



**T.C.  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ – CERRAHPAŞA  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



## **DOKTORA TEZİ**

**DOLGU YÜKÜ ALTINDAKİ ZEMİNLERDE  
KONSOLİDASYONUN SINIRLANDIRILMASI**

**İbrahim KUŞKU**

**DANIŞMAN  
Prof. Dr. Süleyman DALGIÇ**

**Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı**

**ARALIK – 2020**

Bu çalışma 15/12/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Jeoloji Mühendisliğı Anabilim Dalı Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

### **Tez Jürisi**

Prof. Dr. Süleyman DALGIÇ (Danışman)  
İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa  
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Atiye TUĞRUL  
İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa  
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Remzi KARAGÜZEL  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
Maden Fakültesi

Prof. Dr. Şükrü ERSOY  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
İnşaat Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Özkan CORUK  
Kocaeli Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi





20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

## ÖNSÖZ

Bu çalışma, İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalında, dolgu yükü altındaki zeminlerde konsolidasyonun sınırlandırılmasına yönelik yeni yöntem ve eşitliklerin ortaya konulması amacıyla, doktora tezi olarak hazırlanmıştır. Bu çalışmanın başlangıcından bitimine kadar olan süreçte, her konuda desteğini aldığım, lisans eğitimimden itibaren birlikte çalışma imkânı bulduğum, bilgi ve tecrübesini hiçbir zaman benden esirgemeyen, asistanı olmaktan gurur duyduğum, benim için danışman ve hatta hocadan çok öte bir yeri olan, Hocam Prof. Dr. Süleyman DALGIÇ’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın başlangıç aşamasında katkılarını alma imkânı bulduğum, Prof. Dr. Atiye TUĞRUL, Prof. Dr. Hakan HOŞGÖRMEZ, Prof. Dr. Remzi KARAGÜZEL ve Dr. Öğr. Üyesi Özkan CORUK’a,

Arazi çalışmaları sonrası, tektonik değerlendirmelerde desteğini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi İsak YILMAZ’a,

Çalışma alanı olarak seçilen proje sahasında, araştırmaların yürütülmesi için imkân tanıyan T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü, İnşaat Emlak Daire Başkanlığı’na ve arazi çalışmaları sırasında her daim destek olan Kontrol Mühendisi Murat MİSKİ’ye,

Arazi uygulamaları ve ölçüm süreçlerinde her türlü desteği sunan, Makyol İnşaat Sanayi Turizm ve Tic. A. Ş. Proje Müdürü İnş. Müh. Miraç ERDOĞAN başta olmak üzere tüm proje teknik ekibine, teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, hayatımın her aşamasında desteklerini arkamda hissettiğim, ailemin tüm fertlerine, özellikle, tüm çalışmalarım sırasında bana sonsuz destek olan sevgili eşim Banu KUŞKU ve uzun süreler boyunca ilgilenemediğim zamanlarda dahi, her zaman beni sevgiyle karşılayan canım kızım DEFNE’ye, sonsuz teşekkür ederim.

Aralık, 2020

**İbrahim KUŞKU**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ .....                                                                | i         |
| İÇİNDEKİLER.....                                                           | ii        |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                                        | iv        |
| TABLO LİSTESİ.....                                                         | xii       |
| SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ .....                                            | xiv       |
| ÖZET .....                                                                 | xvi       |
| SUMARY.....                                                                | xviii     |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                      | <b>1</b>  |
| 1.1. AMAÇ .....                                                            | 2         |
| 1.2. KAPSAM.....                                                           | 3         |
| <b>2. GENEL KISIMLAR.....</b>                                              | <b>5</b>  |
| 2.1. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....                                               | 5         |
| 2.1.1. Araştırma Konusu ile İlgili Çalışmalar.....                         | 5         |
| 2.1.1.1. Su Hareketinin Sıkıştırılabilirliğe Etkisi .....                  | 18        |
| 2.1.1.2. Yükleme Koşullarının Birim Şekil Değiştirme Üzerinde Etkisi ..... | 25        |
| 2.1.1.3. Yük Altında Oturma Hesapları.....                                 | 44        |
| 2.1.2. Araştırma Alanı ile İlgili Çalışmalar .....                         | 52        |
| 2.1.2.1. İnceleme Alanında Yapılan Jeolojik Çalışmalar .....               | 53        |
| 2.1.2.2. Fizibilite ve Avan Proje Çalışmaları .....                        | 59        |
| <b>3. MALZEME VE YÖNTEM.....</b>                                           | <b>67</b> |
| 3.1. BÜRO ÇALIŞMALARI.....                                                 | 67        |
| 3.1.1. Alansal Değerlendirme Yöntemi .....                                 | 69        |
| 3.2. ARAZİ ÇALIŞMALARI.....                                                | 72        |
| <b>4. BULGULAR.....</b>                                                    | <b>73</b> |
| 4.1. UYGULAMA PROJESİNİN ÖZELLİKLERİ.....                                  | 73        |
| 4.1.1. Dolgu İmalatlarında Kullanılacak Malzeme Kriterleri.....            | 81        |
| 4.1.1.1. Kaya Dolgu Özellikleri.....                                       | 81        |
| 4.1.1.2. Temel Altı ve Temel Tabakası Özellikleri .....                    | 81        |
| 4.1.1.3. Zayıf Beton Temel Tabakası Özellikleri .....                      | 82        |

|                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1.1.4. Beton Kaplama Tabakası Özellikleri.....                             | 83         |
| 4.1.2. Uygulama Projesinin Mevcut Altyapı ve Sanat Yapılarıyla İlişkisi..... | 86         |
| 4.2. ÇALIŞMA ALANI MORFOLOJİSİ.....                                          | 88         |
| 4.3. ÇALIŞMA ALANININ JEOLojİSİ.....                                         | 93         |
| 4.4. ÇALIŞMA ALANININ MÜHENDİSLİK JEOLojİSİ .....                            | 109        |
| 4.4.1. Fiziksel Özellikler.....                                              | 110        |
| 4.4.2. Mekanik Özellikler .....                                              | 116        |
| 4.4.3. Yüzey Suları, Yeraltı Suyu ve Geçirimsilik.....                       | 121        |
| 4.4.4. Proje Alanında Yük ve Gerilme Değişimi.....                           | 126        |
| 4.4.4.1. Hareketli Yükler ve Gerilme Değişimi.....                           | 126        |
| 4.4.4.2. Kazı ve Dolgu Çalışmalarında Yük ve Gerilme Değişimi .....          | 136        |
| 4.4.5. Konsolidasyon Özellikleri .....                                       | 142        |
| 4.4.6. Konsolidasyon Analizleri .....                                        | 164        |
| 4.5. KONSOLİDASYONUN SINIRLANDIRILMASI.....                                  | 170        |
| 4.5.1. Zemin İyileştirme Yöntemi .....                                       | 170        |
| 4.5.2. İyileştirme Yöntemi Analizleri.....                                   | 177        |
| 4.5.3. Performans Kontrol Ölçümleri .....                                    | 186        |
| <b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>                                            | <b>199</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                        | <b>205</b> |
| <b>EKLER .....</b>                                                           | <b>217</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                         | <b>218</b> |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                                                       | Sayfa No |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Şekil 2.1:</b> 1919'da İsveç Geoteknik Komisyonu'ndan John Olsson tarafından üretilen konsolidasyon cihazı (Flodin ve Broms, 1981). ....                                                                           | 6        |
| <b>Şekil 2.2:</b> Kil örneği için test eğrileri (Terzaghi, 1925). ....                                                                                                                                                | 8        |
| <b>Şekil 2.3:</b> Kil örneği içinde basınç dağılımı (Terzaghi, 1925). ....                                                                                                                                            | 9        |
| <b>Şekil 2.4:</b> Düzgün dağılmış sürşarj yükünün ani uygulanması nedeniyle kilin gözenek suyunda aşırı hidrostatik basınç (Terzaghi, 1943). ....                                                                     | 12       |
| <b>Şekil 2.5:</b> Konsolidasyon oranında birim şekil değiştirmenin etkisi (Terzaghi ve Fröhlich, 1936; Janbu, 1965; Duncan, 1993). ....                                                                               | 17       |
| <b>Şekil 2.6:</b> Çok katmanlı bir zeminde (a) permeabilite, (b) hacimsel sıkışma katsayısı değişimi ve (c) tek katmandaki değişkenler (Abbott (1960)'tan değiştirilerek alınmıştır). ....                            | 19       |
| <b>Şekil 2.7:</b> A ve B kesitlerinde yaklaşık gerilme – düşey birim şekil değiştirme eğrileri (Leroueil, 1996). ....                                                                                                 | 21       |
| <b>Şekil 2.8:</b> Berthierville (Kanada)'dan bir kil örneğinin çeşitli alt katmanlarında gözlenen efektif gerilme – eksenel birim şekil değiştirme ilişkileri (Leroueil ve diğ., 1986). ....                          | 22       |
| <b>Şekil 2.9:</b> Konsolidasyon sırasında farklı alt numuneler için boşluk oranı ve efektif gerilme arasındaki ilişki (Imai ve Tang, 1992). ....                                                                      | 23       |
| <b>Şekil 2.10:</b> İlave boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi (Das, 2019). ....                                                                                                                                 | 24       |
| <b>Şekil 2.11:</b> Toplam gerilme, boşluk suyu basıncı ve ilave bir gerilmenin sonucu olarak, alt ve üstte drene edilen bir kil tabakasındaki efektif gerilme değişimi ( $\Delta\sigma$ ) (Das ve Sobhan, 2018). .... | 25       |
| <b>Şekil 2.12:</b> Dolgu yükü altında (xyz) koordinatında gerilme hesabı denklem değişkenleri (Gray, 1936). ....                                                                                                      | 26       |
| <b>Şekil 2.13:</b> Dolgu yükü altında gerilme değişimi (Das (2008)'den düzenlenerek alınmıştır). ....                                                                                                                 | 27       |
| <b>Şekil 2.14:</b> Dolgu yükleme nedeniyle dikey gerilmenin belirlenmesi için Osterberg (1957) etki faktörü grafiği (Das ve Sobhan, 2018). ....                                                                       | 27       |

|                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.15:</b> Zamana bağlı yükleme nedeniyle tek boyutlu konsolidasyon: (a) zemin profili; (b) zamana bağlı gerilme değişimi; (c) $U_{av}$ 'nin $T_v$ ve $T_c$ ile değişimi (Olson, 1977). ..... | 29 |
| <b>Şekil 2.16:</b> Yüklemeyle ilgili (a) $U_1 - T_v$ ve (b) $U_2 - T_v$ eğrileri (Zhu ve Yin, 1998). .....                                                                                            | 31 |
| <b>Şekil 2.17:</b> Sabit yükleme koşullarında yöntemin tipik yapısı (Hanna ve diğ.(2013)'den değiştirilerek alınmıştır.). .....                                                                       | 33 |
| <b>Şekil 2.18:</b> Ani ve sabit hızlı yüklemeler için konsolidasyon derecesi – zaman faktörü grafikleri (Hanna ve diğ., 2013). .....                                                                  | 34 |
| <b>Şekil 2.19:</b> Yük artış oranının etkisi: (a) konsolidasyon eğrisi üzerindeki etkisi; (b) $e - \log \sigma'$ grafiği üzerindeki etkisi (Das, 2019). .....                                         | 42 |
| <b>Şekil 2.20:</b> Yük süresinin $e - \log \sigma'$ grafiğine etkisi: (a) birincil konsolidasyon sonu, (b) 24 saatlik yük artış süresi ve (c) 24 saatten fazla yük süresi (Das, 2019). .....          | 43 |
| <b>Şekil 2.21:</b> Geleneksel ve CRS deneylerinden elde edilen tipik sıkıştırılabilirlik eğrileri (Leroueil ve Kabbaj, 1985). .....                                                                   | 44 |
| <b>Şekil 2.22:</b> Tek boyutlu konsolidasyon oturması miktarının hesabında temel prensip (Das ve Sobhan (2018)'den değiştirilerek alınmıştır). .....                                                  | 47 |
| <b>Şekil 2.23:</b> Boşluk oranı değişiminin hesabı (Das, 2008). .....                                                                                                                                 | 48 |
| <b>Şekil 2.24:</b> Çalışma alanı konumu .....                                                                                                                                                         | 53 |
| <b>Şekil 2.25:</b> Çalışma alanı ve yakın çevresi jeoloji haritası (OYO International Corporation (2009)'dan düzenlenerek alınmıştır). .....                                                          | 55 |
| <b>Şekil 2.26:</b> Fizibilite ve Avan Proje çalışmalarındaki zemin araştırma sondajı ve araştırma çukuru lokasyonları. ....                                                                           | 61 |
| <b>Şekil 2.27:</b> 2028 yılı hava meydanı altyapısı planı, bakış yönü kuzeydoğu (Oakman ve diğ., 2011). .....                                                                                         | 62 |
| <b>Şekil 2.28:</b> Çalışma alanı batı kesiminde hesaplanan oturma miktarlarının alansal değişimi (Oakman ve diğ., 2011) .....                                                                         | 66 |
| <b>Şekil 3.1:</b> Hesap noktalarının proje alanındaki dağılımı. ....                                                                                                                                  | 70 |
| <b>Şekil 3.2:</b> Alansal değerlendirme yöntemi akış şeması. ....                                                                                                                                     | 71 |
| <b>Şekil 4.1:</b> Pist ve apron alanları tip kesit şematik çizimleri. ....                                                                                                                            | 75 |
| <b>Şekil 4.2:</b> Proje nihai yüzeyi üç boyutlu görünümü. ....                                                                                                                                        | 76 |
| <b>Şekil 4.3:</b> Proje bileşenlerinin konumu. ....                                                                                                                                                   | 77 |
| <b>Şekil 4.4:</b> Proje yüzeyi kot değişimi. ....                                                                                                                                                     | 78 |

|                                                                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.5:</b> Kaplamalı yüzey çevresi drenaj hattı imalatından bir görünüm. ....                                                                                                        | 79  |
| <b>Şekil 4.6:</b> Proje alanında planlanan ana drenaj hatları. ....                                                                                                                         | 80  |
| <b>Şekil 4.7:</b> Pürüzlülük kriterlerinin karşılaştırması (ICAO, 2009). ....                                                                                                               | 85  |
| <b>Şekil 4.8:</b> TEM Bağlantı Yolu'nun proje altında kalacak kesiminde oluşturulan tüneller. ....                                                                                          | 86  |
| <b>Şekil 4.9:</b> Kemiklidere derivasyon tüneli kesitinden bir görünüm. ....                                                                                                                | 87  |
| <b>Şekil 4.10:</b> Çalışma alanı ve çevresi 2016 tarihli topografya haritası. ....                                                                                                          | 89  |
| <b>Şekil 4.11:</b> Çalışma alanı üç boyutlu yüzey modeli. ....                                                                                                                              | 90  |
| <b>Şekil 4.12:</b> Çalışma alanı 2016 yılı topoğrafik kotların değişimi. ....                                                                                                               | 91  |
| <b>Şekil 4.13:</b> Çalışma alanı ve çevresi 2006 tarihli 1/5000 ölçekli haritadan üretilmiş topografya haritası. ....                                                                       | 92  |
| <b>Şekil 4.14:</b> Çalışma alanı güney kesiminde, farklı dönemleri temsil eden eşyüksekti eğrilerinin ilişkisi; a) 2006 yılı öncesi, b) 2016 yılı. ....                                     | 93  |
| <b>Şekil 4.15:</b> Zemin araştırma sondajı ve araştırma çukurlarının konumu. ....                                                                                                           | 94  |
| <b>Şekil 4.16:</b> Çalışma alanı ve çevresinin jeoloji haritası. ....                                                                                                                       | 95  |
| <b>Şekil 4.17:</b> Çalışma alanı kuzey doğusunda Kurtköy Formasyonu içerisinde çakıltaşı seviyesinden bir görünüm. ....                                                                     | 96  |
| <b>Şekil 4.18:</b> Çalışma alanı kuzey doğusunda Kurtköy Formasyonu ile Aydos Formasyonu sınırından bir görünüm. ....                                                                       | 97  |
| <b>Şekil 4.19:</b> Aydos Formasyonuna ait kuvarsit düzeylerinden bir görünüm, bakış yönü batı. ....                                                                                         | 98  |
| <b>Şekil 4.20:</b> Değirmen Tepe güney doğusunda, a) Aydos Formasyonu ve b) Yayalar Formasyonu Gözdağ üyesi'nde gelişmiş doğrultu atımlı faylardan bir görünüm (bakış yönü kuzeybatı). .... | 98  |
| <b>Şekil 4.21:</b> Çalışma alanı batısı, TEM Bağlantı Yolu kuzeyinde Kartal Formasyonundan bir görünüm. ....                                                                                | 100 |
| <b>Şekil 4.22:</b> Sultanbeyli formasyonu kil düzeylerinden bir görünüm, bakış yönü kuzeydoğu. ....                                                                                         | 101 |
| <b>Şekil 4.23:</b> Zemin araştırma sondajlarında Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı kil üyesi ve uyumsuz olarak üstüne geldiği Aydos Formasyonu kuvarsit düzeyleri. ....                        | 102 |
| <b>Şekil 4.24:</b> Bitkisel toprak, yapay dolgu ardalanması ve Orhanlı üyesinin konumu. ....                                                                                                | 103 |

|                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.25:</b> Çalışma alanında Paleozoik birimler, Sultanbeyli formasyonu Orhanlı üyesi ve kil dolgu birimlerin alansal yayılımı.....                                             | 104 |
| <b>Şekil 4.26:</b> Yapay dolgu taban kontur haritası.....                                                                                                                              | 105 |
| <b>Şekil 4.27:</b> Sultanbeyli Formasyonu taban kontur haritası.....                                                                                                                   | 106 |
| <b>Şekil 4.28:</b> Çalışma alanında, yapay dolgu kalınlık değişimi.....                                                                                                                | 107 |
| <b>Şekil 4.29:</b> Çalışma alanında, Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi kalınlık değişimi.....                                                                                       | 108 |
| <b>Şekil 4.30:</b> Doğal birim hacim ağırlığı ve su içeriği sonuçlarının derinlikle değişimi.....                                                                                      | 110 |
| <b>Şekil 4.31:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, alüvyon ve yapay dolgu birimleri dane boyu dağılımı.....                                                                      | 111 |
| <b>Şekil 4.32:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, alüvyon ve yapay dolgu birimleri, kil örneklerin plastisite kartındaki konumu.....                                            | 112 |
| <b>Şekil 4.33:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, alüvyon ve yapay dolgu birimleri, kil örneklerin konsistans indisi değerlerinin derinlikle değişimi.....                      | 112 |
| <b>Şekil 4.34:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, alüvyon ve yapay dolgu birimleri, kil örneklerin likitlik indisi değerlerinin derinlikle değişimi.....                        | 113 |
| <b>Şekil 4.35:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi ve yapay dolgu birime ait örneklerde, boşluk oranı değerlerinin örnek sayılarına göre değişimi ve normal dağılım eğrileri..... | 114 |
| <b>Şekil 4.36:</b> Standart penetrasyon testi $N_{60}$ değerlerinin derinlikle değişimi.....                                                                                           | 115 |
| <b>Şekil 4.37:</b> Net limit basınç değerlerinin derinlikle değişimi.....                                                                                                              | 116 |
| <b>Şekil 4.38:</b> Kohezyon ve içsel sürtünme açısı ilişkisi, a) üç eksenli basınç deneyi (UU-CU), b) direk kesme deneyi, c) üç eksenli basınç deneyi (CU).....                        | 117 |
| <b>Şekil 4.39:</b> Cep penetrometresi ve arazi veyn deneyi, drenajsız kohezyon ( $c_u$ ) ilişkisi.....                                                                                 | 118 |
| <b>Şekil 4.40:</b> Serbest basınç deneyi sonucu elde edilen drenajsız kohezyon değerlerinin derinlikle değişimi.....                                                                   | 118 |
| <b>Şekil 4.41:</b> Menard Elastisite Modülü değerlerinin derinlikle değişimi.....                                                                                                      | 119 |
| <b>Şekil 4.42:</b> Nokta yük dayanım indeksi ( $I_{50}$ ) değerlerinin derinlikle değişimi.....                                                                                        | 120 |
| <b>Şekil 4.43:</b> Çalışma alanında bulunan akarsuların ve yüzeysel kaynakların konumu.....                                                                                            | 122 |
| <b>Şekil 4.44:</b> Kuyucak Deresi ve üzerinde bulunan Güney Yonca Tüneli batı kesiminde oluşan göletten bir görünüm.....                                                               | 123 |
| <b>Şekil 4.45:</b> Yeraltı suyu derinlik ölçümü ve permeabilite deneyi yapılan zemin araştırma sondajı ve araştırma çukuru lokasyonları ile yeraltı suyu derinlikleri.....             | 124 |



|                                                                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.46:</b> Yeraltı suyunun yüzeye yakın bulunduğu araştırma çukurundan bir görünüm. ....                                                                                                                          | 125 |
| <b>Şekil 4.47:</b> Permeabilite katsayısı değerlerinin derinlikle değişimi ve drenaj durumu ile geçirimsizlik sınıflaması. ....                                                                                           | 126 |
| <b>Şekil 4.48:</b> Airbus A380–800 iniş takımı konumları ve lastik sayıları. ....                                                                                                                                         | 128 |
| <b>Şekil 4.49:</b> Plaxis 3D analiz modeli. ....                                                                                                                                                                          | 130 |
| <b>Şekil 4.50:</b> Toplam ve efektif gerilmenin derinlikle değişimi, a: toplam gerilme, b: efektif gerilme. ....                                                                                                          | 132 |
| <b>Şekil 4.51:</b> Aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı. ....                                                                                                                                                               | 133 |
| <b>Şekil 4.52:</b> Toplam ve efektif gerilmenin derinlikle değişimi (a ve b pist eksenine paralel, c ve d pist eksenine dik görüşler). ....                                                                               | 134 |
| <b>Şekil 4.53:</b> Yük öncesinde ve yükleme sonrasında, pist eksenı gövde iniş takımı hizasında (A), toplam ve efektif gerilmenin derinlikle değişimi; a ve b tüm kesit, c ve d kesitin 2.4 m’den daha derin kesimi. .... | 135 |
| <b>Şekil 4.54:</b> Kazı ve dolgu çalışmaları şematik kesiti, a) dolgu alanı, b) kazı alanı, c) kazı ve tekrar dolgu alanı. ....                                                                                           | 136 |
| <b>Şekil 4.55:</b> Proje yüzeyi ve topoğrafik yüzey ilişkisinin 3D modelde görünümü. ....                                                                                                                                 | 138 |
| <b>Şekil 4.56:</b> Kazı ve dolgu alanları. ....                                                                                                                                                                           | 139 |
| <b>Şekil 4.57:</b> Kazı ve dolgu yüksekliği değişimi. ....                                                                                                                                                                | 140 |
| <b>Şekil 4.58:</b> Jeolojik birimler bazında proje dolgusu alanlarının yayılımı. ....                                                                                                                                     | 141 |
| <b>Şekil 4.59:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi’ne ait örneklerde belirlenen ön konsolidasyon basıncını değerlerinin normal dağılım eğrisi ve geometrik ortalaması. ....                                          | 143 |
| <b>Şekil 4.60:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi’ne ait örneklerde belirlenen ön konsolidasyon basıncının derinlikle değişimi. ....                                                                                | 144 |
| <b>Şekil 4.61:</b> Ödometre deneyi sonucu belirlenen ön konsolidasyon basıncı değerlerinin Stas ve Kulhawy (1984) yaklaşımı sonuçlarıyla ilişkisi. ....                                                                   | 144 |
| <b>Şekil 4.62:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi’ne ait örneklerde efektif gerilme – ön konsolidasyon basıncı ilişkisi. ....                                                                                       | 145 |
| <b>Şekil 4.63:</b> Aşırı konsolidasyon oranlarının karşılaştırılması. ....                                                                                                                                                | 145 |
| <b>Şekil 4.64:</b> Sıkışma indisi değerlerinin örnek sayılarına göre dağılımı, normal dağılım eğrileri ve geometrik ortalamaları. ....                                                                                    | 147 |

|                                                                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.65:</b> Yeniden sıkışma indisi değerlerinin örnek sayılarına göre dağılımı, normal dağılım eğrileri ve geometrik ortalamaları. ....                                                                     | 148 |
| <b>Şekil 4.66:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi ve yapay dolgu birime ait örneklerde, boşluk oranı – sıkışma indisi ilişkisi.....                                                                          | 148 |
| <b>Şekil 4.67:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi ve yapay dolgu birime ait örneklerde, boşluk oranı – yeniden sıkışma indisi ilişkisi. ....                                                                 | 149 |
| <b>Şekil 4.68:</b> Yapay dolgu birime ait örneklerde, boşluk oranı – sıkışma indisi ilişkisi.....                                                                                                                  | 149 |
| <b>Şekil 4.69:</b> Yapay dolgu birime ait örneklerde, boşluk oranı – yeniden sıkışma indisi ilişkisi.....                                                                                                          | 150 |
| <b>Şekil 4.70:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait örneklerde boşluk oranı – sıkışma indisi ilişkisi. ....                                                                                             | 150 |
| <b>Şekil 4.71:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait örneklerde boşluk oranı – yeniden sıkışma indisi ilişkisi.....                                                                                      | 151 |
| <b>Şekil 4.72:</b> Sıkışma indisi ve yeniden sıkışma indisi ilişkisi. ....                                                                                                                                         | 151 |
| <b>Şekil 4.73:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi ve yapay dolgu birimlerin konsolidasyon basıncı – boşluk oranı değişim modeli. ....                                                                        | 152 |
| <b>Şekil 4.74:</b> Yapay dolgu örneklerde belirlenen konsolidasyon katsayısı değerlerinin, örnek sayıları ve normal dağılım eğrisi. ....                                                                           | 153 |
| <b>Şekil 4.75:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait örneklerde belirlenen konsolidasyon katsayısı değerlerinin, örnek sayıları ve normal dağılım eğrisi.....                                            | 154 |
| <b>Şekil 4.76:</b> Yapay dolgu örneklerde belirlenen konsolidasyon katsayısı değerlerinin, konsolidasyon basıncı ve örnek sayılarına göre dağılımı.....                                                            | 154 |
| <b>Şekil 4.77:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait örneklerde belirlenen konsolidasyon katsayısı değerlerinin, konsolidasyon basıncı ve örnek sayılarına göre dağılımı.....                            | 155 |
| <b>Şekil 4.78:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi ve yapay dolgu örneklerinin, konsolidasyon basıncına göre, konsolidasyon katsayısı, hacimsel sıkışma katsayısı ve geçirimsizlik katsayısı değişimleri..... | 157 |
| <b>Şekil 4.79:</b> Deneme dolgusu yapılan alan ve oturma miktarı ölçüm lokasyonları.....                                                                                                                           | 159 |
| <b>Şekil 4.80:</b> Oturma kolonu ölçüm sonuçları karakök zaman – birim şekil değiştirme ilişkisi.....                                                                                                              | 161 |
| <b>Şekil 4.81:</b> Efektif gerilme artış oranı ile ani oturma sonlanma süresi ilişkisi. ....                                                                                                                       | 162 |
| <b>Şekil 4.82:</b> Oturma kolonu lokasyonlarında oluşturulan konsolidasyon basıncı ile hesaplanan konsolidasyon katsayısı ilişkisi.....                                                                            | 163 |

|                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.83:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi konsolidasyon oturması miktarı alansal değişimi. ....                                                      | 166 |
| <b>Şekil 4.84:</b> Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi %95 konsolidasyon süresi alansal değişimi. ....                                                            | 167 |
| <b>Şekil 4.85:</b> Yapay dolgu konsolidasyon oturması miktarı alansal değişimi. ....                                                                               | 168 |
| <b>Şekil 4.86:</b> Çalışma alanında hesaplanan konsolidasyon oturması miktarlarının alansal değişimi. ....                                                         | 169 |
| <b>Şekil 4.87:</b> Analiz yönteminde kullanılan denklem parametreleri, a) kazı yapılmayan b) kazı yapılan durum. ....                                              | 172 |
| <b>Şekil 4.88:</b> Oluşturulan yazılımdaki analiz algoritmasının özeti. ....                                                                                       | 176 |
| <b>Şekil 4.89:</b> İyileştirme alanının konumu. ....                                                                                                               | 180 |
| <b>Şekil 4.90:</b> İyileştirme kazısı yüksekliği alansal değişimi. ....                                                                                            | 181 |
| <b>Şekil 4.91:</b> İyileştirme sonrasında yapay dolguda hesaplanan konsolidasyon miktarının alansal değişimi. ....                                                 | 182 |
| <b>Şekil 4.92:</b> Pist alanında, yapay dolgu ve iyileştirme kazısı yüksekliği ile hesaplanan oturma miktarı ve yüzey düzensizliğinin değişimi. ....               | 183 |
| <b>Şekil 4.93:</b> Yardımcı Pist alanında, yapay dolgu ve iyileştirme kazısı yüksekliği ile hesaplanan oturma miktarı ve yüzey düzensizliğinin değişimi. ....      | 183 |
| <b>Şekil 4.94:</b> Paralel Taksi Yolu alanında, yapay dolgu ve iyileştirme kazısı yüksekliği ile hesaplanan oturma miktarı ve yüzey düzensizliğinin değişimi. .... | 184 |
| <b>Şekil 4.95:</b> İyileştirme sonrasında çalışma alanında hesaplanan konsolidasyon oturması miktarının alansal değişimi. ....                                     | 185 |
| <b>Şekil 4.96:</b> Çalışma alanında kaya dolgu çalışmalarından bir görünüm. ....                                                                                   | 187 |
| <b>Şekil 4.97:</b> Çalışma alanı batı kesiminde kaya dolgu çalışmalarından bir görünüm (Bakış yönü batı). ....                                                     | 187 |
| <b>Şekil 4.98:</b> Çalışma alanında kırmataş temel tabakasından bir görünüm. ....                                                                                  | 188 |
| <b>Şekil 4.99:</b> Çalışma alanında oluşturulan oturma kolonundan bir görünüm. ....                                                                                | 188 |
| <b>Şekil 4.100:</b> Çalışma alanında oluşturulan oturma plakasından bir görünüm. ....                                                                              | 189 |
| <b>Şekil 4.101:</b> Oturma plakası ve kolonlarının konumu. ....                                                                                                    | 192 |
| <b>Şekil 4.102:</b> Oturma kolonu ve oturma plakalarında ölçüm yapılan tarih aralıkları ve toplam sürenin (gün) proje bileşenlerine göre dağılımı. ....            | 193 |

|                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.103:</b> Oturma kolonu ölçümlerinin bölgelere göre dağılımı, ölçüm yapılan gün sayısı ve en büyük oturma miktarı.....                         | 195 |
| <b>Şekil 4.104:</b> Oturma plakası ölçümlerinin bölgelere göre dağılımı, ölçüm yapılan gün sayısı ve en büyük oturma miktarı.....                        | 195 |
| <b>Şekil 4.105:</b> Oturma kolonu ölçüm sonuçları ile iyileştirme sonrası durum için hesaplanan toplam oturma miktarı değerlerinin karşılaştırması.....  | 196 |
| <b>Şekil 4.106:</b> Oturma kolonu ölçümleri ile aynı lokasyonlarda iyileştirme sonrası durum için hesaplanan oturma miktarlarının ilişkisi.....          | 197 |
| <b>Şekil 4.107:</b> Oturma plakası ölçüm sonuçları ile iyileştirme sonrası durum için hesaplanan toplam oturma miktarı değerlerinin karşılaştırması..... | 198 |



## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                                                                           | Sayfa No |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Tablo 2.1:</b> Ödometre deney teknikleri, önerilen hesap yöntemleri ve kullanılan varsayımlar (Znidarcic ve diğ., 1984) .....                          | 36       |
| <b>Tablo 2.2:</b> Sıkışma indisi için korelasyonlar .....                                                                                                 | 50       |
| <b>Tablo 2.3:</b> Yeniden sıkışma indisi için korelasyonlar .....                                                                                         | 50       |
| <b>Tablo 2.4:</b> Oakman ve diğ. (2011) tarafından yapılan çalışmada, jeoteknik zemin modeli jeolojik birimleri, birim derinlikleri ve kalınlıkları ..... | 63       |
| <b>Tablo 2.5:</b> Avan proje kapsamında değerlendirmeye alınan arazi ve laboratuvar deneyleri (Oakman ve diğ., 2011) .....                                | 65       |
| <b>Tablo 4.1:</b> Proje bileşenleri için belirlenmiş eğim, genişlik ve tabaka kalınlıkları. ....                                                          | 75       |
| <b>Tablo 4.2:</b> Temel altı ve temel tabakasında, agrega ve filler malzemesinin fiziksel özellikleri. ....                                               | 82       |
| <b>Tablo 4.3:</b> Temel altı ve temel tabakası, dayanım ve sıkışma özellikleri. ....                                                                      | 82       |
| <b>Tablo 4.4:</b> Zayıf beton temel tabakasında kullanılan agrega malzemesinin gronülometrik özellikleri. ....                                            | 83       |
| <b>Tablo 4.5:</b> Zayıf beton temel tabakası agrega karışım gronülometrisi. ....                                                                          | 83       |
| <b>Tablo 4.6:</b> Zayıf beton temel tabakası agrega malzemesinin fiziksel özellikleri. ....                                                               | 83       |
| <b>Tablo 4.7:</b> Beton kaplama tabakası agrega malzemesinin fiziksel özellikleri. ....                                                                   | 84       |
| <b>Tablo 4.8:</b> Beton kaplama tabakasında kullanılan agrega malzemesinin gronülometrik özellikleri. ....                                                | 84       |
| <b>Tablo 4.9:</b> Çalışma alanında değerlendirmeye alınan arazi ve laboratuvar deneyleri. ....                                                            | 109      |
| <b>Tablo 4.10:</b> Menard elastisite modülü, en küçük, en büyük, ortalama ve standart sapma değerleri. ....                                               | 120      |
| <b>Tablo 4.11:</b> Çalışma alanında yüzeylenen kaya stratigrafi birimlerinin RMR (1989) sınıflaması. ....                                                 | 121      |
| <b>Tablo 4.12:</b> Airbus A380–800 WV011 ağırlık çeşidine göre yapılan, yük, gerilme ve temas yüzeyi hesapları. ....                                      | 129      |
| <b>Tablo 4.13:</b> Beton kaplama tabakası hesap modeli parametreleri. ....                                                                                | 130      |

|                                                                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tablo 4.14:</b> Zayıf beton temel tabakası hesap modeli parametreleri.....                                                                                                            | 131 |
| <b>Tablo 4.15:</b> Kırmataş temel, kaya dolgu, yapay dolgu ve Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi katmanlarına ait hesap modeli parametreleri. ....                                     | 131 |
| <b>Tablo 4.16:</b> Sıkışma indisi ve tekrar sıkışma indislerinin en düşük, en yüksek, ortalama ve standart sapma değerleri. ....                                                         | 147 |
| <b>Tablo 4.17:</b> Ön yükleme yapılan alanda oluşturulan oturma plakaları ile bu lokasyondaki kil ve proje dolgusu kalınlıkları. ....                                                    | 158 |
| <b>Tablo 4.18:</b> Oturma plakalarının bulunduğu lokasyonda kil ve proje dolgusu kalınlıkları ile ölçüm süresi, en büyük oturma miktarı ve en büyük birim şekil değiştirme oranları..... | 161 |
| <b>Tablo 4.19:</b> Oturma plakası ölçümleri kullanılarak belirlenen konsolidasyon katsayısı değerleri.....                                                                               | 162 |
| <b>Tablo 4.20:</b> Yapay dolgu ve Orhanlı üyesi konsolidasyon analizi parametreleri.....                                                                                                 | 163 |
| <b>Tablo 4.21:</b> Oturma kolonu ve oturma plakalarında ölçüm yapılan toplam süre, toplam veri sayısı ve en büyük oturma miktarının bölgelere göre dağılımı. ....                        | 194 |

## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

| Simgeler         | Açıklama                                   |
|------------------|--------------------------------------------|
| $q_v$            | : Sıkışma katsayısı                        |
| $C_c$            | : Sıkışma indisi                           |
| $C_k$            | : Geçirgenlik değişim indeksi              |
| $C_r$            | : Yeniden sıkışma indisi                   |
| $c_u$            | : Drenajsız kayma mukavemeti               |
| $c_v$            | : Konsolidasyon katsayısı                  |
| $e$              | : Boşluk oranı                             |
| $e_0$            | : İlk boşluk oranı                         |
| $H_T$            | : Sıkıştırılabilir tabaka kalınlığı        |
| $H_K$            | : İyileştirme kazısı yüksekliği            |
| $H_E$            | : Mühendislik dolgusu yüksekliği           |
| $I_p$            | : Plastisite İndisi                        |
| $k$              | : Geçirgenlik katsayısı                    |
| $m_v$            | : Hacimsel sıkışma katsayısı               |
| $n$              | : Porozite                                 |
| OCR              | : Aşırı konsolidasyon oranı                |
| $T_v$            | : Zaman faktörü                            |
| $u$              | : Boşluk suyu basıncı                      |
| U%               | : Konsolidasyon yüzdesi                    |
| $W_L$            | : Likit limit                              |
| $W_P$            | : Plastik limit                            |
| $\gamma_w$       | : Suyun birim hacim ağırlığı               |
| $\gamma_d$       | : Doygun birim hacim ağırlık               |
| $\gamma_E$       | : Mühendislik dolgusu birim hacim ağırlığı |
| $\Delta e$       | : Boşluk oranı değişimi                    |
| $\Delta H$       | : Konsolidasyon oturması miktarı           |
| $\Delta \sigma'$ | : Efektif gerilme değişimi                 |
| $\nu$            | : Poisson oranı                            |
| $\sigma'_c$      | : Ön konsolidasyon basıncı                 |
| $\sigma'$        | : Efektif gerilme                          |
| $\sigma'_v$      | : Düşey efektif gerilme                    |

| <b>Kısaltmalar</b> | <b>Açıklama</b> |
|--------------------|-----------------|
|--------------------|-----------------|

|      |                                                                           |
|------|---------------------------------------------------------------------------|
| AYGM | : T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü |
| CBS  | : Coğrafi bilgi sistemi                                                   |
| CBR  | : Kaliforniya taşıma oranı                                                |
| DHMI | : T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Devlet Hava Meydanları İşletmesi    |
| IATA | : Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği                                  |
| ICAO | : Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu                              |





## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

#### DOLGU YÜKÜ ALTINDAKİ ZEMİNLERDE KONSOLİDASYONUN SINIRLANDIRILMASI

İbrahim KUŞKU

İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Süleyman DALGIÇ

Zemin iyileştirme çalışmaları gün geçtikçe artan bir ihtiyaç olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmalarda, proje yükleri etkisinde, taşıma gücü ve oturma davranışındaki yetersizlikler sıklıkla öne çıkan önemli iki zemin davranışıdır. Özellikle büyük ölçekli projelerde, sınır koşullarını aşan düzeyde oturma miktarı ve süresi, uygulanabilirlik ile yapım süresini önemli derecede etkileyebilecek, iyileştirilmesi gereken zemin davranışı niteliğindedir. Jeoteknik araştırmalar sonucu, gerekli proje kriterlerini sağlamadığı belirlenen zeminde, iyileştirme yönteminin seçimi ise, güvenlik ve uygulanabilirlik başta olmak üzere, seçenekler arası maliyet farklarına da bağlıdır. Ayrıca, alternatifler arası maliyet farkı, uygulama alanı boyutuyla orantılı olarak artmaktadır. Jeoteknik çalışmalar sırasında alansal büyüklük ise, problemin tanımlanması ile iyileştirme yönteminin sonuçlarının değerlendirilmesi sürecinde, zorluklara ve belirsizliklere neden olmaktadır. Bu doğrultuda, birçok araştırmada, arazi veya laboratuvar deneylerinin sonuçları kullanılarak yapılan değerlendirmelerin arazi ölçümleriyle ilişkisi ele alınmakta ve değerlendirmelerde kullanılan parametre ile yöntemler için alternatifler üzerine çalışmalar yürütülmektedir.

