. 0-22m aralığında ortalama net limit basınç değeri de yaklaşık $P_{LN}=8\text{kg/cm}^2=78,5\text{kPa}$ olarak hesaplanmış ve $E_M/ P_{LN}=10$ olarak elde edilmiştir. Şekil 4.12 yardımıyla Menard faktörü $\alpha=2/3$ olarak belirlenir.

q_{net} net geilme artışı olup 5,5m yüksekliğindeki dolgu için $q_{net}=5,5 \times 20=110\text{kPa}$ olarak hesaplanır.

λ_c değeri şekil katsayısı olup Şekil 4.19 yardımıyla temel uzunluğunun genişliğine oranına göre (L/B) belirlenir [17]. Dolgu için şerit temel varsayımı yapılmış ve şekilde, λ_c eğrisinin eğiminin L/B oranı arttıkça azaldığı ve yaklaşık 1,4 değerinde sabit kaldığı belirlenmiştir. Bu sebeple de λ_c değeri hesaplarda 1,4 olarak kullanılmıştır.



Şekil 4.19. Şekil faktörleri (Briaud, 1992)

Tüm bu veriler toplandığında Menard vd (1962)'nin geliştirdiği yarı ampirik yöntemle dolgu tabanında gerçekleşmesi beklenen konsolidasyon oturması;

$$S_c = \frac{2/3}{9 \times 785} \times 110 \times 1,4 \times 45 = 0,65m = 65cm \text{ mertebesinde hesaplanmıştır.}$$

Bu yöntemde dolgu taban zemininde artan derinlikle birlikte gerilme azaltması uygulanmamış olması, PMT verilerini kullanan diğer yöntemle göre hesaplanan konsolidasyon oturması miktarının daha yüksek değer vermesinin sebeplerinden biri olarak düşünülmektedir.

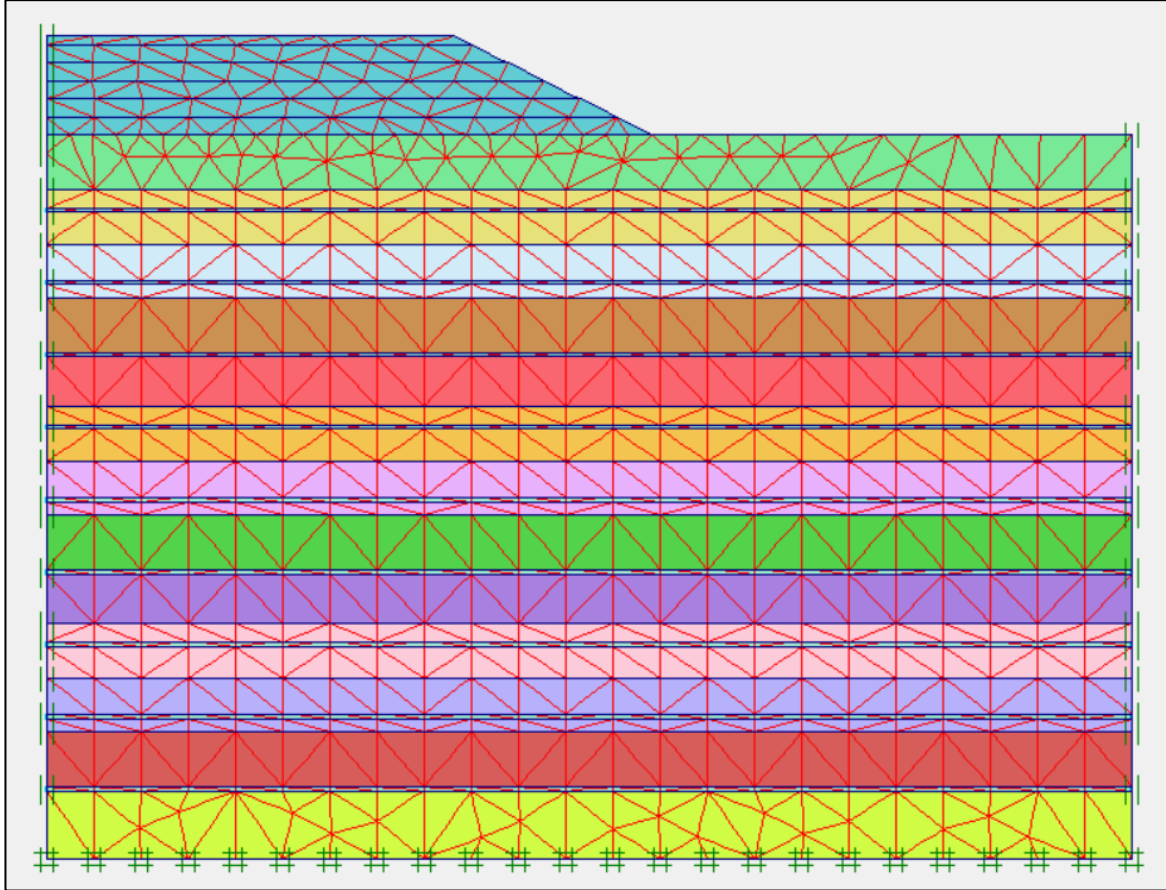
4.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Oturma Değerlendirmeleri

İlgili kilometre aralığında değişken dolgu yüksekliğine sahip ve kohezyonlu birime teşkil ettirilen test dolgusu için konsolidasyon oturması miktarı analitik yöntemin dışında bir de sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada sonlu elemanlar yönteminde analizler gerçekleştirilirken Plaxis 2D yazılımı kullanılmıştır [28]. Analizler düzlem şekil değiştirme koşulu ile gerçekleştirilmiş olup, 15 düğüm noktalı üçgen elemanlar kullanılmıştır. Analizlerde uzunluk, kuvvet, zaman birimleri m, kN ve gün olarak seçilmiştir.

4.2.1. Analiz modeli oluşturulması

Sonlu elemanlar programı ile analizler gerçekleştirilirken en kritik durumu yansıtması sebebiyle en yüksek dolgu olan 5,5m yüksekliğindeki Km:241+620 dolgusu analiz edilmiştir. Dolgu platform genişliği 45m olup, simetrik olarak oluşturulan analiz modelinde dolgu genişliği 22,5m, dolgu taban zemini genişliği 60m'dir. Dolgu tabanı için model oluşturulurken 40m kalınlığında kil birim 3m kalınlığında tabakalara ayrılmış ve bu bölümün ilerleyen kısımlarında anlatıldığı üzere her 4m'de bir kum bandı geçirilmiştir. Oluşturulan analiz modeli Şekil 4.20'de verilmiştir. Sınır koşulu olarak sonlu elemanlar programında bulunan mevcut sınır koşulları uygulanmış, analiz modelinin sağında ve solunda yatay deplasman engellenip sadece düşey deplasmana izin verilmiştir. Tabanda ise hem yatay hem düşey deplasman engellemiştir. Mesh seçenekleri arasında çok sıkı seçeneği seçilmiş ve d23 noktasına karşılık gelen dolgu tabanı için mesh sıkılaştırması yapılmıştır.

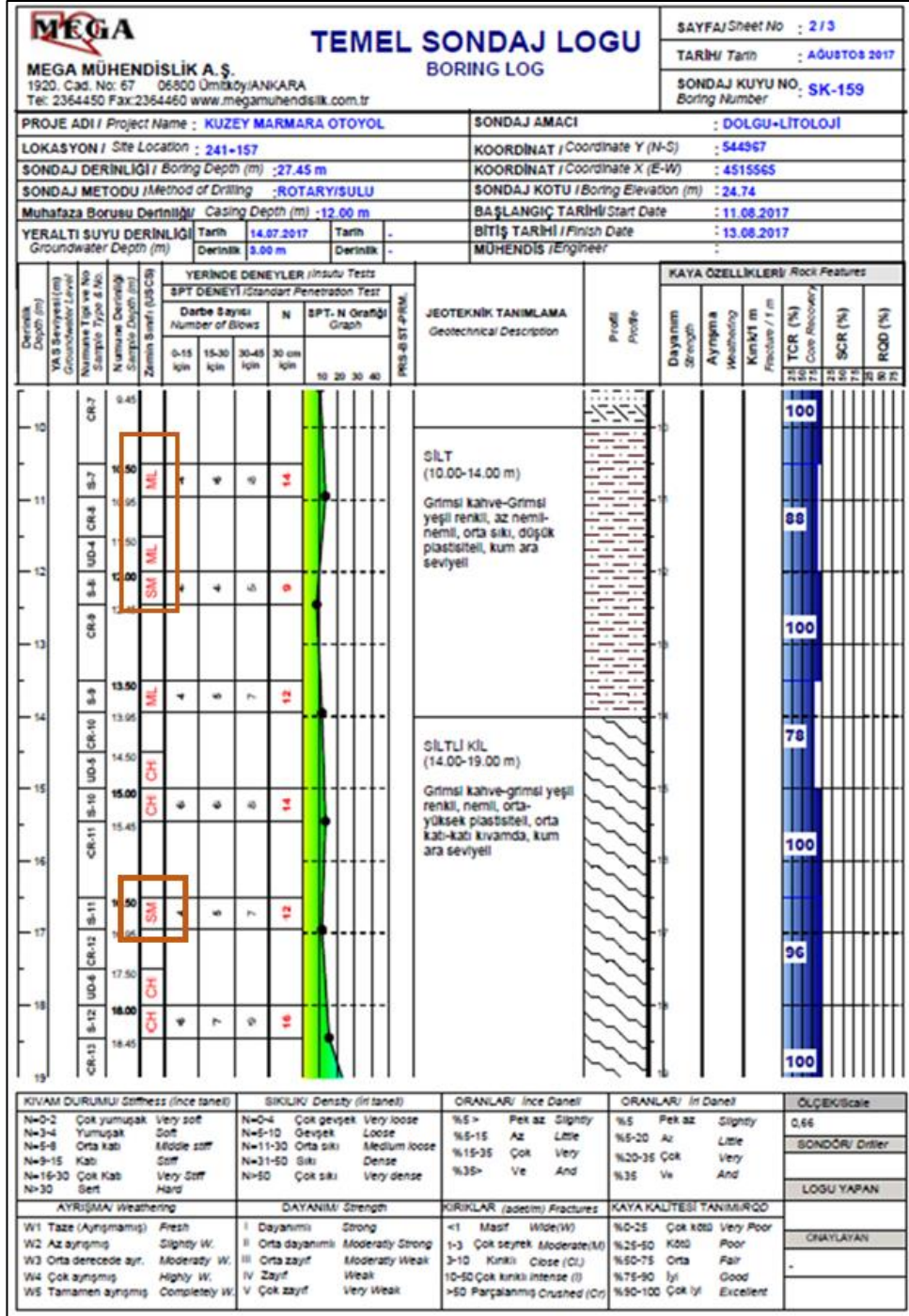
Sınır koşulları tanımlandıktan sonra başlangıç koşullarına geçilmiştir. Test dolgusunun bulunduğu kilometre aralığında açılan sondajlardan yararlanılarak 3m derinlikte yeraltı suyu tanımlanmış ve suyun birim hacim ağırlığı $\gamma_w=10\text{kN/m}^3$ olarak alınmıştır. Kil birimlerde modelin her iki tarafında drenajı önlemek için konsolidasyon sınırlandırılmıştır. Kum bantlarında ise suyun drenajına izin vermek adına bu sınırlar kaldırılmıştır.



Şekil 4.20. Sonlu elemanlar programında oluşturulan analiz modeli

5,5m yüksekliğinde dolgu imal edilirken arazide bir seferde 0,5m kalınlığında dolgu tabakası imal edilebilmektedir. Bir günde bir kilometre mesafe boyunca toplamda iki tabaka dolgu imalatı yapılabilmektedir. Dolayısı ile maksimum 5,5m yüksekliğine sahip test dolgusunun imalat süresi yaklaşık 5,5 gündür. Plaxis 2D programında dolgu için analiz modeli oluşturulurken bu hususlar dikkate alınmış ve her analiz adımında bir günde 1m yüksekliğinde dolgu ağırlığı etki ettirilerek yaklaşık 5,5 gün süren imalat süresiyle birlikte, dolgu konsolidasyon evresi de dahil olmak üzere analiz modeli toplamda 7 adımda oluşturulmuştur.

Analiz modelinde dolgu taban zemini oluşturulurken ilgili kilometre aralığında yapılan sondaj ve laboratuvar verileri incelendiğinde 40m kalınlığındaki kil birimde yer yer SC-SM-ML zemin sınıflarına ait görece geçirimli kum ve silt bantlarının geçildiği görülmektedir. Şekil 4.21’de bir adet örnek sondaj logu üzerinde kum ve silt bandı geçişleri gösterilmiştir.



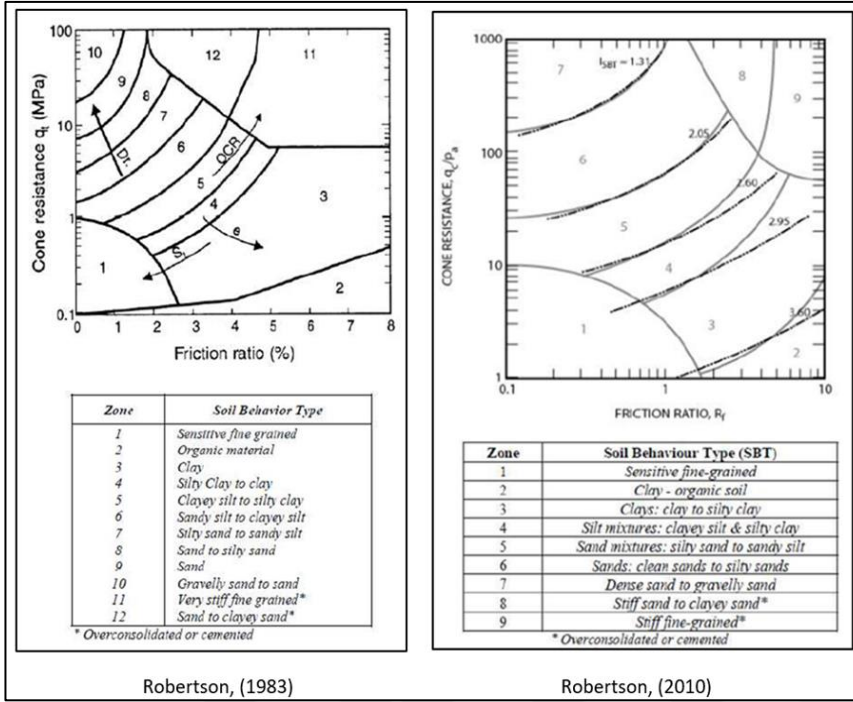
Şekil 4.21. SPT deney logunda rastlanan kum ve silt bantları

SPT deneyi 1,5m aralıklarla gerçekleştirilmekte olup, bu verilerle belirlenebilen granüler tabaka geçişleri Şekil 4.22’de verilmiştir. Bu verilere göre sadece SPT verileriyle dolgu tabanındaki kil birim için kum bandı aralığı yaklaşık olarak 8m olarak belirlenmiştir.

Derinlik	SK-159	SK-164	SK-238+066	SK-238-143	SK-165	SK-239+664	SK-240+00
1,5	7	15	7	5	5	9	14
3	7	14	8	9	7	10	13
4,5	9	9	8	12	8	12	13
6	10	5	10	12	9	9	13
7,5	9	15	11	7	10	15	11
9	11	14	10	8	10	20	13
10,5	14	18	9	13	11	16	16
12	9	12	10	14	11	23	10
13,5	12	14	8	12	10	20	11
15	14	17	6	16	10	18	9
16,5	12	19	6	14	8	30	7
18	16	20	9	12	13	48	13
19,5	36	18	43	13	16	47	15
21	53	26	46	15	44	53	33
22,5	40	19	26	15	39	42	36
24	43	13	26	49	20	45	13
25,5	44	14	18	17	16		21
27	52	16	17	19	23		17
28,5		52	19	19	22		40
30		57	18	13	27		48
31,5		23	18	22	25		35
33		22	18	17	29		
34,5		25	25	18	28		
36			29	28			
37,5			27	29			
39			27	33			
40,5				37			

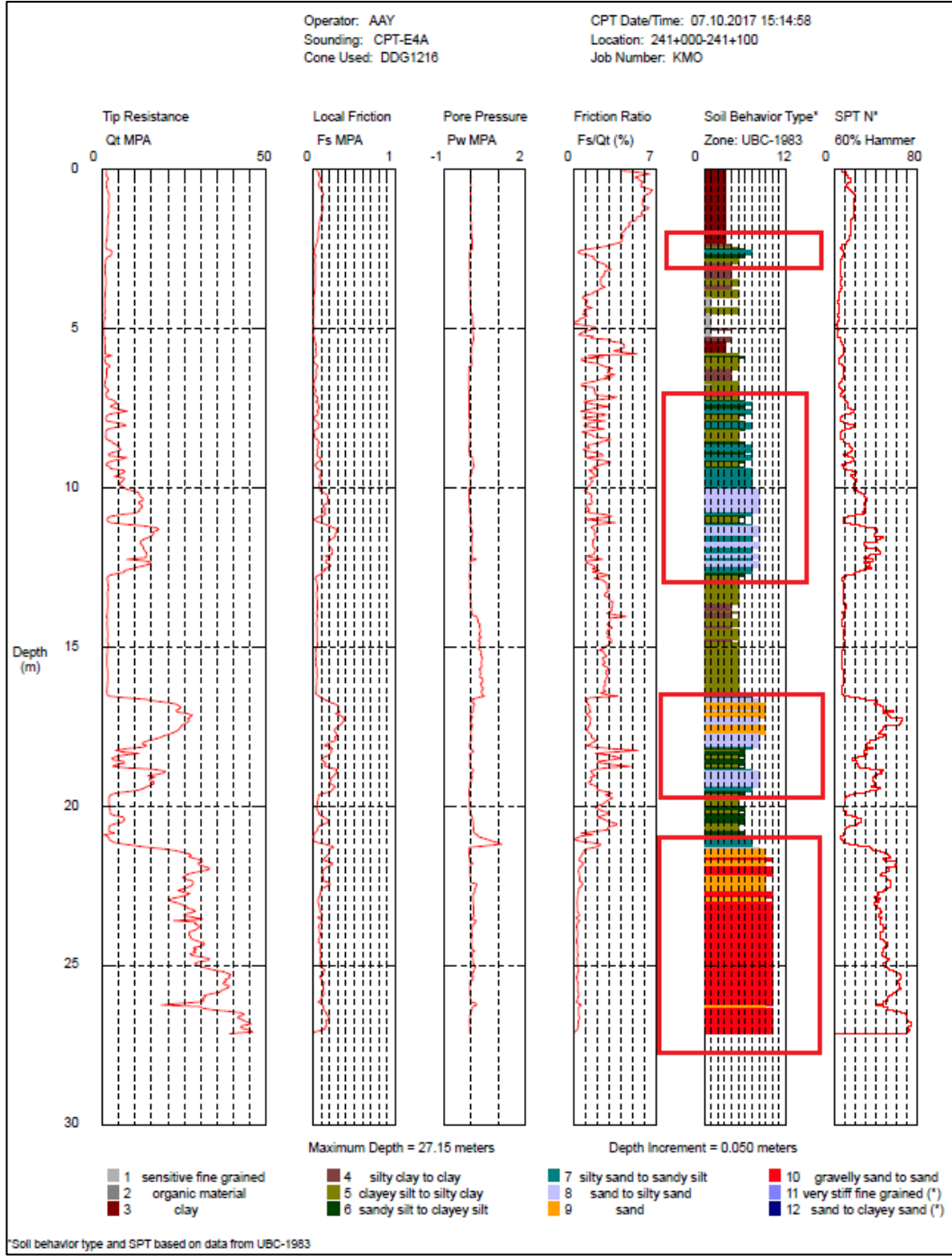
Şekil 4.22. İlgili kilometre aralığında yapılan SPT deney verileri ile belirlenen silt-kum geçişleri ve belirlenen ortalama drenaj mesafeleri

CPT deneyleri iki farklı firmayla gerçekleştirilmiş olup, eklerde verilen deney loglarından da görüleceği üzere, zemin sınıfının belirlenmesinde CPT-E4 deneylerinde Robertson (1983) abağı kullanılmışken, CPT-241-1, CPT-241-3 ve CPT-242-2 deneylerinde Robertson (2010) abağı kullanılmıştır (Şekil 4.23).

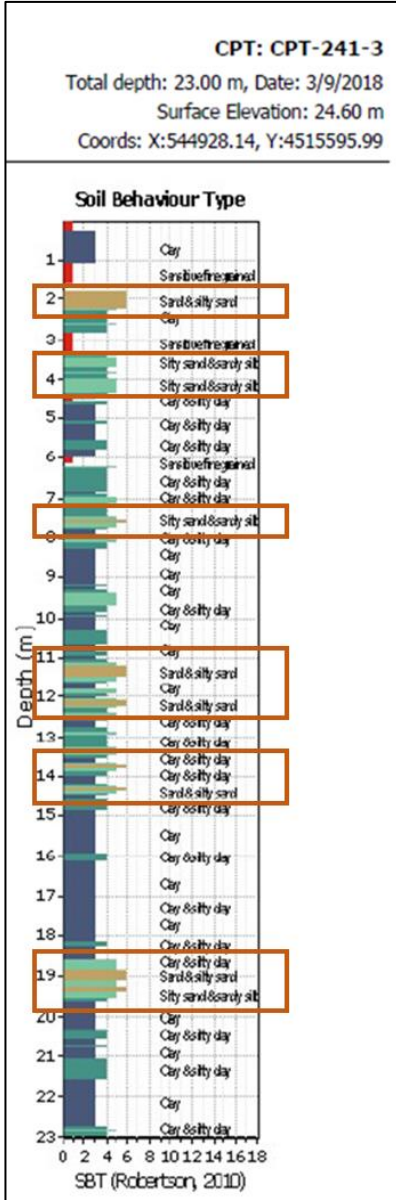


Şekil 4.23. Zemin sınıfı belirlemede kullanılan zemin sınıf tayini (SBT) abakları [29]

CPT deneylerinden elde edilen SBT (Soil Behaviour Type) değerlerine göre zemini sınıflandıran bu yöntemlerle, ilgili kilometre aralığında gerçekleştirilen CPT deney loglarında belirlenen kum ve silt bantları geçişlerinin sondaj sonuçlarına kıyasla daha sık gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 4.24 ve Şekil 4.25’ te farklı firmalar tarafından gerçekleştirilen örnek birer CPT deney logları üzerinde kum bantları gösterilmiştir.



Şekil 4.24. CPT-E4A deney logunda Robertson (1983) ilişkisini kullanan yer alan zemin sınıf tayini (SBT)



Şekil 4.25. CPT-241-3 deney logunda Robertson (2010) ilişkisini kullanan yer alan zemin sınıf tayini (SBT)

CPT deneyi 2cm aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple CPT deney verileri kullanılarak dolgu tabanındaki alüvyon tabakaya ait daha detaylı zemin profili çıkarılabilmektedir. CPT deney verileri ile kum bandı profili belirlenirken Robertson (1983,2010) ilişkilerinden yararlanılarak CPT verilerinden SBT değerlerine göre zemin sınıfı tahmininde bulunulmuştur. CPT-241-1, CPT-241-3 ve CPT-242-2 deneylerinde SBT değerinin 5 ve üzeri olduğu derinliklerde, CPT-E4 deneylerinde ise SBT değerinin 6 ve üzeri olduğu değerlerde granüler bant geçişi bulunduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.26'da çıkarılan profillere göre CPT deneyi ile kum bandı mesafesi yaklaşık olarak 4m olarak belirlenmiştir.

	CPT-E4A	CPT-E4B	CPT-E4C	CPT-E4D	CPT-E4E	CPT-E4F	CPT-E4G	CPT-E4H	CPT-E4I	241-1	241-3	242-2	
0,5	3	3	3	4	3	3	4	4	4	3	3	3	3m
1	3	4	3	4	4	3	4	5	5	2	1	3	
1,5	3	4	4	5	6	3	6	5	5	5	1	4	
2	4	4	4	5	6	4	6	5	5	6	5	3	
2,5	6	3	3	3	3	5	4	3	3	5	3	3	
3	4	4	6	4	3	4	2	6	3	3	3	3	
3,5	5	3	6	6	3	6	4	6	3	4	5	3	
4	2	2	5	1	1	1	1	1	1	4	4	3	
4,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	
5	2	1	2	1	1	1	1	2	1	3	3	3	
5,5	4	5	4	3	3	4	1	4	4	3	3	3	
6	5	5	3	4	1	4	1	5	5	3	3	3	
6,5	4	3	1	1	1	5	4	5	5	4	4	3	
7	5	4	6	5	5	4	3	5	5	3	4	3	
7,5	6	7	6	6	7	7	7	7	7	4	4	1	
8	5	6	5	5	5	6	5	6	5	4	4	4	
8,5	7	5	5	7	5	5	5	6	3	3	3	4	
9	6	6	6	8	7	5	7	7	8	4	4	3	
9,5	7	6	6	7	5	5	7	5	6	4	4	3	
10	8	6	5	7	7	5	7	6	6	4	3	3	
10,5	7	6	5	6	7	7	7	5	5	4	4	3	
11	7	7	5	7	5	6	6	5	6	6	6	3	
11,5	7	8	6	7	7	6	6	7	7	5	4	3	
12	8	6	6	7	7	7	7	6	5	6	5	3	
12,5	5	5	5	5	5	5	6	5	5	4	4	3	
13	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	3	
13,5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	3	
14	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	3	
14,5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	4	3	
15	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	3	5	
15,5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	3	5	
16	5	5	5	6	5	5	5	5	6	3	3	4	
16,5	8	7	7	8	8	6	5	7	8	3	3	4	
17	9	6	9	8	8	8	6	7	7	3	3	5	
17,5	8	6	8	5	7	8	7	6	6	3	3	6	
18	6	6	6	7	6	5	5	6	7	4	3	6	
18,5	7	7	8	9	8	7	5	8	8	4	6	4	
19	8	7	8	8	5	6	8	6	5	4	5	3	
19,5	5	5	5	5	5	5	7	6	5	3	3	4	
20	5	5	5	6	5	5	5	5	5	3	3	4	
20,5	5	9	8	8	8	5	5	5	5	3	3	4	
21	8	10	9	9	7	6	5	6	6	3	4	4	
21,5	10	9	8	9	7	6	6	5	6	3	3	5	
22	9	10	8	9	10	6	5	5	7	3	3	3	
22,5	9	10	9	10	10	6	7	6	7	4	3	3	
23	10	10	10	9	10	9	7	6	5	4	3	3	
23,5	10	0	10	10	10	10	10	8					
24	10		9		10	9	10	7					
24,5	10				10	10	10						
25	10				8		10						
25,5	10						10						
26	10						10						
26,5	10						10						
27	7						9						

Şekil 4.26. İlgili kilometre aralığında yapılan CPT deneylerinde SBT değerlerine göre silt-kum geçişleri ve belirlenen ortalama drenaj mesafeleri

Tüm bu veriler incelendiğinde, 40m kalınlığındaki kil tabakasında ortalama her 4m' de bir ML, SM ve SC zemin sınıfına ait silt ve kum bantlarının yer aldığı tespit edilmiştir. Bu bantların drenaj bandı olarak çalışacağı düşünülmüş ve bu sebeple oluşturulan sonlu eleman modelinde dolgu tabanında yer alan kil birimde 4m aralıkla kum bandı oluşumuna yer verilmiştir.

4.2.2. Analizde kullanılacak parametrelerin belirlenmesi

Bu çalışmada sonlu elemanlar analizinde Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılmıştır. Mohr-Coulomb malzeme modeli basit bir elasto-plastik model olup, temel laboratuvar

deneylemleri ile elde edilen en yaygın geoteknik parametreleri kullanır [28]. Bu geoteknik parametreler Çizelge 4.17’de verilmiştir.

Çizelge 4.17. Sonlu elemanlar analizinde Mohr-Coulomb malzeme modelinde kullanılan geoteknik parametreler

$E_{ref} (E_{def})$: Deformasyon modülü (kPa)
ν	: Poisson oranı
c'	: Efektif kohezyon (kPa)
ϕ'	: Efektif içsel sürtünme açısı ($^{\circ}$)
Ψ	: Dilatasyon açısı ($^{\circ}$)

Analiz modeli oluşturulduktan sonra öncelikle dolgu malzemesine ait Mohr-Coulomb parametreleri tespit edilmiştir. Bölüm 3.1’de anlatıldığı üzere dolgu malzemesi için en kötü durumda parametre seçiminde SC-SM zemin sınıfında olduğu kabul edilmiş ve dolgu malzemesi için dayanım parametreleri efektif kohezyon $c'=5$ kPa, efektif içsel sürtünme açısı $\phi'=33^{\circ}$, kuru birim hacim ağırlık $\gamma=20$ kN/m³, deformasyon modülü sıkı kum için $E_{ref}=50000$ MPa ve Poisson oranı $\nu=0,3$ olarak [30], yatay ve düşey yönde permeabilite değerleri $k_x=k_y=1$ m/gün olarak analizlerde kullanılmıştır. Dilatasyon açısı (Ψ) ise içsel sürtünmeye bağlı olarak Eşitlik 4.10 yardımıyla $\Psi=3^{\circ}$ olarak hesaplanmıştır.

$$\phi > 30^{\circ} \text{ ise } \Psi = \phi - 30^{\circ} \quad (4.10)$$

$$\phi < 30^{\circ} \text{ ise } \Psi = 0^{\circ} \quad (4.11)$$

Dolgu taban zeminindeki kil birimde bulunan silt ve kum geçişleri için parametreler belirlenirken CPT deney verilerinden yararlanılmış olup, silt içeriği de düşünülerek efektif kohezyon değeri $c'=1$ kPa, kuru birim hacim ağırlık $\gamma=19$ kN/m³, efektif içsel sürtünme açısı $\phi'=30^{\circ}$ ve dolayısı ile Eşitlik 4.10 yardımı ile dilatasyon açısı $\Psi=0^{\circ}$ olarak belirlenmiştir. EK-4’te verilen CPT loglarına bakıldığında silt ve kum bandı geçişlerinde koni direnci yaklaşık olarak $q_c=5$ MPa olarak okunmaktadır. Kumlu birimlerde deformasyon modülü için Eşitlik 4.12’den yararlanılmış [30] ve deformasyon modülü;

$$E_s = 4q_c \quad (4.12)$$

$E_s = 4 \times 5000 = 20000 \text{ kPa}$ olarak hesaplanmıştır. Poisson oranı $\nu=0,3$ olarak [30], yatay ve düşey yönde permeabilite değerleri ise görece geçirimli olacağı için kil birime kıyasla çok yüksek değerler alınarak suyun bu tabakalardan hızlı drene olması adına $k_x=k_y=100 \text{ m/gün}$ olarak analizlerde kullanılmıştır.

Analizlerde dolgu tabanında yer alan kil birim için kullanılacak olan parametreler arasında efektif kohezyon değeri ile içsel sürtünme açısının belirlenmesi Bölüm 3 kapsamında incelenmiş olup, dilatasyon açısı (Ψ) Eşitlik 4.10 yardımıyla içsel sürtünme açısına göre $\Psi=0^\circ$ olarak tespit edilmiştir.

Kil birim için Poisson oranı belirlenirken Wroth (1975) ilişkisi kullanılmıştır. Wroth'un yaptığı deneylere dayanarak sunduğu Poisson oranı için Eşitlik 4.13'te verilmiştir [31].

$$\nu = 0,25 + 0,00225 \times PI \quad (4.13)$$

Denklemden yer alan PI değeri plastisite indisi olup, EK-5'te verilen laboratuvar sonuçlarından yararlanılarak dolgu tabanındaki kil birim için ortalama $PI=30$ olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla Poisson oranı;

$\nu = 0,25 + 0,00225 \times 30 = 0,3175$ olarak hesaplanmış olup, analizlerde $\nu=0,3$ olarak kullanılmıştır.

Kil birim için analizde kullanılan diğer parametreler (E_{ref} , k_y , k_x) ise laboratuvar ortamında gerçekleştirilen konsolidasyon deney verileri ile SPT, CPT, PMT korelasyonlarından yararlanılarak belirlenmiştir.

Laboratuvar deney verileri kullanılarak belirlenen parametreler ile sonlu elemanlar analizi

Analizler gerçekleştirilirken dolgu tabanı 3m kalınlığında tabakalara ayrılmış ve farklı sondajlarda ilgili derinlikten alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar sonuçları kullanılarak belirlenen değerlerin ortalamaları alınmıştır. Böylece analizlerde kullanılmak üzere kil biriminde her tabaka için ortalama geoteknik parametreler belirlenmiştir.

Öncelikle laboratuvar deney verileri yardımıyla her tabaka için birim hacim ağırlık ve boşluk oranı (e_0) değerleri belirlenmiştir. Ardından konsolidasyon deney sonuçlarından yararlanılarak elde edilen hacimsel sıkışma katsayıları (Çizelge 4.7) ile Eşitlik 4.14 kullanılarak ödometrik deformasyon modülleri elde edilmiştir.

$$E_{oed} = 1/m_v \quad (4.14)$$

Her bir tabaka için belirlenen ödometrik deformasyon modülleri kullanılarak Eşitlik 4.15 ve Eşitlik 4.16 yardımıyla deformasyon modülü (E_{def}) değerleri hesaplanmıştır. Eşitlik 4.16'da yer alan ' ν ' değeri Poisson oranı olup, dolgu tabanındaki kil birim için $\nu=0,30$ olarak hesaplarda kullanılmıştır.

$$E_{oed} = E_{def} / \beta \quad (4.15)$$

$$\beta = 1 - \frac{2\nu^2}{(1-\nu)} \quad (4.16)$$

Düşey yönde permeabilite (k_y) değeri, bu çalışmada Eşitlik 4.17 yardımıyla tespit edilmiştir. Denklemden yer alan m_v değeri hacimsel sıkışma katsayısı, c_v değeri konsolidasyon katsayısıdır. γ_w değeri ise suyun birim hacim ağırlığı olup hesaplarda 10kN/m^3 olarak kullanılmıştır.

$$k_y = m_v \times c_v \times \gamma_w \quad (4.17)$$

Konsolidasyon katsayısı değeri mertebesinin tespiti Oturma Zamanı Değerlendirmeleri başlığı altında detaylı olarak incelenmiş olup, yapılan incelemeler sonucunda test dolgusunun teşkil edildiği kil birimde konsolidasyon katsayısı $c_v=0,004\text{cm}^2/\text{sn}$ mertebesinde tahmin edilmiştir. Kil birim için yatay yönde permeabilite (k_x) değeri ise k_y değerinin 2 ile 10 katı arasında değişmekte olup [32], bu çalışma kapsamında $k_x= 2k_y$ olarak analizlerde kullanılmıştır.

Konsolidasyon deney verilerinden yararlanılarak elde edilen ortalama geoteknik parametreler Çizelge 4.18'de verilmiştir.

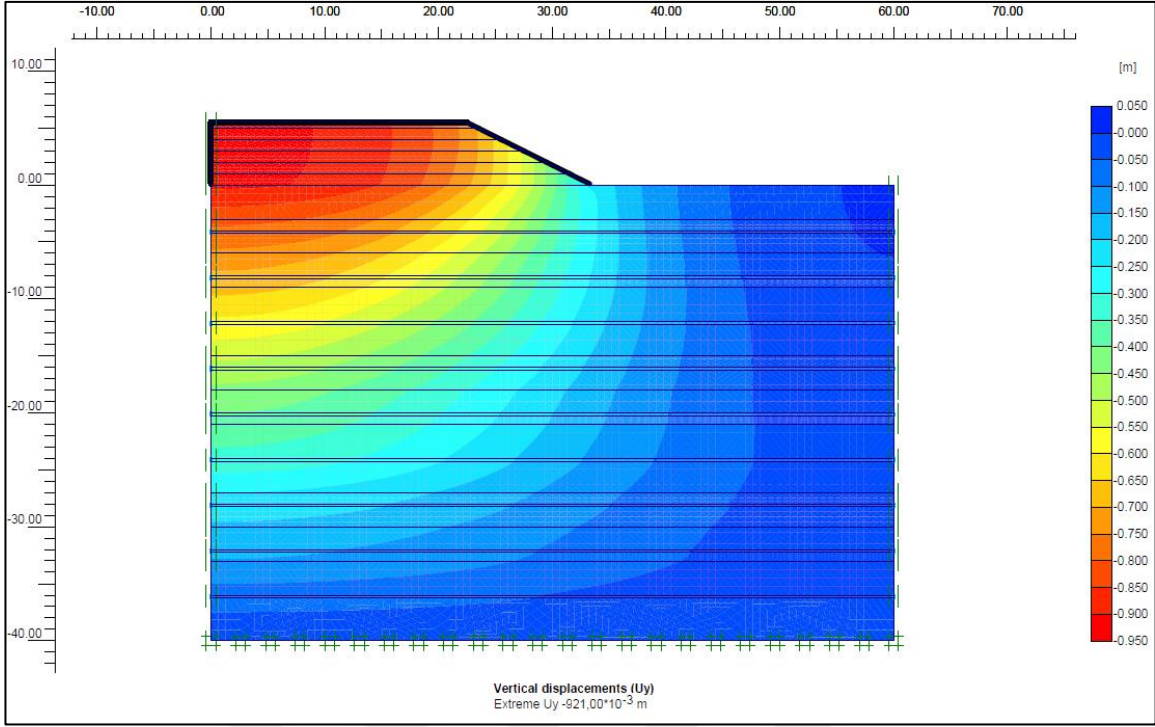
Çizelge 4.18. Konsolidasyon deney verileri ile elde edilen hacimsel sıkışma katsayılarından yararlanılarak belirlenen deformasyon modülleri ve permeabiliteler

Derinlik (m)	m_v (m^2/kN)	E_{oed} (kN/m^2)	E_{ref} (kN/m^2)	k_y (m/gün)	k_x ($2k_y$) (m/gün)
0-3	0,000287	3487	2590	9,9E-05	2,0E-04
3-6	0,000232	4315	3205	8,0E-05	1,6E-04
6-9	0,000223	4488	3334	7,7E-05	1,5E-04
9-12	0,000238	4202	3121	8,2E-05	1,6E-04
12-15	0,000243	4119	3060	8,4E-05	1,7E-04
15-18	0,000236	4231	3143	8,2E-05	1,6E-04
18-21	0,000131	7615	5657	4,5E-05	9,1E-05
21-24	0,000155	6452	4793	5,4E-05	1,1E-04
24-27	0,000230	4348	3230	7,9E-05	1,6E-04
27-30	0,000209	4785	3554	7,2E-05	1,4E-04
30-33	0,000150	6667	4952	5,2E-05	1,0E-04
33-36	0,000260	3846	2857	9,0E-05	1,8E-04
36-40	0,000240	4167	3095	8,3E-05	1,7E-04