Artan gerilme koşullarına bağlı konsolidasyon oturması, jeoteknik çalışmalarda her zaman için değerlendirmeye alınan bir konudur. Bu oturmayı kontrol eden parametreler ise, yük artış miktarı, zemin katmanının kalınlığı, sıkıştırılabilirlik ve geçirimsizlik özellikleri olarak sıralanabilir. Parametrelerde değişikliğe neden olan, sonuçları proje kriterlerinin karşılanmasını sağlayan uygulanabilir müdahaleler ise, zemin iyileştirme yöntemi olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada, dolgu yükü altında konsolidasyonun sınırlandırılmasına yönelik, konsolide olabilir zeminin ortamdaki uzaklaştırılmasını en aza indirecek, böylelikle proje maliyetlerini önemli

ölçüde düşürecek bir iyileştirme yöntemi geliştirilmiştir. Yöntemde, gerekli ölçüde zemin katmanının ortamdaki uzaklaştırılması ve yerli yerinde bırakılan zemin katmanında proje kriterleri içerisinde belirlenen düzeyde bir oturma sağlanması hedeflenmektedir.

Sabiha Gökçen Havalimanı ilave pist ve yardımcı alanlarının, 44.27 m yüksekliğe varan mühendislik dolgusu yapılarak inşa edildiği saha, çalışma alanı olarak seçilmiştir. Mühendislik dolgusu oluşturulan alanda, genel olarak kil boyu malzemeden oluşan, yapay dolgu ve Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı kil üyesi yayılım göstermektedir. Bu birimlerin yayılımı ve jeoteknik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, 190 adet zemin araştırma sondajı ile 214 adet araştırma çukuru verisi değerlendirilmiştir. Birimlerin, fiziksel, mekanik ve geçirimsizlik özelliklerinin yanında, 60 farklı lokasyonda, 49 farklı derinlikten alınan örnekler üzerinde yapılan 131 adet ödometre deneyi kullanılarak, konsolidasyon davranışını kontrol eden özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Birçok araştırmada değinildiği üzere, arazi deneylerine ait sonuçlarla yapılan değerlendirmeler, laboratuvar deneyi sonuçlarıyla yapılanlara göre daha doğru sonuçlar ortaya çıkartmaktadır. Bu doğrultuda, çalışma kapsamında, Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı kil üyesi üzerinde ön yükleme yapılarak birimin konsolidasyon davranışı, laboratuvar deneyi sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve arazi deneyi sonuçlarının konsolidasyon yüzdesi tahmininde önemli farklılıklar ortaya çıkardığı belirlenmiştir. Çalışmada, ayrıca, dolgu yükü ve hareketli yüklerin, konsolidasyon davranışı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Çalışma alanı olarak seçilen proje sahası 4,130,188 m<sup>2</sup>'dir. Bu denli büyük bir proje sahasında, mevcut bilgisayar yazılımlarıyla alanın tümünün gerekli hassasiyetle modellenmesi mümkün değildir. Bu nedenle, analizler için gerekli verinin elde edilmesinin yanında, analizlerden elde edilen sonuçların alansal bazda çıktılarının oluşturulabileceği bir yöntem olan, alansal değerlendirme yöntemi çalışma kapsamında sunulmuştur. Analiz sonuçlarının, çalışma alanındaki yayılımı ise bu yöntemle göre oluşturulan hesap noktaları ve haritalarla değerlendirilmiştir. İyileştirme yapılmaması durumunda, Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi kil düzeylerinde en büyük oturma miktarı 0.57 m, yapay dolguda ise 2.45 m'dir. Bu durumda, Orhanlı üyesi kil düzeyleri, %95 konsolidasyon oranına 4 yılda ulaşacaktır. Çalışma kapsamında geliştirilen iyileştirme yöntemiyle yapılan hesaplamalarda, yapay dolguda limit konsolidasyon oturması miktarı 0.016 m olarak seçilmiş ve ortalama 2.21 m yüksekliğinde kazı yapılması gerektiği hesaplanmıştır. İyileştirme sonrası için, Orhanlı kil üyesi ve yapay dolgu birlikte değerlendirildiğinde, en büyük toplam konsolidasyon oturması miktarı 0.5 m hesaplanmış ve proje imalat süreci içerisinde %95 konsolidasyon oranına ulaşılacağı belirlenmiştir. İyileştirme yöntemiyle belirlenen kazılar sonrasında yapılan mühendislik dolgusu nedeniyle gerçekleşen oturma miktarları, oturma kolonu ve oturma plakası ölçümleriyle denetlenmiştir. Arazi ölçümleri ve hesaplanan oturma miktarları arasında iyi düzeyde ilişki belirlenmiştir. Bu sonuç önerilen yöntemin, konsolidasyon oturmasını istenilen düzeyde sınırlandırmakta başarılı olduğunu göstermektedir. Çalışma kapsamında sunulan iyileştirme yönteminin uygulanmasıyla, yapay dolgunun %100'ünün alandan uzaklaştırılmasını öneren avan proje çalışmalarının aksine, yapay dolgu hacminin %41'lik bir bölümü alandan uzaklaştırılarak, proje maliyetinde önemli düzeyde tasarruf sağlanmıştır.

Aralık 2020, 242 sayfa.

**Anahtar kelimeler:** Konsolidasyon, zemin iyileştirme, kil, dolgu, havalimanı.

## **SUMARY**

### **Ph.D. THESIS**

#### **LIMITATION OF THE CONSOLIDATION ON SOIL UNDER THE EMBANKMENT LOAD**

**İbrahim KUŞKU**

**Istanbul University – Cerrahpaşa  
Institute of Graduate Studies  
Department of Geological Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Süleyman DALGIÇ**

Soil improvement studies encountered as an increasing need day by day. In these studies, due to the influence of applied project loads, deficiencies in bearing capacity and settlement are the two important soil behaviors that frequently come to the fore. Especially in large-scale projects, the amount and duration of settlement exceeding the project criteria is a soil behavior, which can significantly affect applicability and construction time that needs to be improved. As a result of geotechnical investigations, the selection of the improvement method on the ground that does not meet the required project criteria also depends on the cost differences between the alternatives, regarding safety and applicability. Moreover, the cost differences between alternative approaches increase in proportion to the dimensions of the application field. The size of the area during geotechnical studies, causes difficulties and uncertainties in the process of defining the problem and evaluating the results of the improvement method. Accordingly, in many studies, the relationship between the evaluations made by using the results of the field and laboratory tests and the field measurements, and studies are carried out on the parameters and alternatives for the methods used in the assessments.

Consolidation settlement due to increasing stress conditions is an issue that is always considered in geotechnical assessments. The parameters controlling these settlements are the amount of load increase, thickness of soil layers, compressibility and permeability properties. Applicable actions that cause changes in the parameters and those results ensure that the project criteria are met can be defined as the soil improvement method. In this study, an improvement method has been developed to minimize the removal of the compressible soil from the project area to limit

the consolidation rate under embankment load, which significantly decrease the project costs. In the method, it has been aimed to remove the soil layer from the area to the necessary extent and to ensure the settlement at the limit determined within the project criteria in the remained soil.

Engineering embankment with a height of 44.27 m was selected as the study area in Sabiha Gökçen Airport additional runway and auxiliary fields. Below the embankment area artificial fill and Orhanlı member of Sultanbeyli formation exist both mostly composed of clay-sized particles. In order to identify the distribution and geotechnical characteristics of these units, data obtained from 190 boreholes and 214 trial pits were evaluated. In addition to the investigated physical, mechanical and permeability properties of these units, the properties controlling the consolidation behavior were investigated in detail using 131 oedometer tests utilized on samples taken from 60 different locations and 49 different depths.

As mentioned in many studies, evaluations depending on the data obtained from field tests reveal more accurate results than the evaluations considering laboratory test data. In this context, the consolidation behavior of the Orhanlı member of the Sultanbeyli Formation was compared with the results of the laboratory tests by preloading on this unit, and it was determined that the field test results revealed significant differences in the consolidation ratio estimation. In this study, moreover, the effect of the embankment load and dynamic loads on the consolidation behavior was assessed.

The study area is 4,130,188 m<sup>2</sup>. In such a large area, it is not possible to model and analyze all the area with the necessary precision with the existing computer softwares. Therefore, besides obtaining the necessary data for the analyzes, the field evaluation method, which can generate areal based outputs is presented within this study. The distribution of the analysis results for the study area was assessed by the calculation points and maps generated utilizing this method. In case of the lack of any improvement studies, the largest consolidation settlement amount for the clay levels of Sultanbeyli Formation Orhanlı clay member is 0.57 m, and consolidation settlement on the artificial filling is 2.45 m. In this case, the Orhanlı member reaches 95% consolidation rate in 4 years. In the calculations made by the improvement method developed within the scope of the study, the limit of consolidation settlement in the artificial fill was chosen as 0.016 m and it was calculated that an average excavation height of 2.21 m was required. After the soil improvement, the highest total consolidation settlement was calculated as 0.5 m and 95% consolidation rate would be achieved during the project manufacturing process when Orhanlı clay member and artificial fill were evaluated together. The amount of settlement due to the embankment generated after the excavations defined by reinforcement method was verified with settlement column and settlement plate measurements. A good correlation was obtained between field measurements and calculated settlement degrees. This high correlation shows that the proposed method is successful in hindering the consolidation settlements at desired levels. By the application of proposed improvement technique in this study, instead of removing 100% of the artificial fill from the embankment area as suggested by the preliminary design stage, only 41% of the artificial fill was removed which made a significant decrease in the project costs.

December 2020, 242 pages.

**Keywords:** Consolidation, soil improvement, clay, embankment, airport.

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda, irili ufaklı birçok proje, artan bir oranla, zemin iyileştirmesi sonrası uygulamaya geçebilmektedir. Bu kapsamda, yapıların projelendirilmesini, inşa edilecekleri zemin yapısından bağımsız tasarlamak ve/veya bu konuda gereken özenin gösterilmemesi, öngörülen proje güvenliğini, maliyetlerini ve süresini ciddi oranda etkilemektedir. Günümüzde proje güvenliğinin yanı sıra, uygulama maliyetlerinin de düşürülmesi adına, zeminlerin mühendislik özelliklerinin, istenilen bir işlevi yerine getirmek için değiştirilmesi, yeni bir fikir değildir. Bu gün sıklıkla kullanılan sıkıştırma, drenaj ve katkı kullanımı, Mezopotamya'nın eski dönemlerinde, Antik Mısır'da, Çin uygarlıklarında M.Ö. 3000 yıllarında, Roma yollarında M.S. 600 yıllarında ve Mısır'da dolgu barajlarda 1900 yıllarında uygulanmıştır (ASCE, 1978).

Burland ve diğ. (1976) proje için gerekli zemin davranışını tanımlamanın, davranışta etkili eksiklikleri belirlemenin ve bu eksikliklerin giderilmesi için uygun müdahaleyi tasarlayarak uygulamanın, temel zemin iyileştirme aşamaları olduğunu belirtmiştir (Nicholson, 2014). Eksikliklerin giderilmesi ve uygun müdahalenin belirlenmesinde, tipik mühendislik hedefleri; kesme mukavemetini arttırmak, şişme, konsolidasyon, sıvılaşma gibi istenmeyen sonuçları azaltmak, geçirgenliği değiştirmek, sıvı hareketlerini kontrol etmek ve zaman ile maliyette tasarruf sağlamak şeklinde sıralanabilmektedir.

Proje yüklerinin zemine aktarılmasıyla birlikte, öncelikle, zeminlerin en önemli iki özelliğinin, proje ölçütleriyle uyumlu davranış sergilemesi gerekmektedir. Bunlardan ilki taşıma gücü, ikincisi ise ani oturma ve konsolidasyon özelliğidir. Oluşturulan projelerin, zeminin yük altındaki konsolidasyon davranışıyla uyumlu kriterlere sahip olabilmesi, projenin yük aktaracağı zeminin konsolidasyon özelliklerinin uygun bir şekilde ortaya konulmasıyla doğrudan ilişkilidir. Buna paralel olarak, projelerin, zeminin konsolidasyonu ile ortaya çıkan düşey yer değiştirmelere getireceği sınırlamalar, gerekli iyileştirme yöntemlerine ve tekniklerine sınırlamalar getirmektedir. Sonuç olarak, yapılan bütünsel değerlendirmelerle elde edilen alternatifler; projenin terkedilmesi, projenin yeniden tasarlanması, mevcut zeminin kazılarak değiştirilmesi veya mevcut zemin iyileştirme teknikleri kullanılması seçeneklerinden biri olacaktır. Konsolidasyon etkilerini azaltmak veya en aza indirmek için çeşitli türlerde

iyileştirme planları bulunmaktadır. Bunlar, derin sıkıştırma, ön yükleme ve drenaj, çakıl (taş) kolonlar veya diğer zemin "sıkıştırma" teknikleri olarak kabul edilebilir. Son yıllarda, konsolidasyon sürecinin kontrol edilmesine yönelik yapılan deneysel ve uygulama çalışmalarına, fiziksel tekniklerle birlikte kullanılan kimyasal katkıları ve elektroozmotik kimyasal süreçler eklenmiştir (Chien ve diğ., 2010; Peng ve diğ., 2015; Wu ve diğ., 2015).

Taşıma gücüne yönelik Prandtl (1920), Reissner (1924) ve Ohde (1938) çalışmaları günümüzde kullanılan denklemleriyle ilk kez Terzaghi (1943) ve sonrasında Meyerhof (1948) tarafından ortaya konulmuştur (Meyerhof, 1951). Suya doygun zeminlerde konsolidasyon miktarının belirlenmesine yönelik eşitlik ise ilk kez Terzaghi (1925) tarafından önerilmiş, içerdığı parametreler bakımından birçok araştırmacı tarafından günümüze kadar çalışıla gelmiştir. Terzaghi konsolidasyon teorisi, içerdığı bazı kabuller ve gerçeğe yakın sonuçlar sağlamasıyla halen geçerliliğini korumaktadır (Germaine ve Germaine, 2009).

Konsolidasyon sürecini başlatan zemin kesitindeki gerilme değişimi, proje yüklerinin zemine aktarıldığı geometriyle doğrudan ilişkilidir. Uniform yükler altında zemin kesitindeki gerilme değişimi ve etki derinliği Das (2008) tarafından, uygulanan yükün geometrisi, sınırları ve bu sınırlara olan uzaklığı içeren parametrelerle tanımlanmıştır. Bu noktadan hareketle, geniş alanlar kaplayan dolgu yükleri, büyük çoğunlukla düşey yönde tüm zemin kesitinde gerilme değişimine neden olmaktadır.

### 1.1. AMAÇ

Konsolidasyon kontrolüne yönelik hemen hemen tüm zemin iyileştirme çalışmaları, iyileştirilmesi gerekli olan zemin kesitinin, ya teknik olarak müdahale edilebilir kesiminde, ya da tümünde yürütölmektedir. Oysaki; konsolidasyon açısından proje kriterlerini gözeterek, yalnızca gerekli olan derinlikte çalışmaları yürötmek, diğör zemin kesiminde ise konsolidasyona izin vermek, özellikle büyük ölçekli projelerde ekonomik açıdan tasarruf sağlayabilecektir. Ancak; bu tip projelerde, konsolide olabilir tabaka kalınlığının ve gerilme değişimine neden olacak yüklerin alansal değişkenliği göz önüne alındığında, mevcut yaklaşımlarla üç boyutlu bir değerlendirme yapmak mümkün olamamaktadır.

Tez çalışması kapsamında, Terzaghi (1925) teorisinden başlayarak konsolidasyon miktarının belirlenmesine yönelik çalışmalarda ortaya konulan teoriler değerlendirilerek, proje kriterleri

için izin verilebilir konsolidasyon miktarını ve/veya konsolidasyon zamanını karşılayacak, iyileştirilmesi gerekli olan zemin kalınlığının tespitine yönelik yöntem ve eşitliklerin ortaya konulması amaçlanmaktadır. Böylelikle, elde edilecek yaklaşım kullanılarak, özellikle büyük ölçekli projelerde, iyileştirilme gerektiren zemin kütlesi sınırlandırarak, iyileştirme projesinin çevreye etkileri ve iktisadi açıdan kazançlar sağlanması amaçlanmaktadır.

## 1.2. KAPSAM

Günümüze kadar yapılmış olan çalışmalarda, konsolidasyonun miktarı ile süresini belirleme ve bu özelliklerin kontrolü ve iyileştirilmesine yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. İyileştirme çalışmaları kapsamında, müdahale etmeye gerek olmayacak zemin kütlesinin alansal tespitine yönelik doğrudan bir çalışma bulunmamaktadır. Tez kapsamında elde edilen sonuçlar, bu yönde bir yenilik getirmiş olacaktır. Aynı zamanda, çalışma kapsamında, yöntem ve eşitlik geliştirilmesinde kullanılacak yerinde kontrol yöntemleri ve bu yöntemlerin çıktılarıyla, hesaplanan ve gerçekleşen konsolidasyon süreçleri arasında ilişkiler tartışılmıştır.

Hedeflenen çalışmaların yapılabilmesi amacıyla, Sabiha Gökçen Havalimanı ilave pist ve pist yardımcı alanları, çalışma sahası olarak seçilmiştir. Sabiha Gökçen Havalimanında hâlihazırda 1 adet pist ve yardımcı alanları bulunmaktadır. Mevcut havalimanı yapılarına ek olarak 2. Pist, yardımcı pist, taksi yolları, apron ve de-icing (buz çözme) alanları ile bu alanların ICAO kriterlerine göre zorunlu, yardımcı alanları oluşturulacaktır. Çalışma alanı yaklaşık 4,130,000 m<sup>2</sup>'dir ve topoğrafik kotlar, 35.90 m ile 119.49 m arasında değişmektedir. Proje kotlarının sağlanması amacıyla, inceleme alanının yaklaşık 2,800,000 m<sup>2</sup>'lik kesimi; tasarım gereği, 44.27 m yüksekliğe varan, kontrollü kaya dolguyla doldurulacaktır. Çalışma alanında üstten alta doğru, yapay dolgu, alüvyon, Sultanbeyli formasyonu Orhanlı üyesi, Yayalar formasyonu Gözdağ üyesi, Aydos formasyonu ve Kurtköy formasyonu Süreyyapaşa üyesi olmak üzere 6 farklı birim bulunmaktadır. Yapımı planlanan mühendislik dolgusu, tüm bu birimler üzerinde imal edilecektir.

Tez çalışması kapsamında, öncelikle, çalışma sahası ve konsolidasyon teorisiyle ilgili önceki çalışmalar olmak üzere, iki farklı yönde, literatür çalışmaları yapılmıştır. Çalışma alanındaki önceki çalışmalar kapsamında, DHMİ tarafından yaptırılan, yaklaşık 102 adet zemin araştırma sondajı, 83 adet araştırma çukuru verisi ve örnekleri bulunmaktadır. Literatür çalışmalarıyla eş

zamanlı olarak arazi çalışmaları gerçekleştirilmiş ve çalışma sahasında bulunan jeolojik birimlerin yayılımı sondaj verileri de kullanılarak, üç boyutlu sistemde ayrıntılı olarak ortaya konulmuş ve örnekleme yapılmıştır.

Alanda yayılım gösteren birimlerde tez kapsamında değerlendirmeye alınan, farklı derinlik ve litolojileri temsil eden, laboratuvar deneyleri kapsamında; yaklaşık 500 adet indeks ve mekanik deney, arazi deneyleri kapsamında; 100 adet presiyometre deneyi ve 1500'ü aşkın standart penetrasyon deneyi bulunmaktadır. Laboratuvar verilerinin yanı sıra, arazide deformasyon kontrollü yükleme deneyleri yapılarak, birimlerin konsolidasyon özelliklerinin arazide belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Büro, arazi ve laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen verilerin sayısallaştırılması ve yönetiminde, büyük veri setlerinin, düşey boyutu da içeren koordinatlı bir şekilde, kontrolünü sağlamak üzere, Excel, AutoCAD Civil 3D, ArcGIS yazılımları kullanılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen konsolidasyon özellikleri ve öngörülen düşey hareketler, 82 farklı noktada oluşturulan oturma kolonları ve 362 farklı noktada oluşturulan oturma plakasına ait ölçümlerle kontrol edilmiştir. Çalışma sonucunda; hedeflenen konsolidasyon miktarını ve/veya konsolidasyon zamanını karşılayacak, iyileştirilmesi gerekli olan zemin kalınlığının tespitine yönelik, yöntem ve eşitlikler ortaya konulmuştur. Bu eşitlikler kullanılarak öngörülen parametreler ile yerinde ölçümler sonucu elde edilen parametreler karşılaştırılmış ve geliştirilen yöntemin performansı değerlendirilmiştir.



## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

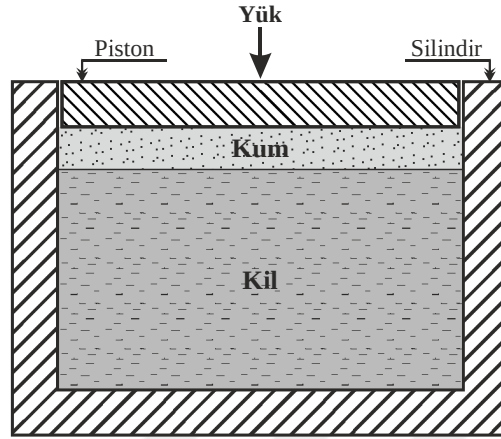
Önceki çalışmalar, araştırma konusuyla ve araştırma alanıyla ilgili çalışmalar olmak üzere iki kısımda sunulmuştur. Araştırma konusuyla ilgili çalışmalar, konsolidasyon teorisine ait kabullerin değerlendirilmesi temelinde, su hareketinin sıkışabilirliğe etkisi, yükleme koşullarının birim şekil değiştirme üzerinde etkisi ve yük altında oturma hesapları olarak tanımlanabilecek üç ana başlık altında toplanmaktadır. Yapılan bu çalışmaların birçoğu, yaklaşımlarının tutarlılığını, konsolidasyon sürecine etkisini tanımladıkları teorilerine dayanan hesaplarını, saha ölçümleriyle karşılaştırarak ortaya koymaktadır. Araştırma alanı ile ilgili çalışmalar ise alanın genel jeolojik özelliklerini ortaya koyan araştırmalar ve çalışmada örnek oluşturacak proje özelinde yapılan araştırmalar, olmak üzere iki başlık altında sunulmuştur.

#### 2.1.1. Araştırma Konusu ile İlgili Çalışmalar

Kil tabakaları üzerinde oluşturulan dolgular ve yapılar sonrası, oluşan büyük oturma miktarı 1900'lü yılların başında açıklanamamıştır. Örneğin; demiryolu inşaatlarında, setlerin ve bentlerin, etrafındaki herhangi bir zemin boşalmadan oturduğunun tespitine karşın, genellikle İskandinav ülkelerinde, kil birimlerden, basınç artışıyla su çıkışının mümkün olmadığına ve görülen bu oturmaların akma olayından kaynaklandığına inanılmaktadır (Flodin ve Broms, 1981).

1918'de İsveçli bir topograf olan Åke Virgin, oluşturduğu ölçüm noktalarının kotlarını kontrol ederken, özellikle yumuşak kilin çok kalın olduğu yerlerde, bazı bölgelerin önemli ölçüde oturduğunu belirlemiştir. Bu oturmaların, su içeriğinin azalmasından ve kil parçacıklarının birbirine yaklaşmasından kaynaklandığını ve oturma oranının zamanla azaldığını ileri sürmüştür. Virgin tarafından yapılan gözlemler, İsveç Geoteknik Komisyonu sekreteri John Olsson'u, Şekil 2.1'de gösterilen bir çeşit oedometreye benzer basit laboratuvar konsolidasyon cihazı kurmaya yönlendirmiştir (Flodin ve Broms, 1981). Olsson, yüklendiğinde yumuşak kil numunesinden suyun çıkışıyla hacminin azaldığını bulmuş olup bu aynı zamanda Terzaghi'nin

1923 – 1924’te konsolidasyon teorisiyle sonuçlanan, çalışmalarına başladığı zamandır (Flodin ve Broms, 1981).



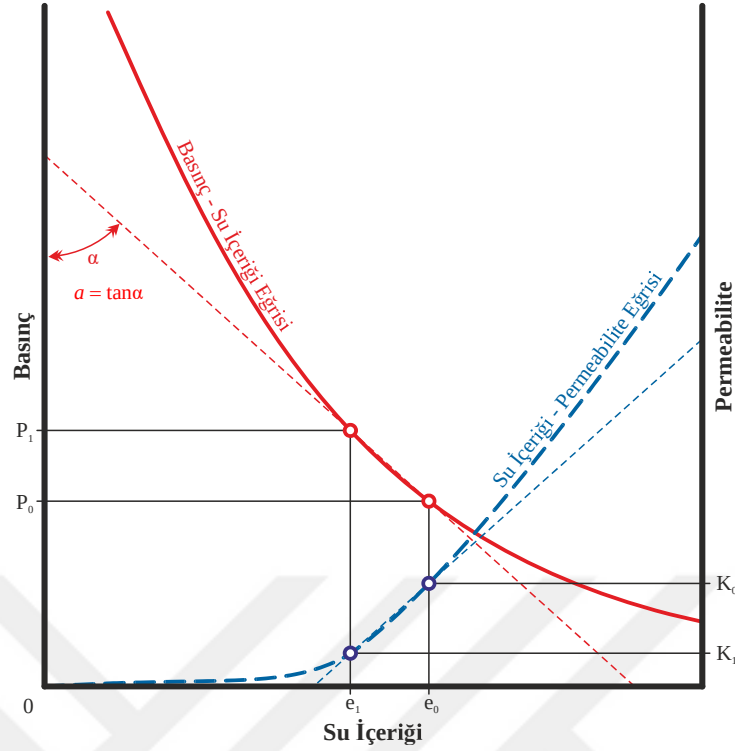
**Şekil 2.1:** 1919'da İsveç Geoteknik Komisyonu'ndan John Olsson tarafından üretilen konsolidasyon cihazı (Flodin ve Broms, 1981).

İsveç'teki konsolidasyon olgusunun yumuşak kille bağıntılı olarak keşfi, aynı teorinin farklı zamanlarda ve farklı koşullar altında nasıl ortaya çıkabileceğinin ve dünyanın geri kalanında bilinmediğinin bir örneğidir. Öyle ki; Skempton (1960) “Terzaghi'nin Efektif Gerilmeyi Keşfi” adlı makalesinde, konsolidasyon sürecinden ilk haberdar olan mühendisin 1809’da Telford gibi görüldüğünü belirtmiştir. Telford, Birleşik Krallık’ta bulunan Kaledonya Kanalı’nın inşaatı sırasında, kanal kapaklarının temel alanında bulunan 17 m kalınlığındaki kil katmanında konsolidasyon oluşturmak ve suyun bu katmandan dışarı atılabilmesini sağlamak amacıyla, bu kapakların inşası öncesinde, temel alanlarında öncelikle dolgu oluşturmuş ve 9 ay boyunca beklemiştir (Skempton, 1960). 18. yüzyılın sonlarında; Lyell (1871), yük altında kilin sıkışmasına ve katılaşmasına, kilden sıkışarak çıkan suyun neden olduğunu, Smith (1892) Şikago kilinde inşa edilen yapılarda yavaş ilerleyen oturmaların, yeryüzünden su çekilmesinden kaynaklandığını belirtmiştir. Shankland (1897) ise Smith’in bu görüşünü benimseyerek Şikago’daki Mason Tapınağı’nın 4.5 yıllık bir dönemini içeren, zaman – oturma eğrilerini yayınlamış, 19. Yüzyılın başında ise Sorby (1908) yüklemeden dolayı kil katmanlarındaki hacim değişimini nicel olarak değerlendirmiştir.

Konsolidasyon oturması miktarının belirlenmesine yönelik, ilk deneysel kanıtlama süreci muhtemelen 1910 yılında Frontard (1914) tarafından yürütülmüştür (Flodin ve Broms, 1981). Frontard (1914) çalışmasında, 50 mm yüksekliğinde ve 350 mm çapında bir numuneyi, pürüzlü bir tabana sahip metal bir kaptan oluşan cihaz içinde, piston aracılığı ile arttırılan yüklerle

araştırmıştır. Bu çalışmada kullanılan deney sistemi, 19. yüzyıl başlarında Olsson tarafından geliştirilen sistem ile benzerlik göstermektedir (Flodin ve Broms, 1981). Çalışma sonucunda, su içeriği – basınç grafikleri oluşturulmuştur. Frontard (1914); deneylerinde, konsolidasyon tamamlanma süreci için, zamanın önemli bir faktör olduğunu ve bu süreç için en az 5 gün gerektiğini belirtmiştir.

Zeminlerde suyun hareketinin ve bu harekete bağlı zemin danelerindeki yer değiştirmenin bir sonucu oluşan konsolidasyon kavramı, ilk kez diferansiyel denklemlerle Terzaghi (1925) tarafından tanımlanmıştır. Terzaghi (1925) çalışmasında; suya doymuş zeminlerde danelerin sıkışmasını ihmal ederek, daneler arasındaki boşluklarda bulunan suyun zemine uygulanan düşey gerilmeyi taşıdığı ve böylece fazla boşluk suyu basıncının oluştuğuna karar vermiştir. Bununla birlikte; zemin tabakalarının geçirimsizliklerinin farklı olması sebebiyle, oluşan bu fazla boşluk suyu basınçlarının sönmeleri de farklı süreler alacağından, bölgeden bölgeye farklılık gösteren fazla boşluk suyu basıncının yaratacağı hidrolik yük farkı, yüksek basınçtan alçak basınç tarafına doğru bir su akışı meydana getirmektedir. Bu akışın sonucunda zamanla sistemden çıkacak su hacminin boşluk hacminde bir azalmaya ve bu azalmanın da oturmaya neden olduğunu belirtmiştir. Terzaghi (1925) ortaya koyduğu bu yaklaşımla, zeminlerde suyun hareketi ve hızını tanımlayan Darcy (1856) yasasının geçerli olduğunu kabul ederek, konsolidasyon oturması miktarının; zemin örneğinde basınç artışıyla birlikte su içeriği azalmasına bağlı elde edilen ve Şekil 2.2’de verilen basınç – su içeriği eğrisinin eğimi olarak tanımladığı sıkışma modülüne ve zemin geçirimsizliğini tanımlayan geçirgenlik katsayısına bağlı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca çalışmada; konsolidasyon oturması miktarının, yalnızca kilin üst yüzeyindeki yük artışlarıyla gerçekleşmeyebileceği, bu oturma miktarının, hidrodinamik yük değişimleriyle gerçekleşebileceğini, sedimentolojik süreçler ve buharlaşmaya bağlı gözlemlerle ortaya koyarak, yine kendisi tarafından bugünkü anlamıyla 1936 yılında sunulan, zeminlerde efektif gerilme kavramını, hidrodinamik basınç kavramıyla ilişkili olarak farklı bir yönden tanımlamıştır.



Şekil 2.2: Kıl örneği için test eğrileri (Terzaghi, 1925).

Terzaghi (1925) çalışmasında, rijit bir silindir içinde sınırlandırılmış suya doygun kıl örneğin üst yüzeyinde  $P_0$  basıncı durumunda,  $e_0$  ile tanımlanan su içeriğinin ve  $K_0$  ile tanımlanan geçirgenlik katsayısının, bu basıncın artırılmasıyla ( $P_1$ ); su içeriğinde, boşluk oranında ve geçirgenlik katsayısında değişikliklere neden olmak zorunda olduğu belirtilmiştir. Ancak; bu işlemin, artan sıkışma ve kılcal su hareketini içerdiğinden, oldukça yavaş gerçekleştiği, her aşamada hidrodinamik gerilmelerin dağılımının kılcal su hareketini sağlayacak hidrolik eğimi sağlaması gerektiği, bu durumun teorisinin hareket noktasını oluşturduğu belirtilmiştir.