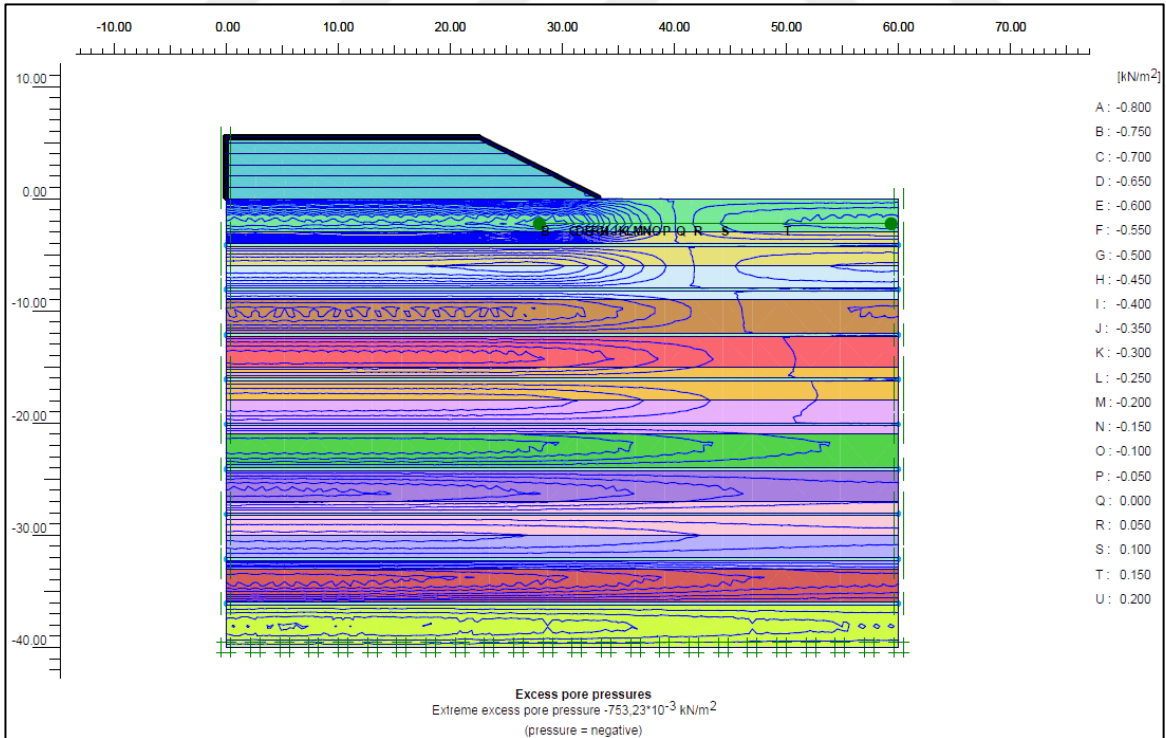
Laboratuvar deney sonuçlarından yararlanılarak elde edilen parametrelerle sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş olup, analizde kullanılan parametreler Şekil 4.27’de, sonlu elemanlar analiz sonucu Şekil 4.28’de, konsolidasyon tamamlandıktan sonra dolgu taban zeminindeki aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı Şekil 4.29’da verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda konsolidasyon oturması tamamlanana kadar ~92cm oturma meydana geldiği tespit edilmiştir.

ID	Name	Type	γ_{unsat} [kN/m^3]	γ_{sat} [kN/m^3]	k_x [m/day]	k_y [m/day]	ν [-]	E_{ref} [kN/m^2]	c_{ref} [kN/m^2]	ϕ [°]	ψ [°]
1	Dolgu	Drained	20,0	20,0	1,0000	1,0000	0,30	50000,0	5,0	33,0	3,0
2	Kil1	Undrained	18,0	19,0	2,0000E-4	1,0000E-4	0,30	2590,0	5,0	26,0	0,0
3	Kil2	Undrained	18,0	19,0	1,6000E-4	8,0000E-5	0,30	3205,0	5,0	26,0	0,0
4	Kil3	Undrained	18,0	19,0	1,5400E-4	7,7000E-5	0,30	3334,0	5,0	26,0	0,0
5	Kil4	Undrained	18,0	19,0	1,6000E-4	8,2000E-5	0,30	3121,0	5,0	26,0	0,0
6	Kil5	Undrained	18,0	19,0	1,6000E-4	8,4000E-5	0,30	3060,0	5,0	26,0	0,0
7	Kil6	Undrained	18,0	19,0	1,6000E-4	8,2000E-5	0,30	3145,0	5,0	26,0	0,0
8	Kil7	Undrained	18,0	19,0	9,0000E-5	4,5000E-5	0,30	5657,0	5,0	26,0	0,0
9	Kil8	Undrained	19,0	20,0	1,0000E-4	5,4000E-5	0,30	4793,0	10,0	26,0	0,0
10	Kil9	Undrained	19,0	20,0	1,5000E-4	7,9000E-5	0,30	3223,0	10,0	26,0	0,0
11	Kil10	Undrained	19,0	20,0	1,4000E-4	7,2000E-5	0,30	3554,0	10,0	26,0	0,0
12	Kil11	Undrained	19,0	20,0	1,0000E-4	5,2000E-5	0,30	4950,0	15,0	27,0	0,0
13	Kil12	Undrained	19,0	20,0	1,8000E-4	9,0000E-5	0,30	2857,0	15,0	27,0	0,0
14	Kil13	Undrained	19,0	20,0	1,7000E-4	8,0000E-5	0,30	3095,0	15,0	27,0	0,0
15	Kum	Drained	19,0	20,0	100,0000	100,0000	0,30	20000,0	1,0	30,0	0,0

Şekil 4.27. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için konsolidasyon deney verilerinden yararlanılarak gerçekleştirilen oturma analizinde kullanılan parametreler



Şekil 4.28. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için konsolidasyon deney verilerinden yararlanılarak gerçekleştirilen oturma analizi sonucu



Şekil 4.29. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için konsolidasyon verileriyle elde edilen konsolidasyon tamamlandıktan sonra aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı

SPT deney verileri ile sonlu elemanlar analizinde kullanılan geoteknik parametrelerin belirlenmesi

Test dolgusu kilometre aralığında açılan sondajlardan yararlanılarak dolgu taban zemininde 3m kalınlığında ayrılan her tabaka için ortalama hacimsel sıkışma katsayıları belirlenmiş ve Çizelge 4.8’de verilmiştir. SPT verileri kullanılarak elde edilen hacimsel sıkışma katsayıları kullanılarak Eşitlik 4.14 yardımıyla bu tabakalar için ödometrik deformasyon modülleri (E_{oed}), Eşitlik 4.15 ve Eşitlik 4.16 kullanılarak deformasyon modülleri (E_{def}) belirlenmiştir. Konsolidasyon katsayısı $c_v=0,004\text{cm}^2/\text{sn}$ mertebesinde belirlenen dolgu tabanındaki kil birim için Eşitlik 4.17 kullanılarak düşey ve yatay yönde permeabilite değerleri (k_y , k_x) belirlenmiş ve Çizelge 4.19’da verilmiştir.

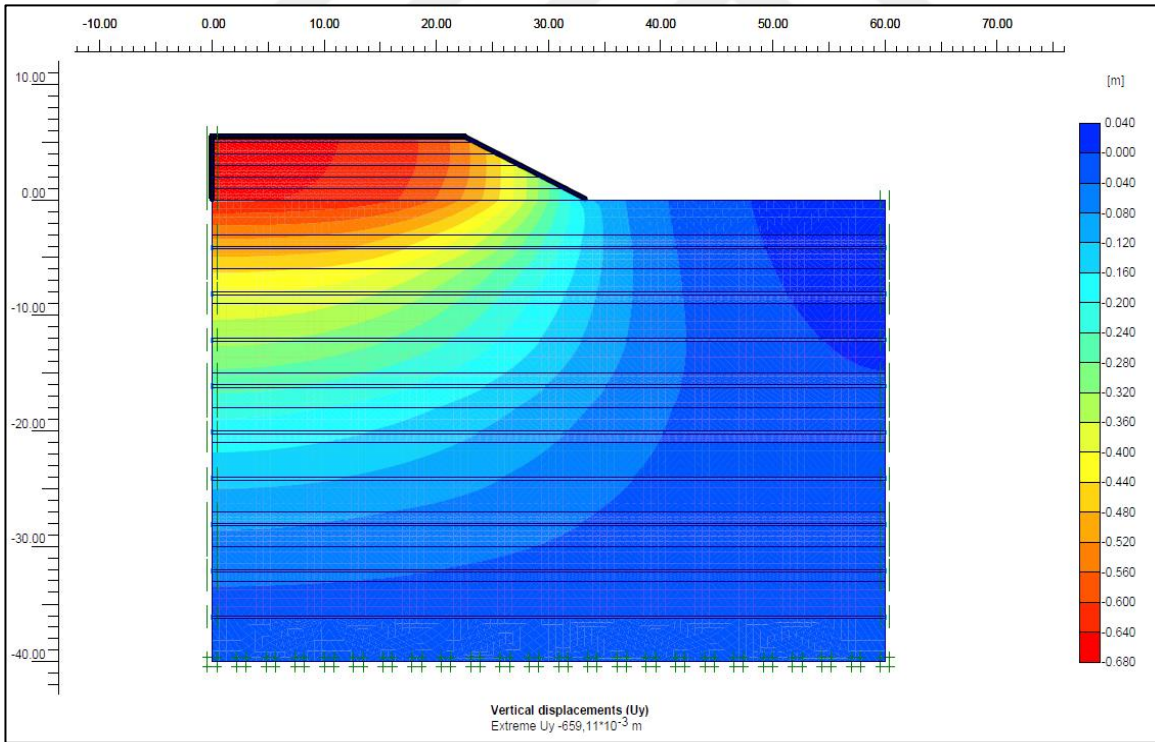
Çizelge 4.19. Analizde kullanılmak üzere SPT verileri ile elde edilen hacimsel sıkışma katsayılarından yararlanılarak belirlenen deformasyon modülleri ve permeabiliteler

Derinlik (m)	m_v (m^2/kN)	E_{oed} (kN/m^2)	E_{def} (kN/m^2)	k_y (m/gün)	k_x ($2k_y$) (m/gün)
0-3	0,000334	2997	2226	1,2E-04	2,3E-04
3-6	0,000251	3982	2958	8,7E-05	1,7E-04
6-9	0,000193	5170	3841	6,7E-05	1,3E-04
9-12	0,000154	6512	4837	5,3E-05	1,1E-04
12-15	0,000177	5643	4192	6,1E-05	1,2E-04
15-18	0,000183	5476	4068	6,3E-05	1,3E-04
18-21	0,000132	7580	5631	4,6E-05	9,1E-05
21-24	0,000118	8460	6284	4,1E-05	8,2E-05
24-27	0,000102	9822	7296	3,5E-05	7,0E-05
27-30	0,000089	11295	8391	3,1E-05	6,1E-05
30-33	0,000084	11967	8890	2,9E-05	5,8E-05
33-36	0,000075	13256	9847	2,6E-05	5,2E-05
36-40	0,000067	14867	11044	2,3E-05	4,6E-05

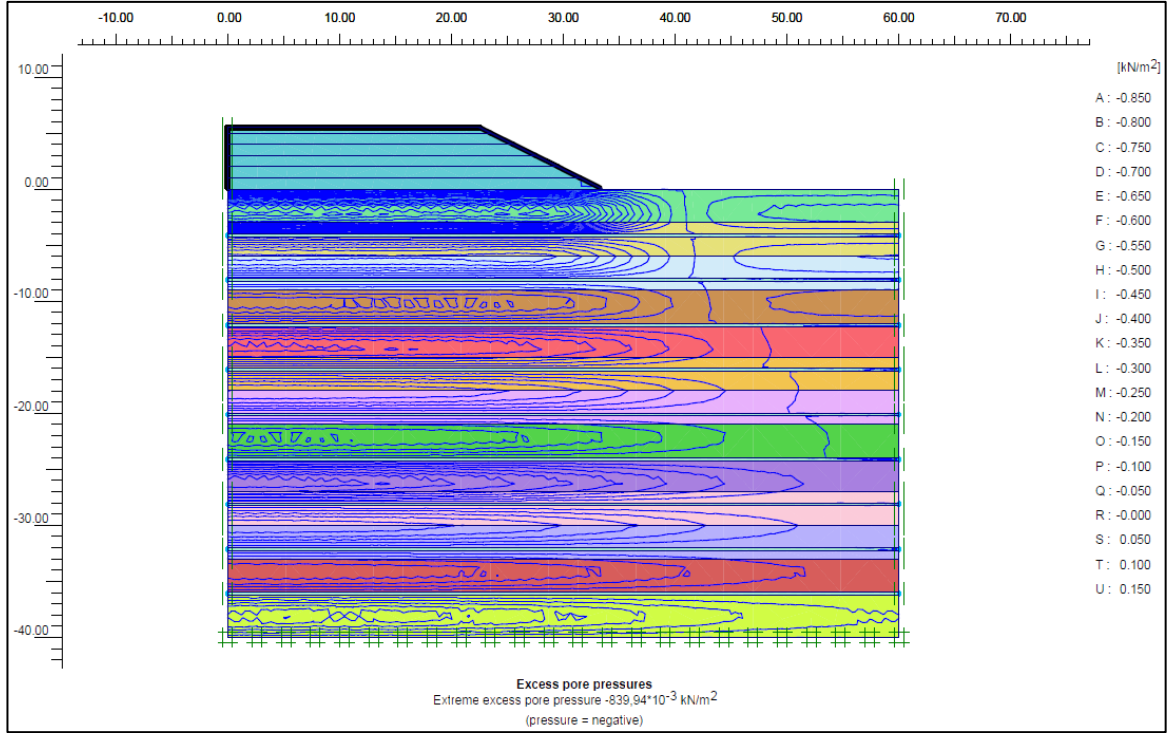
SPT deney verilerinden yararlanılarak elde edilen parametrelerle sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş olup, analizde kullanılan parametreler Şekil 4.30’da, sonlu elemanlar analiz sonucu Şekil 4.31’de, konsolidasyon tamamlandıktan sonra dolgu taban zeminindeki aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı Şekil 4.32’de verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda konsolidasyon oturması tamamlanana kadar ~65cm oturma tespit edilmiştir.

ID	Name	Type	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	k_x [m/day]	k_y [m/day]	ν [-]	E_{ref} [kN/m ²]	c_{ref} [kN/m ²]	ϕ [°]	ψ [°]
1	Dolgu	Drained	20,0	20,0	1,0000	1,0000	0,30	50000,0	5,0	35,0	3,0
2	Kil1	Undrained	18,0	19,0	2,3000E-4	1,2000E-4	0,30	2226,0	5,0	26,0	0,0
3	Kil2	Undrained	18,0	19,0	1,7000E-4	8,7000E-5	0,30	2958,0	5,0	26,0	0,0
4	Kil3	Undrained	18,0	19,0	1,3000E-4	6,7000E-5	0,30	3841,0	5,0	26,0	0,0
5	Kil4	Undrained	18,0	19,0	1,0000E-4	5,3000E-5	0,30	4837,0	5,0	26,0	0,0
6	Kil5	Undrained	18,0	19,0	1,2000E-4	6,1000E-5	0,30	4192,0	5,0	26,0	0,0
7	Kil6	Undrained	18,0	19,0	1,2000E-4	6,3000E-5	0,30	4068,0	5,0	26,0	0,0
8	Kil7	Undrained	18,0	19,0	9,0000E-5	4,6000E-5	0,30	5631,0	5,0	26,0	0,0
9	Kil8	Undrained	19,0	20,0	8,0000E-5	4,1000E-5	0,30	6284,0	10,0	26,0	0,0
10	Kil9	Undrained	19,0	20,0	7,0000E-5	3,5000E-5	0,30	7296,0	10,0	26,0	0,0
11	Kil10	Undrained	19,0	20,0	6,2000E-5	3,1000E-5	0,30	8391,0	10,0	26,0	0,0
12	Kil11	Undrained	19,0	20,0	5,8000E-5	2,9000E-5	0,30	8890,0	15,0	27,0	0,0
13	Kil12	Undrained	19,0	20,0	5,2000E-5	2,6000E-5	0,30	9847,0	15,0	27,0	0,0
14	Kil13	Undrained	19,0	20,0	4,6000E-5	2,3000E-5	0,30	11044,0	15,0	27,0	0,0
15	Kum	Drained	19,0	20,0	100,0000	100,0000	0,30	20000,0	1,0	30,0	0,0

Şekil 4.30. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için SPT deney verilerinden yararlanılarak gerçekleştirilen oturma analizinde kullanılan parametreler



Şekil 4.31. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için SPT deney verilerinden yararlanılarak gerçekleştirilen oturma analizi sonucu



Şekil 4.32. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için SPT deney verileriyle elde edilen konsolidasyon miktarı tamamlandıktan sonra aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı

PMT deney verileri ile sonlu elemanlar analizinde kullanılan geoteknik parametrelerin belirlenmesi

İlgili kilometre aralığında yapılan iki adet PMT deneyinden yararlanılarak parametre belirlenirken öncelikle PMT deney aralıklarına bağlı olarak test dolgusu taban zemini 2m kalınlığında tabakalara ayrılmıştır. Söz konusu tabakalar için PMT verilerinden yararlanılarak belirlenen ortalama hacimsel sıkışma katsayıları (Çizelge 4.9) kullanılarak Eşitlik 4.14 yardımıyla bu tabakalar için ödometrik deformasyon modülleri (E_{oed}), Eşitlik 4.15 ve Eşitlik 4.16 yardımıyla deformasyon modülleri (E_{def}) hesaplanmıştır. Konsolidasyon katsayısı $c_v=0,004\text{cm}^2/\text{sn}$ mertebesinde tespit edilen dolgu tabanındaki kil birim için analizde kullanılmak üzere Eşitlik 4.17 yardımıyla düşey ve yatay yönde permeabilite değerleri (k_y , k_x) belirlenmiş ve Çizelge 4.20’de verilmiştir.

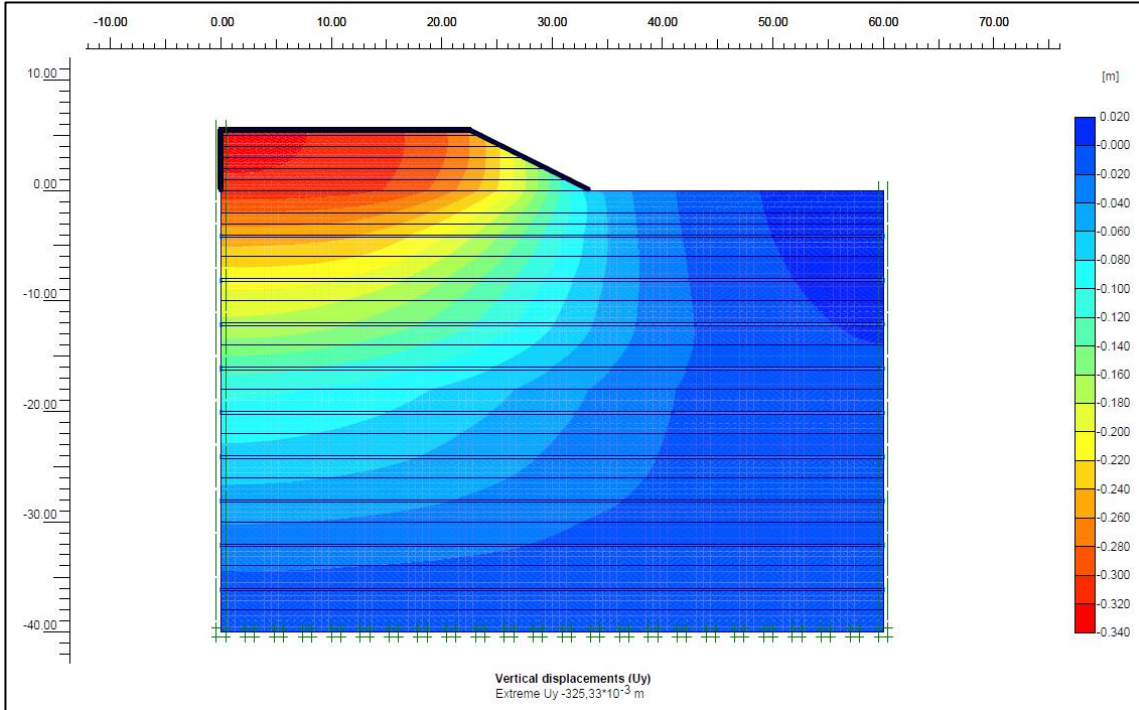
Çizelge 4.20. Analizde kullanılmak üzere PMT verileri ile elde edilen hacimsel sıkışma katsayılarından yararlanılarak belirlenen deformasyon modülleri ve permeabiliteler

Derinlik (m)	m_v (m ² /kN)	E_{oed} (kN /m ²)	E_{def} (kN /m ²)	k_y (m/gün)	k_x (2 k_y) (m/gün)
0-2	0,00016	6221	3876	6,9E-05	1,4E-04
2-4	0,00013	7694	4794	5,6E-05	1,1E-04
4-6	0,00007	13538	8436	3,2E-05	6,4E-05
6-8	0,00010	10187	6347	4,2E-05	8,5E-05
8-10	0,00008	13139	8187	3,3E-05	6,6E-05
10-12	0,00007	14768	9202	2,9E-05	5,9E-05
12-14	0,00011	9445	5885	4,6E-05	9,1E-05
14-16	0,00012	8505	5299	5,1E-05	1,0E-04
16-18	0,00011	9221	5746	4,7E-05	9,4E-05
18-20	0,00006	16792	10462	2,6E-05	5,1E-05
20-22	0,00006	17691	11023	2,4E-05	4,9E-05
22-24	0,00005	21400	13334	2,0E-05	4,0E-05
24-26	0,00006	17841	11116	2,4E-05	4,8E-05
26-28	0,00007	14693	9155	2,9E-05	5,9E-05
28-30	0,00006	16486	10272	2,6E-05	5,2E-05
30-32	0,00004	23537	14666	1,8E-05	3,7E-05
32-34	0,00006	17090	10648	2,5E-05	5,1E-05
34-36	0,00004	24141	15042	1,8E-05	3,6E-05
36-38	0,00004	23236	14478	1,9E-05	3,7E-05
38-40	0,00004	25684	16003	1,7E-05	3,4E-05

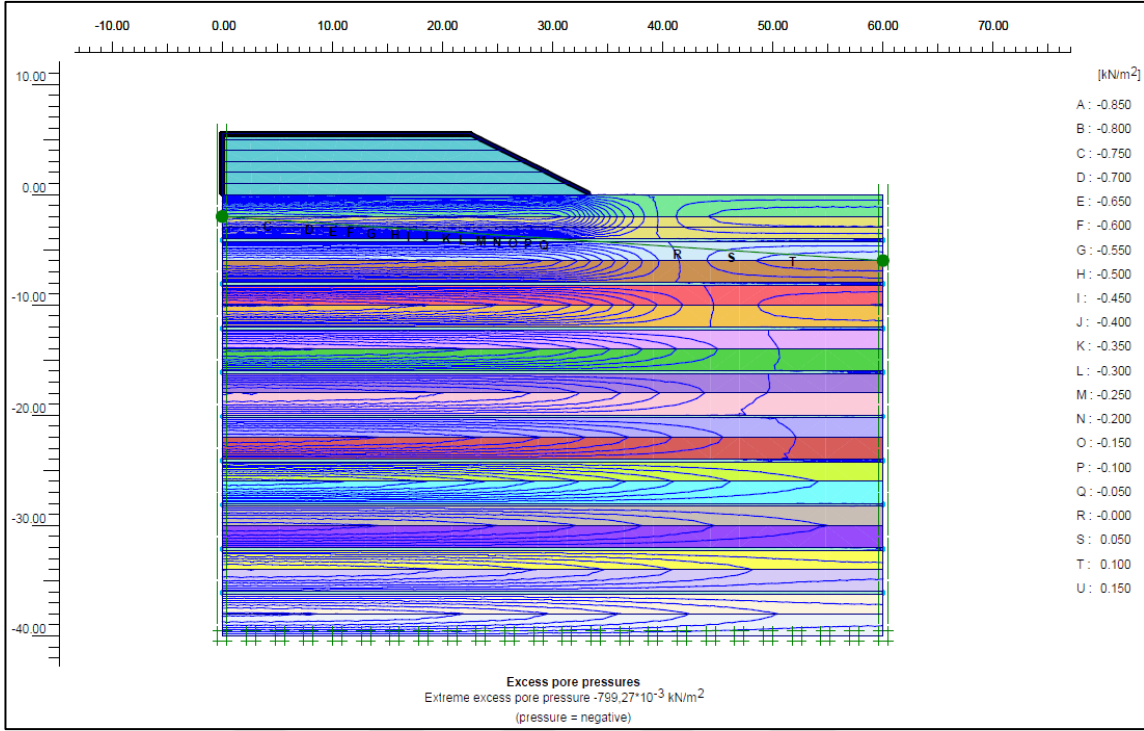
PMT deney verilerinden yararlanılarak elde edilen parametrelerle sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş olup, analizde kullanılan parametreler Şekil 4.33'te, sonlu elemanlar analiz sonucu Şekil 4.34, konsolidasyon tamamlandıktan sonra dolgu taban zeminindeki aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı Şekil 4.35'te verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda konsolidasyon oturması tamamlanana kadar ~33cm oturma tespit edilmiştir.

ID	Name	Type	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	k_x [m/day]	k_y [m/day]	ν [-]	E_{ref} [kN/m ²]	c_{ref} [kN/m ²]	ϕ [°]	ψ [°]
1	Dolgu	Drained	20,0	20,0	1,0000	1,0000	0,30	50000,0	5,0	33,0	3,0
2	Kil1	Undrained	18,0	19,0	1,1000E-4	5,6000E-5	0,30	4621,0	5,0	26,0	0,0
3	Kil2	Undrained	18,0	19,0	9,0000E-5	4,5000E-5	0,30	5715,0	5,0	26,0	0,0
4	Kil3	Undrained	18,0	19,0	5,2000E-5	2,6000E-5	0,30	10057,0	5,0	26,0	0,0
5	Kil4	Undrained	18,0	19,0	6,8000E-5	3,4000E-5	0,30	7568,0	5,0	26,0	0,0
6	Kil5	Undrained	18,0	19,0	5,2000E-5	2,6000E-5	0,30	9761,0	5,0	26,0	0,0
7	Kil6	Undrained	18,0	19,0	4,6000E-5	2,3000E-5	0,30	10971,0	5,0	26,0	0,0
8	Kil7	Undrained	18,0	19,0	7,4000E-5	3,7000E-5	0,30	7016,0	5,0	26,0	0,0
9	Kil8	Undrained	18,0	19,0	8,0000E-5	4,1000E-5	0,30	6318,0	5,0	26,0	0,0
10	Kil9	Undrained	18,0	19,0	7,4000E-5	3,7000E-5	0,30	6850,0	5,0	26,0	0,0
11	Kil10	Undrained	18,0	19,0	2,8000E-5	1,4000E-5	0,30	18318,0	5,0	26,0	0,0
12	Kil11	Undrained	19,0	20,0	3,0000E-5	1,5000E-5	0,30	17215,0	10,0	26,0	0,0
13	Kil12	Undrained	19,0	20,0	2,8000E-5	1,4000E-5	0,30	19005,0	10,0	26,0	0,0
14	Kil13	Undrained	19,0	20,0	2,8000E-5	1,4000E-5	0,30	17982,0	10,0	26,0	0,0
15	Kil14	Undrained	19,0	20,0	3,4000E-5	1,7000E-5	0,30	15081,0	10,0	26,0	0,0
16	Kil15	Undrained	19,0	20,0	4,2000E-5	2,1000E-5	0,30	12247,0	10,0	26,0	0,0
17	Kil16	Undrained	19,0	20,0	3,0000E-5	1,5000E-5	0,30	17485,0	15,0	27,0	0,0
18	Kil17	Undrained	19,0	20,0	4,0000E-5	2,0000E-5	0,30	12696,0	15,0	27,0	0,0
19	Kum	Drained	19,0	20,0	100,0000	100,0000	0,30	20000,0	1,0	30,0	0,0
20	Kil18	Undrained	19,0	20,0	2,8000E-5	1,4000E-5	0,30	17933,0	15,0	27,0	0,0
21	Kil19	Undrained	19,0	20,0	3,0000E-5	1,5000E-5	0,30	17261,0	15,0	27,0	0,0
22	Kil20	Undrained	19,0	20,0	2,7000E-5	1,3000E-5	0,30	19080,0	15,0	27,0	0,0

Şekil 4.33. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için SPT deney verilerinden yararlanılarak gerçekleştirilen oturma analizinde kullanılan parametreler



Şekil 4.34. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için PMT deney verilerinden yararlanılarak gerçekleştirilen oturma analizi sonucu



Şekil 4.35. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için PMT deney verileriyle elde edilen konsolidasyon miktarı tamamlandıktan sonra aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı

CPT deney verileri ile sonlu elemanlar analizinde kullanılan geoteknik parametrelerin belirlenmesi

İlgili aralıkta yer alan üç adet CPT deneyinden yararlanılarak parametre belirlenirken öncelikle dolgu taban zemini 3m kalınlığında tabakalara ayrılmış ve bu tabakalar için CPT deney verilerinden yararlanan Sanglerat (1972) ilişkisi kullanılarak belirlenen ortalama hacimsel sıkışma katsayıları Çizelge 4.12’de verilmiştir. Hacimsel sıkışma katsayıları kullanılarak Eşitlik 4.14 yardımıyla bu tabakalar için ödometrik deformasyon modülleri (E_{oed}), Eşitlik 4.15 ve Eşitlik 4.16 kullanılarak deformasyon modülleri (E_{def}) hesaplanmıştır. Konsolidasyon katsayısı $c_v=0,004\text{cm}^2/\text{sn}$ mertebesinde tespit edilen dolgu tabanındaki kil birim için analizde kullanılmak üzere Eşitlik 17 yardımıyla düşey ve yatay yönde permeabilite değerleri (k_y , k_x) belirlenmiştir. Sanglerat (1972) ilişkisi kullanılarak belirlenen hacimsel sıkışma katsayılarından yararlanılarak elde edilen bütün bu değerler Çizelge 4.21’de verilmiştir. Önceden de bahsedildiği üzere Şekil 4.16 incelendiğinde CPT deney verileri ile oturma hesaplanırken 27m derinlikten sonrası için Sanglerat ilişkisini kullanırken laboratuvar verilerinden, diğer CPT ilişkilerini kullanırken ise Stroud (1974) ilişkisi ile elde edilen verilerden yararlanılmıştır.

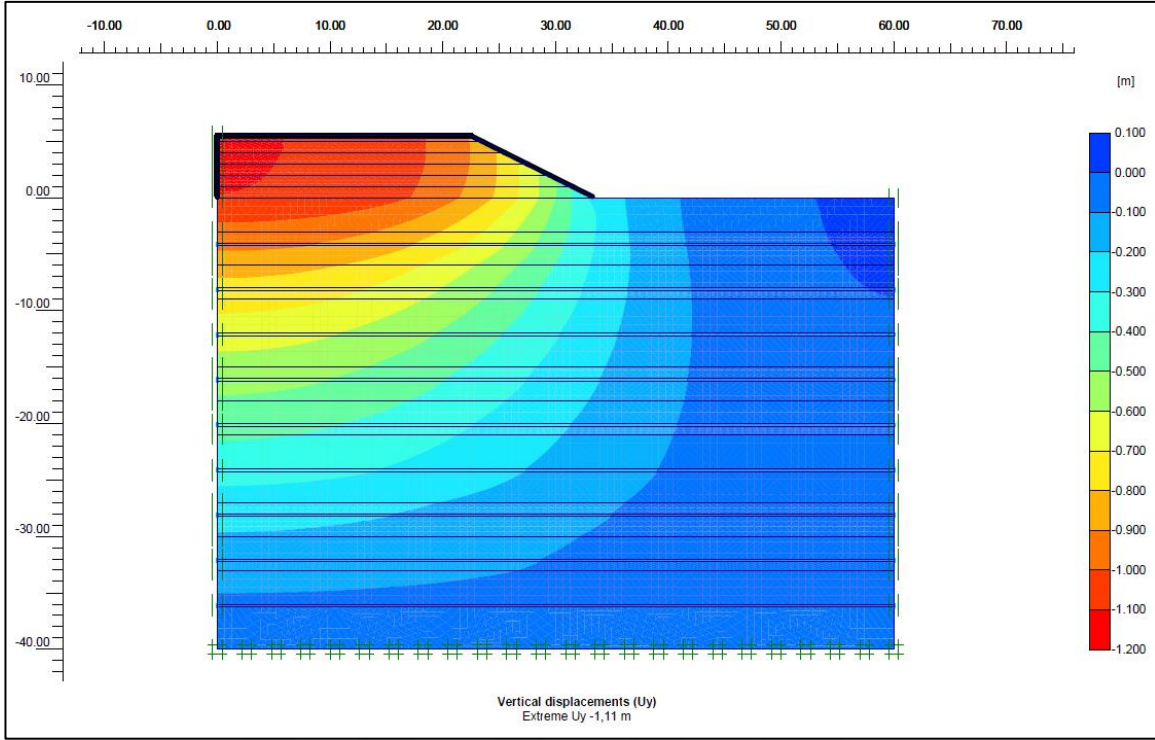
Çizelge 4.21. Analizde kullanılmak üzere CPT verilerini kullanan Sanglerat (1972) ilişkisi ile elde edilen hacimsel sıkışma katsayılarından yararlanılarak belirlenen deformasyon modülleri ve permeabiliteler

Derinlik (m)	m_v (m ² /kN)	E_{oed} (kN/m ²)	E_{def} (kN/m ²)	k_y (m/gün)	k_x (2 k_y) (m/gün)
0-3	0,000386	2592	1925	1,3E-04	2,7E-04
3-6	0,000386	2590	1924	1,3E-04	2,7E-04
6-9	0,000326	3066	2278	1,1E-04	2,3E-04
9-12	0,000283	3528	2621	9,8E-05	2,0E-04
12-15	0,000256	3902	2899	8,9E-05	1,8E-04
15-18	0,000227	4402	3270	7,9E-05	1,6E-04
18-21	0,000232	4308	3200	8,0E-05	1,6E-04
21-24	0,000202	4941	3670	7,0E-05	1,4E-04
24-27	0,000259	3856	2864	9,0E-05	1,8E-04
27-30	0,000209	4785	3554	7,2E-05	1,4E-04
30-33	0,000150	6667	4952	5,2E-05	1,0E-04
33-36	0,000260	3846	2857	9,0E-05	1,8E-04
36-40	0,000240	4167	3095	8,3E-05	1,7E-04

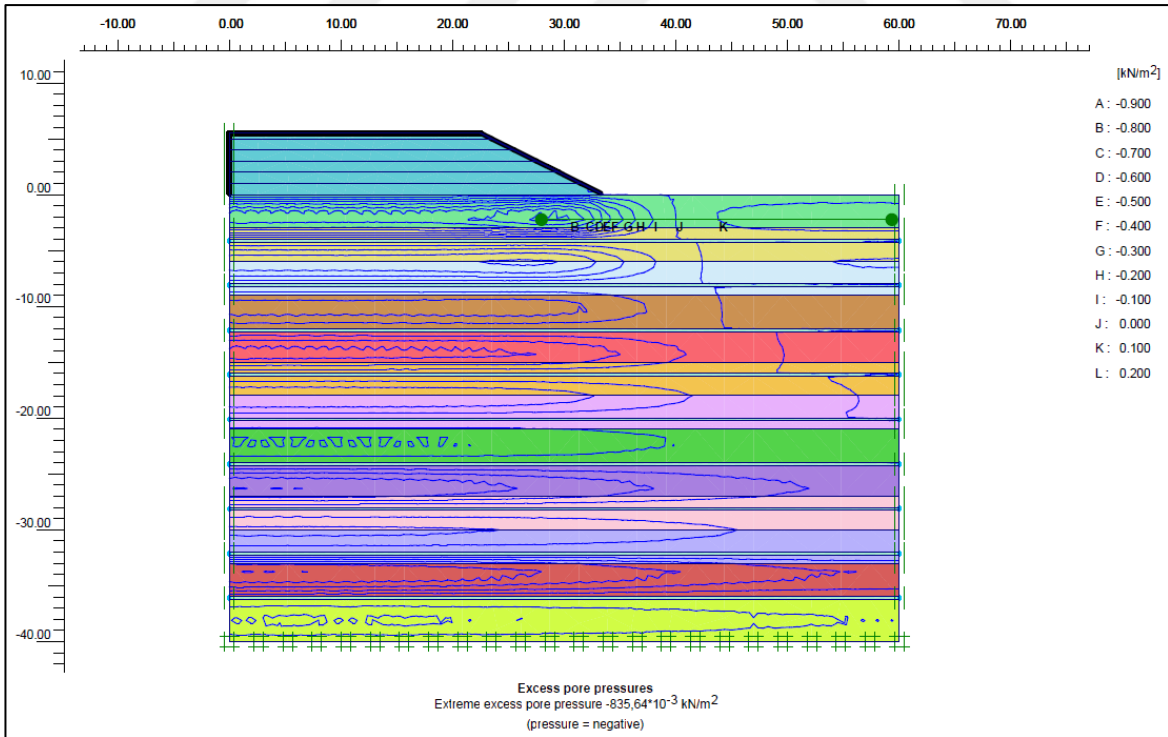
CPT deney verilerinden yararlanılan Sanglerat (1972) ilişkisinden elde edilen parametrelerle sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiş olup, analizde kullanılan parametreler Şekil 4.36'da, sonlu elemanlar analiz sonucu Şekil 4.37, konsolidasyon tamamlandıktan sonra dolgu taban zeminindeki aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı Şekil 4.38'de verilmiştir. Yapılan analizler sonucunda konsolidasyon oturması tamamlanana kadar ~110cm oturma hesaplanmıştır.