Çalışmada; kıl katmanı alt yüzeyinden “z” yüksekliğinde ve “dt” birim zaman değişiminde, “p” basıncının artışı “dp” ise; katı iskelet içindeki “p” basıncının ve aynı noktadaki “w” hidrostatik basıncının toplamı “ $P_1$ ”e eşit olması gerektiği belirtilmiştir (Şekil 2.3). Bununla birlikte, farklar türünden,  $dp = -dw$  eşitliğini vermek mümkündür. Bu eşitliğin, Şekil 2.2’de verilen basınç – su içeriği eğrisinin “a” eğimiyle birlikte değerlendirilmesi sonucu  $de = -a \cdot dp = a \cdot dw$  ilişkisi oluşturulmuştur. Terzaghi (1925), kıl örneğin alt yüzeyden “z” yüksekliğinde yatay birim kesit alanından, birim zamanda drene olan su miktarını  $Q = k \cdot s$  eşitliğiyle tanımlamıştır. Burada; “k” geçirgenlik katsayısı olup, “s” ise  $-dw/dz$  ile tanımlanan hidrolik gradyandır. Ancak, “w” hidrolik basıncı da zamanla değişir, yani; su “z” kotundan “z + dz” kotuna, “dt” zaman aralığında akarken, “p” kıl basıncı, “-dw” ye eşit olan “dp” ile artar ve basıncın bu değişimi,

su içeriğinin yukarıda verilen  $de = -a \cdot dp$  ilişkisine göre değişimini içerir. Dolayısıyla “Q” miktarı “z” kotundan “z + dz” seviyesine yükselir. Bu yaklaşım sonucu Terzaghi (1925) tarafından;

$$\frac{dQ}{dz} = -\frac{de}{dt} = a \frac{dp}{dt} = -a \frac{dw}{dt} \quad (2.1)$$

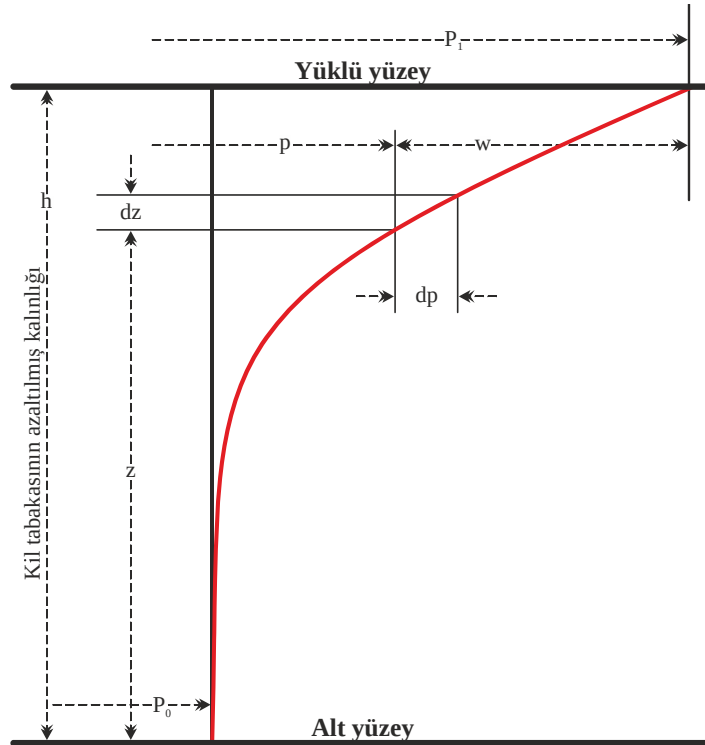
şeklinde tanımlanan diferansiyel denklem sunulmuştur. Ayrıca; Denklem (2.1) de, daha önceden;

$$Q = -k \cdot s = -k \cdot \frac{dw}{dz} \quad (2.2)$$

eşitliğiyle elde edilen “Q” değeri kullanılarak;

$$-\frac{k}{a} \frac{d^2 w}{dz^2} = \frac{dw}{dt} \quad (2.3)$$

diferansiyel denklemiyle kildeki hidrodinamik stresin dağılımı tanımlanmıştır. Terzaghi (1925) tarafından yapılan bu çalışma ve geliştirilen diferansiyel denklemlerle, laboratuvar testleri kullanılarak, konsolidasyon oranının hesaplanması ilk defa mümkün olmuştur.



**Şekil 2.3:** Kil örneği içinde basınç dağılımı (Terzaghi, 1925).

Terzaghi (1925)'nin çalışmasında; ortaya konulan ilişkinin, farklı killeri üzerinde de geçerliliğinin kabul edilebilir olması için önemli sınırlandırmalar yapılmıştır. Özellikle, suyun hareketine neden olan yük artışının düşük seviyede olması gerekliliği ve deney düzeneğinin yanal yer değiştirmelere müsaade etmeyecek şekilde düzenlendiği belirtilmiştir. Ancak, teoremin geçerliliği, yük artışlarının düşük seviyede olması gerekliliği ile sınırlandırılmış olması nedeniyle, büyük yük artışlarında, su içeriği değişimi; basınç – su içeriği eğrisinin değişken eğimi ile tanımlanamamakta ve konsolidasyon oranı hesaplanamamaktadır. Ayrıca; teori bu yapıyla, jeolojik geçmişinde, mevcut jeolojik yükten daha büyük bir yüke maruz kalmış aşırı konsolide kil birimlerde, konsolidasyon miktarının tespitine yönelik çözüm getirememektedir.

Konsolidasyon teorisi üzerinde yaptığı çalışmaları ilerleyen dönemde geliştirerek sunan Terzaghi (1943); zeminin boşlukları tamamen suyla doludur, zemin hem su hem de katı bileşenleri mükemmel bir şekilde sıkıştırılmaz, Darcy (1856) yasası kesinlikle geçerlidir ve geçirgenlik katsayısı sabittir kabulleriyle, sıkışma katsayısı, hacimsel sıkışma katsayısı ile konsolidasyon katsayısı tanımlarını ortaya koyarak, konsolidasyon oturmasının miktarı ile konsolidasyon yüzdesi ve zamanına yönelik günümüzde de kullanımı süren denklemleri geliştirmiştir. Terzaghi (1943) çalışmasında, başlangıç efektif gerilme değerinin ( $\bar{p}_0$ ), son efektif gerilme değerine ( $\bar{p}$ ) yükselmesinin başlangıç boşluk oranı değerini ( $e_0$ ), son boşluk oranı değerine ( $e$ ) düşürdüğünü;

$$a_v = \frac{e_0 - e}{\bar{p} - \bar{p}_0} \quad (2.4)$$

denklemleri ile boşluk oranları değişiminin efektif gerilme değişimine oranı olarak tanımladığı sıkışma katsayısının ( $a_v$ ), teori kapsamında  $\bar{p}_0$  ve  $\bar{p}$  gerilmeleri arasında sabit olduğu varsayımının yapıldığını belirtmiştir. Denklem (2.4)'te  $e_0 - e$  ilk hacmi,  $1+e_0$  olan zemin bloğunda boşluk hacmindeki azalmayı temsil eder. Bu noktadan hareketle, araştırmacı tarafından, boşluk hacmi değişimi ( $\Delta n$ ), zemin birim hacmine düşen boşluk hacimleri farkı olarak yazmış ve

$$\Delta n = n_0 - n_1 = \frac{e_0}{1 + e_0} - \frac{e}{1 + e_0} = \frac{a_v}{1 + e_0} (\bar{p} - \bar{p}_0) = \frac{a_v}{1 + e_0} \Delta \bar{p} = m_v \Delta \bar{p} \quad (2.5)$$

denklemleri oluşturulmuştur. Ayrıca, oluşturulan bu denklemde,  $\Delta \bar{p}$  birim efektif basınç artışı iken,

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad (2.6)$$

eşitliğiyle  $m_v$  hacimsel sıkışma katsayısı tanımlanmıştır.

Terzaghi (1943) çalışmasında, Denklem (2.4), Denklem (2.5) ve Denklem (2.6)'nın, basınç değişiminin olduğu zeminin yanal olarak hareket edemediği durumda, bir kil üzerindeki etkin efektif basınç ile karşılık gelen boşluk oranı arasındaki ilişkinin kaba bir yaklaşımını temsil ettiğini belirtmiştir. Bu nedenle, bu denklemlere dayanan teoriler, sadece kil biriminde oluşacak yanal deformasyonunun, dikey yönde gerilme ile karşılaştırıldığında küçük olduğu durumlarda uygulanabilir. Gerçek uygulamada, farklı yatay düzeyler üzerindeki gerilme dağılımı hiçbir zaman kusursuz bir şekilde aynı değildir, ancak birçok durumda ortaya çıkan hata göz ardı edilebilir (Terzaghi, 1943).

Terzaghi (1943) konsolidasyon sürecini, Şekil 2.4'te verilen, geçirimsiz bir taban ile yüksek geçirimsizliğe sahip kum tabakası arasında bulunan kil tabakasından oluşan bir kesit yardımıyla açıklamıştır. Kesitte, su tablası kil yüzeyinin üzerinde bir yüksekliğe yerleştirilmiştir. Araştırmanın başında, kilin hidrolik bir denge durumunda olduğu varsayılmaktadır. Bu varsayım üzerine; su, kilin içindeki herhangi bir yatay kesitin herhangi bir noktasından, kil yüzeyinin üzerinde bir yükseklikte su tablasına kadar olan piezometrik tüp (I) içinde yükselecektir. Karşılık gelen nötr gerilme,

$$u_w = \gamma_w (H + h_0 - z) \quad (2.7)$$

denklemleri elde edilmekte ve  $H + h_0 - z$ , Şekil 2.4'te  $mn$  seviyesi ile su tablası arasındaki dikey mesafeye eşit olan piezometrik basınç yüksekliğini temsil etmektedir. Şekil 2.4'te  $mn$  üzerindeki normal gerilme  $p_0$ ,  $mn$  birim alanı üzerine yerleştirilen kil, kum ve suyun ağırlığına eşit olup, efektif normal gerilme ise Denklem (2.8) ile tanımlanmıştır.

$$\bar{p}_0 = p_0 - u_w \quad (2.8)$$





temsil eder. Konsolidasyon basıncı uygulandığı anda kil içinde herhangi bir yatay düzeyde fazla hidrostatik basınç  $p_1$  'e eşittir. Sonuç olarak su, piezometrik tüpte (I) su tablasının üstünde,

$$h_1 = \frac{p_1}{\gamma_w} \quad (2.9)$$

seviyesine yükselir (Terzaghi, 1943). Zaman geçtikçe, aşırı hidrostatik basınç ve piezometrik tüpteki su seviyesi düşer. Konsolidasyon süreci içerisinde herhangi bir  $t$  zamanında, aşırı hidrostatik basınç  $u$  'ya eşitse; su, piezometrik tüpte su tablasının üstünde,

$$h = \frac{u}{\gamma_w} \quad (2.10)$$

yükseklğinde durur. Konsolidasyon süreci sonunda, aşırı hidrostatik basınç sıfıra eşit olur ve piezometrik tüp içindeki su seviyesi yeraltı suyu seviyesine ulaşır. Bununla birlikte; herhangi bir zamanda, aşırı hidrostatik basınç ile efektif normal basınç artışının toplamı Denklem (2.11) 'de verildiği şekilde  $p_1$  'e eşittir.

$$u + \bar{p} - \bar{p}_0 = p_1 \rightarrow u = p_1 - \bar{p} + \bar{p}_0 \quad (2.11)$$

Çalışmada, birim zamanda aşırı hidrostatik basıncın düşmesi ise,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} \quad (2.12)$$

diferansiyel denklemiyle açıklanmaktadır. Efektif normal basıncın zaman birimi başına  $\partial \bar{p} / \partial t$  ile artırılması, kilin  $n$  boşluk hacminde karşılık gelen bir azalmayı içerir. Bu noktadan hareketle; Terzaghi (1943),  $\bar{p}$  ve  $n$  arasındaki ilişkinin Denklem (2.5) ile belirlenmiş olması ve suyun kil içerisinde hareketini kontrol eden hidrolik eğim ile permeabilite katsayısı kavramlarını birlikte değerlendirerek, yatay kil tabakasında konsolidasyon sürecini tanımlayan

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w m_v} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.13)$$

diferansiyel denklemi önermiştir. Denklem (2.14)'te verilen  $c_v$  ise konsolidasyon katsayısı olarak tanımlamıştır.

$$\frac{k}{\gamma_w m_v} = c_v \quad (2.14)$$

Terzaghi (1943) çalışmasında, konsolidasyon sürecinde zaman kavramını termodinamik yasalarla ilişkilendirerek, **Şekil 2.4**'te verildiği şekilde tanımlanan ve  $p_1$  yükü uygulandığı  $t = 0$  anıyla başlayan,  $t = \infty$  anına kadar süren bu süreçte, herhangi bir  $t$  zamanında aşırı hidrostatik basıncın belirlenmesi için Denklem (2.13)'ü Fourier serileri vasıtasıyla çözerek,

$$u = \frac{4}{\pi} p_1 \sum_{N=0}^{\infty} \frac{1}{2N+1} \sin \left[ \frac{(2N+1)\pi z}{2H} \right] e^{-(2N+1)^2 \pi^2 2T_v/4} \quad (2.15)$$

denklemini ortaya koymuştur. Denklem (2.15) içerisinde zaman faktörü olarak adlandırdığı  $T_v$  'nin,

$$T_v = \frac{c_v}{H^2} t = \frac{k}{\gamma_w m_v} \frac{t}{H^2} \quad (2.16)$$

denklemiyle bağımsız bir değişkeni temsil ettiğini belirtmiştir. Denklem (2.15) ve Denklem (2.16)'da, sıkışabilir tabaka kalınlığı olarak tanımlanan  $H$  'ın, kilin alt ve üst olmak üzere her iki yüzeyinden drenajın mümkün olduğu durumlarda, sıkışabilir tabaka kalınlığının yarısı olarak alınması gerektiğini açıklamıştır.

Terzaghi (1943)'ye göre, konsolidasyon sürecinin herhangi bir anında oturma miktarı; Denklem (2.17)'de gösterildiği şekliyle, nihai konsolidasyon oturması miktarının, zaman faktörünün fonksiyonuyla çarpımı sonucu elde edilebilir. Nihai oturma miktarı ise; konsolidasyon basıncının derinlikle değişmediği durumda Denklem (2.18), değiştiği durumda ise Denklem (2.19)'la hesaplanır. Denklem (2.19)'da,  $p_1$  ; kil tabakasının üst düzeyinde,  $p_2$  ise alt düzeyinde etkin efektif konsolidasyon basıncını temsil etmektedir.

$$\rho = \rho_1 f(T_v) = \rho_1 \frac{U\%}{100} \quad (2.17)$$

$$\rho_1 = H m_v p_1 \quad (2.18)$$

$$\rho_1 = H m_v \frac{p_1 + p_2}{2} \quad (2.19)$$

Ayrıca, Denklem (2.20) ile tanımlanan konsolidasyon derecesi, sadece suyun hareketini kontrol eden sınır şartlarına ve bu şartlara bağlı Denklem (2.21) ile hesaplanabilen zaman faktörüne bağlıdır.

$$U\% = 100 \frac{\rho}{\rho_1} = 100 f(T_v) \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} U\% \leq 52.6 &\rightarrow T_v = (\pi / 4)(U\% / 100)^2 \\ U\% > 52.6 &\rightarrow T_v = 1.781 - 0.933 \log_{10}(100 - U\%) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Terzaghi (1943), konsolidasyon basıncının kademeli oluşturulması durumunda; herhangi bir  $t$  zamanı için konsolidasyon derecesinin belirlenmesine yönelik eşitlikleri geliştirmiş ve pratikte toplam konsolidasyon basıncının oluşturulma süresinin yarısının, Denklem (2.16) ve Denklem (2.21) ile hesaplanan toplam konsolidasyon süresine eklenmesiyle nihai sonuca ulaşılabilirliğini belirtmiştir.

Ayrıca; kilin gaz içeriğinin konsolidasyon oranına etkisini tanımlayan Terzaghi (1943), kilin geçirgenlik katsayısının; boşlukların kayda değer bir yüzdesini gaz işgal etmediği sürece, pratik olarak, gaz içeriğinden de bağımsız olduğu ve bu nedenle gaz basıncının konsolidasyon derecesi üzerinde çok az etkisi olduğu sonucuna varmıştır. Nihai konsolidasyon derecesine yaklaşma oranının gaz içeriğinden bağımsız olduğunu belirtmiştir.

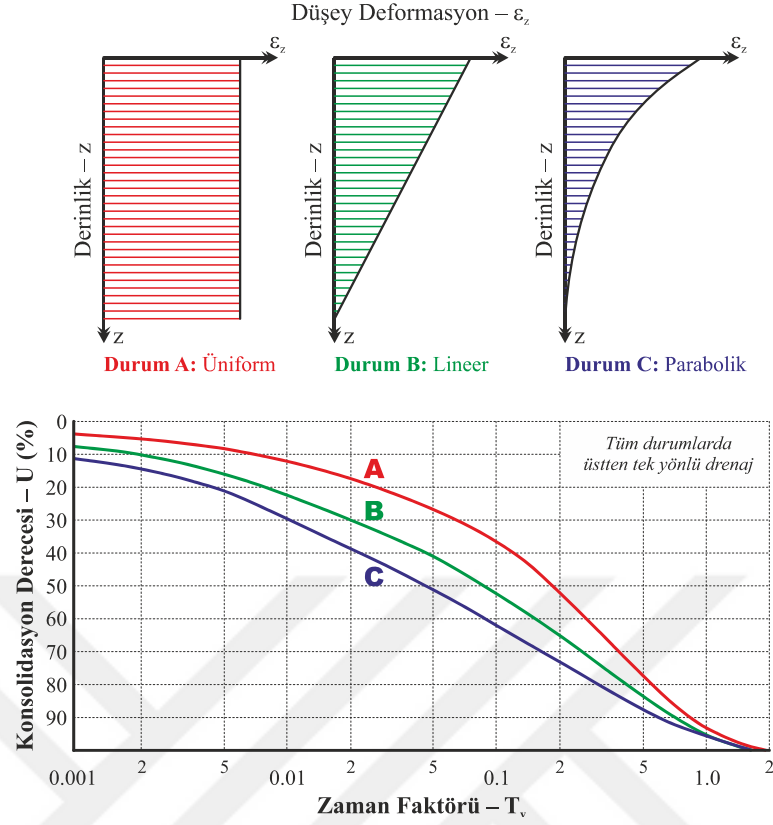
Yukarıda verilen geleneksel konsolidasyon teorisi (Terzaghi, 1943, 1925; Terzaghi ve Fröhlich, 1936) jeoteknik mühendisliğinde en yaygın olarak kullanılan teorilerden biridir. Konsolidasyonun temel fiziksel sürecini içerdiğinden, oldukça basit laboratuvar testlerinde ölçülebilir özellikleri kullanır ve sadece elle kolaylıkla yapılabilecek hesaplamaları içerir. Geleneksel konsolidasyon teorisi, jeoteknik mühendisliği uygulamalarında geniş uygulama alanı bulmuştur. İlk geliştirilmesinden 95 yıl sonra bile, hemen hemen her pratik jeoteknik mühendisi tarafından kullanılır. Teorinin sunulduğu çalışmalarda, tüm kabuller ve hesaba katılmayan parametreler açıklanmış durumdadır. Duncan (1993)'a göre, bu teorinin kullanımından elde edilecek sonuçların doğruluğu, teorinin dayandığı üç basitleştirici varsayımla sınırlıdır.

İlk olarak, geleneksel teoride  $C_v$ , tüm konsolidasyon sürecinde sabit kabul edilmektedir. Ancak; efektif gerilme ön konsolidasyon basıncına ulaştığında,  $C_v$  değeri büyük ölçüde azalır. Bu

basınç değerinden sonra ise normal konsolide killerde artma eğiliminde olabilir. Duncan (1993)'a göre, bu etkilerin bir sonucu olarak,  $C_v$  değeri aslında, katmandaki derinlik ve konsolidasyon sırasında zamana bağlı olarak değişmektedir. Konsolidasyon katsayısındaki bu değişim, geleneksel konsolidasyon teorisi kabulü kullanılarak hesaplanan oturma oranlarından farklı değerlere ulaşılmasıyla sonuçlanabilir.

Geleneksel konsolidasyon teorisi, zemin iskeletinin gerilme – birim şekil değiştirme davranışının doğrusal ve elastik olduğunu varsayar. Duncan (1993)'a göre, aslında gerçek zeminlerin sıkıştırılabilirliği ne doğrusal ne de elastiktir. Doğrusal elastik davranış, gerilme değişikliği ile gerilme değişikliği arasındaki orantılılığı ifade eder. Bununla birlikte çoğu kil için, deformasyonlar efektif gerilmelerle orantılı veya yaklaşık orantılı olarak artar. Aynı zamanda, efektif gerilmeler ön konsolidasyon basıncını aştığı için sıkıştırılabilirlik hızla artar. Diğer bir farklılık ise, normal konsolide killerin, efektif gerilme azalması durumunda, artması için olduğundan daha sert olmaları nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Gerçekte killerin davranışı ile geleneksel konsolidasyon teorisinde varsayılan basit gerilme – birim şekil değiştirme ilişkisi arasındaki bu farklılıklar, bazı durumlarda konsolidasyon davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Duncan (1993)'a göre üçüncü ve son basitleştirici varsayım ise geleneksel konsolidasyon teorisinin pratik problemlere uygulandığı zamanların çoğunda, Şekil 2.5'te gösterilen A durumu olan konsolidasyon derecesi – zaman faktörü arasındaki ilişkinin hesaplamalar için temel olarak kullanılmasıdır. Durum A, konsolidasyon sırasında ortaya çıkan deformasyonların, tabaka içindeki her derinlikte aynı olduğu, üniform duruma karşılık gelir. Terzaghi ve Fröhlich (1936) ve Janbu (1965), konsolidasyon sürecinde deformasyonların üniform olmadığına konsolidasyon derecelerinin farklı olduğunu ortaya koymuştur (Şekil 2.5). Drenajın yalnızca katmanın üst yüzünden gerçekleştiği durumda, Şekil 2.5'teki konsolidasyon derecesi - zaman faktörü grafiğinde B ve C eğrilerinden görüleceği üzere; deformasyonun derinlikle parabolik azaldığı durumdaki konsolidasyon süreci, lineer azaldığı durumdan daha hızlıdır.



**Şekil 2.5:** Konsolidasyon oranında birim şekil değıştirmenin etkisi (Terzaghi ve Fröhlich, 1936; Janbu, 1965; Duncan, 1993).

Çoğu pratik durumda, konsolidasyon sürecinde meydana gelen deformasyonlar derinlikle değışmez değildir. Deformasyonlar genellikle derinlikle azalır. Çünkü, yüzey yüklerinin neden olduğu gerilme artışı ve/veya kil sıkıştırılabilirliği derinlikle azalır. Deformasyonların üniform olmadığı durumlarda, konsolidasyon derecesini tahmin etmek için Şekil 2.5'te verilen zaman eğrisi A'nın kullanılması prensipte uygun değildir, ancak kullanımı yaygın bir uygulamadır.

Deformasyonların derinlikte tek tip olduğu varsayımı, Terzaghi ve Fröhlich (1936) ile Janbu (1965)'nin çalışmalarında gösterildiği gibi geleneksel konsolidasyon teorisinin doğal bir kısıtlaması değildir. Bununla birlikte, teori pratikte kullanıldığında, Şekil 2.5'teki B veya C eğrisi daha uygun olsa da, oturma miktarını tahmin etmek için hemen hemen her zaman A eğrisi kullanılır. Bu sadeleştirmenin, oturma miktarına ait sonuçlar üzerindeki etkisi, derinlikle değışken bir şekilde etkin konsolidasyon basıncı durumunun değerdendirmeye alınmasıyla azaltılabilmesine karşın, özellikle anizotropik permeabilite nedeniyle, herhangi bir  $t$  zamanındaki konsolidasyon derecesi tahmininde olumsuz sonuçlara neden olmaktadır.

Araştırmacılar tarafından, konsolidasyon olayının gerçekleşebileceği her türlü koşul için, yerinde ölçümler ile tutarlı teori geliştirilme çabası, geleneksel teorisinin içerdiği kabullerin sistem gerçeklerine göre modellenmesi, sınırlamaların ise teorideki revizyonlar veya farklı yöntem arayışlarıyla aşılması yönünde olmuştur. Bu anlamda, konsolidasyon olgusu üzerindeki çalışmalar genel olarak üç ana başlık altında toplanmaktadır. Bunlardan ilki, konsolidasyon süreci için olmazsa olmaz suyun durumu ve hareketidir. İkinci öne çıkan başlık ise, basınç – birim şekil değiştirme ilişkisiyken, bir diğer başlık ise ilk iki konunun birbirine olan etkisinin ve sonuçta amaçlanan oturma miktarı ve süresine yönelik farklı veya revize analiz modelinin geliştirilmesidir.

Terzaghi (1925) tarafından, laboratuvar testleri kullanılarak, konsolidasyon oranının hesaplanmasını sağlayan ilk çalışmayı takiben, yine bu çalışmada sunduğu teorisinin kullanılabilirlik sınırı olarak belirttiği, suyun hareketine neden olan basınç değişiminin düşük seviyelerde olması gerektiği sınırlamasını aşabilmek ve etkilerini ortaya koyabilmek adına, ödometre deneylerinden elde edilen sonuçlarda basınç – birim şekil değiştirme durumlarının değerlendirilmesi konusunda ilk çalışma yapılmıştır. Bu çalışmayı takiben, yine aynı çalışmada (Terzaghi, 1925) açıkça teorisinin bir kabulü olarak ortaya koyduğu, permeabilitenin tüm zemin kesitinde aynı ve değişmez olduğu kabulüne yönelik olumsuzlukların giderilmesi amacıyla, anizotropik permeabiliteyi değerlendiren, çalışmalar yapılmıştır. Tarihsel süreç içerisinde, yukarıda açıklanan üç ana başlık altında yapılan çalışmalar, farklı bakış açılarıyla, farklı görüşler ve konunun çözümüne yönelik farklı modellemelerle tarihsel olarak birbirine girift bir şekilde devam etmektedir. Bu anlamda, geleneksel konsolidasyon teorisini takiben yapılan ve suyun hareketi, basınç – birim şekil değiştirme ile modelleme çalışmaları olarak gruplandırabileceğimiz, tez konusuyla ilgili önceki çalışmalar, alt başlıklarda sunulmuştur.

#### **2.1.1.1. Su Hareketinin Sıkıştırılabilirliğe Etkisi**

Geleneksel tek boyutlu konsolidasyon teorisinde permeabilite, tüm zemin kesitinde aynı değerde ve konsolidasyon süreci boyunca değişmez kabul edilmektedir. Ayrıca, suyun hareketi sıkıştırılabilir tabakanın üst ve/veya alt yüzü olmak üzere tek doğrultuda hareket ettiği varsayılır. İlk kez Biot (1941), anizotropik modelle konsolidasyon sürecini tanımlayan bir dizi denklem önermiştir. Önerdiği denklemlerde, permeabilite anizotropik ancak sabittir ve konsolidasyon süreci boyunca değişmez kabul edilmiştir. Yazar, üç boyutlu konsolidasyon

teorisi geliştirmesine karşın, teorisi yalnızca, tanımlanan her boyutta farklı, ancak değişmez durumda permeabilite koşullarını yansıtacak şekilde oluşturulmuştur.

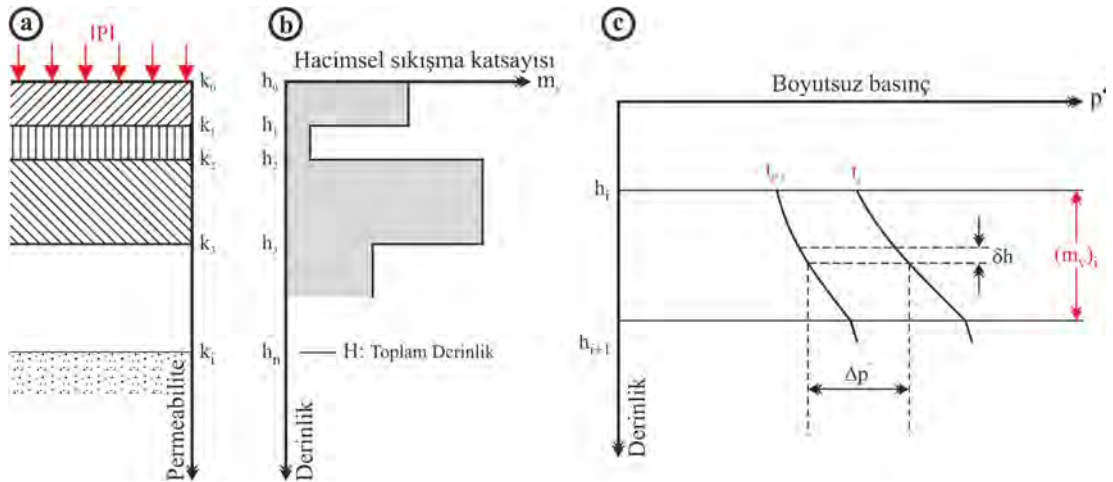
Abbott (1960) zemin kesitini tabakalara bölerek, her tabaka için farklı permeabilite değerlerinin kullanılması imkânını sağlayan, konsolidasyon sürecinde oturma miktarı ve zamanın hesaplanmasına yönelik denklemleri sunmuştur. Çalışmasında, yerinde oturma miktarı ölçümleri bulunan bir örnekle oluşturduğu denklemlerin uyumunu değerlendirmiş, makul bir uyum sağlandığı ancak tabakalar arası permeabilite farkları hesaba katılsa bile, gerçekte oturma miktarlarının tatmin edici bir şekilde hesaplanamadığını belirtmiştir. şekil 2.6’da, çalışma kapsamında sunulan Denklem (2.22), Denklem (2.23), Denklem (2.24) ve Denklem (2.25) değişkenlerini tanımlanmaktadır.

$$\Delta H = c = |P \cdot H| \sum_{i=0}^{i=n-1} \int_{h_i}^{h_{i+1}} \Delta p' m_i dh' \quad (2.22)$$

$$\Delta t_i = \frac{k_i}{m_i} \beta \rightarrow \Delta t = \beta \gamma_w H^2 \quad (2.23)$$

$$\Delta p = \Delta p' |P| \quad (2.24)$$

$$h = h_{i+1} - h_i = h' |H| \quad (2.25)$$



**şekil 2.6:** Çok katmanlı bir zeminde (a) permeabilite, (b) hacimsel sıkışma katsayısı değişimi ve (c) tek katmandaki değişkenler (Abbott (1960)’tan değiştirilerek alınmıştır.).

Normal konsolide kilde permeabilite, boşluk oranı ve poroziteye bağlı olarak Samarasinghe (1982) tarafından,

$$k = C \frac{e^n}{1 + e} \quad (2.26)$$

denklemleri ile tanımlamıştır. Üstel ifade olarak verilen  $n$  kuvveti, tipik olarak 4 – 5 arasındadır ve  $C$  ise zemin özelliklerini gösteren referans permeabilitedir. Taylor (1948) ise  $k$  logaritmasıyla boşluk oranı arasında Denklem (2.27) ile tanımladığı ampirik bir doğrusal ilişkiyi önermiştir.

$$\log k = \log k_0 - \frac{e_0 - e}{C_k} \quad (2.27)$$

Burada  $C_k$  bir geçirgenlik değişim indeksidir ve Tavenas ve diğ. (1983) tarafından

$$C_k = 0.5 \cdot e_0 \quad (2.28)$$

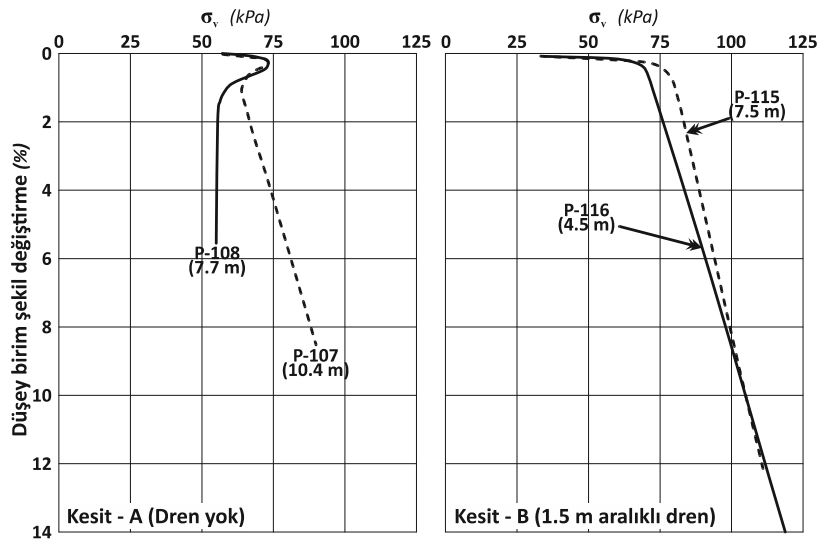
eşitliğinin kullanılabileceği belirtilmiştir. Mesri ve Rokhsar (1974)'ye göre, Taylor (1948) tarafından önerilen denklem (2.27), mühendislikte karşılaşılan boşluk oranı değişimleri için kullanılabilir. Yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, denklemin (2.27) çok geniş bir boşluk oranı aralığı için tutarlı olmayabileceği görülmektedir. Buna paralel olarak, Tavenas ve diğ. (1983) tarafından, farklı deformasyon oranlarında permeabilitenin tespitine yönelik yapılan ödometre deneylerinin sonucuna göre; denklem (2.27)'nin kullanımı, çoğu yumuşak kilin davranışını iyi bir şekilde temsil etmektedir ve gerilme farkının %20'den az olduğu durumlarda çoğu mühendislik problemi için pratik ve uygundur.

Konsolidasyon sürecinde, konsolidasyon basıncı etkisinde bulunan sıkışabilir tabakalardaki permeabilite farklılıkları kadar, bu sürecin tüm aşamalarında, tabakalar içerisindeki suyun hareketi ve beraberinde getirdiği efektif gerilme değişimleri önem kazanmaktadır. Bu doğrultuda; Taylor (1942) konsolidasyon sürecinde ikincil konsolidasyonun dikkate alınması için, Hipotez A ve Hipotez B olarak iki yaklaşımı sunmuş, Ladd ve diğ. (1977) ve Jamiolkowski ve diğ. (1985) birincil konsolidasyon sırasında drenaj boyunun gerilme – deformasyon eğrisine etkisiyle ilgili olarak bu iki yaklaşımın tartışılması gerektiğini ortaya koymuştur. Hipotez A'yı destekleyenler; Mesri ve Choi (1985), Jamiolkowski ve diğ. (1985), Hight ve diğ. (1987) ile Mesri ve Vardhanabhuti (2006), birincil konsolidasyon bittikten sonra kripi davranışının başladığını, drenaj şartları ne olursa olsun tek bir gerilme – deformasyon eğrisi olduğunu savunmaktadır. Hipotez B'yi destekleyenler ise; Leroueil ve diğ. (1986, 1985), Leroueil ve



Kabbaj (1987), Yin ve Graham (1996), Vermeer ve Neher (2019), Kim ve Leroueil (2001), Nash ve Ryde (2001), Degago ve diğ. (2011), Yin ve diğ. (2017, 2011), krip davranışına bir çeşit yapısal viskozitenin neden olduğunu, bu olayın boşluk suyu basıncının sönümlenmesi sırasında meydana geldiğini ve gerilme – deformasyon eğrisinin drenaj şartlarına bağlı olduğunu savunmaktadır. Bu iki hipotez arasında, konsolidasyon aşamasında krip etkisine eleştirisel olarak yaklaşan ve literatürdeki deneysel çalışmaları gözden geçiren Degago ve diğ. (2011), killerde ölçülen zamana bağlı sıkışmasının, Hipotez B ile iyi bir uyum sergilediğini belirtmiştir.