ID	Name	Type	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	k_x [m/day]	k_y [m/day]	ν [-]	E_{ref} [kN/m ²]	c_{ref} [kN/m ²]	ϕ [°]	ψ [°]
1	Dolgu	Drained	20,0	20,0	1,0000	1,0000	0,30	50000,0	5,0	33,0	3,0
2	Kil1	Undrained	18,0	19,0	2,6000E-4	1,3000E-4	0,30	1925,0	5,0	26,0	0,0
3	Kil2	Undrained	18,0	19,0	2,7000E-4	1,3000E-4	0,30	1924,0	5,0	26,0	0,0
4	Kil3	Undrained	18,0	19,0	2,2000E-4	1,1000E-4	0,30	2278,0	5,0	26,0	0,0
5	Kil4	Undrained	18,0	19,0	2,0000E-4	1,0000E-4	0,30	2621,0	5,0	26,0	0,0
6	Kil5	Undrained	18,0	19,0	1,8000E-4	8,9000E-5	0,30	2899,0	5,0	26,0	0,0
7	Kil6	Undrained	18,0	19,0	1,6000E-4	7,9000E-5	0,30	3270,0	5,0	26,0	0,0
8	Kil7	Undrained	18,0	19,0	1,6000E-4	8,0000E-5	0,30	3200,0	5,0	26,0	0,0
9	Kil8	Undrained	19,0	20,0	1,4000E-4	7,0000E-5	0,30	3670,0	10,0	26,0	0,0
10	Kil9	Undrained	19,0	20,0	1,8000E-4	9,0000E-5	0,30	2864,0	10,0	26,0	0,0
11	Kil10	Undrained	19,0	20,0	1,4000E-4	7,2000E-5	0,30	3554,0	10,0	26,0	0,0
12	Kil11	Undrained	19,0	20,0	1,0000E-4	5,2000E-5	0,30	4952,0	15,0	27,0	0,0
13	Kil12	Undrained	19,0	20,0	1,8000E-4	9,0000E-5	0,30	2857,0	15,0	27,0	0,0
14	Kil13	Undrained	19,0	20,0	1,7000E-4	8,3000E-5	0,30	3095,0	15,0	27,0	0,0
15	Kum	Drained	19,0	20,0	100,0000	100,0000	0,30	20000,0	1,0	30,0	0,0

Şekil 4.36. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için Sanglerat (1972) ilişkisinden yararlanılarak gerçekleştirilen oturma analizinde kullanılan parametreler



Şekil 4.37. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için Sanglerat (1972) ilişkisinden yararlanılarak gerçekleştirilen oturma analizi sonucu



Şekil 4.38. Hd=5,5m yüksekliğinde dolgu için Sanglerat (1972) ilişkisi verileriyle elde edilen konsolidasyon miktarı tamamlandıktan sonra aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı

Kulhawy ve Mayne (1990), Mahesh ve Vikash (1995), Erol vd (2004) ve Robertson (2009) ilişkilerinden elde edilen parametreler, bu parametrelerle yapılan analiz sonuçları ve konsolidasyon tamamlandıktan sonra dolgu taban zeminindeki aşırı boşluk suyu basıncı dağılımları ise EK-9'da verilmiştir.

Laboratuvar ve arazi deneylerinden yararlanılan farklı ilişkiler kullanılarak elde edilen parametrelerle gerçekleştirilen analizler sonucunda dolgu tabanında tespit edilen oturmalar Çizelge 4.22'de sunulmuştur.

Çizelge 4.22. Farklı ilişkilerle elde edilen parametrelerle gerçekleştirilen 2 boyutlu sonlu elemanlar analizler sonucunda belirlenen konsolidasyon oturması miktarları

Yöntem	Hesaplanan Konsolidasyon Oturması (cm)
Laboratuvar	92
Stroud (1974) – SPT	65
Sanglerat (1972) – CPT	110
Kulhawy & Mayne (1990) – CPT	40
Mahesh & Vikash (1995) – CPT	70
Erol vd (2004) – CPT	60
Robertson (2009) – CPT	50
Amar (1991) – PMT	33
Ortalama	65
Standart sapma	24
Arazi ölçümleri d23	25

Sonlu elemanlar yöntemi ile farklı ilişkiler kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda 5,5m yüksekliğindeki dolgu yükünün sebep olduğu gerilme artışı altında dolgu tabanında hesaplanan oturma miktarı 33-110cm arasında değişmektedir. Sonuçlara bakıldığında analitik yöntemde olduğu gibi arazi ölçümlerine en yakın değerleri veren yöntemlerin PMT verilerini kullanan Amar (1991) ilişkisi olduğu tespit edilmiştir. CPT verilerini kullanan ilişkiler arasında da arazi davranışına en yakın sonuç veren ilişkinin Kulhawy & Mayne (1990) ilişkisi olduğu belirlenmiştir. Ancak sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen oturma miktarları bütün ilişkilerde analitik yöntemden daha fazla çıkmıştır. Bunun sebeplerinden biri sonlu elemanlar yönteminde elde edilen oturma miktarlarına imalat sırasında meydana gelen elastik oturmalar da dahildir. Analitik yöntemlerde ise hesaplanan oturma miktarları sadece konsolidasyon oturmalarını içermektedir.

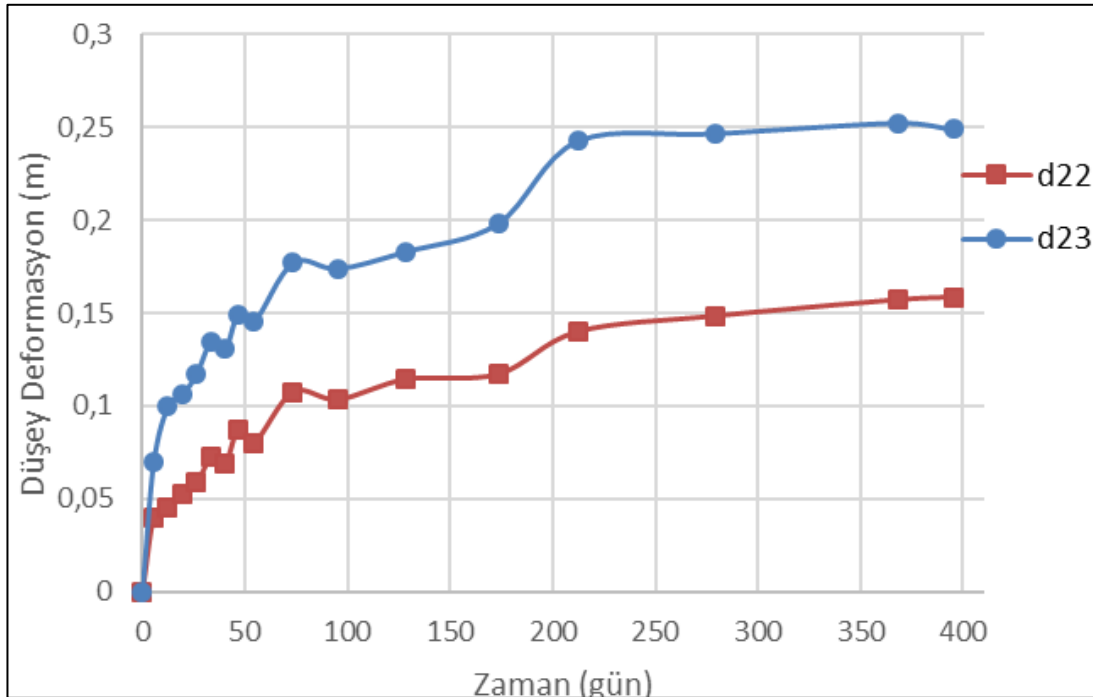
Analitik yöntemde olduğu gibi sonlu elemanlar yönteminde de laboratuvara gönderilen numunelerde derinlik arttıkça örselenme miktarının artması sebebiyle laboratuvar

verilerinden yararlanılarak hesaplanan oturma miktarları arazi deney verilerinden yararlanılarak hesaplanan oturma miktarlarına kıyasla fazla gelmektedir.

4.3. Oturma-Zaman İlişkisine Ait Değerlendirmeleri

Konsolidasyon oturmasında önemli parametrelerden biri de zaman olup, bu bölümde 3,5-5,5m arasında değişen yüksekliğe sahip test dolgusunda maksimum yükseklik olan 5,5m yüksekliğindeki d23 dolgusu için analitik ve sonlu elemanlar modelleriyle farklı ilişkiler kullanılarak elde edilen oturma miktarlarının tamamlanma süreleri hesaplanıp, oturma-zaman ilişkileri ortaya konmuştur ve farklı ilişkiler kullanılarak elde edilen bu veriler arazi ölçümleriyle karşılaştırılarak arazi davranışına uygunlukları incelenmiştir.

Test dolgusunda maksimum dolgu yüksekliğine sahip Km:241+620' de bulunan d22 ve d23 noktalarına ait arazi ölçümlerinden yararlanılarak dolgu imalatı sırasında meydana gelen oturma tahmini yapılmış ve imalat sırasında meydana geldiği düşünülen oturma miktarları da göz önünde bulundurularak bu noktalara ait oturma-zaman ilişkileri çıkarılmıştır (Şekil 4.39).



Şekil 4.39. d22 ve d23 noktaları için imalat sırasındaki oturma ile birlikte oturma-zaman ilişkisi

4.3.1. Analitik yöntemle oturma-zamanı değerlendirmeleri

5,5m yüksekliğindeki dolgu için analitik yöntemle farklı ilişkiler kullanılarak oturma hesapları yapılmış ve kullanılan farklı ilişkilerin arazideki davranışına uygunluğunu irdelemek amacıyla hesaplanan oturma miktarlarının tamamlanma süreleri hesaplanmıştır. Oturmaların tamamlanma süreleri incelenirken Eşitlik 4.18' den yararlanılmıştır:

$$t = \frac{T_v \times H_{dr}^2}{c_v} \quad (4.18)$$

Bu eşitlikte T_v zaman faktörü, H_{dr} en uzun drenaj mesafesi, c_v konsolidasyon katsayısı, t oturmanın tamamlanma süresidir.

T_v değeri konsolidasyonun gerçekleşme oranına bağlı olarak aşağıdaki denklemler yardımıyla yaklaşık olarak belirlenebilir. [33]

$$U \leq \%60, \quad T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U\%}{100} \right)^2 \quad (4.19)$$

$$U > \%60, \quad T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - U\%) \quad (4.20)$$

Gerçekleştirilen arazi deneyleri ve hazırlanan jeolojik profil incelendiğinde dolgu taban zemininde bulunan kil birimde yaklaşık olarak 4m aralıklarla kum bandının geçtiği tespit edilmiştir. Bu sebeple oturma zamanı hesaplarında çift yönlü drenaj için maksimum drenaj mesafesi $H_{dr}=2,0m$ olarak hesaplarda kullanılmıştır.

Konsolidasyon katsayısı ise hacimsel sıkışma katsayısında olduğu gibi ödometre deney sonuçlarından yararlanılarak gerilme artışına göre belirlenir.

Örnek olarak SK-238+066 sondajına ait 2,5m derinlikten alınan UD-1 numunesinde gerilme artışına göre konsolidasyon katsayıları belirlenmiştir. Bu numune için başlangıç efektif örtü gerilmesi;

$\sigma'_{v0}=2,5 \times 18=45kPa$ olup, ilgili derinlikte gerilme değişimi 45-155kPa aralığındadır. Bu aralıkta bulunan c_v değerlerin ağırlıklı ortalaması alınmıştır. Çizelge 4.23'te gösterilmiştir.

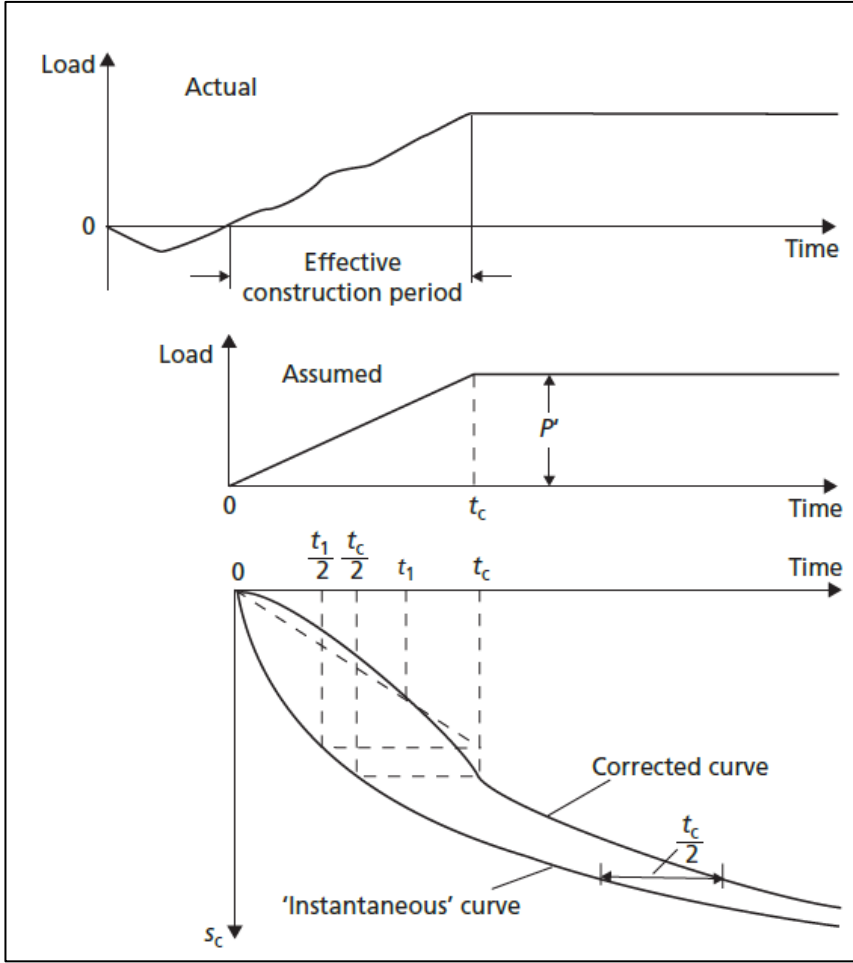
Çizelge 4.23. SK-238+066 sondajında UD-1 numunesinde c_v belirlenmesi

Basınç (kPa)	c_v (m^2/sn)
0-25	0,000000568
25-50	0,00000104
50-100	0,000000587
100-200	0,00000112
200-400	0,00000104

$m_v=(5 \times 0,00000104 + 50 \times 0,000000587 + 55 \times 0,00000112) / 110 = 8,7 \times 10^{-7} m^2/sn = 0,0087 cm^2/sn$ olarak hesaplanmıştır.

Sondajlardan her 3m'de bir alınan UD numunesi üzerinde gerçekleştirilen konsolidasyon deney verileri kullanılarak Çizelge 4.23'te belirtilen şekilde konsolidasyon katsayıları hesaplanmış ve ortalamaları alınarak test dolgusunun teşkil edildiği kil birimde konsolidasyon katsayısı yaklaşık $c_v=0,004 cm^2/sn$ mertebesinde tespit edilmiştir.

Laboratuvar ve arazi deneyleri kullanılarak farklı ilişkiler yardımıyla analitik yöntemle hesaplanan konsolidasyon oturmaları için, drenaj mesafesi 2m ve konsolidasyon katsayısı $c_v=0,004 cm^2/sn$ alınarak elde edilen oturma-zaman ilişkileri çizilmesi amaçlanmıştır. Ancak analitik yöntemle oluşturulan oturma zaman ilişkilerinde dolgunun imalat süreci dikkate alınmayıp, bu ilişkiler $t=0$ anından itibaren 5,5m yüksekliğindeki dolgu yükünün direkt olarak dolgu tabanına etki ettiği durumu temsil etmektedir. Gerçekte ise arazide imalata başlanmasından itibaren her gün yaklaşık 1m yüksekliğinde dolgu imal edilerek yaklaşık 5,5 günde dolgu yüksekliği 5,5m'ye ulaşmaktadır. Analitik yöntemlerle hesaplanan oturma miktarları için çizilen eğrilerde bu anlık yükleme varsayımını düzelterip imalat sırasında meydana gelen oturmayı dikkate alan düzeltilmiş oturma-zaman ilişkisini çizmek adına Şekil. 4.40'da verilen Terzaghi (1943)'nin geliştirdiği imalat süresi düzeltmesi uygulanmıştır. Zemine etki eden yük imalat süresi boyunca artarken imalat süresi tamamlandıktan yük sabit bir şekilde etki etmeye devam eder. Bu yöntemde Terzaghi artan yük altında imalat süresinde meydana gelen oturma miktarının, aynı miktarda sabit yük altında bu sürenin yarısı kadar zamanda meydana gelen oturmaya eşit olduğunu ileri sürmüştür. İmalatın tamamlanmasından sonrasında ise düzeltilmiş oturma-zaman eğrisi, düzeltme yapılmamış eğrinin efektif inşaat süresinin yarısı kadar ötelenmiş halidir.



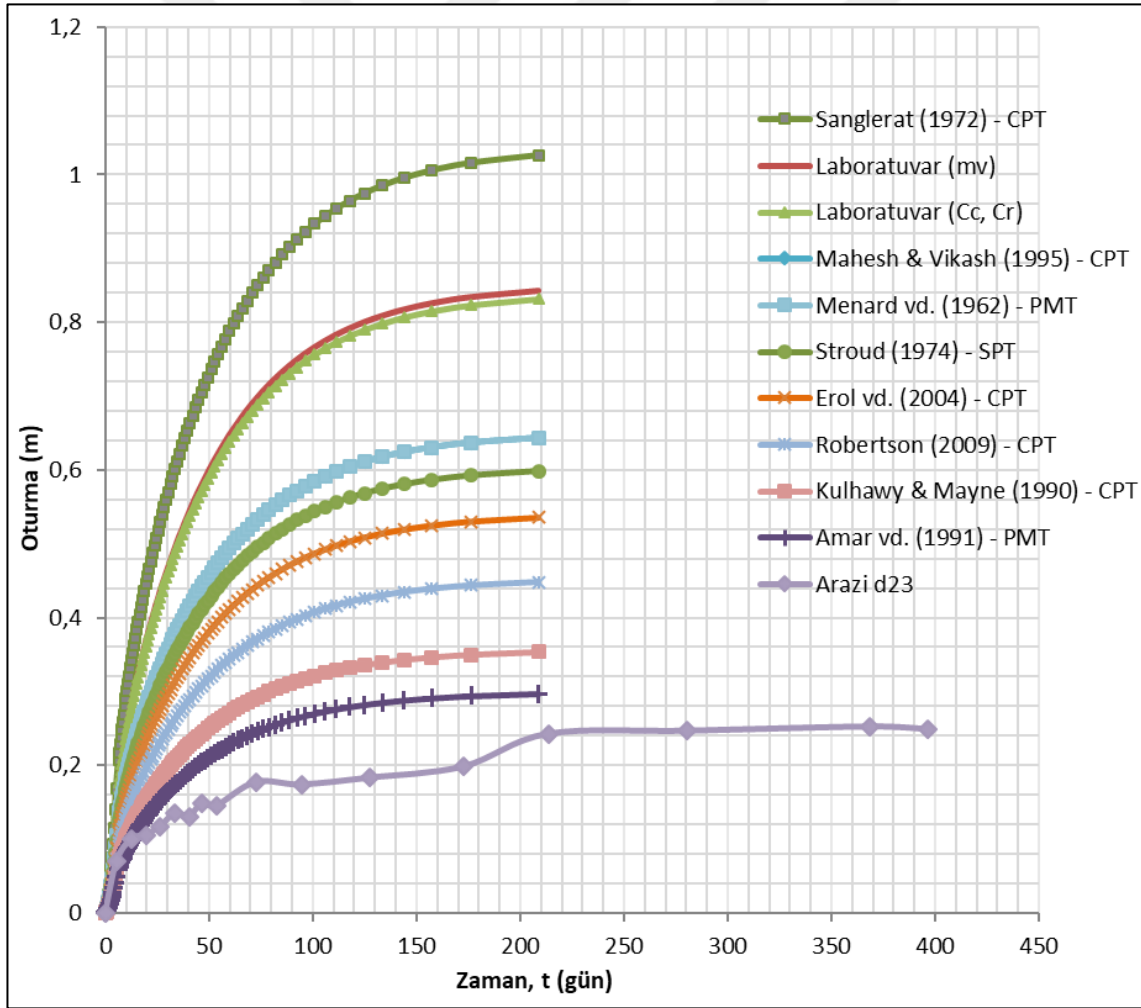
Şekil. 4.40. İmalat süresi düzeltmesi [34]

Burada t_c imalat süresi olup $H_d=5,5\text{m}$ yüksekliğindeki dolgu için yaklaşık olarak $t_c = 5,5$ gündür. O halde $\frac{t_c}{2} = 2,75$ günde gerçekleşecek oturma miktarı aynı zamanda imalat süresinde meydana gelecek oturmadır.

Her bir yöntem için imalat süresi düzeltmesi uygulanarak drenaj mesafesi 2,0m ve konsolidasyon katsayısı $c_v=0,004\text{cm}^2/\text{sn}$ alınarak oturma-zaman ilişkileri çizilmiştir. Öncelikle Bölüm 4.1' de 5,5m yüksekliğinde dolgu yükü altında analitik yöntemle laboratuvar ve arazi verilerinden yararlanılan farklı ilişkiler kullanılarak hesaplanan oturma miktarları ve yarı ampirik yöntemle PMT verilerini kullanan Menard vd. (1962) ilişkisi ile hesaplanmış oturma miktarları Çizelge 4.24'te listelenmiş ve Şekil 4.41'de oturma-zaman ilişkileri çizilmiştir.

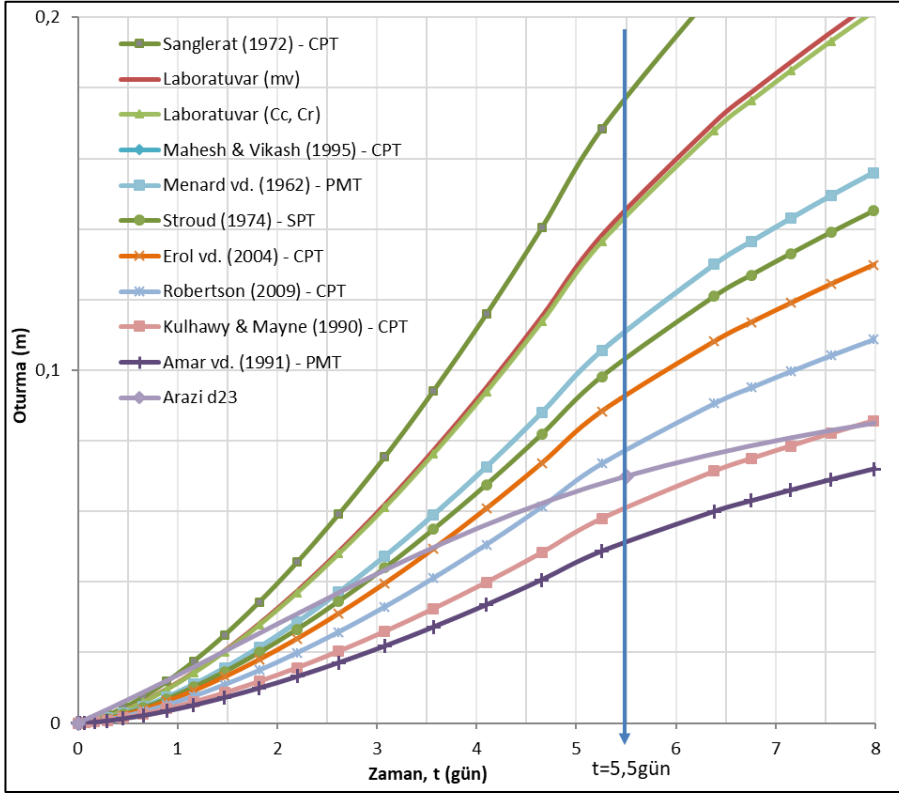
Çizelge 4.24. Analitik yöntem kullanılarak farklı ilişkiler için hesaplanan oturma miktarları

Yöntem	Hesaplanan Konsolidasyon Oturması (cm)
Laboratuvar c_c, c_r (arazi düzeltmesi ile)	84
Laboratuvar m_v	85
Stroud (1974) – SPT	60
Sanglerat (1972) – CPT	104
Kulhawy & Mayne (1990) – CPT	35
Maresh & Vikash (1995) – CPT	65
Menard vd. (1962) – PMT	65
Erol vd (2004) – CPT	54
Robertson (2009) – CPT	45
Amar (1991) – PMT	30
Ortalama	63
Standart Sapma	22
Arazi ölçüleriyle hesaplanan (d_{23})	25



Şekil 4.41. İmalat süresi düzeltilmiş oturma-zaman eğrileri

Çizilen eğrilerde imalat süresine denk gelen 5,5 gün detayı Şekil 4.42’te verilmiş ve bu detay yardımıyla farklı yöntemlerle imalat süresinde meydana geldiği düşünülen oturma miktarları belirlenmiş ve Çizelge 4.25’te verilmiştir.



Şekil 4.42. İmalat süresi düzeltilmesi yapılmış oturma-zaman eğrilerinin 5,5 gün olan imalat süresindeki detaylı gösterimi

Çizelge 4.25. Analitik yöntem kullanılarak farklı ilişkiler için hesaplanan imalat süresinde meydana gelen oturma miktarları

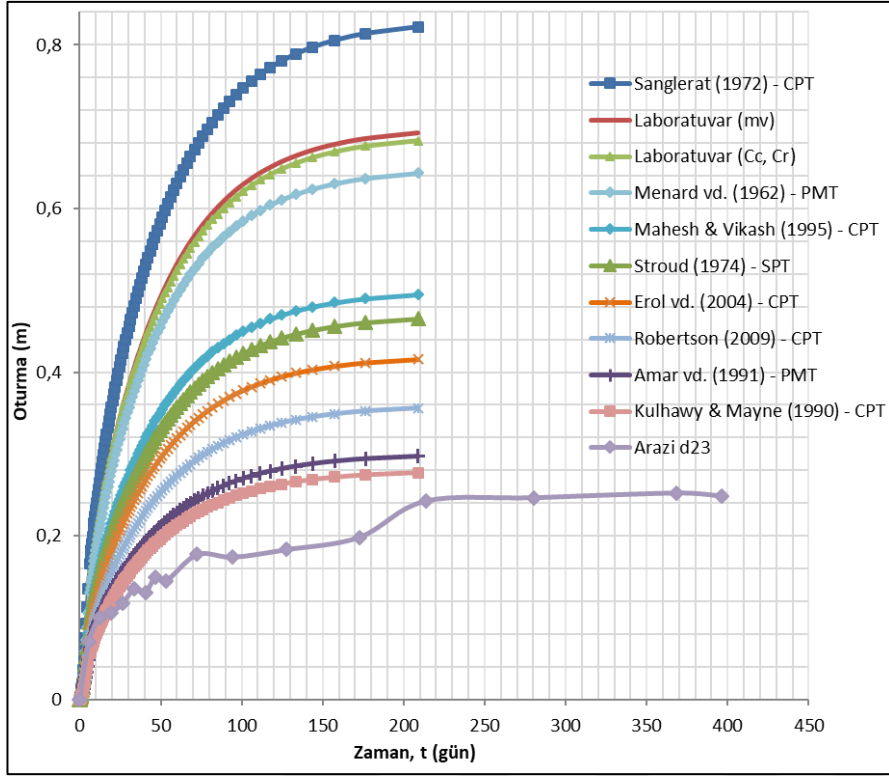
Yöntem	İmalat süresinde gerçekleşen oturma (cm)
Laboratuvar (c_c , c_i) (arazi düzeltilmesi ile)	14,0
Laboratuvar (m_v)	15,0
Stroud (1974) – SPT	10,0
Sanglerat (1972) – CPT	17,5
Kulhaway & Mayne (1990) – CPT	6,0
Mahesh & Vikash (1995) – CPT	11,0
Menard vd. (1962) – PMT	11,0
Erol vd (2004) – CPT	9,2
Roberton (2009) – CPT	7,5
Amar (1991) – PMT	4,5
Ortalama	10
Standart Sapma	5,0
Arazi d23	7,0

Ardından Bölüm 4.1’ de 5,5m yüksekliğinde dolgu yükü altında laboratuvar ve arazi verileri yardımıyla elde edilen konsolidasyon parametrelerini (sıkışma indisleri ve hacimsel sıkışma katsayıları) kullanan yöntemlerde Skempton-Bjerrum (1957) düzeltmesi uygulanarak elde edilmiş ve yarı ampirik yöntemle PMT verilerini kullanan Menard vd. (1962) ilişkisi ile hesaplanmış oturma miktarları Çizelge 4.26’da listelenmiştir.

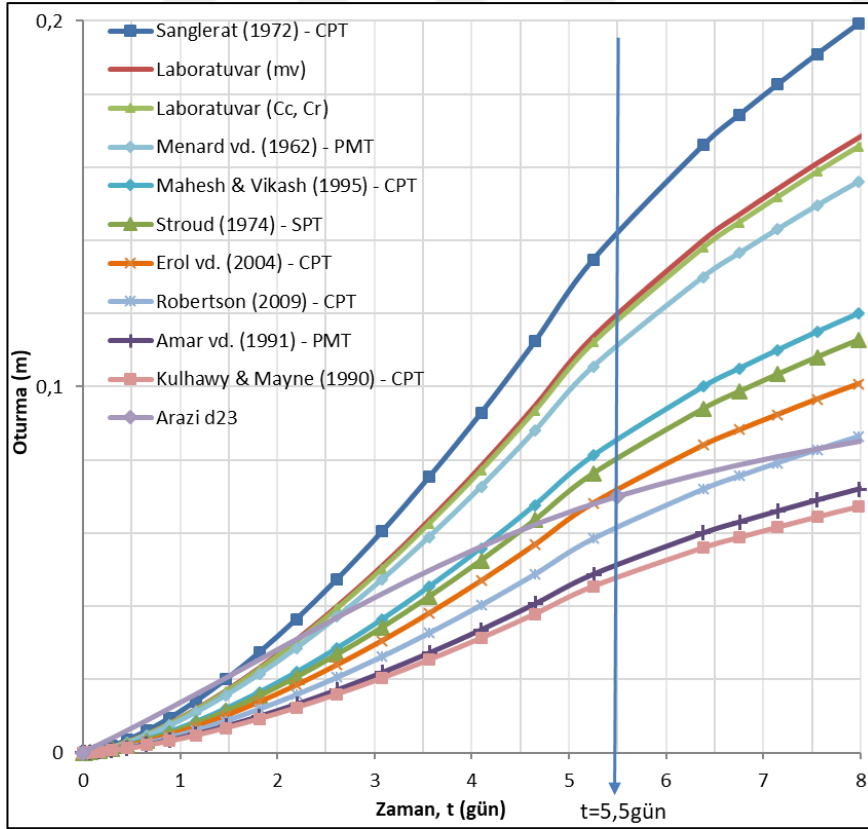
Çizelge 4.26. Analitik yöntem kullanılarak farklı ilişkiler için hesaplanan oturma miktarları

Yöntem	Skempton & Bjerrum (1957) düzeltmesi uygulanmış konsolidasyon oturması (cm)
Laboratuvar c_c, c_r (arazi düzeltmesi ile)	69
Laboratuvar m_v	70
Stroud (1974) – SPT	47
Sanglerat (1972) – CPT	83
Kulhawy & Mayne (1990) – CPT	29
Mahesh & Vikash (1995) – CPT	50
Menard vd. (1962) – PMT	65
Erol vd (2004) – CPT	42
Roberton (2009) – CPT	36
Amar (1991) – PMT	24
Ortalama	51
Standart Sapma	19
Arazi ölçümleriyle hesaplanan (d_{23})	25

Her bir yöntem için imalat süresi düzeltmesi uygulanarak drenaj mesafesi 2,0m ve konsolidasyon katsayısı $c_v=0,004\text{cm}^2/\text{sn}$ alınarak elde edilen düzeltilmiş oturma zaman ilişkileri Şekil 4.43’te verilmiştir. Eğrilerin, imalat süresi olan 5,5güne ait detayları Şekil 4.44’te ve bu şekilden yararlanılarak her bir ilişki için belirlenen imalat süresinde meydana gelen oturma miktarları Çizelge 4.27’de verilmiştir.



Şekil 4.43. İmalat süresi düzeltmesi yapılmış oturma-zaman eğrileri (Skempton-Bjerrum düzeltmesi uygulanmış)



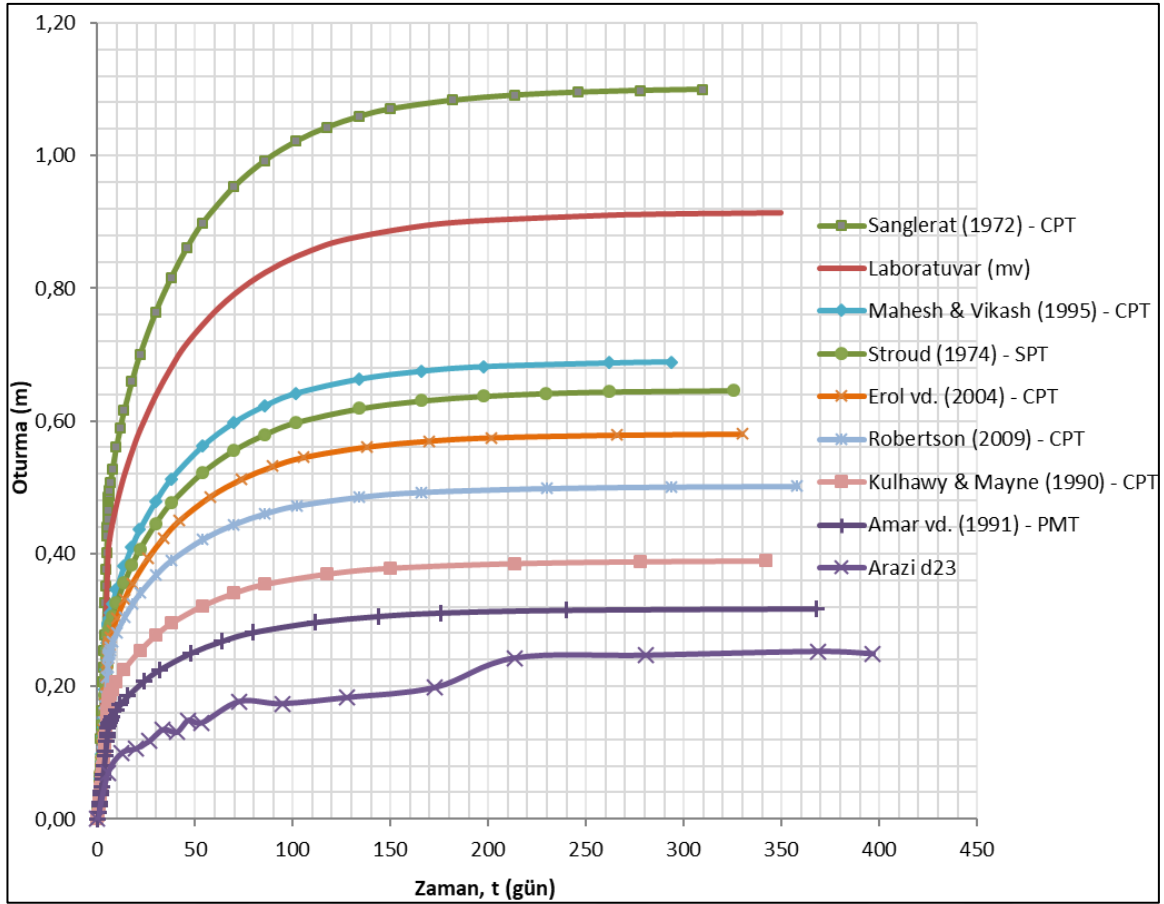
Şekil 4.44. İmalat süresi düzeltmesi yapılmış oturma-zaman eğrilerinin 5,5 gün olan imalat süresindeki detaylı gösterimi (Skempton-Bjerrum düzeltmesi uygulanmış)

Çizelge 4.27. Analitik yöntem kullanılarak farklı ilişkiler için hesaplanan imalat süresinde meydana gelen oturma miktarları (Skempton-Bjerrum düzeltmesi uygulanmış)

Yöntem	İmalat süresinde gerçekleşen oturma (cm)
Laboratuvar (c_c, c_r) (arazi düzeltmesi ile)	11,5
Laboratuvar (m_v)	12,0
Stroud (1974) – SPT	8,0
Sanglerat (1972) – CPT	14,0
Kulhawy & Mayne (1990) – CPT	4,5
Mahesh & Vikash (1995) – CPT	8,5
Menard vd. (1962) – PMT	11,0
Erol vd (2004) – CPT	7,0
Roberton (2009) – CPT	6,0
Amar (1991) – PMT	5,0
Ortalama	10
Standart Sapma	5,0
Arazi ölçümleri ile hesaplanan (d23)	7,0

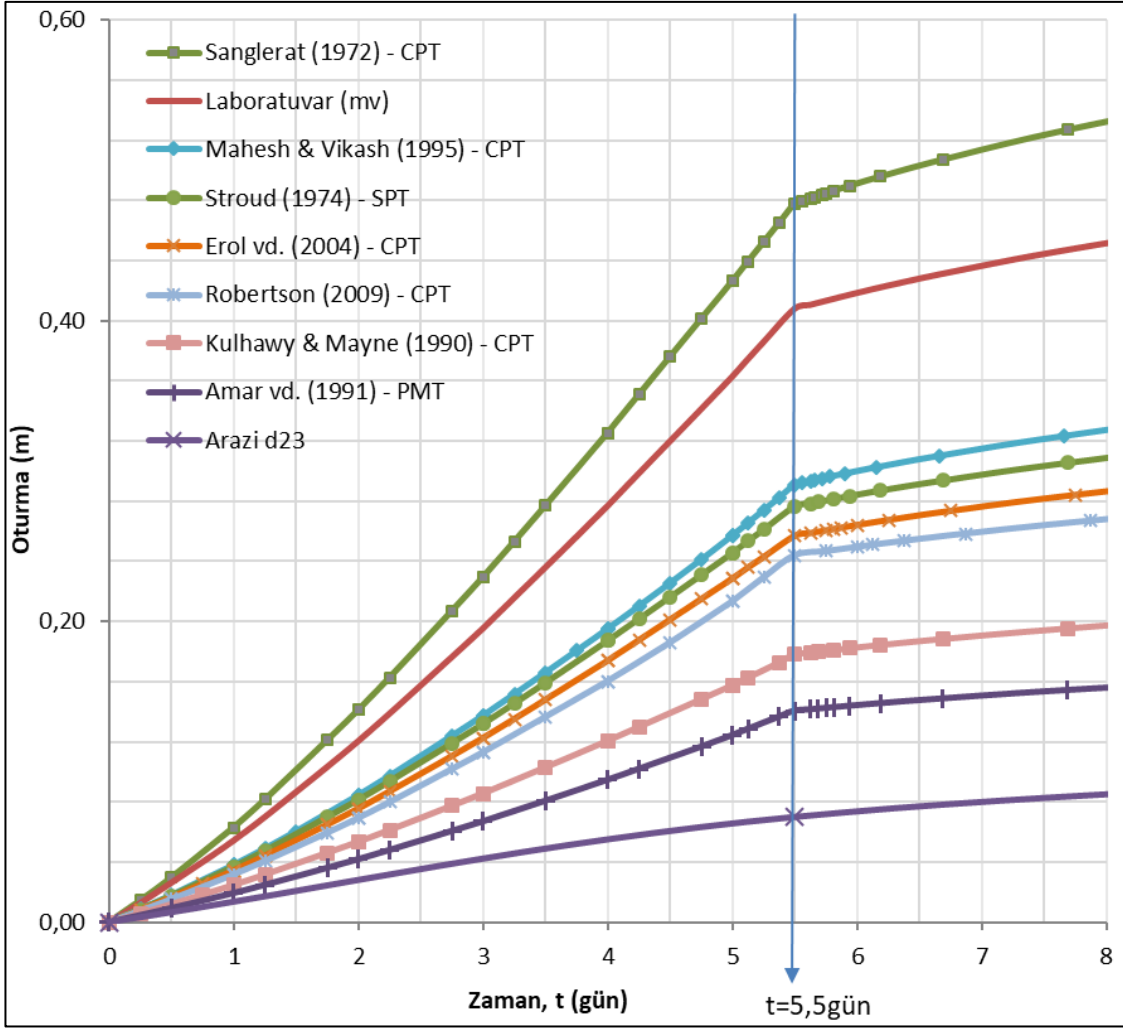
4.3.2. Sonlu elemanlar yöntemi ile oturma zamanı değerlendirmeleri

Test dolgusunda maksimum dolgu yüksekliğine sahip d23 dolgusu için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak laboratuvar, SPT, PMT ve CPT deney verilerinden yararlanılan farklı ilişkilerle elde edilen geoteknik parametrelerle gerçekleştirilen konsolidasyon analizleri sonucunda 4m aralıkla kum bandının yer aldığı dolgu taban zemini için Plaxis 2D yardımıyla oturma-zaman eğrileri oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar yönteminde gerçekleştirilen oturma analizleri sırasında dolgu imalat adımları dikkate alındığı için çizilen grafiklerde imalat sırasında gerçekleşen oturma miktarları görülmektedir. (Şekil 4.45)



Şekil 4.45. 5,5m yüksekliğinde dolguda d23 noktası için oturma-zaman eğrisi (Plaxis 2D)

Dolgu imalat süresi dikkate alınarak analizlerin gerçekleştirildiği sonlu elemanlar programı ile elde edilen ve Şekil 4.45'te verilen eğrilerin 5,5 güne ait detayları Şekil 4.46'da verilmiştir. Bu şekilden yararlanılarak belirlenen dolgu imalatı sırasında gerçekleşen oturma miktarları Çizelge 4.28'de listelenmiştir.