Yükleme sonrası drenaj boyunun etkisi Leroueil (1996) tarafından, 10 m kalınlığında yüksek plastisiteli kil tabakası bulunan alanda yapılan test dolgusu çalışmasıyla izlenmiştir. Çalışmada, dolgu altındaki 4 farklı kesite ölçümler yapılmıştır. A kesitinde dren yoktur, B kesitinde 1.5 m aralıklarla, C ve D kesitlerinde ise 1.0 m aralıklarla dren oluşturularak, farklı drenaj uzunluklarının oluşması sağlanmıştır. Sonuç olarak; drenaj boyunun kısalmasıyla konsolidasyon oranında artışların olduğu, kısa drenaj boyu olan B, C ve D kesitlerinde yüklem sonrası boşluk suyu basınçlarında düşüşün hemen gerçekleşmeye başladığı, drenaj boyunun uzun olduğu A kesitinde ise boşluksuyu basıncının düşmeye başlamadan önce, inşaatı takip eden 15 – 50 gün boyunca arttığı belirlenmiştir. Boşluk suyu basınçlarının yüklem sonrası değişimindeki farklılıktan hareketle, A kesitinde öncelikle efektif gerilmenin azaldığı açıkça görülmektedir (Şekil 2.7). Efektif gerilmedeki bu değişim Crooks ve diğ. (1984) ve Kabbaj ve diğ. (1988)’nin çalışmalarında da gözlenmiştir (Leroueil, 1996).



**Şekil 2.7:** A ve B kesitlerinde yaklaşık gerilme – düşey birim şekil değiştirme eğrileri (Leroueil, 1996).

Efsel Gerilme  $\sigma'_v$  lbf/in<sup>2</sup> (kN/m<sup>2</sup>)

12 (82.73) 14 (96.52) 16 (110.31) 18 (124.10) 20 (137.89)

0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5

Eksenel birim deformasyon (%)

boşluk oranı - gerilme ilişkisiyle hesaplanan

Geçirimli

0.51 m

Geçirimsiz

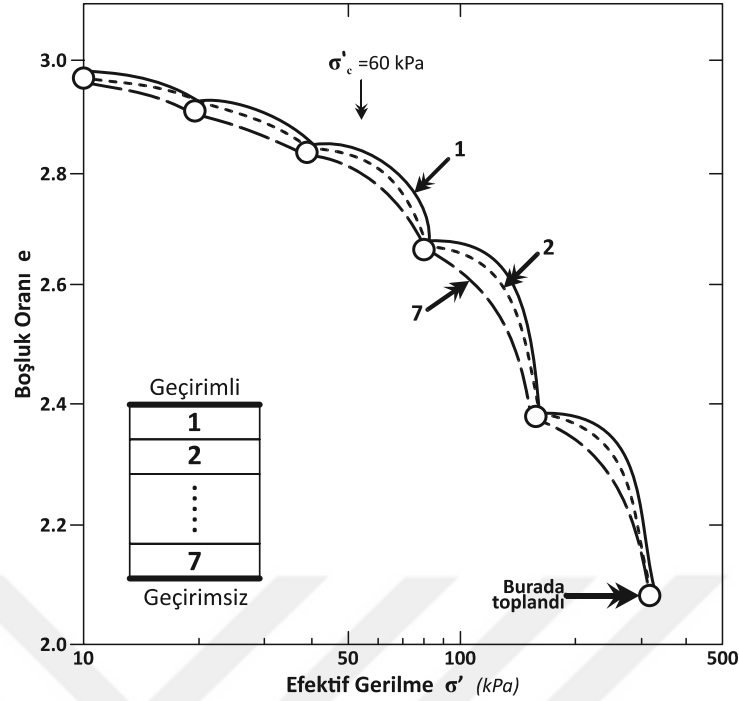
1 ———

2 - - - -

3 . . . .

4 ———

**Şekil 2.8:** Berthierville (Kanada)'dan bir kil örneğinin çeşitli alt katmanlarında gözlenen efektif gerilme – eksenel birim şekil değiştirme ilişkileri (Leroueil ve diğ., 1986).



**Şekil 2.9:** Konsolidasyon sırasında farklı alt numuneler için boşluk oranı ve efektif gerilme arasındaki ilişki (Imai ve Tang, 1992).

Hipotez B kabulüyle araştırmacılar, tek boyutlu gerilme durumunda krip ve konsolidasyonun birleşmesini araştırmak için çok sayıda çalışma yapmıştır. Yin ve diğ. (1994) ilk olarak bir elastik visko – plastik (EVP) modelini konsolidasyon denkleminde dahil etmiş ve beklenen su basıncını başarılı bir şekilde simüle etmiştir. Yin ve Zhu (1999), EVP modelini sonlu eleman programına uygulayarak, Tarsiut Adası'ndaki killi toprakların konsolidasyon analizinde gözenek suyu basınç tepkisi mekanizmasını incelemişlerdir; tek boyutlu gerilme durumunda killerin artan gözenekli su basıncının, krip davranışından kaynaklandığını bulmuşlardır. Benzer bulgu, Stolle ve diğ. (1999) tarafından da tespit edilmiştir. Yuan ve Whittle (2018) ise, fazla boşluk suyu basıncındaki artışın, toplam gerinim oranı ile visko – plastik gerinim oranı arasındaki tutarsızlıktan kaynaklandığını açıklamaktadır.

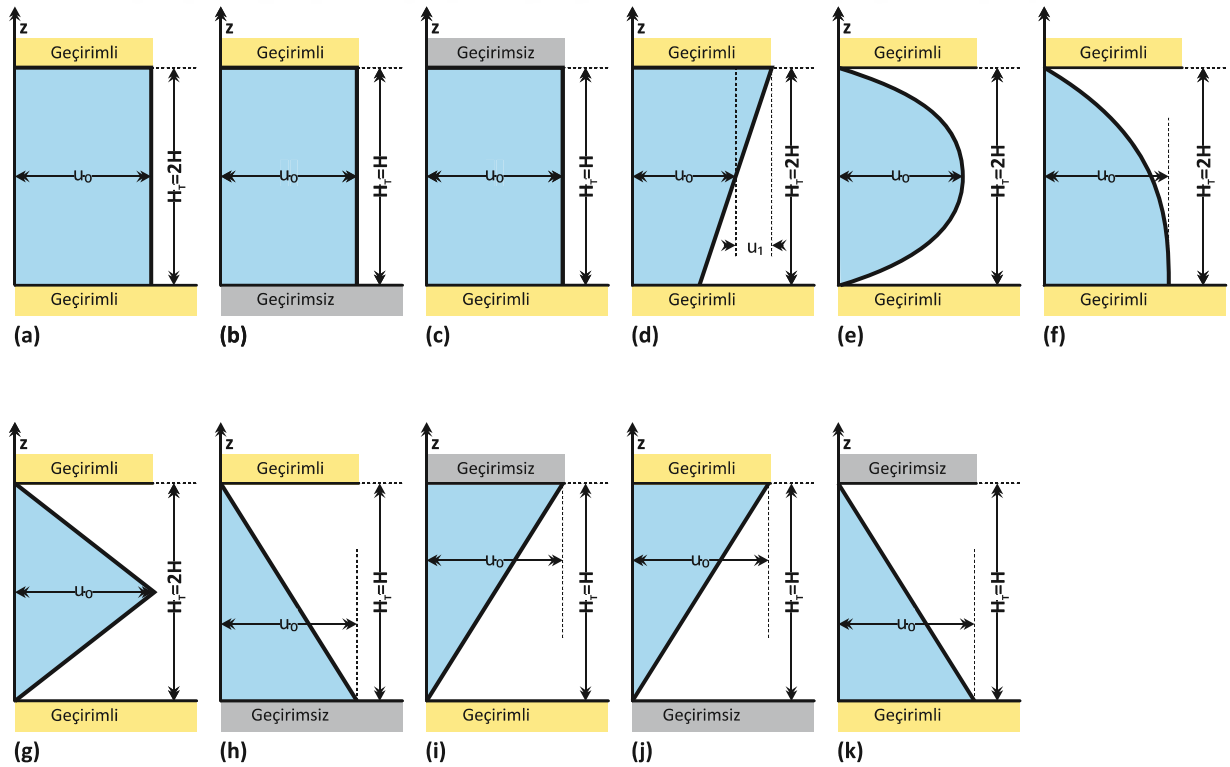
Das (2019), Terzaghi (1943)'nin konsolidasyon sürecini tanımlayan Denklem (2.13)'te verilen diferansiyel denklemini kullanarak, konsolidasyon süreci içerisinde, istenilen zamanda ilave boşlu suyu basıncının belirlenmesi için, herhangi bir derinlikteki ilk ilave boşluk suyu basıncı olan  $u$  değişkeniyle tanımlamıştır. Bu çalışmasıyla araştırmacı, Terzaghi (1943) tarafından önerilen Denklem (2.15)'yi uygulanan yükten bağımsız Denklem (2.29)'deki şekliyle sunmuştur. Bu denklemde, zaman faktörü  $T_v$  Terzaghi (1943) önerdiği şekliyle, Denklem (2.21)

'den hesaplanabilmektedir. Çalışmasında, Şekil 2.10'da verilen  $u$  varyasyonlarını sunan araştırmacı, herhangi bir  $t$  zamanı için, iki yönlü drenaj koşullarında, ortalama konsolidasyon derecesinin belirlenmesinde, derinlikle, sabit veya doğrusal artan suyu basıncı durumunda Denklem (2.30)'un, sinüzoidal değişen durumda ise Denklem (2.31)'in kullanılmasını önermiştir. Araştırmacı ayrıca, Şekil 2.10'da verilen diğer tüm varyasyonlardaki durumlar için ortalama konsolidasyon oranının bu üç denklemin, çeşitli birleşimleri yardımıyla hesaplanabileceğini belirtmiştir.

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{H} \int_0^{2H} u_i \sin \frac{n\pi z}{2H} dz \right) \sin \frac{n\pi z}{2H} \exp \left[ \left( -n^2 \pi^2 T_v \right) / 4 \right] \quad (2.29)$$

$$U_{av} = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{8}{[(2m+1)\pi]^2} \exp \left[ - \left( \frac{2m\pi + \pi}{2} \right)^2 T_v \right] \quad (2.30)$$

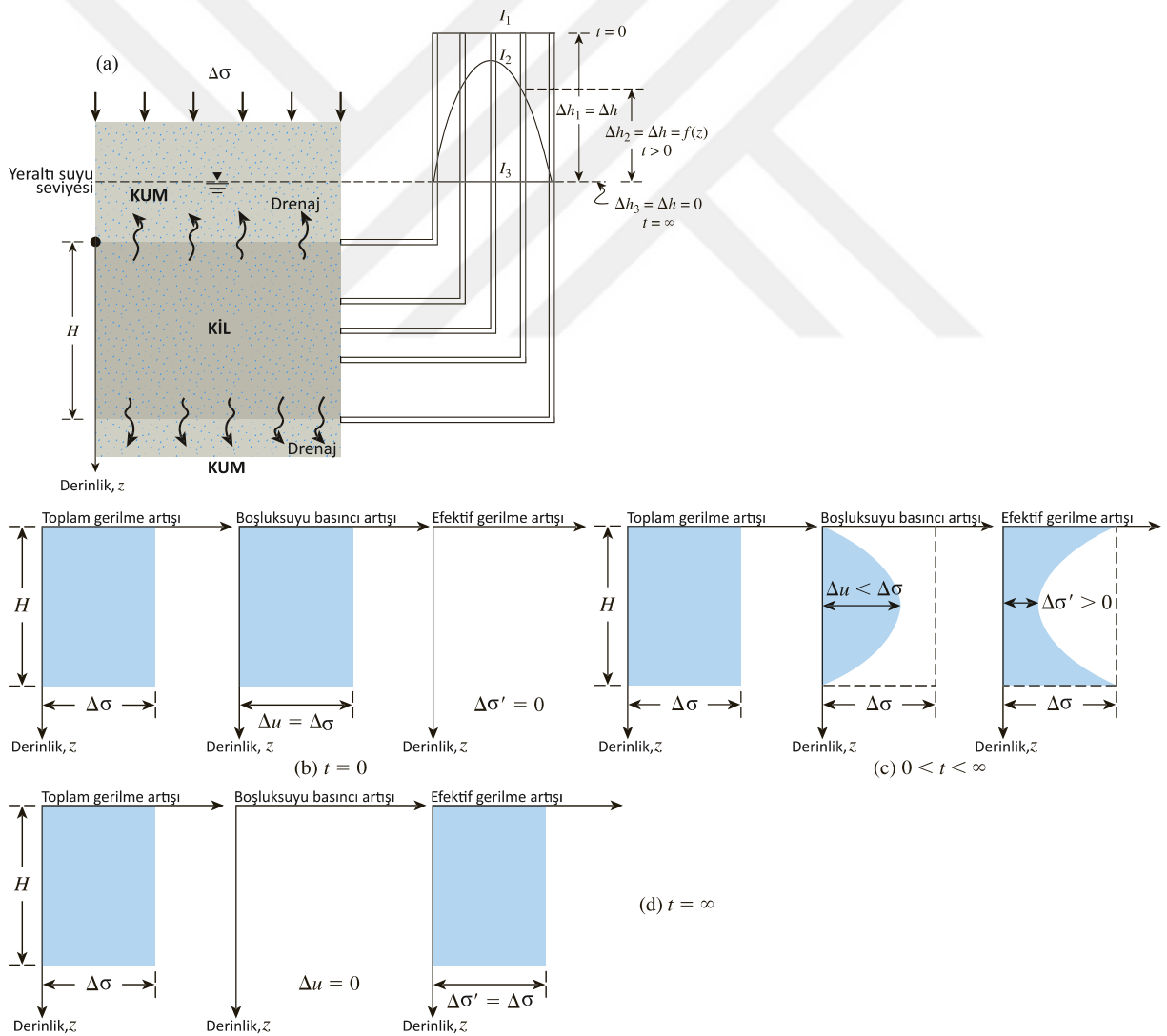
$$U_{av} = 1 - \exp \left[ \frac{-\pi^2 T_v}{4} \right] \quad (2.31)$$



Şekil 2.10: İlave boşluk suyu basıncının derinlikle değişimi (Das, 2019)

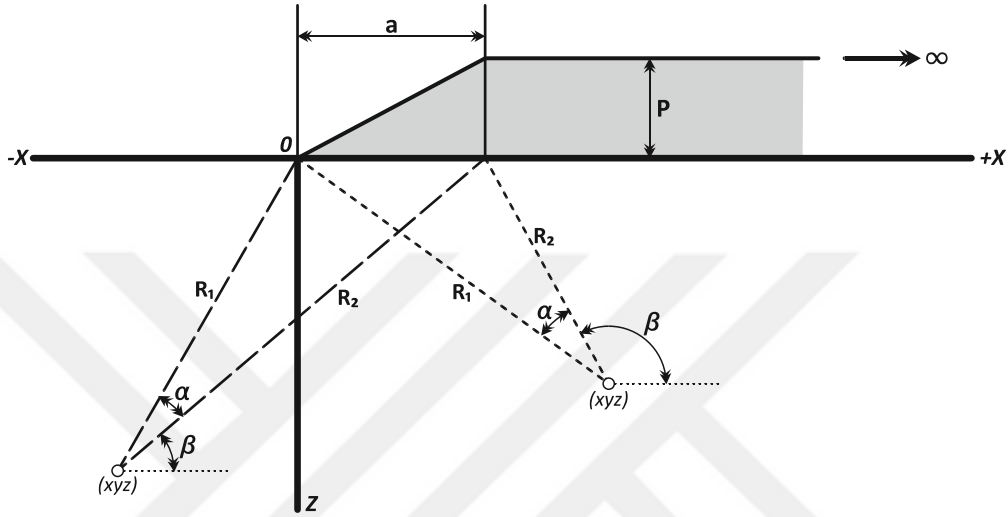
### 2.1.1.2. Yükleme Koşullarının Birim Şekil Değiştirme Üzerinde Etkisi

Doygun bir sıkıştırılabilir kil tabakası, gerilme artışına maruz bırakıldığında, öncelikle elastik yerleşme meydana gelir. Kilin hidrolik iletkenliği kumdakinden önemli ölçüde daha küçük olduğu için, yüklemeyle oluşan aşırı boşluk suyu basıncı uzun bir süre boyunca kademeli olarak dağılır. Böylece, kildeki hacim değişikliği, başka bir deyişle konsolidasyon, elastik yerleşmeden çok sonra devam edebilir ve neden olduğu deformasyon miktarı, elastik deformasyondan birkaç kat daha büyük olabilir (Das ve Sobhan, 2018). Ek bir yük uygulaması altında bu kademeli drenaj işlemi ve fazla boşluk suyu basıncının efektif gerilmeye aktarılması, kil tabakasında zamana bağlı oturmaya neden olur. Konsolidasyon sürecine neden olan bu efektif gerilme değişimi, Das ve Sobhan (2018) tarafından Şekil 2.11’le tariflenmiştir.



**Şekil 2.11:** Toplam gerilme, boşluk suyu basıncı ve ilave bir gerilmenin sonucu olarak, alt ve üstte drene edilen bir kil tabakasındaki efektif gerilme değişimi ( $\Delta\sigma$ ) (Das ve Sobhan, 2018).

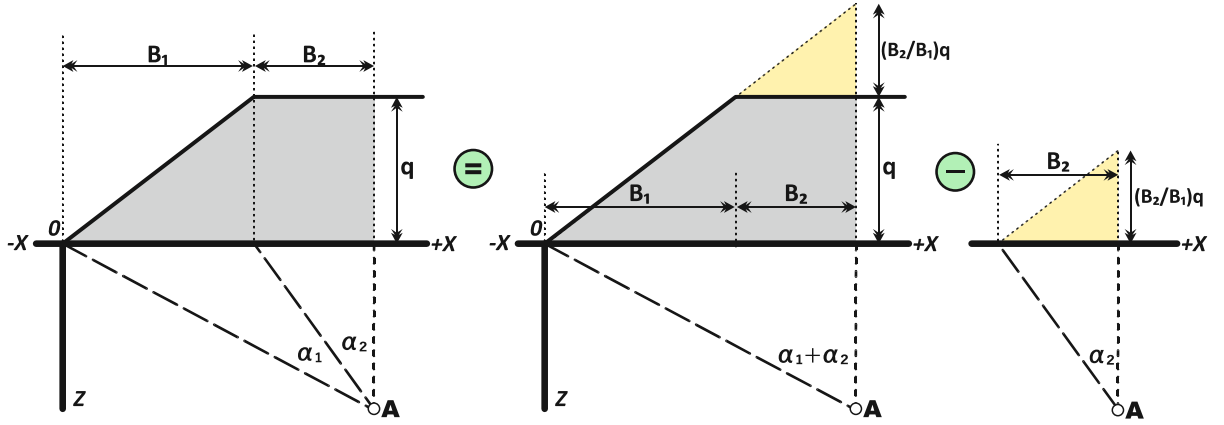
Dolgu yapılacak alanlarda, efektif gerilme değişiminin belirlenmesinde, boşluklardaki suyun hareket mekanizmasının yanı sıra, kil birim içerisindeki gerilme artışının derinlikle değişimi de önem kazanmaktadır. Gray (1936) tarafından, dolgu yükü altında nihai gerilme durumunun, Şekil 2.12’de bileşenleri verilen ve elastisite teorisi temeline dayanan, Denklem (2.32)’la hesaplanabileceği belirtilmiştir.



**Şekil 2.12:** Dolgu yükü altında (xyz) koordinatında gerilme hesabı denklem değişkenleri (Gray, 1936).

$$\sigma_z = \frac{p}{\pi a} [a\beta + x\alpha] \quad (2.32)$$

Bu yaklaşım, Das (2008) ile Das ve Sobhan (2014, 2018) tarafından farklı geometrik yükleme koşulları için düzenlenerek, dolgu yükü sonrası herhangi bir  $A(x, z)$  konumunda meydana gelen gerilme değişiminin hesaplanmasında kullanılmak üzere, Şekil 2.13’te bileşenleri verilen, Denklem (2.33) ve Denklem (2.34) tanımlanmıştır. Denklem (2.33)’ün Osterberg (1957) tarafından tanımlanmış olan etki faktörüyle ( $I$ ) sadeleştirilmesi sonucu oluşturulan Denklem (2.34), yine Osterberg (1957) tarafından hazırlanmış olan ve  $B_1/z$  ile  $B_2/z$  oranlarına bağlı etki faktörü değerlerini gösterir, Şekil 2.14’te verilen, grafiğin kullanılabilir hale getirilmesiyle, pratik uygulamalarda kolaylık sağlanmıştır. Çalışmada, ayrıca  $\alpha_1$  ile  $\alpha_2$  açılarının hesaplanması için Şekil 2.13’te tanımlanan, pratikte saptanması kolay  $B_1$ ,  $B_2$  ve  $z$  uzunluklarının kullanımını sağlayan, Denklem (2.36) ile Denklem (2.37) tanımlanmıştır.



Şekil 2.13: Dolgu yükü altında gerilme değişimi (Das (2008)'den düzenlenerek alınmıştır).

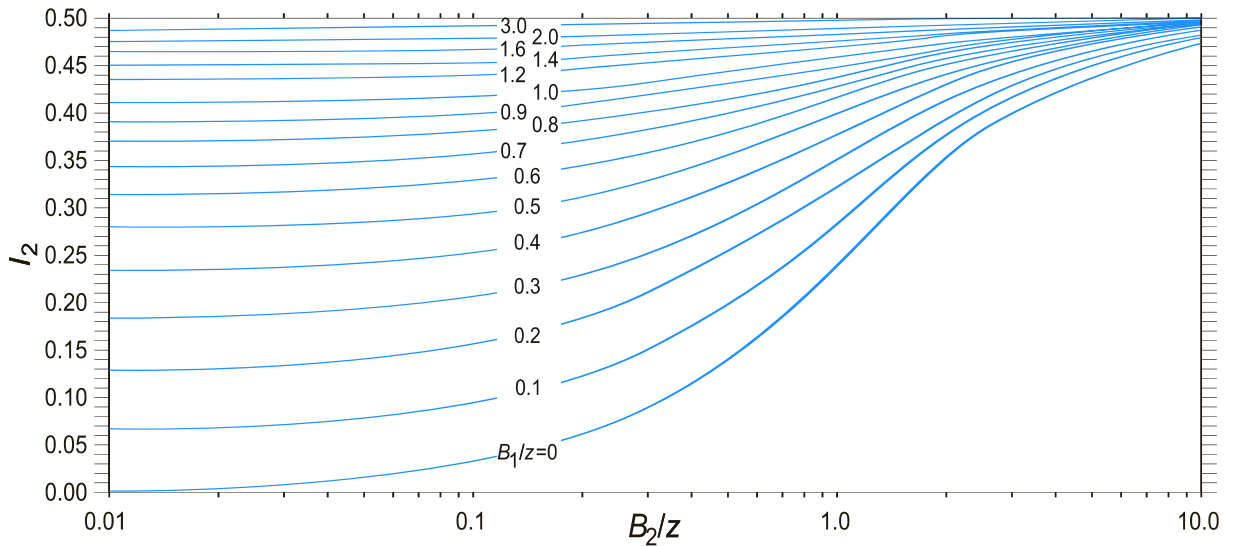
$$\Delta \sigma_z = \frac{q_0}{\pi} \left[ \left( \frac{B_1 + B_2}{B_2} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{B_1}{B_2} (\alpha_2) \right] \quad (2.33)$$

$$\Delta \sigma_z = q_0 I \quad (2.34)$$

$$I = \frac{1}{\pi} \left[ \left( \frac{B_1 + B_2}{B_2} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{B_1}{B_2} (\alpha_2) \right] = \frac{1}{\pi} f \left( \frac{B_2}{z}, \frac{B_1}{z} \right) \quad (2.35)$$

$$\alpha_1 (\text{radyan}) = \tan^{-1} \left( \frac{B_1 + B_2}{z} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{B_1}{z} \right) \quad (2.36)$$

$$\alpha_2 (\text{radyan}) = \tan^{-1} \left( \frac{B_1}{z} \right) \quad (2.37)$$



Şekil 2.14: Dolgu yüklemesi nedeniyle dikey gerilmenin belirlenmesi için Osterberg (1957) etki faktörü grafiği (Das ve Sobhan, 2018).

Uygulamada, dolgu yükleri, anında değil, bir süre içerisinde oluşturulur. Başlangıçta, genellikle kazı nedeniyle net yükte bir azalma gerçekleşir ve bu da kilde şişme meydana gelmesine neden olur, uygulanan yük kazılan toprağın ağırlığını aşana kadar oturma başlamaz. Konsolidasyon basıncının zamana bağlı bu değişimi nedeniyle, Terzaghi'nin tek boyutlu konsolidasyon teorisinin başlangıcından bu yana, inşaat yüklerinden kaynaklanan konsolidasyonla ilgili sorunlarla başa çıkmak için, çeşitli çözümler geliştirilmiştir. Bu kapsamda; özellikle, Terzaghi (1943), Schiffman (1958), Olson (1977, 1998), Sivakugan ve Vigneswaran (1991), Zhu ve Yin (1998), Conte ve Troncone (2006), Hsu ve Lu (2006), Hanna ve diğ. (2013), Sivakugan ve diğ. (2014) gibi araştırmacılar, inşaat yüklerinin zamana bağlı sabit oranlı yüklenmesi durumunda, yarı deneysel yaklaşımlardan, daha karmaşık teorik analizlere kadar çeşitlilik gösteren, yaklaşımlar sunmuşlardır.

Bu yaklaşımların en basiti, anlık zaman – konsolidasyon oranı eğrisini düzeltmek amacıyla, Terzaghi (1943) tarafından önerilen yarı geometrik yöntemdir. Yöntemin, belirlenen genel prosedürün uygulanmasıyla, kil üzerindeki yükün kademeli olarak arttırılması sırasında, konsolidasyon sürecini içeren diğer tüm problemlerin çözümüne de uyarlanabilir olduğu belirtilmiştir. Ayrıca; bu yöntemle göre, dolgunun doğrusal bir zaman – yük ilişkisiyle oluşturulması durumunda, inşaat tamamlandıktan sonraki herhangi bir zamanda, gerçek oturma miktarı, inşaat süresinin yarısı kadar daha az zamana karşı gelen oturma miktarına eşittir.

Olson (1977), Terzaghi (1943)'nin tek boyutlu konsolidasyon teorisini, dikey ve radyal akışın neden olduğu konsolidasyonu kapsayan, kademeli yüklemeyi içerecek şekilde genişletmiştir. Çalışmada denklemler, konsolidasyon basıncını oluşturan dolgu imalatı sırasındaki ve bu imalat sonrasındaki zaman dilimi için iki farklı şekilde tanımlamıştır. Dolgu imalatının tamamlanma süresi ( $t_c$ ) ve bu süreye bağlı belirlenen zaman faktörü ( $T_c$ ) kullanılarak, konsolidasyon süreci içerisinde, herhangi bir zaman ( $t$ ) için aşırı boşluk suyu basıncı ( $u$ ) ve ortalama konsolidasyon derecesinin ( $U_{av}$ ) belirlenmesine yönelik Denklem (2.38), Denklem (2.39), Denklem (2.40) ve Denklem (2.41) sunulmuştur. Sunulan bu denklemlerin bileşenleri Şekil 2.15, Denklem (2.42), Denklem (2.43) ve Denklem (2.44)'de verilmiştir. Çalışmada ayrıca, hesaplamalarda kolaylık sağlayacak şekilde,  $U_{av} - T_v - T_c$  değişimi grafiksel olarak sunulmuştur (Şekil 2.15.c).



$T_v \leq T_c$  için;

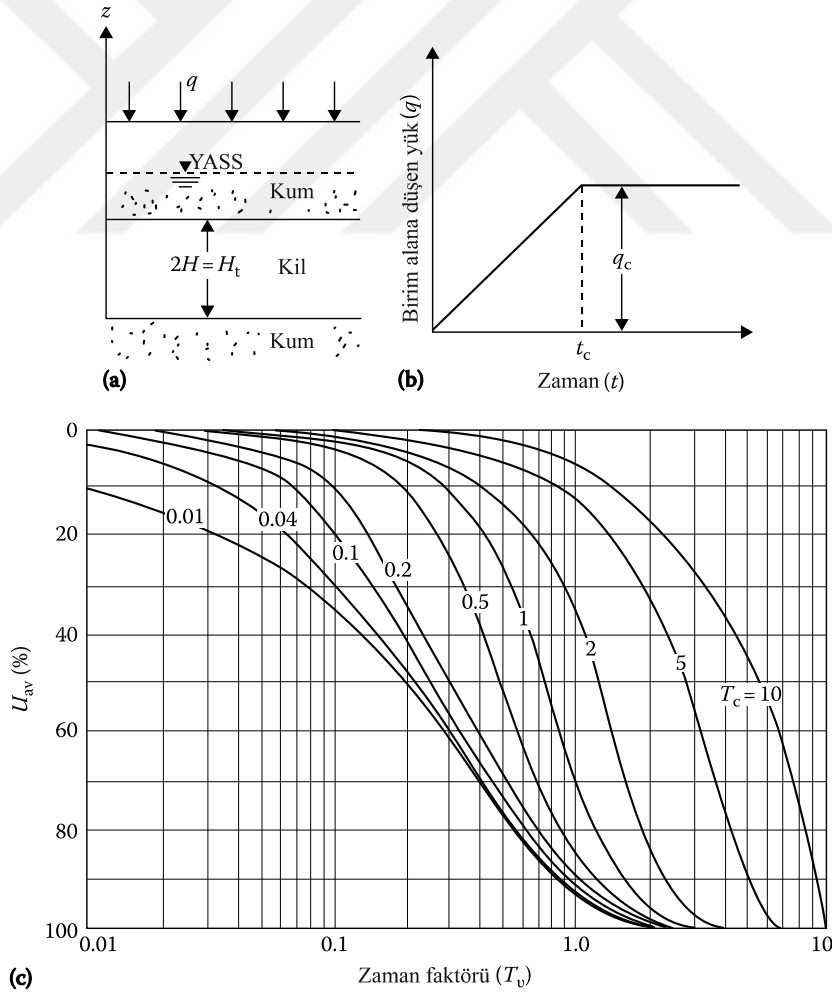
$$u = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2q_c}{M^3 T_c} \sin \frac{Mz}{H} [1 - e^{(-M^2 T_v)}] \quad (2.38)$$

$$U_{av} = \frac{T_v}{T_c} \left\{ 1 - \frac{2}{T_v} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{M^4} [1 - e^{(-M^2 T_v)}] \right\} \quad (2.39)$$

$T_v \geq T_c$  için;

$$u = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2q_c}{M^3 T_c} [e^{(M^2 T_c)} - 1] \sin \frac{Mz}{H} [1 - e^{(-M^2 T_v)}] \quad (2.40)$$

$$U_{av} = 1 - \frac{2}{T_c} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{M^4} [e^{(M^2 T_c)} - 1] e^{(-M^2 T_v)} \quad (2.41)$$



**Şekil 2.15:** Zamana bağlı yükleme nedeniyle tek boyutlu konsolidasyon: (a) zemin profili; (b) zamana bağlı gerilme değişimi; (c)  $U_{av}$ 'nin  $T_v$  ve  $T_c$  ile değişimi (Olson, 1977).

$$T_c = \frac{C_v t_c}{H^2} \quad (2.42)$$

$$T_v = \frac{C_v t_v}{H^2} \quad (2.43)$$

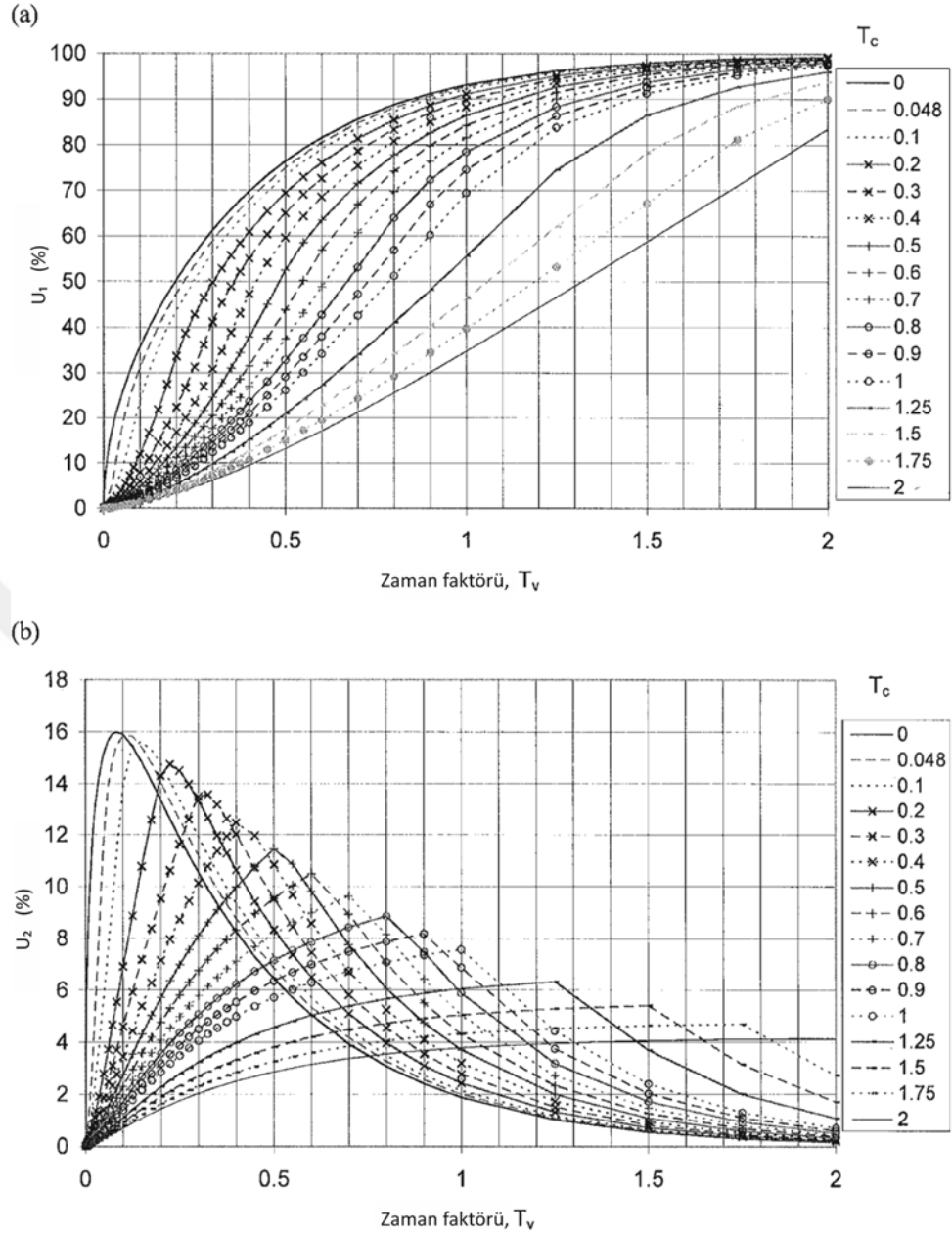
$$M = \frac{(2m+1)\pi}{2} \quad (2.44)$$

Terzaghi (1943) yaklaşımının yanı sıra Olson (1977) yaklaşımında da konsolidasyon sırasında  $C_v$ 'nin aynı kaldığı varsayılmaktadır. Bu noktadan hareketle Hsu ve Lu (2006), Olson (1977)'in çalışmalarını genişleterek, uygulanan basınçla  $C_v$ 'nin değişiminin hesaplamalarda kullanılabilirliğini sağlamıştır. Çalışmada, dört farklı yükleme hızı kullanılarak konsolidasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerin farklı basınç safhalarında, düşen seviyeli permeabilite deneyleri yapılmış ve konsolidasyon katsayısının basınca karşı değişimi tespit edilerek, konsolidasyon derecesinin tahmini için Denklem (2.45) önerilmiştir. Bu denklemde, sıkışabilir tabaka kalınlığındaki ( $H_t$ ) aşırı boşluk suyu basıncı ( $u$ ), Denklem (2.38) ile hesaplanabilirken,  $\alpha$  ise uygulanacak toplam yükün ( $q_c$ ) analiz zamanı için oranını temsil etmektedir.

$$U_{av} = \frac{\alpha q_c - \frac{1}{H_t} \int_0^{H_t} u dz}{q_c} \quad (2.45)$$