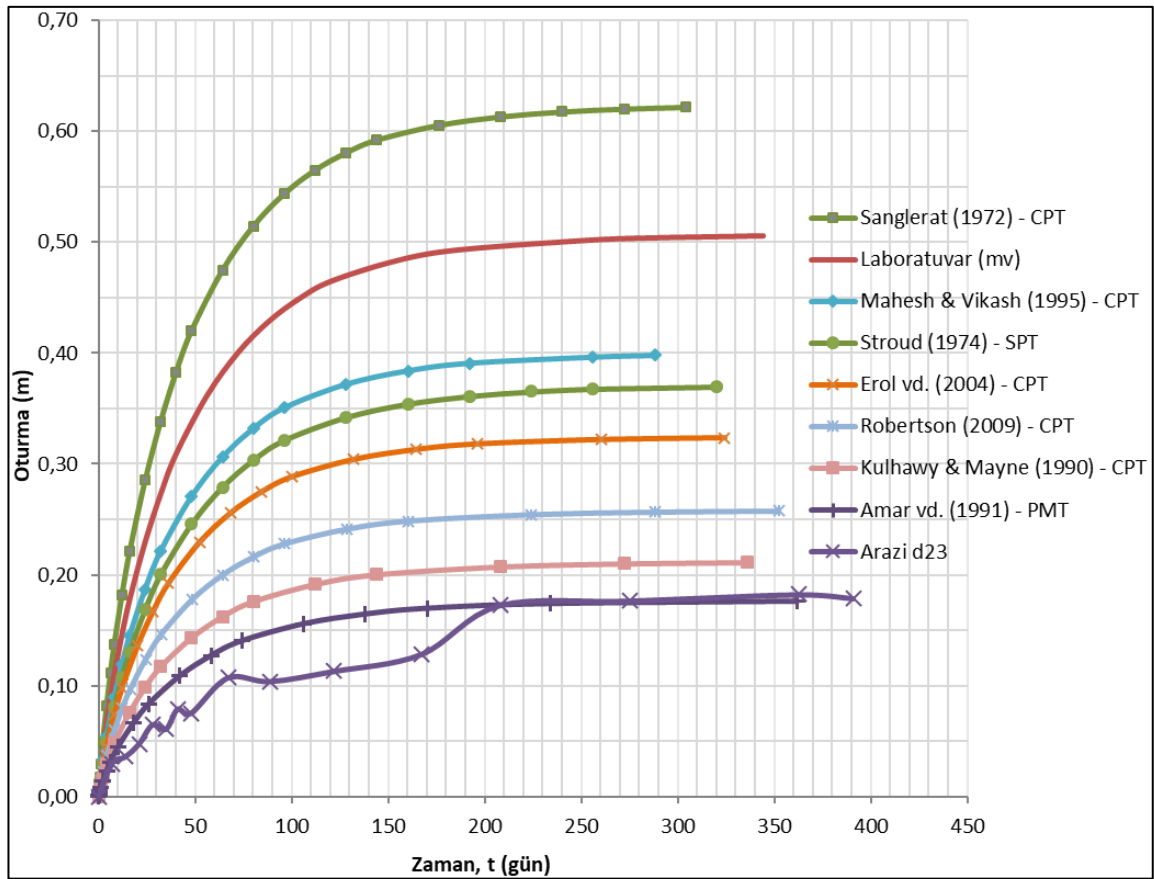


Şekil 4.46. Sonlu elemanlar programı kullanılarak d23 noktası için elde edilen oturma-zaman eğrilerinde dolgu imalat süresi detayı

Çizelge 4.28. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak farklı ilişkilerle d23 noktası için hesaplanan imalat süresinde meydana gelen oturma miktarları

Yöntem	İmalat süresinde gerçekleşen oturma (cm)
Laboratuvar (m_v)	41,0
Stroud (1974) – SPT	28,0
Sanglerat (1972) – CPT	48,0
Kulhawy & Mayne (1990) – CPT	18,0
Mahesh & Vikash (1995) – CPT	30,0
Erol vd (2004) – CPT	26,0
Roberton (2009) – CPT	25,0
Amar (1991) – PMT	14,0
Ortalama	29,0
Standart Sapma	10,5
Arazi d23	7,0

Sonlu elemanlar yöntemiyle belirlenen oturma miktarları incelendiğinde analitik yöntemle hesaplanan oturma miktarlarından her zaman fazladır. Bu farkın nedenlerinden biri de sonlu elemanlar yönteminde belirlenen oturma miktarlarının dolgu imalatı sırasında gerçekleşen elastik oturmaları da içermesidir. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen konsolidasyon oturmasını arazi davranışı ile kıyaslamak için sonlu elemanlar yönteminde dahil edilen elastik oturmaları göz ardı edebilmek adına d23 noktasında dolgu imalatı tamamlandıktan sonra gerçekleşen oturma-zaman ilişkileri Şekil 4.47’de, oturma miktarları Çizelge 4.29’da verilmiştir.

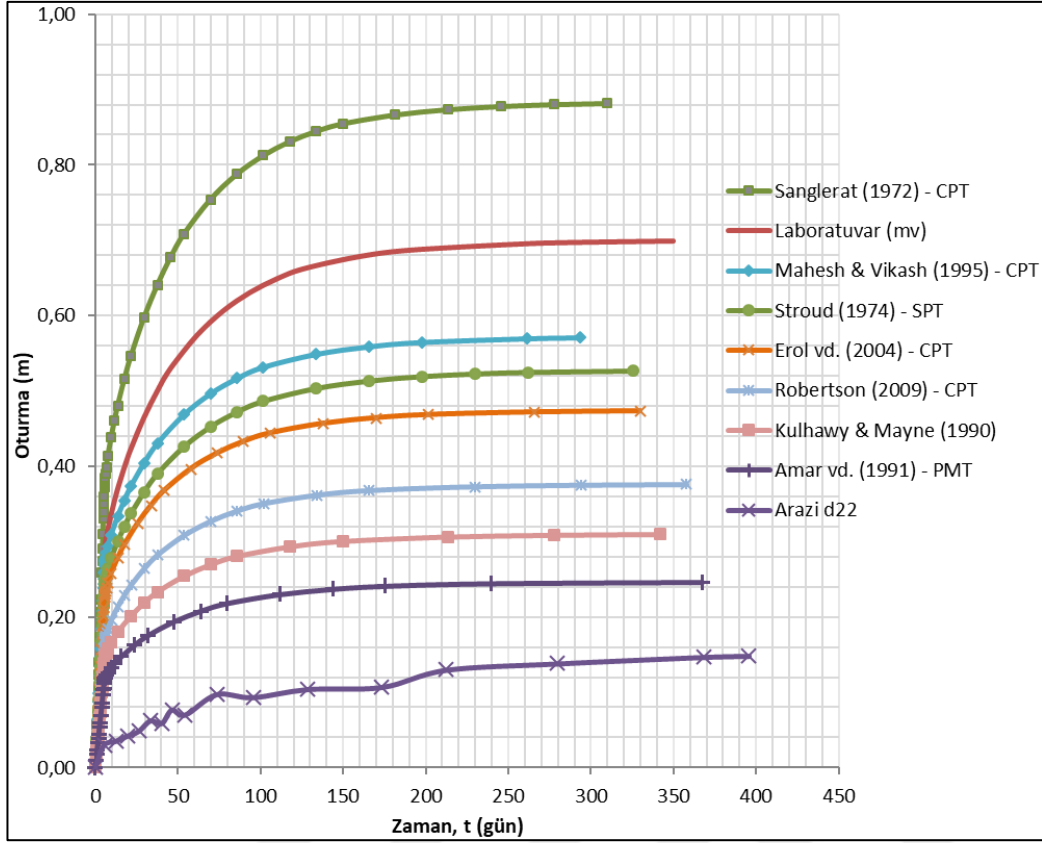


Şekil 4.47. Sonlu elemanlar yöntemi ile d23 noktasında dolgu imalatı tamamlandıktan sonra gerçekleşen oturmalara ait oturma-zaman ilişkisi

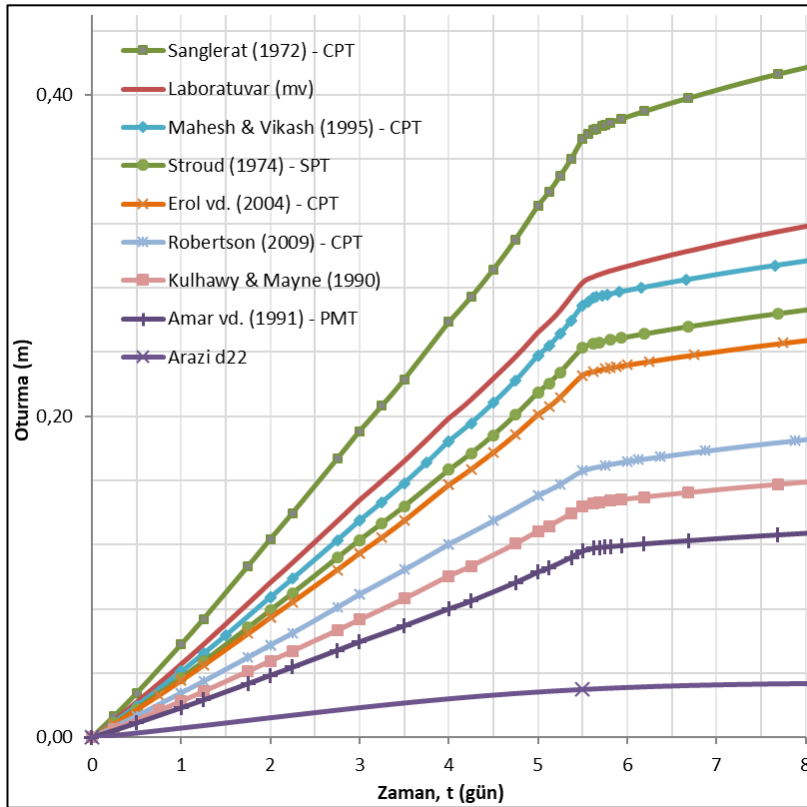
Çizelge 4.29. Sonlu elemanlar yöntemi ile dolgu imalatı tamamlandıktan sonra d23 noktasında gerçekleşen konsolidasyon oturması miktarları

Yöntem	İmalat tamamlandıktan sonra gerçekleşen oturma (cm)
Laboratuvar (m_v)	51,0
Stroud (1974) – SPT	37,0
Sanglerat (1972) – CPT	62,0
Kulhawy & Mayne (1990) – CPT	21,0
Mahesh & Vikash (1995) – CPT	40,0
Erol vd (2004) – CPT	32,0
Roberton (2009) – CPT	37,0
Amar (1991) – PMT	18,0
Ortalama	37,0
Standart Sapma	14,0
Arazi d23	18,0

Aynı işlemler test dolgusunda Km:241+620’de dolgu sağ şev ekseninde yer alan d22 noktası için gerçekleştirilmiş ve d22 noktası için elde edilen oturma zaman eğrisi Şekil 4.48’de, dolgu imalat detayı Şekil 4.49’da ve bu şekil yardımıyla dolgu imalatı sırasında meydana geldiği belirlenen oturma miktarları Çizelge 4.30’da verilmiştir. İmalat sırasında meydana gelen elastik oturmaları göz ardı edebilmek adına imalat sonrası için çizilen oturma-zaman ilişkisi Şekil 4.50’de ve imalat tamamlandıktan sonra gerçekleşen konsolidasyon oturması miktarları Çizelge 4.31’de verilmiştir.



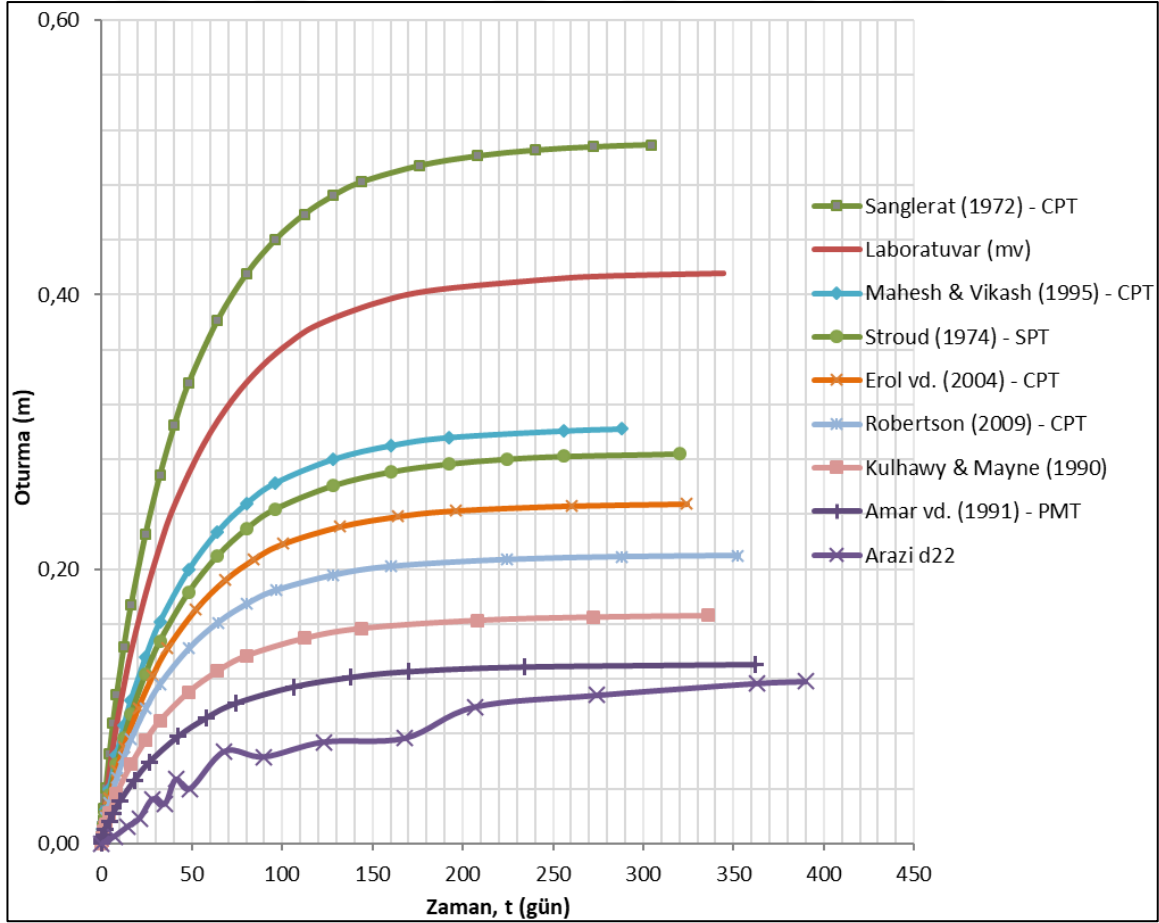
Şekil 4.48. 5,5m yüksekliğinde dolguda d22 noktası için oturma-zaman eğrisi (Plaxis 2D)



Şekil 4.49. Sonlu elemanlar programı kullanılarak d22 noktası için elde edilen oturma-zaman eğrilerinde dolgu imalat süresi detayı

Çizelge 4.30. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak farklı ilişkilerle d22 noktası için hesaplanan imalat süresinde meydana gelen oturma miktarları,

Yöntem	İmalat süresinde gerçekleşen oturma (cm)
Laboratuvar (m _v)	28,0
Stroud (1974) – SPT	24,0
Sanglerat (1972) – CPT	37,0
Kulhawy & Mayne (1990) – CPT	15,0
Mahesh & Vikash (1995) – CPT	27,0
Erol vd (2004) – CPT	23,0
Robertson (2009) – CPT	17,0
Amar (1991) – PMT	12,0
Ortalama	23,0
Standart Sapma	8,0
Arazi d22	3,0



Şekil 4.50. Sonlu elemanlar yöntemi ile d22 noktasında dolgu imalatı tamamlandıktan sonra gerçekleşen oturmalara ait oturma-zaman ilişkisi

Çizelge 4.31. Sonlu elemanlar yöntemi ile dolgu imalatı tamamlandıktan sonra d22 noktasında gerçekleşen konsolidasyon oturması miktarları

Yöntem	İmalat tamamlandıktan sonra gerçekleşen oturma (cm)
Laboratuvar (m_v)	42,0
Stroud (1974) – SPT	28,0
Sanglerat (1972) – CPT	51,0
Kulhawy & Mayne (1990) – CPT	17,0
Mahesh & Vikash (1995) – CPT	30,0
Erol vd (2004) – CPT	25,0
Roberton (2009) – CPT	21,0
Amar (1991) – PMT	13,0
Ortalama	28,0
Standart Sapma	12,0
Arazi d22	12,0

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak farklı ilişkilerden elde edilen verilerle yapılan analiz sonuçlarına göre Şekil 4.47’de verilen oturma-zaman ilişkilerinden yararlanılarak oluşturulan Çizelge 4.29’daki ve Şekil 4.50’de verilen oturma-zaman ilişkilerinden yararlanılarak oluşturulan Çizelge 4.31’deki oturma miktarları ile arazi ölçümleri karşılaştırıldığında d22 ve d23 olmak üzere her iki nokta için de arazi verilerine en yakın sonuç veren ilişkinin PMT deney verilerini kullanan Amar (1991) ilişkisi olduğu belirlenmiştir. CPT deney verilerini kullanan Kulhawy & Mayne (1990) ilişkisi de arazi verilerine yakın sonuçlar vermiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kuzey Marmara Otoyolu Projesi kapsamında yürütülen ve Kesim-5'te Km:188+000'den başlayıp Kesim-6'da Km:251+111'de son bulan projede, Kesim-6'da Km:230+000'da Akyazı Ovası başlamakta olup bu aralıkta dolgu yeraltı su seviyesi yüzeye yakın olan alüvyon birim üzerinde inşa edilecektir. Bu sebeple de bu aralıkta dolgularda stabilite ve oturma problemleri beklenmektedir. Dolguların stabilite ve oturma davranışlarını incelemek adına Km:241+200-242+300 aralığında yüksekliği 3,5-5,5m arasında değişen test dolgusu imal edilmiş ve bir yıl süreyle belirli noktalarda koordinat ölçümleri alınarak dolgunun oturma davranışı incelenmiştir. Bu çalışmada ilgili kilometre aralığında gerçekleştirilen arazi ve laboratuvar deney verilerinden yararlanılarak, test dolgusunda maksimum dolgu yüksekliği olan 5,5m yüksekliğine sahip Km241+620 dolgusunun stabilite ve oturma davranışları incelenmiştir. Bu kapsamda deney verilerinden yararlanan ve literatürde yer alan farklı ilişkiler kullanılarak elde edilen parametrelerle stabilite ve oturma analizleri gerçekleştirilmiş, analiz sonuçları arazi ölçümleri ile karşılaştırılarak deney sonuçlarının ve literatür verilerinin gerçek davranışa uygunluğu irdelenmiştir.