Schiffman (1958), konsolidasyon sürecinde, geçirgenliğinin ve konsolidasyon katsayısının zamanla değiştiği, zamana bağlı yükleme altında tek boyutlu konsolidasyon üzerinde çalışmıştır. Bu çalışmadan hareketle, Zhu ve Yin (1998), uygulanan basıncın zaman ve derinliğe göre değiştiği, derinliğe bağlı değişken konsolidasyon derecesi ile tek boyutlu konsolidasyon için çözümler geliştirmiştir. Araştırmacılar tarafından, ortalama konsolidasyon derecesinin belirlenmesi için Denklem (2.46)'ın kullanılabileceği belirtilmiş,  $U_1(T_v)$  ve  $U_2(T_v)$  bileşenleri için sunulan denklemlerin yanı sıra uygulama kolaylığı için tablo ve grafikler verilmiştir (Şekil 2.16).

$$U_{av} = U(T_v) = U_1(T_v) + \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_0 + \sigma_1} U_2(T_v) \quad (2.46)$$



**Şekil 2.16:** Yüklemeye bağlı (a)  $U_1 - T_v$  ve (b)  $U_2 - T_v$  eğrileri (Zhu ve Yin, 1998).

Conte ve Troncone (2006) zamana bağlı yüklemenin neden olduğu konsolidasyon için, (Terzaghi, 1943)'nin tek boyutlu konsolidasyon teorisine ait denklemlere bir çözüm olarak Taylor (1948) tarafından geliştirilen prosedüre benzer bir çözümle Denklem (2.47) önerilmiştir. Konsolidasyonu oluşturan yüklemenin herhangi bir zamanında ( $t$ ), herhangi bir derinlikteki ( $z$ ) konsolidasyon oranının tespiti için önerilen bu denklemde; zeminin sıkışabilirliğini temsil eden  $\eta$ , Denklem (2.48)'te,  $\lambda$  katsayısı ise Denklem (2.49)'da tanımlanmıştır. Denklem (2.48)'te, hacim değişimi katsayısı  $m_v$ , porozite  $n$  ve boşluk suyu sıkışabilirliği ise  $\beta$  ile temsil edilmektedir.

$$U(z, t) = \frac{2}{c_v H} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(-1)^j}{\lambda_j^3} \cos(\lambda_j z) e^{(-\eta \lambda_j^2 c_v t)} \quad (2.47)$$

$$\eta = \frac{m_v}{m_v + n\beta} \quad (2.48)$$

$$\lambda_j = \frac{(2j-1)\pi}{2H} \quad (2.49)$$

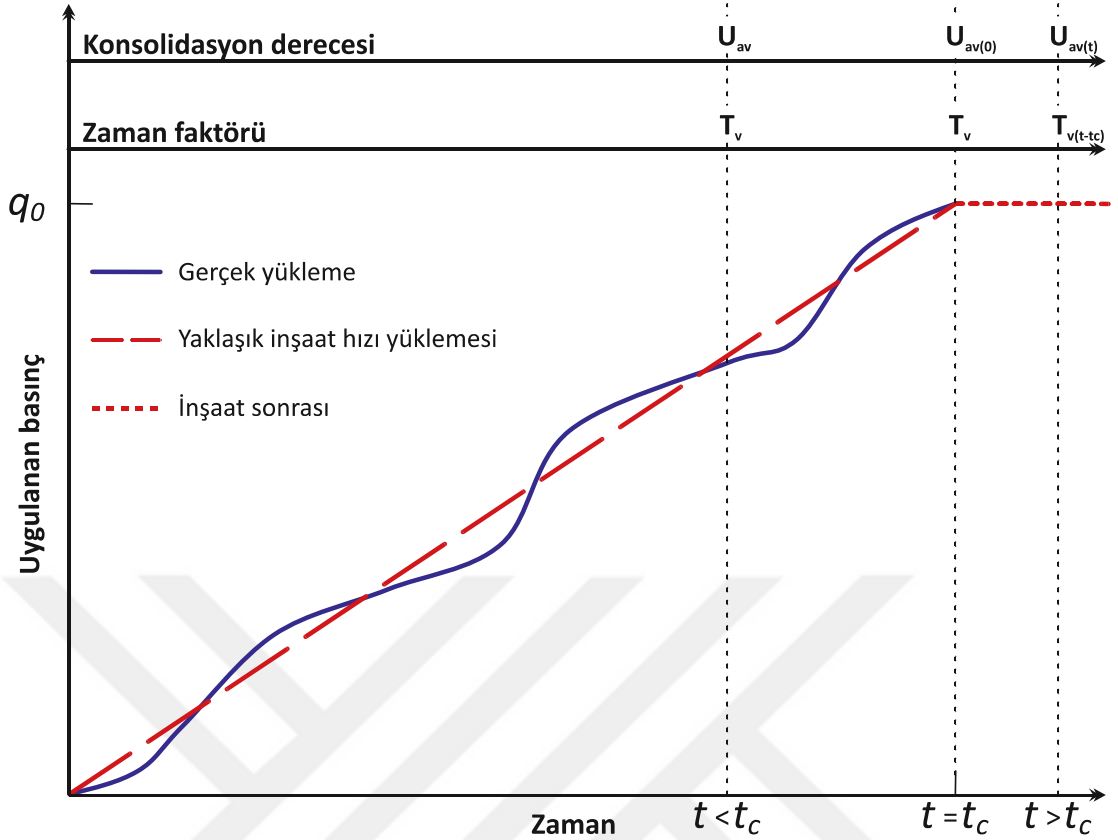
Hanna ve diğ. (2013) ile Sivakugan ve diğ. (2014), konsolidasyon basıncını oluşturan yüklemeyi sonsuz basınç artışlarına ayırmış ve Terzaghi (1925)'nin tek boyutlu konsolidasyon teorisi ile süperpozisyon prensibini kullanarak oluşturdıkları denklemlerle, yükleme sırasında ( $t < t_c$ ), yükleme sonunda ( $t = t_c$ ) veya yükleme işleminin bitiminden herhangi bir zaman sonra ( $t > t_c$ ) konsolidasyon derecesinin belirlenmesine yönelik geliştirdikleri yöntemi sunmuşlardır. Araştırmacılar; zaman katsayısı ile bu katsayıya bağlı konsolidasyon derecesinin belirlenmesinde, konsolidasyon basıncını oluşturan yükleme işleminin; devam ettiği süre içerisinde Denklem (2.50)'nin, bittiği anda ise Denklem (2.51)'in kullanılmasını önermektedir (Şekil 2.17). Dolgu işleminin bitiminden sonraki herhangi bir süre için yapılacak hesaplarda ise; Denklem (2.51) ve yüklemenin bitiş anından itibaren yükün ani uygulandığı varsayılarak, Denklem (2.52)'nin birlikte kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu denklemler ile elde edilen ve iki farklı zaman dilimi için hesaplanan konsolidasyon derecelerinin, Denklem (2.53) kullanılarak değerlendirilmesi ve ortalama konsolidasyon derecesinin hesaplanması gerekmektedir.

$$t < t_c \rightarrow T_v = \frac{c_v t}{H^2} \rightarrow U_{av} = 1 - \frac{1}{T_v} \left[ \sum_{m=0}^{\infty} \left( \frac{2}{M^4} \right) (1 - e^{-M^2 T_v}) \right] \quad (2.50)$$

$$t = t_c \rightarrow T_v = \frac{c_v t_c}{H^2} \rightarrow U_{av(0)} = 1 - \frac{1}{T_v} \left[ \sum_{m=0}^{\infty} \left( \frac{2}{M^4} \right) (1 - e^{-M^2 T_v}) \right] \quad (2.51)$$

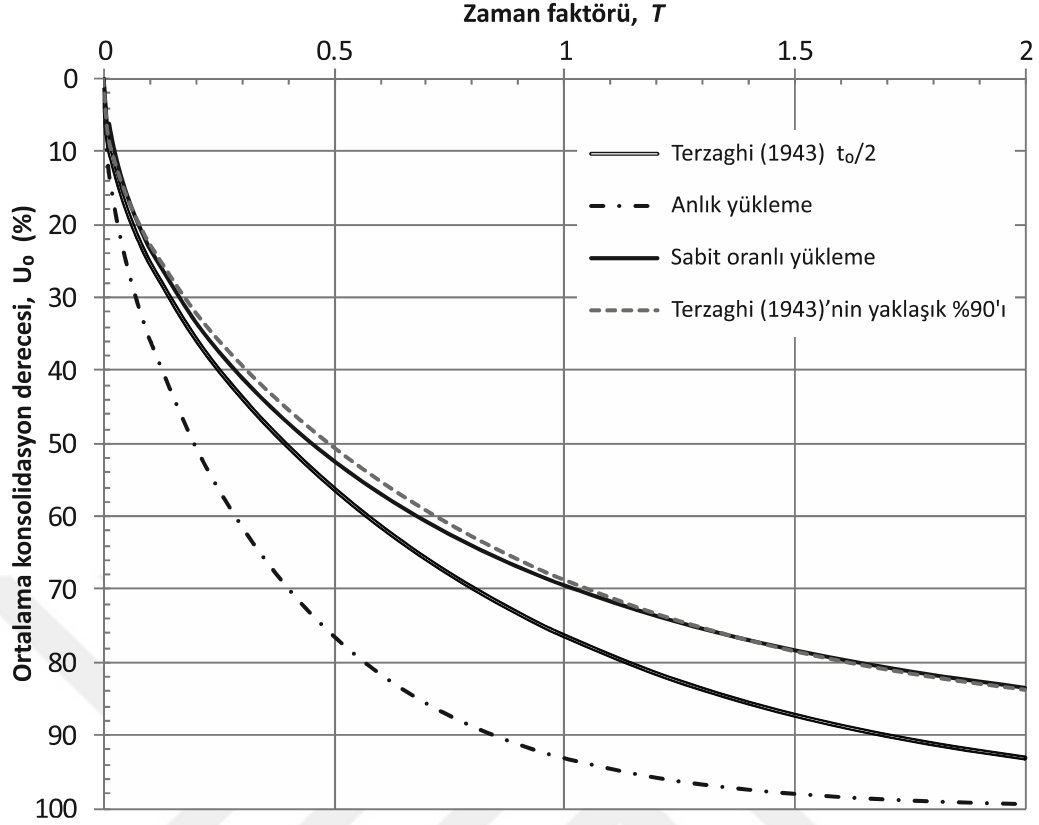
$$t > t_c \rightarrow T_{v(t-t_c)} = \frac{c_v t_{(t-t_c)}}{H^2} \rightarrow U_{av(t-t_c)} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-2M^2 T_{v(t-t_c)}} \quad (2.52)$$

$$t > t_c \rightarrow U_{av(t)} = U_{av(0)} + [1 - U_{av(0)}] U_{av(t-t_c)} \quad (2.53)$$



**Şekil 2.17:** Sabit yükleme koşullarında yöntemin tipik yapısı (Hanna ve diğ.(2013)'den değiştirilerek alınmıştır.).

Hanna ve diğ. (2013), Terzaghi (1943)'nin sabit yükleme hızı için konsolidasyon derecesi belirleme yaklaşımını kendi çalışmaları ile karşılaştırmış ve bu yaklaşımın her zaman %10 fazla sonuç verdiğini belirtmiştir. Bu değerlendirmede kullanılan konsolidasyon derecesi – zaman faktörü grafiği Şekil 2.18'de verilmiştir. Grafikte, Terzaghi (1943) yaklaşımı, bu yaklaşıma göre hesaplanan konsolidasyon derecesi değerlerinin %10 azaltılmış durumu ile araştırmacıların önerdiği yaklaşımla belirlenmiş, ani ve sabit yükleme koşullarına göre konsolidasyon dereceleri, birlikte yer almaktadır. Terzaghi (1943) yaklaşımının %10 azaltılmış durumunun sabit yükleme ile olan uyumu açıkça görülmektedir. Ancak; Hanna ve diğ. (2013) ile Sivakugan ve diğ. (2014)'nin önerdiği yöntemde, dolgu yükünün tamamının oluşturulması sonrasındaki herhangi bir zaman için yapılan hesaplamalarda, ani ve sabit yükleme koşullarına göre elde edilen konsolidasyon derecelerinin birlikte değerlendirildiği göz ardı edilmemelidir. Bu konunun, farklı ani ve sabit yükleme süreleri içeren örneklerle değerlendirilmesi gerekmektedir.



**Şekil 2.18:** Ani ve sabit hızlı yüklemeler için konsolidasyon derecesi – zaman faktörü grafikleri (Hanna ve diğ., 2013).

Konsolidasyon oturması miktarının ve süresinin belirlenmesi sürecinde, arazi yükleme koşullarının, oluşturulan yükün sıkışabilir tabaka üzerindeki değişiminin, bu yükün zemin yapısında meydana getirebileceği mekanik ve hidrolik farklılaşmaların modellenmesi kadar, bu modellemelerde kullanılan parametrelerin tespitinin de uygun şekilde yapılması, tüm yaklaşımların doğru sonuçlanmasında temel oluşturmaktadır. Yani; teori alan koşullarını yeterince yansıtmalı ve gerekli malzeme özellikleri doğru ve tamamen belirlenmelidir. Bu son gereklilik, malzeme davranışı hakkında güvenilir bilgi sağlayan bir test prosedürüne ihtiyaç anlamına gelmektedir. Terzaghi'nin orijinal çalışmasından bu yana, konsolidasyon teorisi, test prosedürleri ve test verilerini analiz etme yöntemleri önemli ölçüde değiştirilmiştir.

Konsolidasyon teorisi denklemleri, konsolidasyonun ilerlemesini belirlemek için gerekli olan iki temel özellik içerir. Bunlar, geçirgenlik katsayısı ve zemin iskeletinin sıkıştırılabilirliğidir. Bu özelliklerin her ikisi de, oluşan gerilme değişimine bağlı, boşluk oranının bir fonksiyonudur. Bu özellikleri belirlemek, konsolidasyon testi ve ilgili analizlerin amacıdır. Kavramsal olarak, malzeme fonksiyonlarını belirlemek için en basit yaklaşım, boşluk oranı – efektif gerilme ve boşluk oranı – geçirgenlik ilişkilerinin doğrudan belirlendiği bir deney yapmaktır (Znidarcic ve

diğ., 1984). Böyle bir deney, geçirgenliğin doğrudan her bir yük artışında ölçüldüğü, klasik sıkıştırma testidir. Bu test türünün iki temel dezavantajı vardır. İlk olarak, yöntem zaman alıcıdır. İkincisi, örnekte yapılan bir geçirgenlik ölçümü sonucu, basınç farkı ne kadar küçük olursa olsun, bir konsolidasyon işlemi ve aynı zamanda numune içinde eşit olmayan bir boşluk oranı dağılımı ile boşluk suyu basıncı farkı oluşmasıyla sonuçlanır. Bu durum, geçirgenliğin belirlenmesi için geleneksel testlerin sadece yaklaşık değerler sağlayacağı anlamına gelir (Pane ve diğ., 1983).

Geçirgenlik, boşluk oranı ve bu özelliklerin efektif gerilme ile olan ilişkilerini belirlemek için başka bir yaklaşım, konsolidasyon sürecinin izlendiği bir deney yapmak ve daha sonra ölçülen verilerden malzeme özelliklerini geri analizle hesaplamaktır. Geri analiz tekniği ile malzeme özelliklerini hesaplamak için birkaç farklı konsolidasyon testi kullanılabilir. Tek şart, testin matematiksel olarak iyi tanımlanmış sınır koşulları altında gerçekleştirilmesidir (Znidarcic ve diğ., 1984). Znidarcic ve diğ. (1984) tarafından yapılan çalışmada, literatürde adı geçen deney yöntemleri ve bu yöntemlerin önerildiği çalışmalar Tablo 2.1’de sunulmuştur. Tüm bu deneyler için, temel eşitlikler olan ve Terzaghi (1923) tarafından önerilen, doğrusal olmayan sonlu şekil değiştirme teorisi Denklem (2.54)’de verilmektedir. Bu temel denklem, yine Terzaghi ve Fröhlich (1936) tarafından, türetilmesinde kullanılan koordinat sisteminin Lagrangian sistemine değiştirilmesiyle, Denklem (2.55)’de verilen sonsuz şekil değiştirme teorisine dönüştürülmüştür (Znidarcic ve Schiffman, 1982).

$$\left[ \frac{k}{\gamma_w a_v (1+e)} \right] \left( \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.54)$$

$$\left[ \frac{k(1+e)}{\gamma_w a_v} \right] \left( \frac{\partial^2 u}{\partial a^2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.55)$$

Denklemlerde,  $k$  permeabilite katsayısı,  $u$  aşırı boşluk suyu basıncı,  $e$  boşluk oranı,  $a_v$  sıkıştırılabilirlik katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Denklem (2.54)’nin bir bileşeni olan  $z$  ile Denklem (2.55)’nin bir bileşeni olan  $a$ , teori çözümünde kullanılan koordinat sisteminde, referans düzlemlerden olan uzaklığı tanımlamaktadır.

**Tablo 2.1:** Ödometre deney teknikleri, önerilen hesap yöntemleri ve kullanılan varsayımlar (Znidarcic ve diğ., 1984)

|                                      |                        | Malzeme Özellikleri için Varsayımlar |                  |               |
|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------|---------------|
| Analiz Yöntemi                       | Teori*                 | $e_0 - \sigma'$                      | $e_0 - k$        | $c_v$         |
| <b>Gevşeme Deneyi</b>                |                        |                                      |                  |               |
| Terzaghi                             | sonlu                  | parçalı doğrusal                     | doğrusal         | parçalı sabit |
| <b>Kademeli Yükleme Deneyi</b>       |                        |                                      |                  |               |
| Terzaghi                             | sonlu                  | parçalı doğrusal                     | doğrusal         | parçalı sabit |
| Zamanın karekökü                     | sonlu veya sonsuz      | parçalı doğrusal                     | parçalı doğrusal | parçalı sabit |
| Zamanın logaritması                  | sonsuz                 | parçalı doğrusal                     | parçalı doğrusal | parçalı sabit |
| Doğrusallaştırılmış şekil değiştirme | sonlu                  | –                                    | –                | parçalı sabit |
| <b>Sabit Deformasyon Hızlı Deney</b> |                        |                                      |                  |               |
| Smith ve Wahls (1969)                | basitleştirilmiş sonlu | parçalı doğrusal                     | parçalı doğrusal | –             |
| Wissa ve diğ. (1971)                 | sonsuz                 | Doğrusal/logaritmik                  | –                | sabit         |
| Umehara ve Zen (1980)                | sonlu                  | logaritmik                           | –                | sabit         |
| Lee (1981)                           | sonlu/sonsuz           | –                                    | –                | sabit         |
| <b>Hidrolik Eğim Kontrollü Deney</b> |                        |                                      |                  |               |
| Lowe ve diğ. (1969)                  | sonsuz                 | parçalı doğrusal                     | –                | –             |
| <b>Sabit Yükleme Hızlı Deney</b>     |                        |                                      |                  |               |
| Aboshi ve diğ. (1970)                | sonsuz                 | doğrusal                             | –                | –             |
| <b>Sürekli Yükleme Deneyi</b>        |                        |                                      |                  |               |
| Janbu ve diğ. (1981)                 | sonsuz                 | –                                    | –                | –             |
| <b>Sızıntı Deneyi</b>                |                        |                                      |                  |               |
| Imai (1979)                          | kullanmadı**           | doğrudan ölçülen                     | doğrudan ölçülen | –             |

$e_0 - \sigma'$  : Boşluk oranı – efektif gerilme,  $e_0 - k$  : boşluk oranı – permeabilite katsayısı,  $c_v$  : konsolidasyon katsayısı

\*Yöntem geliştirilmesinde kullanılan şekil değiştirme teorisi

\*\*Konsolidasyon teorisi kullanılmamıştır.

Deneyler, malzeme özellikleri için yapılan varsayımlarına ve başlangıç koşullarına göre farklılık gösterir. Ayrıca, her deneyin kendine özel sınır koşullarıyla ilgili malzeme özelliklerini değerlendirmek için bir analiz prosedürü vardır (Tablo 2.1). Bir zemin numunesinin konsolidasyon özelliklerini belirlemeye yönelik ilk deney olarak bilinen gevşeme deneyi, Terzaghi (1923) tarafından konsolidasyon teorisini formüle ettiği sırada önerilmiştir. Bu deney, numunenin içinde kararlı olmayan bir durum üretildikten sonra gerçekleştirilmektedir. Numunede kararsız durum halinin oluşturulması kısa zaman aralıklarıyla yük uygulanması veya numunenin belirlenen bir hızla deformasyonu ile sağlanmaktadır. Deney sırasında, numunenin bazı kısımları şişerken, diğer bölgeler birleşmektedir ve bu nedenle, monoton yükleme varsayımı ihlal edilmektedir. Bu deney tekniğinde, kararsız durum hali şartlarının açıkça belirtilememiş olması nedeniyle, deneyin başlangıç sınır koşulları da bilinmemektedir (Znidarcic ve diğ., 1984). Bu nedenle, önerilen bu deney yöntemi araştırmacılar tarafından kullanılamamıştır.

Kademeli yükleme deneyi ise, ince bir örneğe kademeli olarak artan yük uygulanarak, her bir yük artışı tarafından ortaya çıkarılan konsolidasyon sürecinin izlenmesiyle gerçekleştirilir. Bu



yöntem ile yapılan deney, konsolidasyon özelliklerini belirlemek için, en yaygın kullanılan ödometre deneyidir. İlk olarak Terzaghi (1927) tarafından önerilmiş olan bu deney için, boşluk oranı – efektif gerilme ilişkisini ve konsolidasyon katsayısını belirlemek üzere, çeşitli analiz prosedürleri önerilmiştir (Terzaghi, 1927; Casagrande, 1936; Gilboy, 1936; ASCE, 1941; Taylor, 1942, 1948; Burmister, 1952; Schmertmann, 1955; Leonards, 1962; Bishop ve Gibson, 1964; Smith, 1967; Winterkorn ve Fang, 1975; Holtz ve Kovacs, 1981; Yong ve Townsend, 1986; ASTM International, 2011). Numunenin konsolidasyon özelliklerini belirlemek için kademeli yükleme deneyinin esas dezavantajı, testin süresidir. Düzgün yürütülen bir deney, birkaç hafta veya ay kadar sürebilmekte olup, bu dezavantaj daha hızlı test tekniklerinin geliştirilmesi çabalarının ana nedenidir. Önerilen yöntemlerin tümü, sıkıştırılabilirlik ve konsolidasyon katsayısının her bir yük artışı sırasında sabit olduğu varsayımını içerir. Bu varsayım, analiz prosedürlerinin uygulanabilirliğine kısıtlama getirmektedir ve konsolidasyon katsayısının belirlenmesinin doğruluğu, yük artışının büyüklüğü ile ters orantılıdır.

Hamilton ve Crawford (1960) deney sürecini hızlandırmak ve saha deformasyon hızlarına daha yakın hızlar altında malzemeyi test etmek için sabit deformasyon hızlı (CRS) ödometre deneyini önermişlerdir. Araştırmanın deneysel bölümünde yazarlar, boşluk oranı – efektif gerilme ilişkilerinde, deneydeki deformasyon hızına bağlı olarak, önemli farklılıklar ortaya çıktığını bulmuşlardır. Örneklerinde bir miktar fazla su basıncı bulunduğunu ve önemli gözenek suyu basınçlarının gelişmesini önlemek için testin düşük bir hızda yapılması gerektiği sonucuna varmışlardır. Bu deney için, analitik çözümler ile oluşturulan çeşitli yöntemler önerilmiştir (Smith ve Wahls, 1969; Wissa ve diğ., 1971; Umehara ve Zen, 1980; Lee, 1981; ASTM International, 2012). Bu araştırmacılar, kademeli yükleme deneyinin, yüksek su içeriğine sahip çok yumuşak zeminler için geçerli olamayacağını, bu tür örneklerde, çok küçük yük artışlarının gerekli olduğunu, alternatif olarak, CRS ödometre deneyinin kullanılması gerektiğini belirtmişler ve bu deneyle sonuçların çok daha hızlı elde edildiğini vurgulamışlardır.

Hidrolik eğim kontrollü deney, Lowe ve diğ. (1969) tarafından, boşluksuyu basıncının test boyunca sabit kalacağı şekilde, yükleme hızının ayarladığı deneyler olarak tanımlanmıştır. Deney sırasında, bu koşulu yerine getirmek için gerekli laboratuvar donanımının, önemli ölçüde bir geri bildirim sağlayan ölçüm mekanizmasının bulunması gereklidir. Elde edilen sonuçların doğruluğu, deney sırasında, oluşan aşırı boşluk suyu basıncının çok düşük seviyelerde tutulmasına ve boşluk oranının sabit kalmasına bağlıdır (Znidarcic ve diğ., 1984). Sabit

yükleme hızlı deney ise konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesine yönelik prosedürün Schiffman (1958)'ın teorik çalışmasına dayanan, Aboshi ve diğ. (1970) tarafından tanımlanmış bir ödometre deneyidir. Sabit bir yükleme hızıyla yapılan bu deneyde geçirgenlik ve konsolidasyon katsayısının da sabit olduğu varsayılmaktadır. Efektif gerilme ve boşluk oranının ortalama değerlerinin birbiriyle ilişkili olmasından dolayı, analiz, sadece numune içindeki boşluk oranı neredeyse sabitse, güvenilir olacaktır ki buda yüklenme hızını sınırlamaktadır. Janbu ve diğ. (1981) tarafından, sabit deformasyon hızlı, hidrolik eğim kontrollü ve sabit yükleme hızlı deneylere ait başlangıç koşulları ve sınırlandırmalarının bir varyasyonu olarak, sürekli yükleme deneyi önerilmiştir. Araştırmacılara göre bu deneyin, diğer deneylere ve özellikle kademeli yükleme deneyine göre avantajları vardır. Bu avantajların en önemlilerinin, uygulanmada hız farkı ve elde edilen sonuçların analitik yaklaşımlarla oluşturulan grafiklerde çok daha kesin verilebilmesi, olduğu belirtilmiştir.

Tüm bu deneylerden farklı olarak, Imai (1979), konsolidasyon teorisini kullanmadan, efektif gerilmenin, boşluk oranının ve permeabilite katsayısının doğrudan ölçüldüğü, sızıntı etkili ödometre deneyini önermiştir. Bu deneyde, numune üzerinde bir hidrolik eğim oluşturulması sonucu konsolide olan numune tabanında, boşluk suyu basınçları ölçülmekte ve deney sonunda numunenin boşluk oranı belirlenmektedir. Znidarcic ve Liu (1989) ile Huerta ve diğ. (1988) tarafından yapılan çalışmalarla, görülen bazı dezavantajların giderilmesi yönünden tekrardan revize edilmiştir. Bu deneyin, revize edilen haliyle, herhangi bir teorik yaklaşıma gerek kalmadan, istenilen konsolidasyon özelliklerinin doğrudan ölçülerek belirlenmesiyle, diğer deney sitemlerine göre, özellikle yüksek sıkışabilirliğe ve tarama çamurları gibi oldukça yumuşak kıvama sahip zeminlerde, avantaj sağlamakta olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmiştir. Ancak, deney sırasında, boşluksuyu basınçlarının sürekli ölçülmesi için kapsamlı bir deney düzeneğine ihtiyaç duyulmaktadır ve numunenin yan çeperlerinde akım kanalları oluşmasıyla deney sonuçları yanlış değerler verebilmektedir. Bu önemli dezavantajları nedeniyle pratikte çok fazla kullanıldığı bilinmemektedir.

Açıklanan deney teknikleri ve analiz prosedürleri, zeminlerin konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesinde laboratuvardaki mevcut uygulama durumunu temsil etmektedir. Bazı yöntemler, diğerlerinden daha iyi olmasına rağmen, kısıtlayıcı varsayımlar olmaksızın teorik olarak eksiksiz değildir. Sızıntı deneyi haricinde, tüm yöntemler malzeme özelliklerini değerlendirmek için konsolidasyon teorisini ve inversiyon işlemini kullanır. Tüm yöntemlerde ortak olan ana sorun, sunulan varsayımların, iyi tanımlanmış malzeme özelliklerinin bulunduğu problemlere, deneylerin uygulanabilirliğini sınırlamasıdır. Yöntemlerin tanımlandığı çalışmalarda, kısıtlayıcı varsayımların sonuçları eleştirisel olarak değerlendirilmediğinden, elde edilen malzeme özellikleri üzerindeki etkileri ölçülemez durumdadır. Ancak; günümüze kadar yapılmış birçok çalışmada, gerek yöntem olarak seçilen gerekse kabulleri eleştirisel olarak değerlendirilen kademeli yükleme deneyi (standart ödometre deneyi) ile sabit deformasyon hızlı deney uluslararası ASTM International (2011, 2012) ve CEN/ISO (2017) standartlarında yer bulmuştur.

Ödometre deneyi yöntemlerinin gelişimi sürecinde, zemin örneklerinin, maruz kaldıkları gerilme geçmişinin bir izini taşıdıkları ilk kez Casagrande (1936) tarafından tanımlanmıştır. Örneğin oluşturulduğu zamana kadar, maruz kaldığı en büyük efektif gerilmeye karşılık gelen basınç ise ön konsolidasyon basıncı olarak tanımlanmıştır (Casagrande, 1936; Becker ve diğ., 1987; Burland, 1990). Bir zeminin tarihsel süreç içerisinde farklı gerilme koşullarını, erozyon, kuruma, buzulların erimesi, yeraltı suyu hareketi ile PH, iyon, sıcaklık ve tuz konsantrasyonu değişimleri gibi doğal süreçler etkileyebilmektedir. Bu faktörlerin yanı sıra; kazı, yapıların kaldırılması, derin drenaj gibi işlemler, gerilme değişimlerine neden olmaktadır (Brumund ve diğ., 1976; Das, 2019). Bu tanımdan hareketle, zeminin geçmişte maruz kaldığı en büyük efektif gerilmenin, mevcut efektif gerilmeye oranı olarak tanımlanan aşırı konsolidasyon oranı (OCR) ve ön konsolidasyon basıncı, oturma miktarının hesaplanmasında önemli bir yer tutmaktadır. Ön konsolidasyon basıncı, zeminin elastik davranışını plastik davranışından ayıran yalancı elastik bir sınırdır. Bu basınç, jeoteknik mühendisliğinde, gerilme geçmişini, aşırı konsolidasyon oranını, oturma davranışını ve yumuşak killerdeki kısa süreli stabilite problemlerini, analiz etmek için önemli bir parametredir (Ladd ve Foote, 1974; Mesri ve Godlewski, 1977; Wroth, 1984; Jamiolkowski ve diğ., 1985). Ön konsolidasyon basıncının belirlenmesinde, önemli bir belirsizlik ve yanlışlık varsa, analizlerin sonuçlarını sorgulanabilir duruma getirmektedir. Bu basıncın, doğru tahminlerini sağlayacak güvenilir bir yöntem, ince taneli zeminlerdeki analiz ve tasarımının merkezinde yer almaktadır.

Ön konsolidasyon basıncı, genellikle tek boyutlu konsolidasyon testlerinin sonuçlarından belirlenir. Standart ödometre deneylerinden, sıkıştırılabilir zeminin ön konsolidasyon basıncını ve yorumlamak için çok sayıda ampirik yöntem geliştirilmiştir (Casagrande, 1936; Janbu, 1967; Silva, 1970; Butterfield, 1979; Becker ve diğ., 1987; Oikawa, 1987; Drnevich ve diğ., 1989; Burland, 1990; Jacobsen, 1992; Onitsuka ve diğ., 1995; Wang ve Frost, 2004; Boone, 2010). Bu yöntemlerin yanı sıra, ön konsolidasyon basıncının belirlenmesinde, zeminin kıvam özelliklerini kullanan korelasyonlar da çeşitli araştırmacılar tarafından sunulmuştur (Hansbo, 1957; Stas ve Kulhawy, 1984; Nagaraj ve Srinivasa Murthy, 1985; Mayne ve Kemper, 1988). Aşırı konsolidasyon oranının belirlenmesi için ise kıvam özellikleri ve kesme gerilmesi parametreleri kullanılarak bazı korelasyonlar geliştirilmiştir (Hansbo, 1957; Larsson, 1980; Mayne ve Kemper, 1988; Kulhawy ve Mayne, 1990). Stas ve Kulhawy (1984) tarafından önerilen, likitlik indeksine ( $I_L$ ) göre ön konsolidasyon basıncı yaklaşımı Eşitlik (2.56)'da, Mayne ve Mitchell (1988) ile Kulhawy ve Mayne (1990) tarafından önerilen aşırı konsolidasyon oranının tahminine yönelik yaklaşım ise sırasıyla Eşitlik (2.57) ve Eşitlik (2.59)'de sunulmuştur.

$$\frac{\sigma'_c}{100kN / m^2} = 10^{(1.11 - 1.62 I_L)} \quad (2.56)$$

$$OCR = \beta \frac{c_u}{\sigma'_0} \quad (2.57)$$

$$\beta = 22 [I_p]^{-0.48} \quad (2.58)$$

$$OCR = 0.58N \frac{100kN / m^2}{\sigma'_0} \quad (2.59)$$

Umar ve Sadrekarimi (2017) tarafından yapılan çalışmada incelenen ampirik yöntemler arasında, Oikawa (1987) tarafından önerilen logaritmik grafik tekniğinin, ortalama 16.8 kPa aşırı tahmin potansiyeli ile ön konsolidasyon basıncını en doğru tahminlerini sağladığı belirlenmiştir. Öte yandan, araştırmacılara göre; literatürde en çok kullanılan Casagrande (1936)'nin klasik yöntemi ortalama 33.1 kPa sapma ile nispeten yanlış tahminleri sağlamıştır (Umar ve Sadrekarimi, 2017). Karşılaştırmalar, tüm yöntemlerin ön konsolidasyon basıncını, çoğunlukla fazla tahmin edeceğini göstermiştir. Konsolidasyon eğrisinin daha keskin eğriliği ve dolayısıyla konsolidasyon verilerinden maksimum eğrilik noktasını tespit etme konusunda

daha yüksek güven nedeniyle, tahminlerin genel doğruluğunun, artan plastisite indisi değerleri ile doğru orantılı olduğu saptanmıştır (Umar ve Sadrekarimi, 2017).

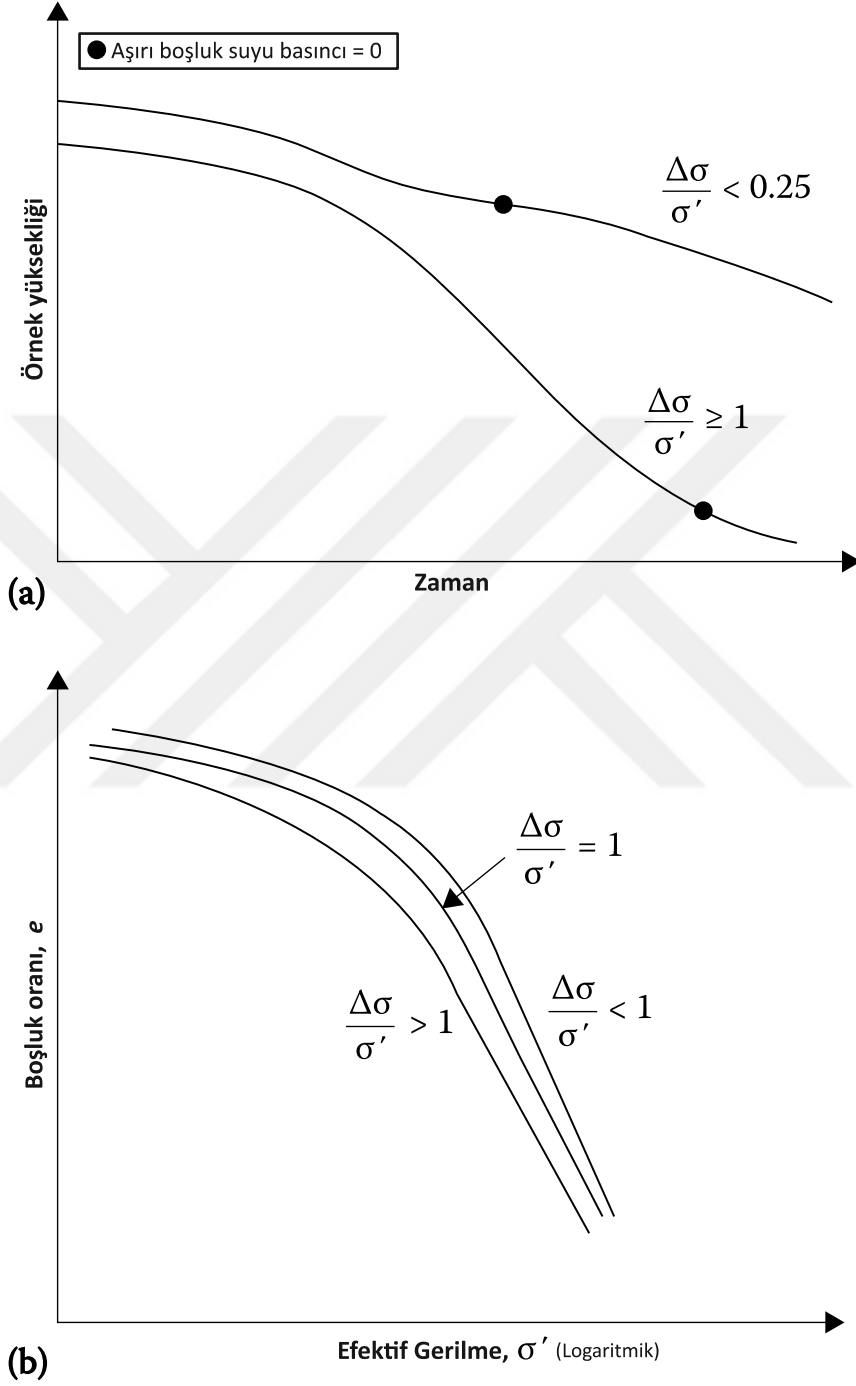
Standart ödometre deneylerinde, ASTM International (2011) tarafından da tariflendiği şekliyle, örnek üzerindeki yük 24 saatte bir iki katına çıkar, bu, her adımda efektif gerilme değişiminin, yük arttırılmadan bir önceki efektif gerilme değerine oranının ( $\Delta\sigma'/\sigma'$ ) 1'de tutulduğu anlamına gelmektedir. Deneyler sonucu oluşturulan sıkışma – zaman eğrilerinin şeklindeki çarpıcı değişiklikler, genellikle  $\Delta\sigma'/\sigma'$  oranı yaklaşık 0.25'in altına düştüğünde fark edilir (Das, 2019). Leonards ve Altschaeffl (1964), Meksika kili üzerinde, bu oranı değiştirdikleri çeşitli testler gerçekleştirmiş ve daha sonra fazla boşluk suyu basıncını zamanla ölçmüştür. Örnek deformasyonunun zamanla değişimi Şekil 2.19.a'da gösterilmiştir. Bu şekilden, yük oranının 0.25'ten küçük olduğu durum için, birincil konsolidasyon sonunun<sup>1</sup> pozisyonunun çözülmesinin biraz zor olduğu görülebilir. Ayrıca, yük artış oranının kilin konsolidasyonu üzerinde yüksek bir etkisi vardır. Şekil 2.19.b, çeşitli oranlar için  $e - \log \sigma'$  eğrisini göstermektedir. Eğer oran küçükse, tek tek kil parçacıklarının denge konumlarını yeniden ayarlama yeteneği azdır, bu da daha büyük oranlara kıyasla daha küçük bir sıkıştırma ile sonuçlanır (Das, 2019).

Zemin örneğinin yaklaşık bir gün boyunca belirli bir yük altında bırakıldığı standart deneylerde, bir sonraki yük artışı eklenmeden önce belirli bir miktarda ikincil konsolidasyon gerçekleşir. Das (2019)'a göre; örnek bir günden fazla bir süre boyunca yük altında bırakılırsa, ilave ikincil konsolidasyon çözümü gerçekleşmektedir. Bu ilave ikincil konsolidasyon miktarı, Şekil 2.20'de gösterildiği gibi,  $e - \log \sigma'$  grafiği üzerinde etkili olacaktır. Belirli bir efektif gerilme için şekil değiştirme, bir sonraki yük artışı uygulanmadan önce numunenin geçirdiği toplam deformasyondan hesaplanır. Bu konuda, Crawford (1964), Leda kili üzerinde deneysel sonuçlar sağlamıştır. Çalışmasında, her bir yük artışının bir hafta tutulduğu durumda, birincil konsolidasyon sonundaki zamana göre belirlenen boşluk oranı ile oluşturulan  $e - \log \sigma'$  grafiği kullanılarak hesaplanan ön konsolidasyon basıncının, bir hafta sonundaki boşluk oranına göre çizilen  $e - \log \sigma'$  grafiğinden hesaplanana göre iki katı değere sahip olduğunu belirtmiştir. Bu

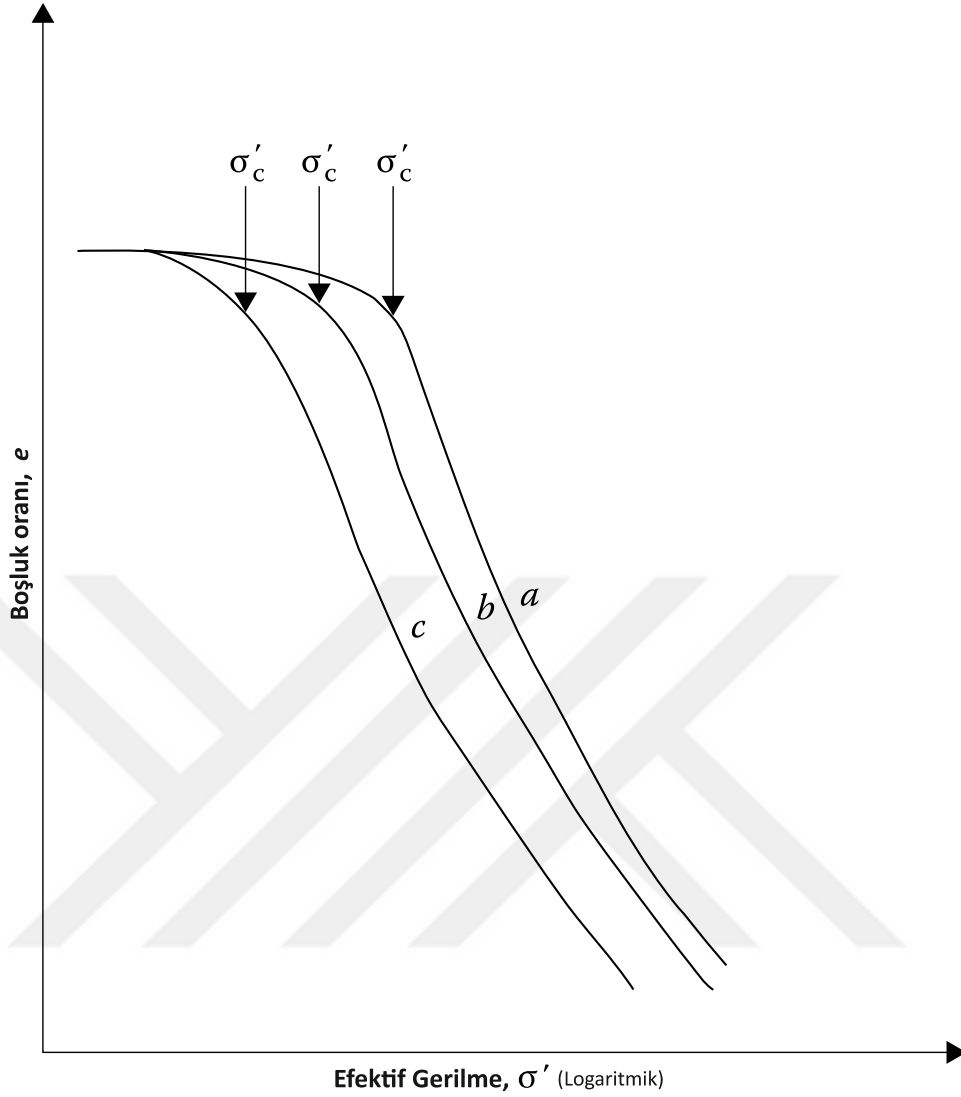
---

<sup>1</sup> Birincil konsolidasyonun sonu, aşırı gözenek suyu basıncının 0'a eşit olduğu durum olarak tanımlanmaktadır.

çalışma, deneylerde uygulanan yükün arttırılma periyodunun önemini başlı başına ortaya koymaktadır.

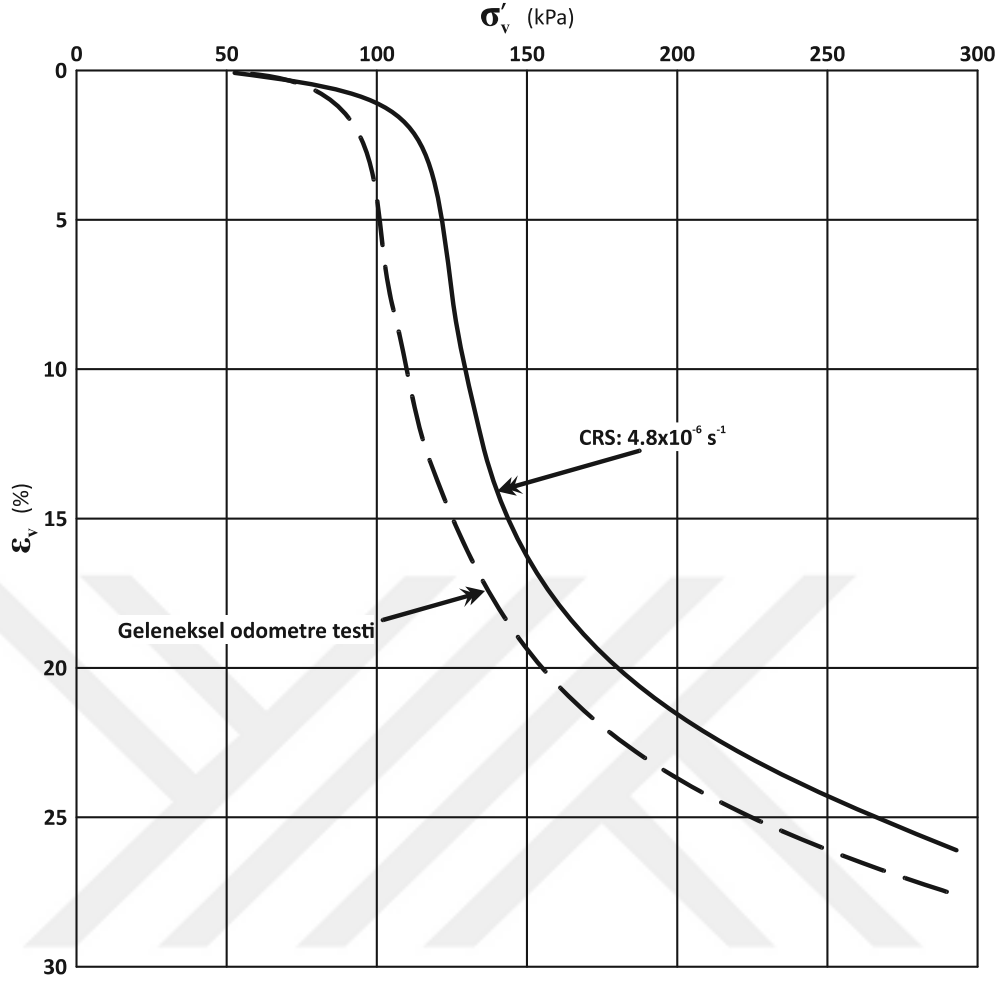


**Şekil 2.19:** Yük artış oranının etkisi: (a) konsolidasyon eğrisi üzerindeki etkisi; (b)  $e - \log \sigma'$  grafiği üzerindeki etkisi (Das, 2019).



**Şekil 2.20:** Yük süresinin  $e - \log \sigma'$  grafiğine etkisi: (a) birincil konsolidasyon sonu, (b) 24 saatlik yük artış süresi ve (c) 24 saatten fazla yük süresi (Das, 2019).

Leroueil ve diğ. (1983), Leroueil ve Kabbaj (1985) ile Leroueil (1988) çalışmalarında, deformasyon hızının, boşluk oranı – efektif gerilme ilişkisi üzerindeki etkisinin önemine dikkat çekilmiştir. Sabit deformasyon hızlı ödometre deneyi (CRS) ile geleneksel 24 saatlik kademeli yüklemeli ödometre deneyinden elde edilen sonuçlar arasında önemli farklılıklar olduğunu belirtmişlerdir. Bu deneylerin sonucunda, elde edilen tipik konsolidasyon eğrileri Şekil 2.21’de verilmiştir. Araştırmacılar, sabit deformasyon hızlı ödometre deneyinden elde edilen ön konsolidasyon basıncı değerinin standart ödometre deneyinden elde edilene göre yaklaşık %25 daha büyük olduğunu ve %35 seviyesinde çıkabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, karşılaştırılan her iki deney sonuçlarının, şekil değiştirme hızının bir fonksiyonu ile düzeltilebileceği belirtilmiştir.



**Şekil 2.21:** Geleneksel ve CRS deneylerinden elde edilen tipik sıkıştırılabilirlik eğrileri (Leroueil ve Kabbaj, 1985).

### 2.1.1.3. Yük Altında Oturma Hesapları

Zeminde, çeşitli yapılar tarafından oluşturulan yüklerden dolayı meydana gelen gerilme artışına, yapıların oturmasıyla sonuçlanan, bazı şekil değiştirmeler her zaman eşlik edecektir.

Genel olarak bir temeldeki toplam oturma miktarı; elastik oturma ( $S_e$ ), birincil konsolidasyon oturması ( $S_p$ ) ve ikincil konsolidasyon oturması ( $S_s$ ) miktarlarının toplamıyla ifade edilmektedir.

$$S = S_e + S_p + S_s \quad (2.60)$$

Kohezyonsuz zeminlerde, elastik oturma baskın iken, doymun inorganik siltlerde ve killerde ise büyük bir olasılıkla birincil konsolidasyon yerleşimi baskındır. İkincil konsolidasyon yerleşimi, organik topraklarda ve turbalarda toplam yerleşimin büyük bölümünü oluşturmaktadır (Das,



2019). Janbu ve diğ. (1956) muntazam yüklenen esnek temelde, ortalama elastik oturma miktarının belirlenmesi için Denklem (2.61)'i önermiştir. Çalışmada, denklem bileşenleri olan, sıkışabilir tabaka kalınlığı düzeltme faktörü  $\mu_1$  ile temel derinliği düzeltme faktörü  $\mu_0$  için, temel boyutları ve derinliğinin fonksiyonları ile oluşturulan grafikler verilmiş,  $q$  net basınç,  $E$  elastisite modülü ve  $B$  ise temel genişliği olarak tanımlanmıştır. Janbu ve diğ. (1956)'nin teorisinde poisson oranı  $\nu=0.5$  olarak kabul edilmiştir. (Burland, 1970) ve (Giroud, 1972) düzeltme faktörleriyle ilgili çalışmalar yürütmüş ve teori grafiklerini yeniden düzenlemiştir. Christian ve Carrier III (1978)'nin çalışmasına göre, bu yeni grafiklerle yapılan hesaplamalar, sonlu elemanlar yöntemine dayanan hesaplamalarla karşılaştırıldığında, genellikle %10'dan ve her zaman %20'den az hatalı sonuçlar vermektedir. Çalışmada, genellikle dairesel ve dikdörtgen temeller için yeterli olduğu sonucuna varmıştır.

$$S_{e(ortalama)} = \mu_1 \mu_0 \frac{qB}{E} \quad (2.61)$$

Bowles (1987) derinlikle değişken elastisite modülünün kullanımına olanak sağlayan ve mükemmel derecede esnek temel yüklemesinde, temelin orta ve köşe noktaları altında oturma miktarının hesaplanabildiği,

$$S_e = q(\alpha B') \frac{1-\nu^2}{E_s} I_s I_f \quad (2.62)$$

denkleminin kullanılmasını önermiştir. Denklem (2.62)'de;  $q$  net basınç,  $\nu$  poisson oranı,  $E_s$  ortalama elastisite modülü,  $B'$  ise eşdeğer temel genişliğidir. Ortalama elastisite modülü hesabında, temel genişliğinin dört katı bir derinlik içerisinde belirlenen elastisite modülü değerlerinin kullanılması önerilmiştir. Eşdeğer temel genişliği ise, temelin oturma miktarının hesaplanacağı yerine göre değişmektedir. Oturma miktarının hesabında, temel orta noktası altında  $B' = B/2$ , köşe noktası altında ise  $B' = B$  kullanılmalıdır. Temel genişliği, uzunluğu, derinliği ile poisson oranı değerlerinin bir fonksiyonu olan temel şekli faktörü  $I_s$  ve derinlik faktörünün  $I_f$  hesabı sırasıyla, Steinbrenner (1934) ve Fox (1948) tarafından yapılan çalışmalarda ayrıntılarıyla açıklanmıştır.

Farklı kuramlar, ilk yönetim varsayımları, temel geometrileri ve özel durumlar için literatürde çok çeşitli ve çok sayıda çözüm bulunmaktadır. Uygulayıcı mühendis için, hangi çözümün

belirli çalışma problemiyle en alakalı olduğu ve hangi parametrelerin en önemli olduğu belki de biraz kafa karıştırıcıdır. Çözümlerin çoğu normalize edilmiş formlarda verilir, ancak tablo veya grafik sunumları çeşitli çözümler arasında önemli farklılıklar olduğunu gösterebilirken, aslında çözümler oldukça benzerdir. Mayne ve Poulos (1999) yer değiştirme etki faktörleri elde etmek için yaklaşık bir çözüm sağlamak ve bu çözümlerin, farklı formatlarda sunulan, iyi bilinen, yaklaşımlarla uyumluluğunu göstermek amacıyla yaptığı çalışmasında, önerdiği yeni etki faktörlerine dayanan bir hesaplama tablosu tekniği sunmuştur. Çalışmada, temel orta noktası altındaki elastik oturma miktarının hesaplanması için Denklem (2.63)'in kullanımı önerilmiştir.

$$S_e = qd \frac{1-\nu^2}{E_0} I_G I_F I_E \quad (2.63)$$

Önerilen denklem, temelin rijitliği ile gömülme derinliğini, derinlikle zeminin elastiklik modülündeki değişimini ve katı tabakaların sınırlı bir derinlikteki yerini dikkate alır. Denklemden  $I_G$  ; yer değiştirme etki faktörünü,  $I_F$  ; rijitlik düzeltme faktörünü,  $I_E$  ise oturma düzeltme faktörünü temsil etmektedir. Denklem (2.63), araştırmacılar tarafından, dairesel temel esas alınarak düzenlenmiştir. Temel çapı olarak tanımlanan  $d$  bileşeninin, farklı tip temellerde, eşdeğer temel genişliği olarak kullanılması gerektiği, yöntemin bu düzenlemeyle, kare, dikdörtgen, çokgen ve düzensiz şekilli temellere de başarıyla uygulanabilir olduğu belirtilmiştir.

Elastisite teorisini kullanarak, dolgu yüküne karşın, oluşacak elastik oturma miktarının hesaplanmasında, başlıca önemli nokta, sıkışabilir zemin için uygun bir elastisite modülünün seçilmesidir. Bunun akabinde ise dolgu altında gerilme değişimi dağılımının, hesaplara uygun bir şekilde yansıtılması gereklidir. Bu kapsamda, yukarıda açıklanan yaklaşımlarda problemin çözülmesine yönelik ana prensibin, uygulanan yüke karşılık birim şekil değiştirmenin hassas hesaplanması olduğu açıktır.

Dolgu yükü altında toplam oturma miktarının hesaplanması için, birincil ve ikincil konsolidasyondan kaynaklı oturma miktarlarının belirlenmesi gereklidir. Tek boyutlu konsolidasyon miktarının hesaplanmasında temel prensip Şekil 2.22'de verilmiştir. Toplam kalınlığın  $H$  olduğu bir kil tabakasında, ortalama efektif basıncın  $\sigma'_0$  'dan,  $\sigma'_1$  'e yükseltilmesi

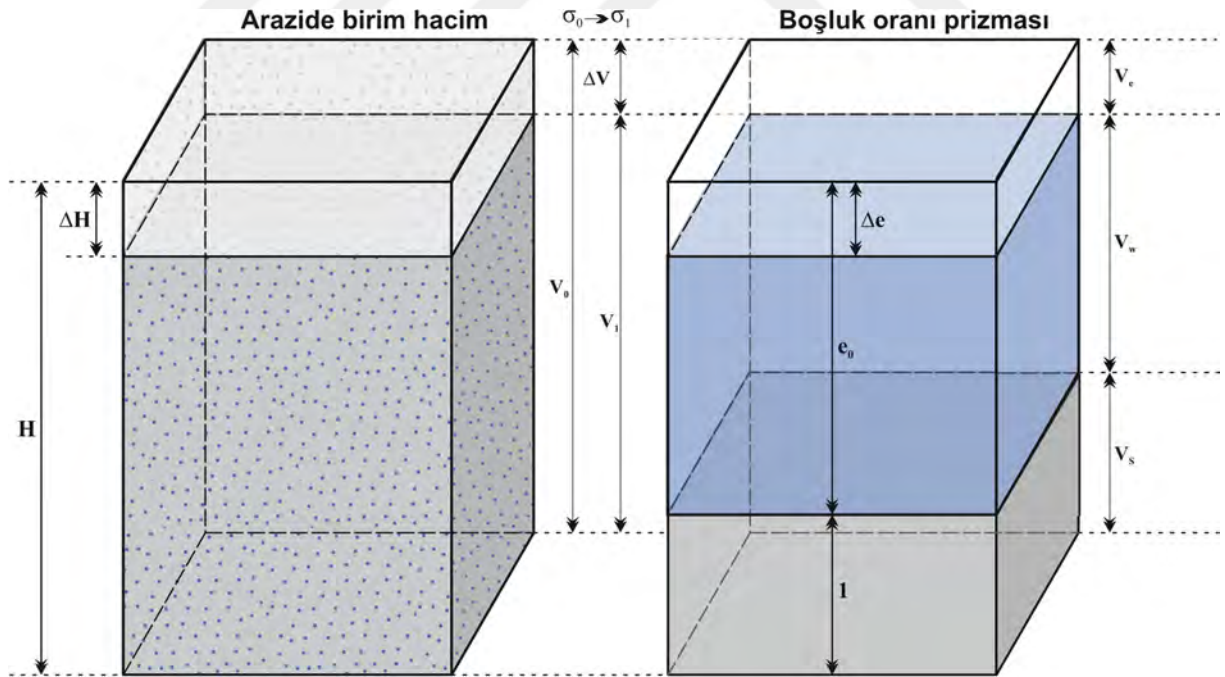
durumunda birim şekil değiştirme, dolayısıyla tabaka kalınlığı değişimi  $\Delta H$  Denklem (2.64)'le verilebilir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H} \rightarrow \Delta H = \varepsilon H \quad (2.64)$$

Buna paralel olarak, bozulmamış bir laboratuvar numunesi aynı efektif gerilme artışına maruz kalırsa,  $e_0$  başlangıç boşluk oranı  $\Delta e$  kadar azalacaktır. Bu durumdaki birim şekil değiştirme de Denklem (2.65)'le ifade edilebilir. Böylelikle, Denklem (2.64) ve Denklem (2.65) kullanılarak, tabaka kalınlığı değişimi  $\Delta H$ , Denklem (2.66)'da verilen boşluk oranı değişimi ve tabaka kalınlığı değişkenleriyle tanımlanabilir.

$$\varepsilon = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (2.65)$$

$$\Delta H = \frac{\Delta e H}{1 + e_0} \quad (2.66)$$

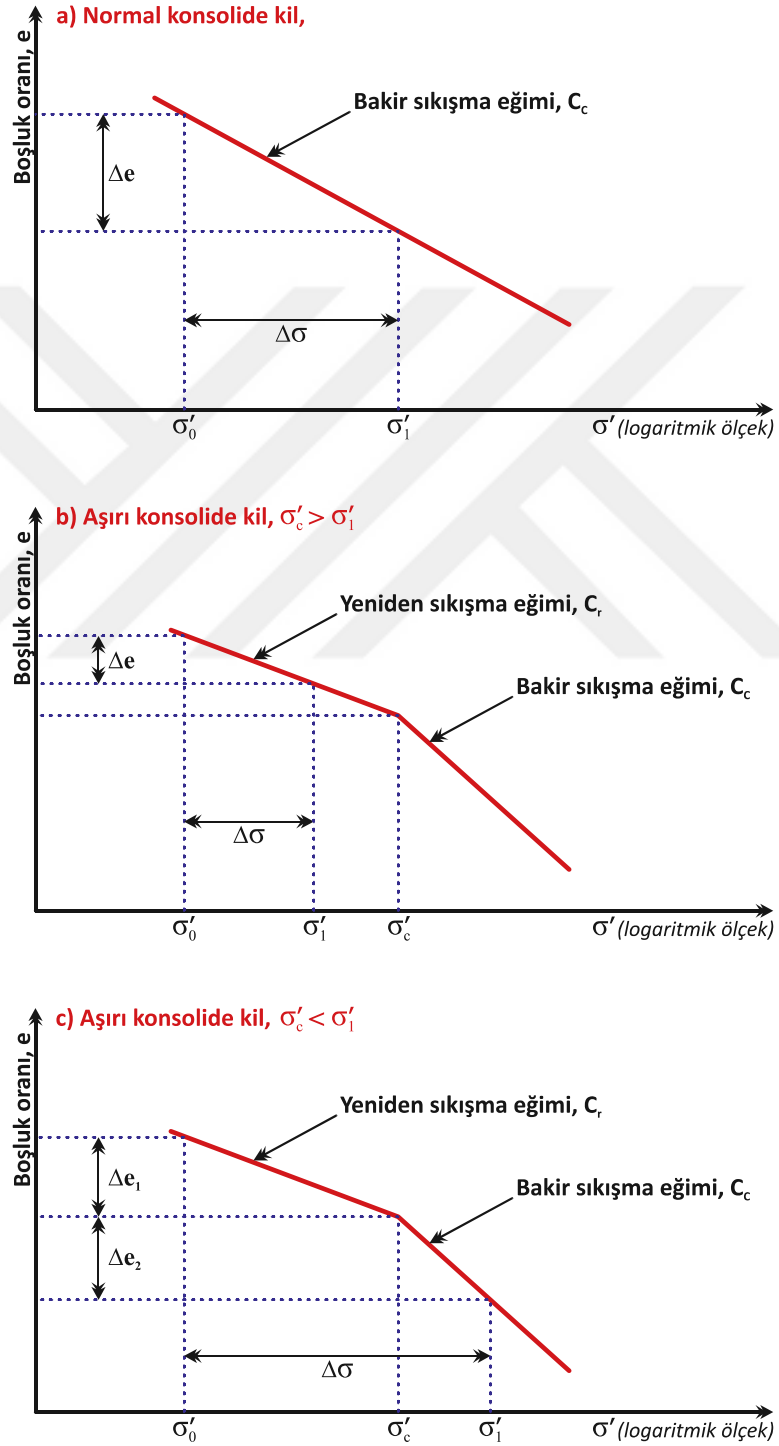


**Şekil 2.22:** Tek boyutlu konsolidasyon oturması miktarının hesabında temel prensip (Das ve Sobhan (2018)'den değiştirilerek alınmıştır).

Tabaka kalınlığı değişiminin, başka bir deyişle konsolidasyon oturması miktarının hesabında, Denklem (2.66)'da bir değişken durumunda olan boşluk oranı değişimi  $\Delta e$ , ödometre deneyi sonucu tipik efektif gerilme – boşluk oranı ilişkisinin gösterildiği Şekil 2.23 kullanılarak,

sıkışma indisi  $C_c$ , yeniden sıkışma indisi  $C_r$  ve efektif gerilme değişimi  $\Delta\sigma'$  ile tanımlanabilir.

Bu noktadan hareketle, boşluk oranı değişimi  $\Delta e$  için oluşturulan eşitlikler, normal konsolide killeri için Denklem (2.67)'ta, aşırı konsolide killeri için ise Denklem (2.68) ve Denklem (2.69)'de sunulmuştur.



Şekil 2.23: Boşluk oranı değişiminin hesabı (Das, 2008)

$$\Delta e = C_c \log \frac{\sigma'_1}{\sigma'_0} = C_c \log \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma'_0} \quad (2.67)$$

$$\sigma'_1 < \sigma'_c \rightarrow \Delta e = C_r \log \frac{\sigma'_1}{\sigma'_0} = C_r \log \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma'_0} \quad (2.68)$$

$$\sigma'_0 < \sigma'_c < \sigma'_1 \rightarrow \Delta e = \Delta e_1 + \Delta e_2 = C_r \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + C_c \log \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma}{\sigma'_c} \quad (2.69)$$

Birincil konsolidasyon oturması miktarının hesabında, Denklem (2.66)'da bir değişken olarak verilen boşluk oranı değişiminin, artan efektif gerilme altındaki davranışının tanımlanması, çözüme temel oluşturmaktadır. Bu hesaplamalarda, Denklem (2.67), Denklem (2.68) ve Denklem (2.69)'den de görüleceği üzere, efektif gerilme artışına bağlı boşluk oranı değişiminin tanımlanması, normal konsolide zeminlerde sıkışma indisi  $C_c$  'nin belirlenmesiyle mümkündür. Aşırı konsolide zeminlerde ise ayrıca, yeniden sıkışma indisi  $C_r$  'nin belirlenmesi gerekmektedir.

Normal konsolide zeminler için boşluk oranı  $e$ 'ye karşı  $\log \sigma$  grafiğinin eğimi, sıkıştırma indisi  $C_c$  olarak adlandırılır. Bu noktadan hareketle, Şekil 2.23.a'dan sıkışma indisini Denklem (2.70) 'le tanımlamak mümkündür. Buna paralel olarak, yeniden sıkışma indisi  $C_r$  ise, Şekil 2.23.c'den Denklem (2.71)'le tanımlanabilir.

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \sigma'_2 - \log \sigma'_1} = \frac{\Delta e}{\log(\sigma'_2 - \sigma'_1)} \quad (2.70)$$

$$C_r = \frac{e_c - e_0}{\log \sigma'_c - \log \sigma'_0} = \frac{\Delta e_c}{\log(\sigma'_c - \sigma'_0)} \quad (2.71)$$

Sıkışma indisi ve yeniden sıkışma indisinin hesaplanması için seçilen efektif gerilme ve boşluk oranı noktalarının nasıl belirleneceği, ön konsolidasyon basıncının belirlenmesi için yapılan birçok çalışmada tanımlanmıştır. Aynı zamanda, sıkışma indisinin ( $C_c$ ) ve yeniden sıkışma indisinin ( $C_r$ ) belirlenmesi amacıyla, boşluk oranı, kıvam limitleri ve poroziteyi içeren, korelasyonlar önerilmiştir (Tablo 2.2 ve Tablo 2.3).

**Tablo 2.2:** Sıkışma indisi için korelasyonlar

| Referans                 | Bağıntı                                         | Açıklamalar                       |
|--------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Terzaghi ve Peck (1967)  | $C_c = 0.009 (W_L - 10)$                        | Örselenmemiş kil                  |
|                          | $C_c = 0.007 (W_L - 10)$                        | Örselenmiş kil                    |
| Nacci ve diğ. (1975)     | $C_c = 0.02 + 0.015 (I_p)$                      | Kuzey Atlantik kili               |
| Azzouz ve diğ. (1976)    | $C_c = 0.01w_N$                                 | Şikago kili                       |
|                          | $C_c = 0.0046 (W_L - 9)$                        | Brezilya kili                     |
|                          | $C_c = 1.21 + 1.005 (e_0 - 1.87)$               | Sao Paulo şehrinde alacalı killer |
|                          | $C_c = 0.208e_0 + 0.0083$                       | Şikago kili                       |
|                          | $C_c = 0.0115w_N$                               | Organik zemin, turba              |
| Wroth ve Wood (1978)     | $C_c = 0.5G_s [(I_p) / 100]$                    | Tüm killer                        |
| Rendon-Herrero (1983)    | $C_c = 0.141G_s^{1.2} [(1 + e_0) / G_s]^{2.38}$ |                                   |
| Nagaraj ve Murthy (1985) | $C_c = 0.2343 (W_L / 100) G_s$                  |                                   |
| Kulhawy ve Mayne (1990)  | $C_c = (I_p) / 74$                              | Ortalama $G_s = 2.7$              |
| Park ve Koumoto (2004)   | $C_c = n_0 / (371.747 - 4.275n_0)$              |                                   |

$W_L$ : Likit limit (%),  $I_p$ : Plastisite indisi (%),  $w_N$ : Doğal su içeriği (%),  $e_0$ : Yerinde boşluk oranı,  $n_0$ : Porozite,  $G_s$ : Özgül ağırlık

**Tablo 2.3:** Yeniden sıkışma indisi için korelasyonlar

| Referans                 | Bağıntı                               | Açıklamalar                        |
|--------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Nagaraj ve Murthy (1985) | $C_r = 0.0046e_L$                     | Örselenmiş kil                     |
| Nakase ve diğ. (1988)    | $C_r = 0.0019(I_p - 4.6)$             | Yeniden oluşturulmuş denizel zemin |
| Kulhawy ve Mayne (1990)  | $C_r = (I_p) / 74$                    | Ortalama $G_s = 2.7$               |
| Kootahi (2017)           | $C_r = 0.054 (e_0 - 0.3)$             | Örselenmemiş örnek                 |
|                          | $C_r = 0.0014 (w_n - 0.3)$            |                                    |
|                          | $C_r = 0.0017 (W_L - 21)$             |                                    |
|                          | $C_r = 0.0025 (I_p - 3)$              |                                    |
|                          | $C_r = 0.0021 (e_0 + 0.06W_L - 1.6)$  |                                    |
|                          | $C_r = 0.0033 (e_0 + 0.04I_p - 0.55)$ |                                    |

$W_L$ : Likit limit (%),  $I_p$ : Plastisite indisi (%),  $w_N$ : Doğal su içeriği (%),  $e_0$ : Yerinde boşluk oranı,  $e_L$ : Likit limitteki boşluk oranı

Mesri ve Choi (1985) oturma hesaplarında, kil tabakasının belirli kalınlıklara bölünerek, oluşturulan her alt tabaka için sıkışma indisinin ödometre deneyi ile elde edilecek eğrilerden saptanabileceğini belirtmiştir. Robinson ve Allam (2003)'a göre ise kil ve siltte,  $e - \log \sigma'$  grafiği her zaman doğrusal olmamakta, yüksek plastisiteli killerde basıncın artmasıyla, sıkışma indisinin düşmektedir. Plastik olmayan siltlerde ise basınç artışıyla, sıkışma indisi artmaktadır.

Leroueil ve diğ. (1988) drenajsız dolguların arazideki konsolidasyon davranışında, özellikle deformasyon hızı ve sıcaklığın etkili olduğunu belirterek, standart ödometre deneyi sonuçlarına dayanan deformasyon hesaplarına, Denklem (2.72) verilen  $\Delta \varepsilon_s$  deformasyonunun ilave edilmesini önermişlerdir. Leroueil (1996) üç farklı test dolgusunda çalışmasını yenilemiş ve bu deformasyon ilavesinin, drenaj koşulları kötü, yüksek plastisiteli ve yapılanmamış killer için yapılan hesaplamalarda kullanılmasının daha doğru olacağını belirtmiştir.

$$\Delta \varepsilon_s = \frac{C_c}{m(1+e_0)} \left[ \log(6 \times 10^{-7}) - \log \left( \frac{0.16ku'_0}{\gamma_w H^2} \right) \right] \quad (2.72)$$

Denklem (2.72)'te; değeri yaklaşık 32 alınması önerilen deformasyon hızı faktörü  $m$ , permeabilite katsayısı  $k$ , başlangıçtaki ilave boşluk suyu basıncı  $u'_0$  ve maksimum drenaj uzunluğu  $H$  ile gösterilmiştir.