Stabilite analizlerinde kullanılmak üzere kil birim için mukavemet parametreleri belirlenirken SPT, CPT, PMT deneylerine ait korelasyonlardan ve laboratuvar verilerinden yararlanılmıştır. Drenajsız kayma dayanımı belirlenirken farklı ilişkilerden elde edilen drenajsız kayma dayanımlarının derinlikle değişimi incelenmiş proje alanındaki killerde SPT verilerini kullanan Terzaghi ve Peck (1967) ve Sowers (1979) ilişkilerinin diğer yöntemlere kıyasla genellikle daha yüksek drenajsız kayma dayanımı değerleri verdiği belirlenmiştir. SPT verilerini kullanan Stroud (1974), Kulhawy ve Mayne (1990), Sivrikaya ve Toğrol (2002) ilişkileri ile CPT ve PMT verilerinin ortalama değerlere yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Farklı yöntemlerle elde edilen parametrelerden yararlanılarak dolgu tabanında yer alan kil birim için idealize mukavemet parametreleri belirlenmiş ve bu parametrelerle dolgu için kısa dönem, uzun dönem ve sismik durum stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda alüvyon birim üzerine imal edilen dolgularda, dolgu yüksekliklerinin düşük tutulması sebebiyle tasarıma dolgu şev eğiminin hükmettiği ve herhangi bir stabilite problemi beklenmediği tespit edilmiştir.

Arazide test dolgusu imal edildikten hemen sonra oturma ölçümü alınmaya başlandığı ve bu sebeple de alınan oturma ölçümlerine dolgu imalatı sırasında meydana gelen oturmaların dahil olmadığı düşünüldüğü için test dolgusu imalatı sebebiyle gerçekleşen toplam konsolidasyon oturması miktarını belirlemek adına oturma oranlarından yola çıkılarak oturma tahmini yapılmış ve dolgu merkez ekseninde bulunan d23 noktası için dolgu imalatı sırasında yaklaşık olarak 7cm olmak üzere toplam konsolidasyon oturması yaklaşık olarak 25cm, dolgu sağ şev ekseninde bulunan d22 noktası için dolgu imalatı sırasında yaklaşık olarak 3cm olmak üzere toplam konsolidasyon oturması yaklaşık olarak 15cm hesaplanmıştır.

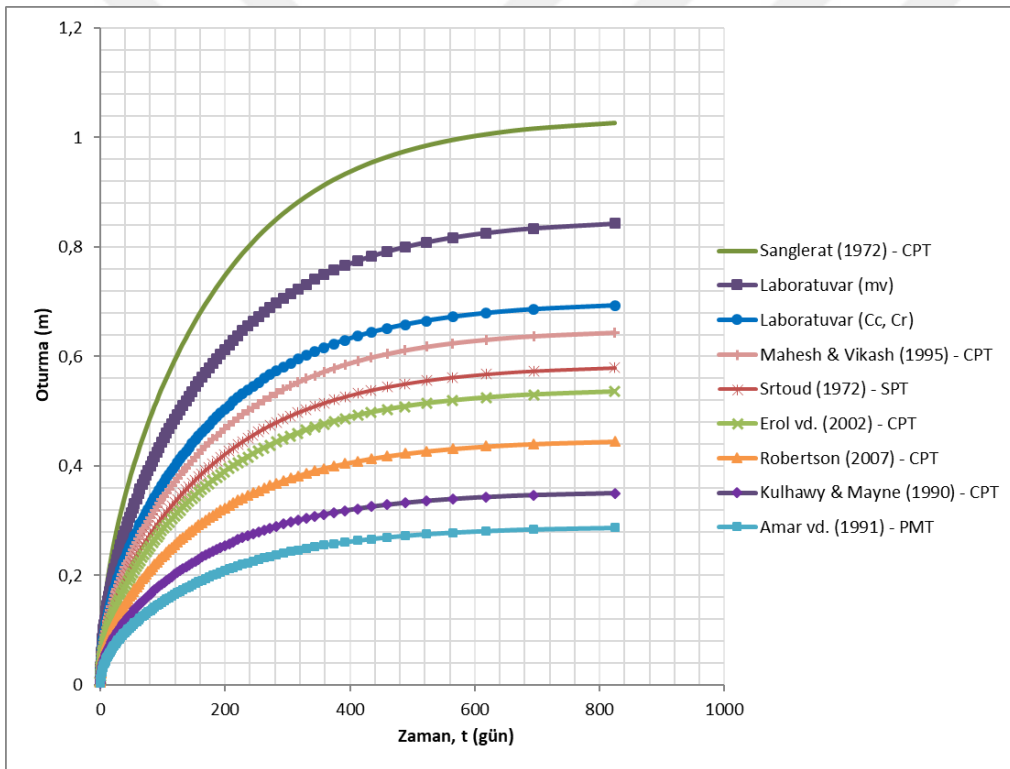
5,5m yüksekliğindeki Km:241+620 dolgusu için analitik yöntemlerle gerçekleştirilecek oturma analizlerinde kullanılmak üzere öncelikle konsolidasyon deney verilerinin yanında SPT, PMT ve CPT deney verilerini kullanan ve literatürde yer alan ilişkilerden yararlanılarak konsolidasyon parametreleri (sıkışma indisleri ve hacimsel sıkışma katsayıları) belirlenmiş ve bu parametreler kullanılarak farklı ilişkilerle konsolidasyon oturmaları hesaplanmıştır.

Sıkışma indisleri ile oturma hesaplandıktan sonra arazi örselenmesi etkisini azaltmak amacıyla Duncan & Buchignani (1976) yöntemi ile arazi sıkışma indisi düzeltilmesi yapılmıştır. Ardından sıkışma indisleri ve hacimsel sıkışma katsayıları ile hesaplanan oturma miktarlarına Skempton-Bjerrum (1957) düzeltmeleri uygulanmış ve her iki durum için de oturma-zaman ilişkileri çizilerek arazi ölçümleri ile kıyaslanmıştır. Karşılaştırma sonucunda Skempton-Bjerrum (1957) düzeltilmesi uygulanan değerlerin, uygulanmayan değerlere göre arazi ölçümlerine daha yakın olduğu tespit edilmiştir.

PMT deney verilerini kullanan Menard vd. (1962)'nin geliştirdiği yarı ampirik yöntemle konsolidasyon oturması hesaplanmış ve PMT verilerini kullanan diğer yöntemlere göre daha yüksek oturma miktarları elde edilmiştir. Yarı ampirik yöntemde artan derinlikle birlikte gerilme azaltmasının uygulanmaması da bu durumun sebeplerinden biri olarak düşünülmektedir.

Arazide CPT deneyi 2cm aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple CPT deney verileri kullanılarak dolgu tabanındaki alüvyon tabakaya ait daha detaylı zemin profili çıkarılabilmiş ve kum bandı aralığı 4m olarak belirlenmiştir. SPT deneyi ise 1,5m aralıklarla

gerçekleştirilmekte olup, proje sahasında CPT deneyi yapılmıyaydı, sadece SPT deney verileri ile dolgu tabanındaki kil birim için kum bandı aralığı yaklaşık olarak 8m olarak belirlenmiş ve 5,5m yüksekliğindeki dolgu için oturma-zaman ilişkisi Şekil 5.1’de olduğu gibi elde edilecekti. Yani oturmanın tamamlanma süresi drenaj mesafesinin karesiyle doğru orantılı olarak 4 kat artacaktı. Ancak test dolgusunda imalat sırasındaki oturmaya tespit etmeye yönelik yapılan hesaplar sonucunda arazide 5,5 günde meydana geldiği düşünülen yaklaşık 7cm’lik oturma miktarı CPT loglarında ortalama 4m aralıkla görülen kum bantlarının drenaj bandı olarak çalıştığı düşüncesini desteklemektedir ve arazide gerçekleştirilen CPT deneylerinin, zemin profilinin oluşturulmasında önemli rol oynadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 5.1. SPT deney verileri ile elde edilen 8m aralıklarla geçen kum bantları için oturma-zaman ilişkisi

Laboratuvar ve arazi verileri kullanılarak belirlenen konsolidasyon parametreleriyle analitik ve sonlu elemanlar yöntemleriyle oturma miktarları hesaplanmış olup, oturmaların tamamlanma süreleri incelenmiştir. $H_{dr}=2m$ ve konsolidasyon katsayısı $c_v=0,004cm^2/sn$ olarak belirlendikten sonra analitik yöntemle yapılan hesaplarda imalat sırasında meydana gelen konsolidasyon oturmasını belirlemek için Terzaghi (1943) ilişkisinden yararlanılırken, sayısal modelleme yöntemiyle gerçekleştirilen analizlerde dolgu imalat adımları dikkate

alınarak analiz modeli oluşturulması sebebiyle imalat sırasında gerçekleşen oturma miktarına direkt analiz sonuçlarından ulaşılabilmektedir. Ancak sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen imalat sırasında meydana gelen oturma miktarlarının, analitik yöntemle hesaplanan oturma miktarlarından her zaman daha fazla olmasının nedeni sonlu elemanlar yönteminde yapılan analiz sonuçlarının dolgu imalatı sırasında hızlı bir şekilde tamamlanan elastik oturmayı da içermesinden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple elastik oturmayı göz ardı edebilmek için sonlu elemanlar yönteminde dolgu imalatı tamamlandıktan sonrası için oturma-zaman ilişkisi oluşturulmuş ve arazi ölçümleri ile kıyaslanmıştır.

Bu çalışma kapsamında test dolgusunda maksimum dolgu yüksekliği olan 5,5m yüksekliğindeki dolgu için analizler gerçekleştirilmiş ve oturma zaman ilişkisi oluşturulmuştur. Analitik yöntemde sadece trapez kesite sahip yol dolgusunun sebep olduğu gerilme artışı altında, dolgu merkez eksenini boyunca meydana gelen oturma miktarları hesaplanmıştır. Ancak sonlu elemanlar yöntemiyle analiz yapılması durumunda, yapılan tek bir analizle hem dolgu merkez eksenini, hem de sağ ve sol şev eksenini için ayrı ayrı oturma-zaman ilişkisi oluşturulabilmektedir. Böylelikle sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan bir analizle test dolgusunda ölçüm alınan merkez eksenindeki d23 noktası ve dolgu sağ şev ekseninde bulunan d22 noktası için ayrı ayrı oturma-zaman ilişkileri çizilmiş ve sonuçları incelenmiştir.

Analitik ve sonlu elemanlar yöntemleriyle, farklı deneyler verilerinden yararlanan ilişkiler kullanılarak hesaplanan oturma miktarları ve çizilen oturma-zaman ilişkileri incelendiğinde analitik yöntemde de sonlu elemanlar yönteminde de arazi ölçümlerine en yakın sonuç veren ilişkilerin PMT verilerini kullanan Amar (1991) ile CPT verilerini kullanan Kulhawy & Mayne(1990) ilişkileri olduğu belirlenmiştir. Ancak sonlu elemanlar yönteminde analitik yöntemlere kıyasla daha detaylı ve araziye daha yakın davranışı veren sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan bu çalışmada birden fazla arazi ve laboratuvar deneyleri yapılmış olmasına ve literatürde bu deneyleri kullanan birden fazla ilişki bulunmasına rağmen birçoğunun arazi davranışını tam anlamıyla yansıtamadığı tespit edilmiş ve arazi ölçümlerinin arazideki gerçek davranış hakkında fikir edinme konusundaki önemini ortaya koymuştur.

KAYNAKLAR

1. Mega Mühendislik Müşavirlik A.Ş. (2018). Kuzey Marmara Otoyolu (3. Boğaz Köprüsü Dahil) Projesi Kurtköy-Akyazı (Bağlantı Yolları Dahil) 6. Kesim Km 188+180-251+111,123 Arası Jeolojik – Jeoteknik Etüt Raporu, Ankara, 1-327.
2. Mega Mühendislik Müşavirlik A.Ş. (2018). Kuzey Marmara Otoyolu (3. Boğaz Köprüsü Dahil) Projesi Kurtköy- Akyazı (Bağlantı Yolları Dahil) Kesim-6 Km: 223+000-Km: 251+111 Arası Güzergah Geoteknik Proje Raporu, Ankara, 1-320.
3. United States Department of Transportation Federal Highway Administration. (December 2006), *Soils and Foundations Reference Manual*. Washington D.C., Naresh C. Samtani and Edward A. Nowatzki, volume I, 5-82.
4. Terzaghi, K. ve Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practic*. New Yrok, John Wiley ve Sons, 63.
5. Stroud, M.A. (1974), *The standard penetration test in insensitive clays and soft rock*. Stockholm, Sweden, Proceedings of European Symposium on Penetration Resistance, National Swedish Institute for Building Research, 2.2, 367-375.
6. Sowers, G.F. (1979), *Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering* (4th edition). New York NY, Macmillan Publishing Company, Incorporated, 338.
7. Kulhawy, F.H. and Mayne, P.W. (1990), *Manual on estimating soil properties for foundation design*. New York, Electric Power Institute, 4-53.
8. Sivrikaya, O., Toğrol, E. (2002). *Relations between SPT-N and q_u* . Istanbul, Turkey, 5th International Congress on Advances in Civil Engineering, 943-952.
9. Livneh, M. ve Uzan, S. (1970). Discussion on *A study of in situ testing with pressuremeter*. London, Proceedings of the Conference On In Situ Investigations on Soil and Rock, BGS, 212-213.
10. Amar, S. ve Jezequel, J.F. (1972). *Essais en place et en laboratoire sur sols comparaison des resultats*,. *Bulletin de Laisson laboratoires de Pontset Chaussees*. Paris, (58), 97-108.
11. Baguelin, F., Jezequel, J.F. ve Shields D.H. (1978). *The Pressuremeter and Foundation Engineering*. . Switzerland, Transportation Technical Publications, 617.
12. Amar, S., Clarke, B.G.F., Gambin, M.P. ve Orr, T.L.L. (1991). *The application of pressuremeter test results to foundation design in Europe*. Rotterdam, A state of the art report by ISSMFE European Technical Committee on Pressuremeters, A.A Balkema, 48
13. Briaud, J.L. (1992). *The Pressuremeter*. Rotterdam, A.A. Balkema.

14. Aas, G., Lacasse, S., Lunne, T. ve Hoeg, K. (1986). *Use of in situ tests for foundation design on clay*. Blacksburg, Proceedings of the American Society of Engineers Speciality Conference In Situ '86: Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, , 1 – 30,
15. Lunne, T., Robertson, P.K. ve Powell, J.J.M. (1997). *Cone penetration testing in geotechnical practice*. New York, Blackie Academic, EF Spon/Routledge Publishing, 312.
16. De Beer, E. (1977) *Static cone penetration testing in clay and loam*. In Proceedings Sonder Symposium, Fugro, 15–23.
17. Erol, O., Çekinmez, Z. (2014). *Geoteknik Mühendisliğinde Saha Deneyleri*. Ankara, Yüksel Proje Yayınları No:14-01, 97-101.
18. Terzaghi, K., Peck, B.R. ve Mesri, G. (1996) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York, John Wiley ve Sons, Incorporated., 152.
19. Jacobsen, M. (1970) *Strength and deformation properties of preconsolidated moraine clay*. In *Bulletin 27*, The Danish Geotechnical Institute, 21-45.
20. Osterberg, J. O. (1957), *Influence Values for Vertical Stresses in Semi-infinite Mass Due to Embankment Loading*. Proceedings 4th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1,393.
21. Casagrande, A. (1936b) *The Determination of the Pre-Consolidation Load and Its Practical Significance*. Discussion D-34, Proceeding of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, 3,60-64.
22. New York State Department Of Transportation (2012). *Embankments, Geotechnical Design Manual*. chapter 12, 12-36 – 12-39.
23. Sanglerat, G. (1972). “*The penetrometer and soil exploration*” Amsterdam, Elsevier Science, 464.
24. Mahesh, D. ve Vikash, J. (1995). *State of art of CPT in India*. International Symposium.on CPT, (1), Linköping, Sweden, 87 – 95.
25. Erol, O., Kaplan, N. ve Çakan, G. (2004). *Plastik killerde odometre modülünün CPT uç direncinden tahmini*. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, (1), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 31-38.
26. Robertson, PK. (2009), *Interpretation of cone penetration tests – a unified approach*. *Canadian Geotechnical. Journal*, 46(11),1337–1355.
27. Skempton, A.W. and Bjerrum, L. (1957), *A contribution to the settlement analysis of foundations on clay*. *Geotechnique*, 7, 168–178.
28. Brinkgreve R.B.J. (2002). *Plaxis Tutorial Manual V8*, Netherlands, A. A. Balkema, 1-114

29. Robertson, P.K. (2010), *Soil Behaviour Type from the CPT: An Update*. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, 2, 575-583.
30. Bowles, J.E. (1988). *Foundation Analysis and Design*, (4th Edition). New York, Mc Graw Hill Book Company, 125.
31. Wroth, C. P (1975). *In Situ Measurement of Initial Stresses and Deformation Characteristics*. in Proceeding of Specialty Conference In Situ Measurements Soil Properties, 2, American Society of Civil Engineering, 180–230.
32. Burt Look (2007), *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. London, UK, Taylor ve Francis Group, 96.
33. Taylor, D.W. (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*. New York, Wiley, 712
34. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical Soil Mechanics*. New York, John Wiley & Sons, 287





EKLER

(Ekler Tezin arka kapağında CD ortamında verilmiştir.)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KILIÇOĞLU, Buse
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 26.09.1992, Van
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (506) 703 06 97
 e-mail : kilicoglubuse@gmail.com.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2015
Lise	Çankaya Milli Piyango Anadolu Lisesi	2010

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-Halen	Mega Mühendislik Müşavirlik A.Ş.	Geoteknik Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayımlar

Kılıçoğlu, B., ve Akbaş, S.O. (2019). *Kuzey Marmara Otoyolu Projesi Km:241+200 Yol Dolgusu Oturma Davranışının Analitik Ve Sayısal Modelleme İle Karşılaştırmalı İncelenmesi*. International Conference on Innovation, Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering, iSTE-CE'2019, Hatay, Türkiye

Hobiler

Spor yapmak, Seyahat etmek, Fotoğraf çekmek |



GAZİ GELECEKTİR..