Bowles (1996)'e göre, zeminlerde yük artışıyla birlikte, drenajsız durumda gerçekleşen elastik oturma yedi gün içinde gerçekleşmektedir. Konsolidasyon oturması ise üç veya dört yıl sürebilmektedir. Oldukça aşırı bir örnek olarak, yapımına 1173 yılında başlanan Pisa Kulesi'nde, inşaatının ilk aşamalarından başlayarak 2001 yılına kadar, birçok kez yapılan teknik müdahalelere rağmen, 800 yılı aşkın bir süre oturma devam etmiştir. Pratikte, zamana bağlı yerleşimlerin çoğu 3 ila 10 yıl arasında gerçekleşir, ancak mühendislik projeleri genellikle oturma süresinin daha dar bir zaman içerisinde sınırlanmasını gerektirir (Bowles, 1996). Bu nedenle, oturma miktarının belirlenmesi kadar, hangi hızla oturacağını bilmesi dolgu tasarımı için önemlidir.

Konsolidasyon oturmasının hızı, boşluk suyu basıncının sönümlenme hızı ile ilişkilidir. İlave boşluk suyu basıncının sönümlenme hızı, Terzaghi (1943) tarafından tanımlanan, konsolidasyon katsayısı  $C_v$ 'ye dayanan, zaman – konsolidasyon ilişkisiyle tahmin edilebilmektedir. Konsolidasyon katsayısı  $C_v$  ise ödometre deneyi sonuçlarından, hesaplanabilmektedir (Casagrande ve Fadum, 1940; Taylor, 1942; Su, 1958; Sivaram ve Swamee, 1977; Sridharan ve Prakash, 1985, 1993; Robinson ve Allam, 1996). ASTM International (2011) ise standartta Casagrande ve Fadum (1940) ile Taylor (1942) yöntemlerini, kullanılması gereken iki alternatif olarak sunmaktadır. Ödometre deneyi sonuçlarından grafiksel yöntemlerle yapılabilen bu hesapların yanı sıra Raju ve diğ. (1995) başlangıçtaki

efektif gerilme ve likit limitteki boşluk oranı ile konsolidasyon katsayısının belirlenmesi için ampirik korelasyon önermiştir. Ancak, Duncan (1993), 33 farklı test verisi ile yaptığı değerlendirmede, Taylor (1942) metodu ile yapılan hesaplamalarda elde edilen konsolidasyon katsayısının, Casagrande ve Fadum (1940) metoduyla hesaplananlara göre, ortalama 1.66 olmak üzere, 3.43 kata kadar daha büyük olduğunu belirtmiştir. Yazarlara göre, iki yöntem arasında, çoğu durumda, laboratuvar deney verileri ile geleneksel konsolidasyon teorisi kullanılarak tahmin edilen konsolidasyon oranlarının, sahada gözlemlenen gerçek konsolidasyon oranlarından daha küçük olduğu düşünüldüğünde,  $C_v$ 'nin hesabı için Taylor (1942) yöntemi kullanılması uygun olacaktır. Böylelikle, hesaplanan konsolidasyon oranı daha büyük olacağından, tahmini ve ölçülen oturma oranları arasındaki uyum genellikle iyileştirilecektir.

Konsolidasyon sürecinde, ön konsolidasyon basıncından sonraki gerilme durumlarındaki  $C_v$  değeri, önceki gerilme durumlarına göre önemli miktarda azalmaktadır. Başka bir deyişle, zemin ön konsolide olduktan sonra konsolidasyon hızı azalmaya başlamaktadır. Pratikte, ödometre deneyinden belirlenen konsolidasyon katsayısı  $C_v$  ile Denklem (2.16) kullanılarak hesaplar yapılmakta olmasına karşın, ilave boşluk suyu basıncının, kil tabakası içinde derinlikle değişim modeli ve yükün oluşturulma süresinin konsolidasyon zamanına etkisi göz ardı edilmemelidir.<sup>2</sup>

### 2.1.2. Araştırma Alanı ile İlgili Çalışmalar

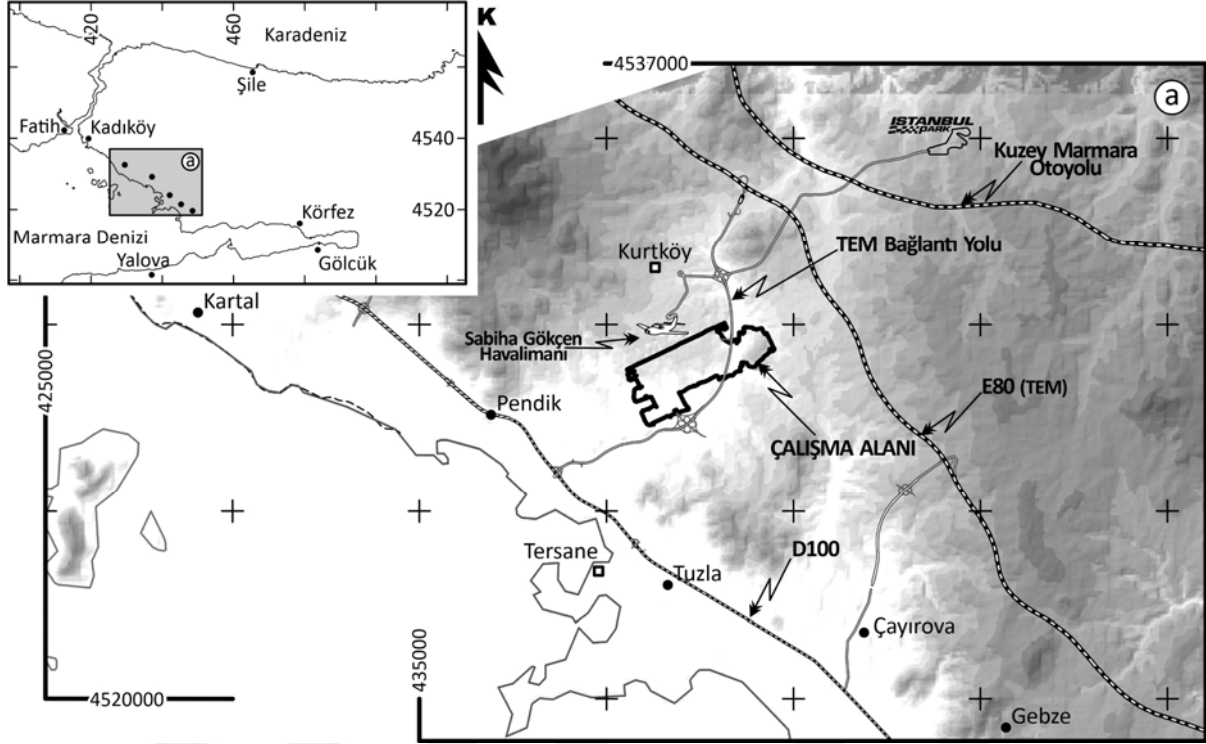
Hedeflenen çalışmaların yapılabilmesi amacıyla, Sabiha Gökçen Havalimanı ilave pist ve pist yardımcı alanları, çalışma sahası olarak seçilmiştir. Sabiha Gökçen Havalimanı, İstanbul İli, Anadolu yakası güneyinde, Pendik ve Tuzla ilçe sınırları içerisinde bulunmaktadır (Şekil 2.24). Havalimanında hâlihazırda 1 adet pist ve yardımcı alanları bulunmaktadır. Mevcut havalimanı yapılarına ek olarak 2. Pist, yardımcı pist, taksi yolları, apron ve buz çözme alanları ile bu alanların ICAO (2009, 2018) kriterlerine göre zorunlu, yardımcı alanları oluşturulacaktır.

Araştırma alanı ile ilgili önceki çalışmalar kapsamında aşağıdaki başlıklar altında; öncelikle alanın jeolojisini çeşitli ölçekte ortaya koyan çalışmalar sunulmuştur. Sonrasında, havalimanı

<sup>2</sup> İlave boşluk suyu basıncının derinlikle değişim modeli 2.1.1.1. Başlığı, yükün oluşturulma süresinin etkisi ise 2.1.1.2. Başlığı altında sunulmuştur.



ilave pist ve pist yardımcı alanlarının oluşturulması amacıyla yapılmış olan fizibilite ve avan proje çalışmaları değerlendirilmiştir.



Şekil 2.24: Çalışma alanı konumu

#### 2.1.2.1. İnceleme Alanında Yapılan Jeolojik Çalışmalar

Çalışma alanı ve çevresinde yapılan son yıllardaki jeolojik çalışmalar kapsamında, 1/50000 ölçek düzeyinde jeoloji haritası Gedik ve diğ. (2005), 1/25000 ölçekli jeoloji haritası Özgül (2005), 1/2000 ölçekli jeoloji haritası ise T.C. İstanbul Büyükşehir Belediyesi adına OYO International Corporation (2009) tarafından hazırlanmıştır. Özgül (2005) tarafından yapılan çalışma ve bu çalışmayı temel alan OYO International Corporation (2009) çalışmasındaki litolojik birimler, Gedik ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmadaki litolojik birimlerden, formasyon ve üye bazında farklı sınıflanmış ve adlanmıştır.

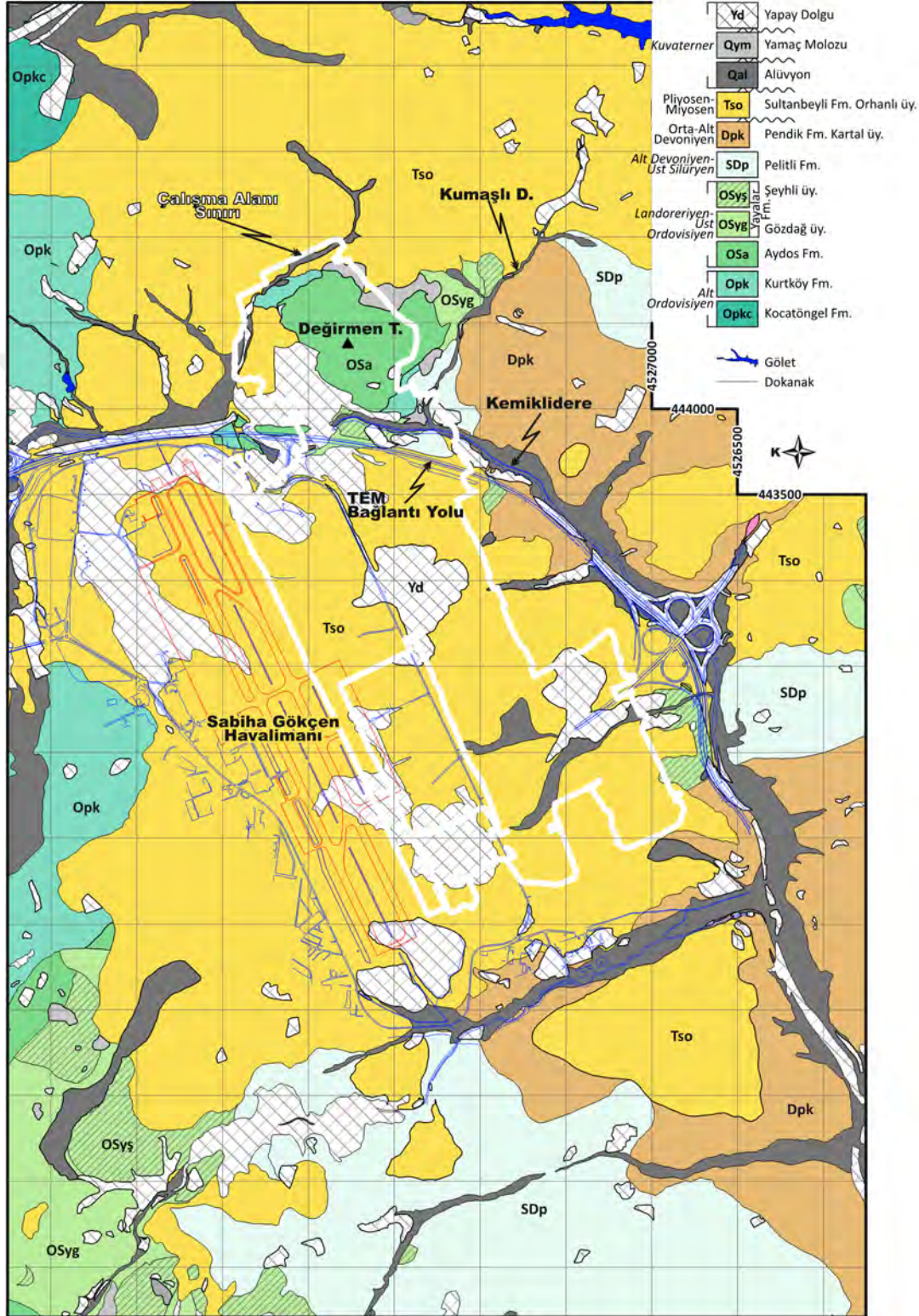
Çalışma alanı ve yakın çevresinde, Gedik ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmaya göre, Kurtköy, Aydos, Gözdağ, Dolayoba, İstinye, Kartal, Kayalıtepe ve Meşetepe formasyonları ile bu formasyonlar üzerinde Alüvyon alanları yüzeylenmektedir. Özgül (2005) tarafından yapılan çalışmada ise, çalışma alanında yüzeylenen en yaşlı birim Polenezköy Grubu (Op) olarak değerlendirilen Kocatöngel ve Kurtköy formasyonlarıdır. Bu birimler üzerine uyumlu olarak

sırasıyla, Aydos, Yayalar, Pelitli, Pendik formasyonları gelmektedir. Sultanbeyli Formasyonu, Alüvyon, Yamaç Molozu ve Yapay Dolgu ise tüm birimleri uyumsuz olarak üzerlemektedir.

Özgül (2005) çalışmasından yararlanılarak, 1/2000 ölçekli OYO International Corporation (2009) tarafından yapılan çalışmaya göre en yaşlı birim, laminalı miltaşı, kıltaşı ve ince taneli kumtaşından oluşan Kocatöngel Formasyonu'dur (Şekil 2.25). Alanın kuzey doğu kesiminde yüzeylenen birim koyu yeşil, yeşilimsi gri, boz miltaşı – kıltaşı formasyonun egemen kaya türünü oluşturmaktadır. Alt Ordovisiyen yaşlı, buzul yada buzul çevresi koşulların etkin olduğu ortam özellikleri gösteren, 1500 m – 2000 m arası kalınlığa sahip formasyon, il alanında açığa çıkmadığından, alt dokanak özelliği bilinmemesinin yanında Kurtköy Formasyonu tarafından uyumlu geçişli olarak üstlenilmektedir (Özgül, 2005).

Özgül (2005) tarafından Polenezköy Grubu içerisinde tanımlanan ikinci litostratigrafi birimi olan Kurtköy Formasyonu, mor renkli kumtaşı, çamurtaşı – şeyl ve çakıltaşı ardalanmasından oluşmaktadır. Haas (1968) tarafından "Kurtköy Tabakaları" olarak adlandırılmış, Kaya (1978) tarafından "Kurtköy arkoz birimi", Önalın (1980, 1982) tarafından "Kurtköy Formasyonu" adı altında incelenmiştir. Gedik ve diğ. (2005) formasyonun, genelde açık mor, grimsi mor, kırmızı ve nadiren yeşilimsi gri renkli, orta-kalın tabakalı, feldispatlı kumtaşı, çakıllı kumtaşı, kumlu çakıltaşı, çakıltaşı, subarkoz ve koyu mor-bordo renkli, laminalı, feldispatlı şeyl ardalanmasından oluştuğunu belirtilmiştir. Özgül (2005), kumtaşı ara katkılı miltaşlarının egemen olduğu formasyonun alt kesimini Bakacak üyesi, çakıltaşı ara katkılı kumtaşlarının egemen olduğu üst kesimini ise Süreyyapaşa üyesi olarak değerlendirmiş ve Kocatöngel Formasyonu ile geçişli tanımlamıştır. Önalın (1981) çalışmasında, eski akıntı yönü ölçüm analizlerine göre, Kurtköy Formasyonu'nun yaklaşık olarak kuzeydoğudan granitik ve metamorfik bir temelden beslendiğini, örgülü ve menderesli akarsu çökelleri ile temsil edildiğini belirtmiştir. Yine aynı çalışmada, altta Bakacak Formasyonu ile dereceli geçişli olan birimin, üstte Aydos Formasyonu ile uyumlu olduğu tanımlanmıştır. Bakacak Formasyonu ile olan dokanağını belirlemek oldukça zor olup, bu formasyonu oluşturan grimsi yeşil kumtaşı-mor renkli şeyllerin tümüyle mor renge dönüşmesiyle Kurtköy Formasyonu başlamaktadır (Önalın, 1982). Gedik ve diğ. (2005) göre kalınlığının en çok 1000 metreye kadar ulaşan formasyonun kaya türleri arasında yanal ve dikey yönde değişimler gözlenir. OYO International Corporation (2009) çalışmasına göre, çalışma alanı kuzey doğu kesiminde

yüzeylenen ve herhangi bir fosile rastlanmayan formasyonun yaşını, Gedik ve diğ. (2005) önceki çalışmaları değerlendirerek, Alt Ordovisiyen olarak belirtmiştir.



**Şekil 2.25:** Çalışma alanı ve yakın çevresi jeoloji haritası (OYO International Corporation (2009)'dan düzenlenerek alınmıştır.).

Kurtköy formasyonu üzerine uyumlu olarak gelen ve kuvars kumtaşı ile kuvars çakıltaşından oluşan Aydos Formasyonu ilk kez Kaya (1978) tarafından Aydos kuvarsarenit birimi olarak adlanmış, Önalın (1981) ise bu adlamayı Aydos Formasyonu olarak değiştirmiştir. Formasyon, Gedik ve diğ. (2005) ile OYO International Corporation (2009) alışmalarına göre, çalışma alanı kuzeyinde ve çalışma alanı içerisinde doğu sınırı ile TEM Bağlantı Yolu arasındaki kesimde yüzeylenmektedir (şekil 2.25). nalın (1981, 1982), birimin genel olarak beyaz, açık gri, bej ve kırmızı-mor renkli, ince-kalın tabakalı, silis çimentolu, kuvars kumtaşı ve kuvars çakıltaşından oluştuğunu belirtmiştir. Alt kesimi pembemsi mor renkli, silttaşı – şeyl ara tabakalı kuvars kumtaşı biçimindedir. Birimde ara seviyeler halinde tektr tane bileşenli kuvars çakıltaşları gözlenir (nalın, 1982). Özgül (2005) ise çalışmasında birimin alt seviyelerinin değişken kalınlıklarda çakıltası seviyeleriyle temsil edildiğini belirtmiş ve bu seviyeleri Başıbüyük yesi olarak tanımlamıştır. Aynı araştırmacı kumtaşı – amurtaşı ara seviyeli kuvarsit düzeyleri ise Kınalıada yesi değerlendirmiştir. Eski akıntı yönleri analizi, birimin kuzey – kuzeydoğudan, granitik ve metamorfik bir kaynak alandan beslendiğini ve fosil içeriği ise kıyı ortamı çökeli olduğunu göstermektedir (nalın, 1981, 1982). Formasyon stte Gözdağ Formasyonu ile geçişli olup kalınlığı 10 – 100 m arasında değişen formasyon önemli bir yanal değişim göstermez (Gedik ve diğ., 2005). Çalışma alanında ve yakın çevresinde Gedik ve diğ. (2005)'ne göre formasyon, Gözdağ Formasyonu tarafından geçişli üstlenmesinin yanında, bu formasyonla faylı dokanak da belirlenmiştir. Formasyonun yaşını, Gedik ve diğ. (2005), önceki çalışmaları değerlendirerek, Erken Ordovisiyen olarak belirtmiştir.

Çalışma alanında kumtaşı (grovak) ve şeyl arđalanmasından oluşan Gözdağ Formasyonu, nalın (1980, 1982) tarafından adlanmıştır. Birimin st seviyelerinde yer alan ve Kaya (1978) tarafından "şeyhli Subarkoz Birimi", nalın (1980, 1982) tarafından da "Aydınlı formasyonu" olarak adlandırılan merceksel geometrilili feldispatlı kuvars kumtaşları, Gedik ve diğ. (2005) tarafından "Aydınlı yesi" olarak değerlendirilmiştir. Gözdağ Formasyonu genel olarak yeşilimsi gri, gri, altere olmuş kesimleri sarımsı kahverengi renkli, ince tabakalı ve laminalı silttaşı – şeyl ile koyu yeşil ve yeşilimsi gri renkli, ince – orta tabakalı kumtaşı arđalanmasından oluşur (Gedik ve diğ., 2005). st seviyeleri mor, kahverengi ve gri renkli silttaşı – şeyl arđalanması karakterindedir. Bu düzey merceksel geometrilili, feldispatlı kuvars kumtaşları (subarkozlar) ile oolitlik şamozitler içerir. Gedik ve diğ. (2005), birimin st düzeylerinde yer alan merceksel geometrilili subarkozlar "Aydınlı yesi", oolitlik şamozitli kesimler de "Umurdere yesi" olarak değerlendirmiştir. Özgül (2005) tarafından ise formasyonu, Gözdağ, şeyhli ve

Umurdere üyesi olarak alt litostratigrafik birimlere ayrılmış ve Yayalar formasyonu adı altında incelenmiştir. Gedik ve diğ. (2005) çalışmasına göre Gözdağ, Özgül (2005) tarafından yapılan çalışmaya göre ise Yayalar Formasyonu olarak tanımlanan birim, çalışma alanı doğu kesiminde TEM Bağlantı Yolu doğusunda ve çalışma alanı dışında alanın kuzey batısında geniş alanlarda yüzeylenmektedir. Özgül (2005) tarafından, kırmızı bordo ve yeşilimsi renkli şeyl düzeyleri Umur Deresi üyesi, yer yer büyük mercekler halinde feldspatlı kuvarsit düzeyleri ise Şeyhli üyesi olarak ayırtlanmıştır. Önal (1982), Gözdağ Formasyonu olarak adlanan birimin, üstte Dolayoba Formasyonu ile geçişli olduğunu, Özgül (2005) ise Dolayoba Formasyonunu üye mertebesinde değerlendirerek, birimi uyumlu olarak Pelitli Formasyonunun takip ettiğini belirtmiştir. Özgül (2005) tarafından sunulan çalışmaya göre Yayalar Formasyonu, yaklaşık 250 m kalınlıkta Gözdağ, yaklaşık 50 m kalınlıkta ise Şeyhli ve Umurdere üyelerinden oluşmaktadır.

Çalışma alanında, farklı araştırmacılar tarafından Dolayoba formasyonu veya Dolayoba üyesi düzeyinde ayırtlanan, alttan üste genel olarak kumtaşı, şeyl ve feldspatlı kuvarsit düzeylerini, genelde açık gri renkli, resifal kireçtaşları yüzeylenmektedir. Bu birim çalışma alanı güneydoğu kesiminde, TEM Bağlantı Yolu doğusunda Kemiklidereyi besleyen Kumaşlı Dere boyunca gözlenmektedir. Bu kireçtaşı birimi Gedik ve diğ. (2005) tarafından formasyon düzeyinde Dolayoba Formasyonu olarak, Özgül (2005) ve OYO International Corporation (2009) tarafından ise Pelitli Formasyonu Dolayoba Kireçtaşı üyesi olarak ayırtlanmıştır (Şekil 2.25). Birim, Halysites ve brakiyopodlu kireçtaşı litolojisi ile “Dolayoba kireçtaşı” olarak Kaya (1978) tarafından adlandırılmış, Önal (1981) tarafından ise formasyon düzeyinde değerlendirilmiştir. Birim genelde açık gri ve yer yer pembe, yer yer de açık kahve renkli, ince – kalın tabakalı resifal kireçtaşlarından oluşmaktadır (Gedik ve diğ., 2005). Altta Gözdağ, üstte İstinye formasyonları ile dereceli geçişli olan birimin kalınlığı 100 m dolayındadır (Gedik ve diğ., 2005). Birim Özgül (2005) tarafından Pelitli formasyonu içerisinde üye bazında değerlendirilmiş olup, kalınlığı yaklaşık 30 m’dir. Fosil içeriğini temel alan önceki çalışmaları değerlendiren Gedik ve diğ. (2005) tarafından formasyonun Paleozoyik zamanı Silüryen dönemi olarak benimsenmiş, üye düzeyinde tanımlanan Özgül (2005) tarafından yapılan çalışmada da buna paralel olarak Üst Silüryen yaşı benimsenmiştir. Özgül (2005) Pelitli Formasyonu yaşını ise Üst Silüryen – Alt Devoniyen olarak tanımlamıştır.

Çalışma alanı dışında ancak batı alanın kesiminde geniş alanlar kapladığı, Gedik ve diğ. (2005) tarafından belirtilen İstinye Formasyonu, Sedefadası, Gebze ve Kaynarca üyeleri, Özgül (2005) tarafından yapılan çalışmada da tanımlanmış ancak Pelitli Formasyonu içerisinde üye düzeyinde ayırtlanmıştır. Bu birimler, çökelme ortamı ve buna bağlı litolojik farklılıklar içeren kireçtaşı egemen birimler olarak tanımlanan bu litostratigrafi birimleri Alt Devoniyen – Üst Silüryen yaşlıdır (Gedik ve diğ., 2005; Özgül, 2005, 2011; Özgül ve diğ., 2005).

Yukarıda tanımlanan birimler üzerine, Gedik ve diğ. (2005)'ne göre Kartal Formasyonu, Özgül (2005)'e göre ise Pendik Formasyonu Kartal üyesine ait koyu gri, yer yer koyu yeşilimsi, ayrılmış boz-açık kahverengi, ince-orta katmanlı, bol mikalı şeyller egemen litostratigrafi birimi gelmektedir. Çalışma alanında yüzeylendiği kesimlerde, kendineden yaşlı birimlerle genellikle faylı sınır ilişkisi bulunan Kartal Formasyonu, alt düzeyleri yer yer kireçtaşı arakatlı grovak ile şeyllerle, orta düzeyleri çoğunlukla kireçtaşı aratabakalı kireçli grovak ile şeyllerle ve üst kesimlerinde ise nadiren kireçtaşı ara seviyeli şeyllerle temsil edilmekte olup, Önalın (1988) tarafından tanımlanmıştır. Formasyon altta İstinye Formasyonu üstte ise Büyükada formasyonu ile dereceli geçişli olup kalınlığı 750 m dolayındadır (Gedik ve diğ., 2005). Formasyonun yaşı, Paeckelmann (1938), Baykal (1962), Haas (1968), Gandl (1973), Carls (1973), Babin (1973), Kullmann (1973) ve Önalın (1982) çalışmalarında Alt – Orta Devoniyen devri olarak belirtilmiştir. Benzer litolojik ve yaş özellikleriyle ayırtlanan kaya türü, Özgül (2005)'e göre, Kaya (1973) tarafından Pendik Grubu Kartal Formasyonu olarak ayırtlanması ve adlamada öncelik kuralları gereği, istifin bütününe kapsayacak şekilde Pendik Formasyonu Kartal Üyesi olarak adlanması daha uygun olacaktır.

Çalışma alanında Paleozoik birimler üzerine uyumsuzlukla Üst Oligosen – Alt Miyosen yaşlı, litostratigrafi birimleri gelmektedir (Şekil 2.25). Bu birimler çalışma alanı ve yakın çevresinde geniş alanlarda yüzeylenmekte, çalışma alanı dâhilinde ise TEM Bağlantı Yolu batı kesimini büyük çoğunlukla kaplamaktadır. Büyük bölümü kil-mil-ince kum boyu ince gereçten oluşan özelliğiyle Özgül ve diğ. (2005) ve OYO International Corporation (2009) tarafından Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi olarak ayırtlanmıştır. Birim, bazı bölgelerde, özellikle çökelme ortamının kıyıya yakın kesimlerinde, taban kayadan türemiş, kum-çakıl ve blok boyutunda tutturulmamış kaba gereç mercek ve arakatlıklarını içerir. Çökelme ortamının kıyıda uzak kesimlerindeki istiflerin tümüne yakınında, değişen oranda kireç konkresyonlu kil-mil boyu ince gereç egemendir (Özgül, 2005). Sultanbeyli Formasyonu'nu Kuşdili



Formasyonu ve Güncel birikintiler tarafından uyumsuzlukla üstlenir. Değişken taban topoğrafyasına bağlı olarak Orhanlı Üyesi'nin birim kalınlığı 150 m'ye varmaktadır (Özgül ve diğ., 2005). OYO International Corporation (2009) tarafından yapılan çalışmada, sondajlardan formasyon bazında alınan örneklerle Üst Miyosen – Pliyosen yaşı belirlenmiştir.

Çalışma alanında Sultanbeyli Formasyon'un yüzeylendiği alanlar Gedik ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmada alttan üste doğru, Kayalıtepe ve Meşetepe formasyonları olarak ayırtlanmıştır. Bu çalışmada, TEM bağlantı yolunun doğu kesiminde geniş alanda yüzeylelendiği belirtilen Kayalıtepe formasyonu, zayıf tutturulmuş kuvars kumtaşı ve çakıltaşları litolojisiyle ayırtlandığı belirtilmiştir. Aynı çalışmada, formasyonun kalınlığı en fazla 100 m, yaşı ise Üst Oligosen – Alt Miyosen olarak tanımlanmıştır. Gedik ve diğ. (2005)'ne göre, Kayalıtepe formasyonu'yla düşey ve yanal yönde geçişli olarak tanımlanan Meşetepe formasyonu'nu ise, genel olarak yeşil, yeşilimsi gri, gri ve kirli beyaz renkli, ince tabakalı, kömürlü, şeyl, marn, silttaşı ve kilitaşı ile merccekler halinde bulunan beyaz, kızılımsı kahverengi ve yer yer kırmızı-pembe renkli, çapraz tabakalı, zayıf tutturulmuş kuvars kumtaşı ve çakıltaşından oluşmaktadır. Birim aynı araştırmacılara göre; en fazla 100 m kalınlığında görülmekte ve üstte aşınmalı olup bazı alanlarda Kuvaterner dönemi birimleri tarafından örtülmektedir. Birimin yaşı ise Üst Oligosen – Alt Miyosen çağı olarak tanımlanmaktadır.

#### **2.1.2.2. Fizibilite ve Avan Proje Çalışmaları**

Havalimanı projelendirmesinde öncelikli çalışma, hedeflenen trafik kapasitesinin tespiti, bu trafiği oluşturacak uçak tip ve sınıflarının, hedeflenen trafikteki oranlarıyla birlikte belirlenmesidir. Havalimanı altyapısının planlamasında, belirlenen bu özellikler, proje bileşenlerinin en önemlisi olan, pist ve yardımcı alanlarının, sayı, boyut ve konumlarının belirlenmesinde temel oluşturmaktadır. Oluşturulan hava tarafı planında, hedeflenen ve işletmeye alınması planlanan tarihlerdeki trafik hacmi esas alınarak, meydanın gerekli standartlarda işletimini sağlamak amacıyla, performans kriterlerinin kontrolü için, farklı uçuş takvimi senaryolarıyla simülasyonlar gerçekleştirilir. Yapılan simülasyon çalışmaları sonucu gerekli plan revizeleri ile son şeklini alan hava tarafı planı doğrultusunda, planın uygulanacağı alan ve çevresinde altyapı çalışmaları belirlenerek projelendirilir.

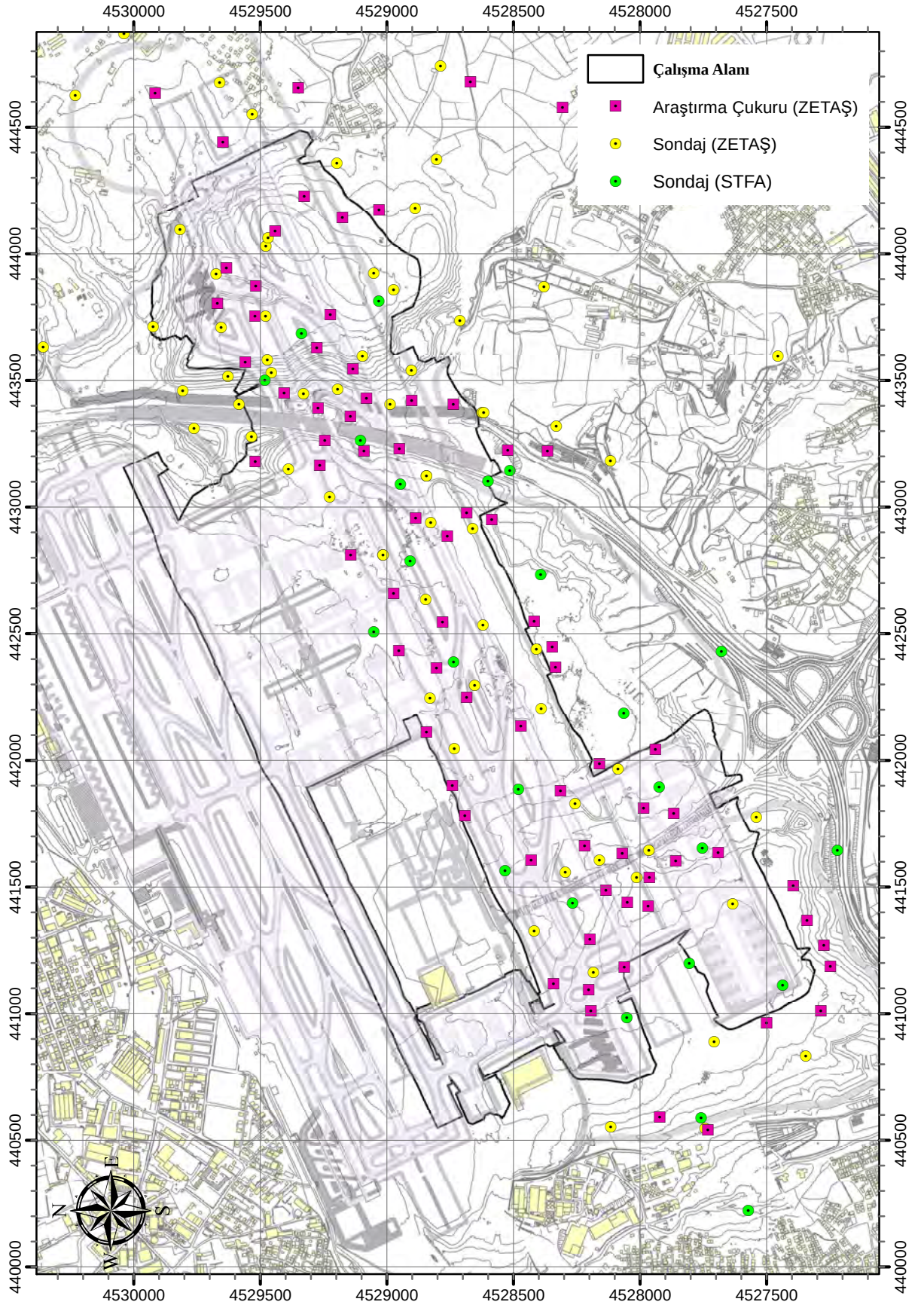
Tez kapsamında hedeflenen çalışmaların yapılabilmesi amacıyla seçilen, Sabiha Gökçen Havalimanı geliştirme çalışmaları, 2009 yılında ARUP (2009) tarafından, havalimanının 2028

yılı planlaması için yapılan çalışma ile başlamıştır. Bu çalışma sonucunda, havalimanı gelişimi için en büyük bileşen, 2. Pistin ilave edilmesi olarak belirlenmiştir. Önerilen 3500 metrelik yeni pist uzunluğu ise B747, B777 ve A380 gibi büyük uçakların çalışmasını destekler niteliktedir. Çalışmada, mevcut pistin 1100 metre güneyinde ve buna paralel olarak belirlenen pist konumu, iki pistin de bağımsız şekilde işlemesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, ilgili işlerin arasında bağlantılı taksi yolları, orta sahaların gelişimi ve apron için platform önerileri bulunmaktadır.

İlave pist ve pist yardımcı alanlarında, fizibilite çalışmaları STFA (2010) ve Oakman ve diğ. (2010), avan proje çalışmaları ise ZETAŞ (2011) ve Oakman ve diğ. (2011) tarafından gerçekleştirilmiştir. Uygulama projeleri, Makyol İnş. San. Turz. ve Tic. A.Ş. tarafından yapılmış olup, projenin tüm safhaları T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü (DHMI) ile Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü (AYGM) kontrollüğünde yürütülmektedir. Oakman ve diğ. (2011) tarafından gerçekleştirilen avan proje çalışmaları kapsamında altyapı planı oluşturulmuş ve önerilen plan doğrultusunda oluşturulacak platformlar için, jeoteknik çalışmalar kapsamında gerekli hafriyat ve dolgu alanları değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, fizibilite ve avan proje kapsamında elde edilen, tez konusu ile ilgili çalışma sonuçları aşağıda sunulmuştur.

Fizibilite çalışmaları kapsamında, STFA (2010) tarafından yapılan çalışmada, 50 m ile 100 m derinlikleri arasında değişen 24 adet zemin araştırma sondajı açılmıştır. Bu çalışmada, sondajlardan alınan örnekler üzerinde indeks ve mekanik laboratuvar deneylerinin yanı sıra, 5 adet sondajda yeraltı suyu ölçümleri yapılmıştır. Avan proje çalışmaları kapsamında ise alanda ZETAŞ (2011) tarafından yürütülen çalışma, avan proje yüklenicisi olan ARUP ile koordineli bir şekilde yürütülmüştür. Bu çalışmada ise, jeolojik haritalamanın yanı sıra, 78 adet zemin araştırma sondajı ve 83 adet zemin araştırma çukuru açılmıştır. Zemin araştırma sondajlarından elde edilen örnekler üzerinde laboratuvar deneyleri, presiyometre ve yerinde geçirimsizlik testleri gerçekleştirilmiştir. Yeraltı suyu değişimlerini sürekli izlenmesi amacıyla 74 adet zemin araştırma sondajında yeraltı suyu ölçümleri Ocak 2011 ve Mayıs 2011 tarihleri arasında yapılmıştır.





**Şekil 2.26:** Fizibilite ve Avan Proje çalışmalarındaki zemin araştırma sondajı ve araştırma çukuru lokasyonları.



Havalimanı avan projesi Oakman ve diğ. (2011) tarafından ICAO standart uygulamaları ve önerileri ile Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (IATA) önerileri doğrultusunda, ZETAŞ (2011) tarafından yürütülen jeolojik – jeoteknik çalışmanın sonuçları kullanılarak oluşturulmuştur. Avan proje kapsamında, hava tarafı ana yapıları olarak sayılabilecek, birer adet ilave pist, yardımcı pist ve paralel taksiyolu ile 3 adet yeni apron alanı planlanmıştır (Şekil 2.27).

Avan proje çalışmalarına göre, ilave pist ve yardımcı alanlarında, genel olarak 10 m ile 20 m yüksekliği arasında değişen, ancak bölgesel olarak 44.27 m yüksekliğe varan dolgu yapılması gereklidir. Proje alanı doğu kesiminde ise, 750 m’yi geçen bir uzunluk boyunca Marmaray depo alanının bir kısmının ve Paleozoik birimlerde ise 29.78 m yüksekliklere varan bir kesimin, hafredilerek kaldırılması gerekmektedir (Oakman ve diğ., 2011). Çalışmada, toplam kazı hacmi bitkisel toprak dâhil olmak üzere 15,300,000 m<sup>3</sup>, dolgu hacmi ise kaplama ve granüller dolgu dâhil 40,400,000 m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir.



**Şekil 2.27:** 2028 yılı hava meydanı altyapısı planı, bakış yönü kuzeydoğu (Oakman ve diğ., 2011)

Oakman ve diğ. (2011) tarafından yapılan avan proje çalışmasında, alan dâhilindeki jeolojik birimler; dolgu zemin, bitkisel toprak, alüvyon, kolüvyum, ayrılmış Neojen, Neojen, ayrılmış

paleozoik tabaka, paleozoik tabaka ve volkanik kayaç sokulumları olmak üzere 9 farklı grupta sınıflanmıştır (Tablo 2.4). Tespit edilen kalınlıkları ve başlangıç derinlikleri Tablo 2.4'te verilen bu birimler arasında, Neojen birimler üzerinde, kolüvyal birimin 4 m, alüvyonun 8.5 m, bitkisel toprağın 0.5 m ve dolgu zeminin ise 70 m kalınlığa ulaştığı belirtilmiştir.

**Tablo 2.4:** Oakman ve diğ. (2011) tarafından yapılan çalışmada, jeoteknik zemin modeli jeolojik birimleri, birim derinlikleri ve kalınlıkları

| Tabaka                            | Tabaka üst sınırı derinliği<br>(m) | Kalınlık<br>(m) |
|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------|
| Dolgu Zemin                       | 0.0                                | 0 – 70          |
| Bitkisel Toprak                   | 0.0                                | 0.0 – 0.5       |
| Alüvyon                           | 0.2 – 0.5                          | 0.0 – 8.5       |
| Kolüviyum                         | 0.2 – 0.5                          | 0.0 – 4.0       |
| Ayrışmış Neojen                   | 0.2 – 0.5                          | 0.0 – 15.0      |
| Neojen                            | 1.0 – 10.0                         | 0.0 – >100      |
| Ayrışmış Paleozoik Tabaka         | 0.2 – 0.5                          | 0.0 – 25.0      |
| Paleozoik Tabaka                  | 0.2 – >100 m                       | –               |
| Volkanik Kayaç Sokulumları (Dayk) | 29.0                               | 1.0             |

Çalışma alanı boyunca yaygın olarak rastlanan ve bölgesel olarak Neojen birimlerdeki kazılardan çıkan malzemenin alana yayılması ile oluşan kil birim, Oakman ve diğ. (2011) tarafından yapılan çalışmada, dolgu zemin kapsamında değerlendirilmiştir. Ayrıca, çalışma alanında dolgu zemin olarak gruplandırılan birim içerisinde, lokal olarak gözlenen, inşaat artığı ve çöp atıkları bulunmaktadır. Aynı çalışmada, alanın doğusunda, belediye atık depo alanı ve bu alan altında bulunan Marmaray silt deposuda, dolgu zemin grubunda değerlendirmeye alınmıştır.

Oakman ve diğ. (2011) tarafından yapılan çalışmada, alüvyon birim, biraz kum ve çakılla birlikte genel olarak, orta katı – katı, düşük plastisiteli kil olarak tanımlanmıştır. Aynı çalışmada, kolüvyal birim, Paleozoik tabakanın üzerinde uzanan ince bir rezidüel katman olarak tanımlanmıştır. Bu birimin yayılımı, genel olarak Aydos ve Yayalar Formasyonu kuvarsit kumtaşlarının mostra verdiği, Paleozoik tabakanın kuzey alanıyla sınırlıdır. Ayrışma profilinden kolayca ayırt edilmediğinden, kolüviyum Pendik Formasyonunun mostra verdiği Paleozoik tabakanın güney alanında belirgin olarak tanımlanamamaktadır. Genellikle, ayırt edici kırmızı – kahverengi renge sahip kolüvyal birimin kalınlığı, Oakman ve diğ. (2011) tarafından yapılan çalışmada, yaklaşık 1.0 m – 1.5 m olmakla birlikte, yer yer 4.0 m.ye kadar kalınlığıyla, orta katı – katı, çakıllı kil olarak tanımlanmıştır. Kolüvyal malzeme Kuaterner

döneme ait olup, Paleozoik tabakanın mostraları dışında ortaya çıkan Neojen tabakasından çok daha gençtir.

Çalışma alanında, önerilen ilave pistin büyük kısmının altında geniş alan kaplayan, Gedik ve diğ. (2005) tarafından Kayalıtepe Formasyonu (Tomk) ve Meşetepe Formasyonu (Tomm), OYO International Corporation (2009) tarafından ise Sultanbeyli formasyonu olarak ayırtlanan birimler, Oakman ve diğ. (2011) tarafından yapılan fizibilite çalışmasında, Neojen birim olarak ele alınmıştır. Bu çalışmaya göre; Neojen birimi, yapılan saha çalışmalarında ve zemin araştırma sondajlarında, ayrışmamış kesimlerde, ince ila orta çakıllı, çok katı ila sert, açık kahverengi, genellikle kalkerli siltli kumlu kilden oluşur. Bu kalkerli malzeme, özellikle derinde olmak üzere, Neojene çimentolanma özelliği kazandırmakta ve özellikle birimin alt seviyeleri kilaşı olarak tanımlanmaktadır. Neojen birim, çalışma alanının kuzey kesiminde, killi kum, kısmen çakılla temsil edilir. Tüm birim içinde, kalkrit oluşumları düzensiz bir şekilde yayılım göstermekle birlikte, çalışma alanı batı ve kuzeybatı kesiminde, birim içerisindeki oranı %40 seviyesine kadar çıkmaktadır. Kalkrit nodüllerin daha sık olduğu bu alanlarda, birim daha yüksek geçirimsizliğe sahiptir ve potansiyel olarak akifer özelliği göstererek, önerilen ilave pist alanındaki kaynakları beslemektedir (Oakman ve diğ., 2011). Oakman ve diğ. (2011) tarafından, bu Neojen birim üzerindeki, kahverengi, katı, siltli kumlu kilden oluşan birim ise Ayrışmış Neojen olarak gruplanmıştır. İklim koşulları ve esasen kalsiyum karbonat bileşenin ortamdaki uzaklaşması ile oluşan ayrışmış zon çalışma alanı güneybatı kesiminde 1.0 m kalınlığa varmaktadır. Çalışmada, bu ayrışma zonunun, drenaj alanı ile yüzeysel kaynak alanlarında yoğunlaştığı ve lokal olarak bu alanlarda 10 m kalınlığa ulaştığı, ayrıca, orta – katı kıvamlı zayıflık zonları ortaya çıkarttığı belirtilmiştir.

Avan proje kapsamında Oakman ve diğ. (2011) tarafından yapılan çalışmada Ordovizyen - Devoniyen dönemi sedimanter birimleri Paleozoik Kayalar olarak gruplanmıştır. Bu grup içinde değerlendirilen birimler, Pendik, Pelitli, Yayalar, Aydos ve Kurtköy Formasyonları olarak tanımlanmış ve çalışma alanının güney – güneybatı ile doğu kesiminde yüzeylendiği veya Neojen birimler altında yer aldığı belirtilmiştir.

Avan proje çalışmalarında, ayrıntıları Tablo 2.5'te verilen, bu çalışmadan önce ve çalışma kapsamında yapılan, saha ile laboratuvar deneyleri sonuçları değerlendirilmiştir. Oakman ve diğ. (2011) tarafından yapılan bu çalışma kapsamında, gruplanan jeolojik birimlere yönelik,

gerekli olan mukavemet ve kıvam özellikleri ile indeks özellikler tanımlanmıştır. Çalışmada elde edilen ve tez kapsamında değerlendirilen verilere bu tezin 4. Bölümünde değinilmiştir.

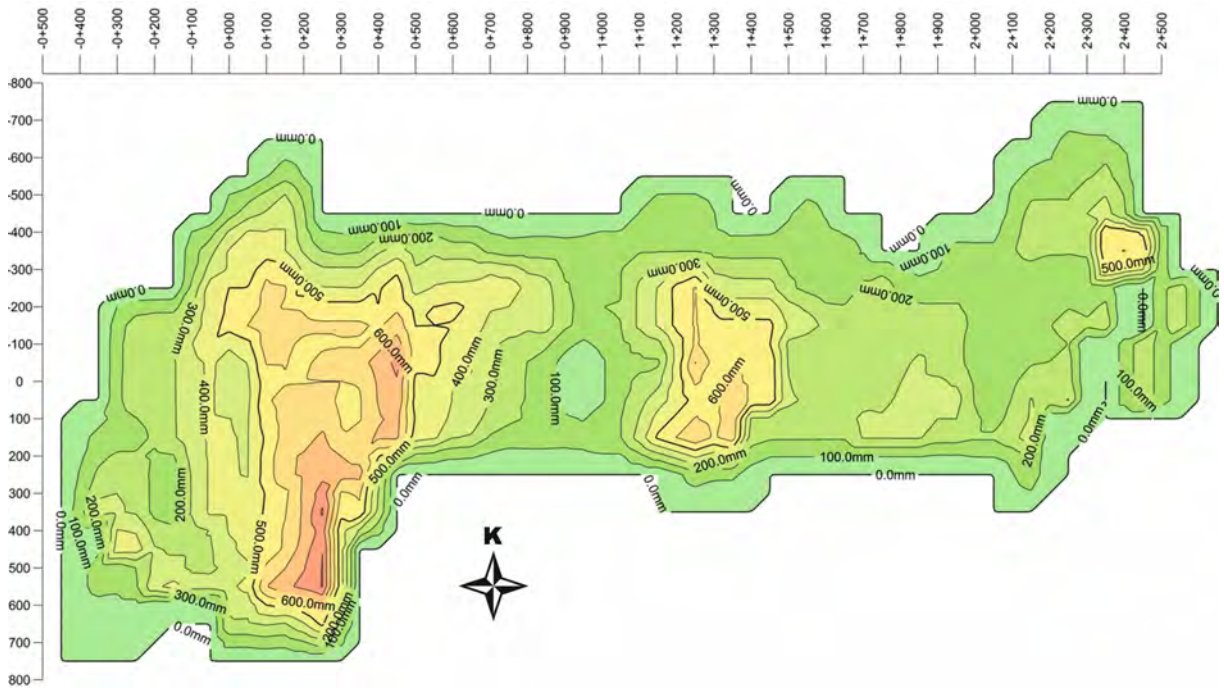
**Tablo 2.5:** Avan proje kapsamında değerlendirmeye alınan arazi ve laboratuvar deneyleri (Oakman ve diğ., 2011)

| Deney Türü                         | STFA (2007) | OYO<br>International<br>Corporation<br>(2009) | STFA (2010) | ZETAŞ<br>(2011) |
|------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------|-------------|-----------------|
| <b>Arazi Deneyleri</b>             |             |                                               |             |                 |
| In Situ Kanatlı Kesici             |             |                                               |             | x               |
| Plaka yükleme                      |             |                                               | x           | x               |
| Kum konisi                         |             |                                               | x           | x               |
| Değişken seviyeli geçirimsizlik    |             |                                               | x           | x               |
| Packer geçirimsizlik               | x           |                                               | x           | x               |
| Menard presiyometre                | x           |                                               | x           | x               |
| Standard penetrasyon               | x           | x                                             | x           | x               |
| <b>Laboratuvar Deneyleri</b>       |             |                                               |             |                 |
| Su muhtevası                       | x           | x                                             | x           | x               |
| Atterberg limitleri                | x           | x                                             | x           | x               |
| Elek/Hidrometre                    | x           | x                                             | x           | x               |
| Doğal birim hacim ağırlığı         | x           |                                               | x           | x               |
| Kuru birim hacim ağırlığı          |             |                                               | x           | x               |
| Özgül ağırlık                      | x           |                                               | x           | x               |
| Serbest basınç                     | x           |                                               | x           | x               |
| Üç eksenli basınç (UU)             | x           | x                                             | x           | x               |
| Üç eksenli basınç (CU)             |             | x                                             | x           | x               |
| Zeminde direk kesme                |             |                                               |             | x               |
| California taşıma oranı            | x           |                                               |             | x               |
| Standart/modifiye proktor          |             |                                               |             | x               |
| Los Angeles                        |             |                                               |             | x               |
| Tek boyutlu konsolidasyon          | x           | x                                             | x           | x               |
| Şişme basıncı                      |             | x                                             |             |                 |
| Tek eksenli basınç dayanımı (kaya) |             |                                               | x           | x               |
| Nokta yükleme                      |             |                                               |             | x               |
| Kimyasal testler (sülfat) zemin/su |             |                                               | x           | x               |
| Organik madde içeriği              |             |                                               |             | x               |
| Kalsiyum karbonat içeriği          |             |                                               |             | x               |
| Kireç ıslahı uygunluk              |             |                                               |             | x               |

Avan proje çalışması sonucu, yapımı önerilen ilave pist ve yardımcı alanlarının kapladığı alanda yapılacak mühendislik dolgusu nedeniyle, 90 cm seviyesine varan konsolidasyon oturmasının gerçekleşebileceği öngörülmüştür (Şekil 2.28). Hesaplanan oturma miktarlarının ilk 1 yıllık süreçte %20 – %40 oranında gerçekleşeceği, oturma hızında zaman bağlı azalma nedeniyle 10 yıllık bir süreç içinde oturmaların tamamlanmayacağı belirlenmiştir. Çalışmada, inşaat sonrası farklı oturma miktarı için yapılan hesaplamaların sonucunda ise, en büyük eğim kriteri %0.25 olarak kabul edilmiş ve havalimanı 10 yıllık bakım periyodu içerisinde, farklı

oturma kaynaklı olumsuzlukların giderilmesi için, ilave bakım ihtiyacının ortaya çıkacağı sonucuna varılmıştır.

Oakman ve diğ. (2011) tarafından yapılan bu değerlendirmeler sonucunda, dolgu zemin ve alüvyonun birimin tamamının havalimanı toprak işlerinin kapladığı alan altından kaldırılması önerilmiştir. Çalışma kapsamında, Neojen Birim olarak tanımlanan alanların bir bölümünde ise 3 m aralıklı, 15 m boyunda, dikey kum drenlerin oluşturulması önerilmiş, ancak, bu uygulamanın, dren uygulamasının yapılmadığı alanlarla olan geçiş bölgelerinde, farklı oturmalarla yol açabileceği, bu konunun ayrıntıda çalışılması gerektiğine dikkat çekilmiştir.



**Şekil 2.28:** Çalışma alanı batı kesiminde hesaplanan oturma miktarlarının alansal değişimi (Oakman ve diğ., 2011)

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

Dolgu yükü altında konsolidasyon miktarının sınırlandırılmasına yönelik geliştirilen ve proje alanında uygulanan yöntem için yapılan çalışmalar, zamansal anlamda birbiriyle girift olmakla birlikte, büro ve arazi çalışmaları olmak üzere iki aşamada yürütülmüştür. Arazi çalışması için gerekli verilerin derlenmesi ve arazi çalışmaları sonrası verilerin analizi ve yöntem kontrollünü kapsayan büro çalışmaları ile geliştirilen yöntem öncesi ve sonrasında yapılan arazi çalışmalarına ait metodoloji, aşağıdaki başlıklar altında ayrıntılarıyla sunulmuştur.

#### 3.1. BÜRO ÇALIŞMALARI

Büro çalışmaları, öncelikle, tez konusunun bilimsel altyapısını oluşturan, konsolidasyon oturması miktarına ve konsolidasyon zamanına yönelik literatür araştırmalarıyla başlanmıştır. Literatür çalışmaları, konsolidasyon olayında etkin parametreler olan, yükün derinlikle değişimi, yükleme koşullarının gerilme değişimine etkisi, yeraltı suyu hareketi ve yük altında oturma hesaplamaları gibi çeşitli çalışmaların araştırılmasıyla devam etmiştir. Ayrıca, bu çalışma sırasında, konsolidasyon olayının proje kriterleri ile uyum sağlamadığı durumlarda yapılan iyileştirme çalışmalarına yönelik literatür değerlendirilmiştir. Konsolidasyon, etkin parametreler ve iyileştirme konusunda literatür çalışmalarının yanı sıra, tez konusu çalışma alanı olarak seçilen proje ve bölge özelinde yapılmış olan literatür çalışmaları incelenmiştir.

Büro çalışmaları kapsamında, literatür çalışmalarıyla eşzamanlı olarak, arazi çalışmalarına altlık oluşturacak şekilde, literatür verileri sayısallaştırılmış, Autocad Civil 3D ve ArcMap yazılımları kullanılarak veri tabanı oluşturulmuştur. Sayısallaştırma çalışmalarında, proje uygulama yüklenicisi firma tarafından 0.015 m hassasiyette alınan koordinat ölçümleri kullanılarak, ITRF96 koordinat sisteminde üretilmiş olan güncel hâlihazır harita altlık olarak kullanılmış ve bu harita verileriyle, uygulama öncesi durumu yansıtan, üç boyutlu topoğrafik arazi modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan veri tabanı, yapılan tüm arazi ve büro çalışmalarıyla eşzamanlı olarak, elde edilen verilerin üç boyutlu korelasyonunun sağlanması amacıyla, tez çalışması süresince güncellenmiştir.

Tez çalışması büro çalışmaları kapsamında, önerilen iyileştirme yönteminin kontrol ölçümlerinin yapılabilmesi amacıyla, uygulama projelerinin sonuçlandırılmasını takiben ve inşa faaliyetlerine başlanması öncesinde ölçüm sistemi oluşturulmuştur. Ölçüm sistemi elemanları olarak, dolgu yükü altındaki zeminlerde oturma miktarının zamansal bazda değerlendirilmesine imkân tanıyan oturma kolonları ve nihai uygulama kotunda oluşturularak, yapılan mühendislik dolgusu dâhil tüm oturma miktarının milimetre hassasiyetinde ölçümüne imkân tanıyan oturma plakaları seçilmiştir.

Tez çalışması kapsamında, dolgu yükü altında konsolidasyon miktarının sınırlandırılmasına yönelik geliştirilen yöntemin analiz ve kontrol süreçleri sonucu elde edilen veriler, gerekli proje kriterleri ve standartlar gözetilerek, büro çalışmaları kapsamında değerlendirilmiştir. Böylelikle, yapılan analizler ile arazi ölçümleri sonucu elde edilen veriler karşılaştırılarak, yöntemin doğruluğu, kullanılabilirliği, sınırlamaları ve proje maliyetine etkileri ortaya konulmuştur.

Uygulama Projesinin Özellikleri başlığı altında ayrıntılarıyla açıklanacağı üzere, çalışma alanı yaklaşık 4,130,000 m<sup>2</sup>'dir ve topoğrafik kotlar 35.90 m ile 119.49 m arasında değişmektedir. Dizayn kotlarının sağlanması amacıyla, inceleme alanının yaklaşık 2,800,000 m<sup>2</sup>'lik kesimi; tasarım gereği, 44.27 m yüksekliğe varan, kontrollü kaya dolguyla doldurulacak, geri kalan alanda ise kazı çalışmalarıyla proje kotları teşkil edilecektir. Bu denli büyük bir proje alanında mevcut bilgisayar yazılımlarıyla alanın tümünün gerekli hassasiyette modellenmesi ve analizi mümkün değildir. Bu yönde, çalışma alanını bölümlere ayırmak ve ayrı ayrı yapılan analizleri birlikte yorumlamak bir seçenek olarak görülebilmesine karşın, bölümlerin birleştirilmesinde sorunlarla karşılaşılması kuvvetle muhtemeldir. Farklı bir yaklaşımla, alanı temsilen birbirine dik doğrultularda oluşturulan kesitler ve iki boyutlu yazılımlarla analiz mümkün olabileceği gibi, bu yöntemde, modelleme aşamasında büyük zaman kayıpları ve değerlendirme aşamasında zorluklar nedeniyle, uygulanabilir olmayacaktır. Bu nedenle, analizler için gerekli parametrelerinin elde edilmesini sağlayan ve bu parametreler ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçların alansal bazda çıktılarının oluşturulabileceği bir yöntem, alansal değerlendirme yöntemi olarak geliştirilmiştir.

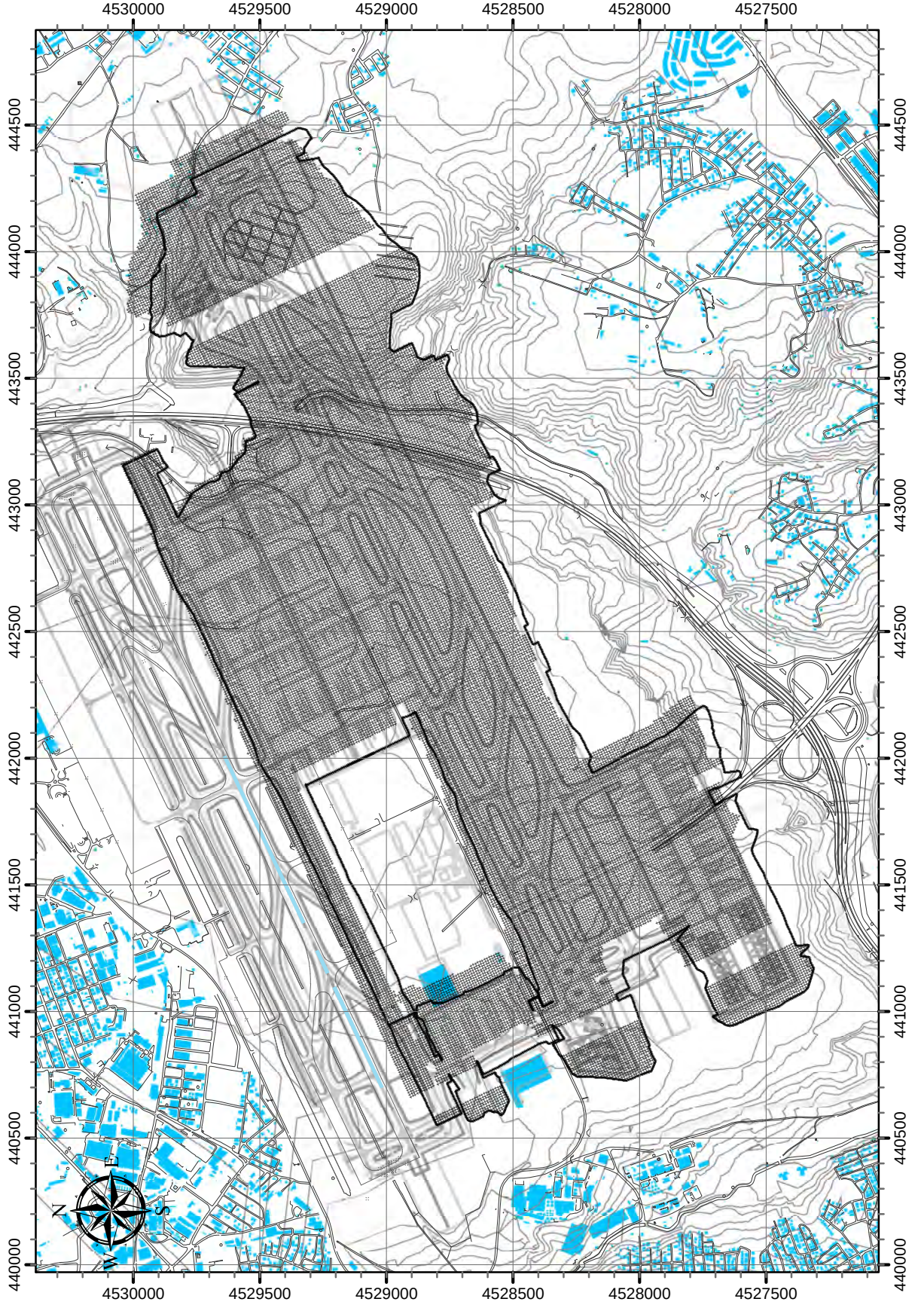


### 3.1.1. Alansal Değerlendirme Yöntemi

Alansal değerlendirme yönteminde, öncelikle, tüm proje alanı karelajlara ayrılmıştır. Karelajı oluşturan eksenler, ilave pist ve yardımcı pistler için oluşturulacak grafiklerde kolaylık sağlaması amacıyla, pist eksenini ve bu eksene dik doğrultularda seçilmiştir. Karelaj boyutları ise, analiz aşamasında bilgisayar kapasitesinin optimizasyonu ve farklı oturumların proje kriterleriyle kontrolünde kolaylık sağlaması amacıyla, 10 m x 10 m ölçülerinde belirlenmiş ve oluşturulan karelajın köşe noktaları birer hesap noktası olarak tanımlanmıştır. Bu hesap noktalarına, projede bileşeni ve jeolojik birim sınırlarında 5 m aralıklarla belirlenen noktalar ilave edilerek, tüm çalışma alanında 62,317 adet hesap noktası oluşturulmuştur (Şekil 3.1). Tüm bu işlemlerde, üç boyutlu koordinat sistemiyle çalışan, tablo işlemcisi Microsoft Excel ve CBS tabanlı yazılımlar ile veri alışverişine imkân tanıyan CAD yazılımı olarak, AutoCAD Civil 3D yazılımı kullanılmıştır.

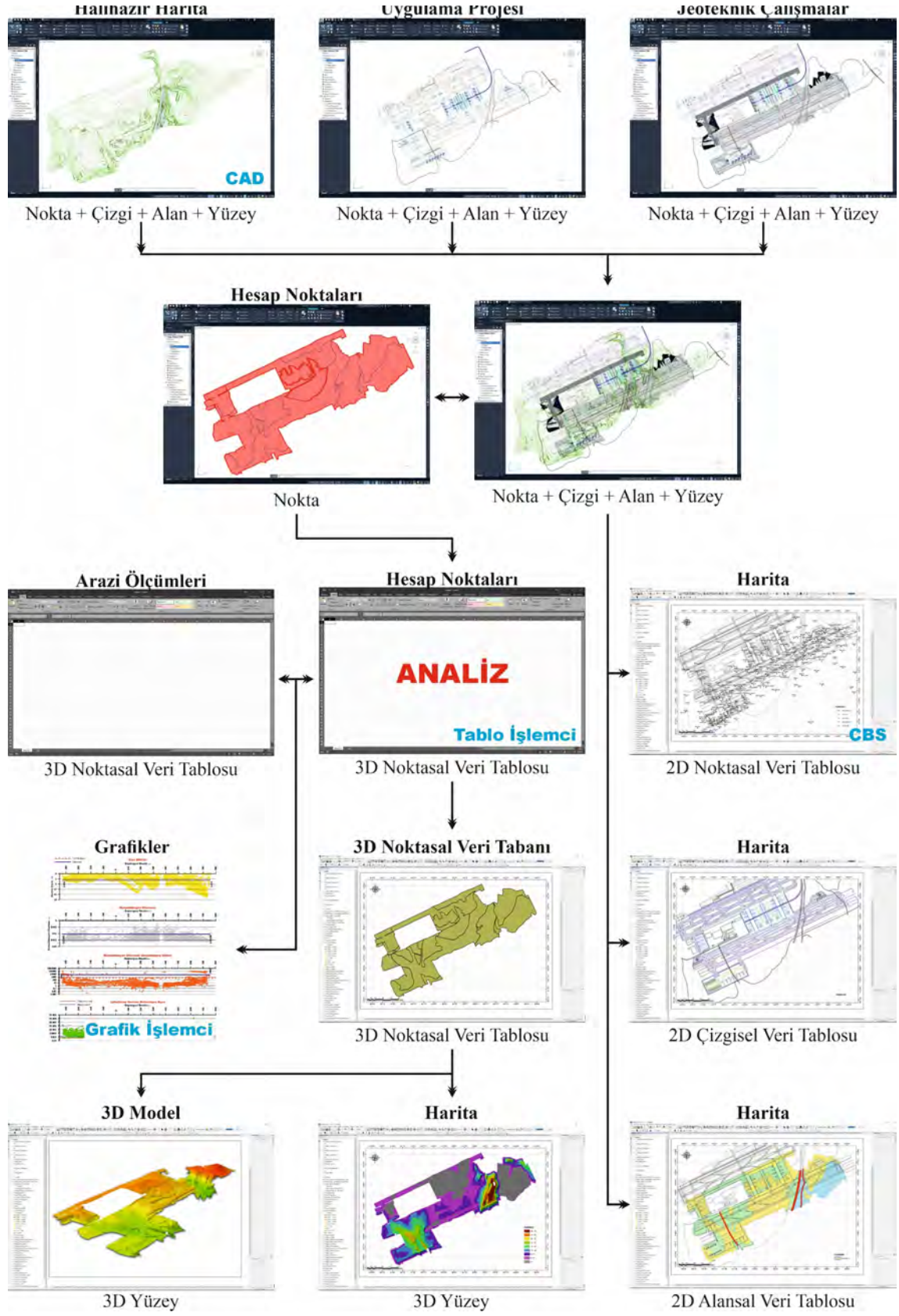
Yapılacak tüm analizlerde, jeolojik birim kalınlıkları, proje bileşenleri ve yapılacak imalat türü ile kotları birer parametre olarak kullanılacağından, oluşturulan hesap noktalarının bulunduğu koordinatlardaki bu parametrelerin noktasal bazda sınıflanabilmesi amacıyla, tüm hesap noktaları, proje özelliklerinin poligonlar ile sınıflandığı veri tabanına aktarılmıştır. Veri tabanında, noktasal bazda yapılan sınıflamalar sonucu el edilen veri tabanı, Microsoft Excel programında kullanılabilir hale getirilmiş ve yapılan analizlerde Microsoft Excel tabanlı oluşturulan yazılımla analizler gerçekleştirilmiştir.

Alansal değerlendirme yönteminde, yukarıda sunulan ve tüm bulguların noktasal bazda gruplanmasını amaçlayan aşama ve bu aşamayı takiben hazırlanan yazılımla yapılan her türlü analiz sonucu, tüm proje alanında birer nokta olarak temsil edilir duruma getirilmiştir. Böylelikle, her türlü sonuca haritalanabilir bir durum kazandırılmıştır. Noktasal bazda elde edilen her türlü verinin veya analiz sonucunun haritalanmasında ve yüzey modellemelerinde, yapılan işlemdeki performans üstünlükleri değerlendirilerek, AutoCAD Civil 3D ve ArcMAP yazılımları kullanılmıştır. Alansal değerlendirme yönteminin uygulanma aşamalarını özetleyen akış şeması Şekil 3.2’de sunulmuştur.



Şekil 3.1: Hesap noktalarının proje alanındaki dağılımı.





Şekil 3.2: Alansal değerlendirme yöntemi akış şeması.

### 3.2. ARAZİ ÇALIŞMALARI

Arazi çalışmaları kapsamında, öncelikle, proje alanı özelinde yapılmış olan önceki çalışmalardan da yararlanılarak, jeolojik birimlerin alansal yayılımlarının belirlenmesi amacıyla saha çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda, özellikle avan proje çalışmaları kapsamında dolgu zemin olarak tanımlanan, tamamının proje alanından uzaklaştırılması önerilen, kil birimlerin yayılımı ayrıntıda belirlenmiş ve ayrıca tüm birimlerin yayılımı 1/1000 ölçekte haritalanmıştır.

Tez çalışmalarının, literatür araştırması ve yöntem geliştirme süreci, Sabiha Gökçen Havalimanı 2. Pist ve yardımcı alanlarını kapsayan uygulama projelerinin hazırlanması süreciyle eş zamanlı olarak devam etmiştir. Bu doğrultuda, geliştirilen iyileştirme yöntemi analizlerinde temel oluşturacak parametrelerin alan genelinde uygun bir istatistiksel yaklaşımla gerekli doğrulukta tespiti ve elde bulunan verilerin ayrıntılı üç boyutlu korelasyonunun sağlanabilmesi amacıyla, uygulama projeleri yapım süreci içerisinde, ilave zemin araştırma sondajı ve araştırma çukuru lokasyonları arazi çalışmaları kapsamında belirlenmiştir.

Oakman ve diğ. (2011) tarafından yapılan avan proje kapsamında, kum drenler veya çimento iyileştirilmesi önerilen ve Neojen birimler olarak sınıflandırılan kil – kilaşı, birimlerin yayılım gösterdiği proje alanının batı kesiminde, deneme dolgusu yaptırılmıştır. Bu arazi çalışması ile Neojen birimlerin, arazi yükleme koşullarında konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Arazi çalışmaları kapsamında, analizlere imkân tanıyacak verilerin elde edilmesi çalışmaları, ölçüm süreçlerinin takibi ve çalışma alanının büyüklüğü nedeniyle öngörülemeyen, yerel bazda karşılaşılan değişimlerde uygulanacak yaklaşımların belirlenmesi, tez değerlendirme süreci içerisinde, saha çalışmaları kapsamında gerçekleştirilmiştir.

## 4. BULGULAR

Tez çalışması kapsamında, proje kriterleri, elde edilen veriler, konsolidasyon sürecinde etkin parametrelerin tespiti, geliştirilen iyileştirme yönteminin kriter, sınırlama ve başarı ölçütleri, alansal bazda yapılan değerlendirmeler ile birlikte, ölçüm sonucu elde edilen verilerin proje bölümleri bazında değerlendirmesi bu bölümde ayrıntılarıyla sunulmuştur.

### 4.1. UYGULAMA PROJESİNİN ÖZELLİKLERİ

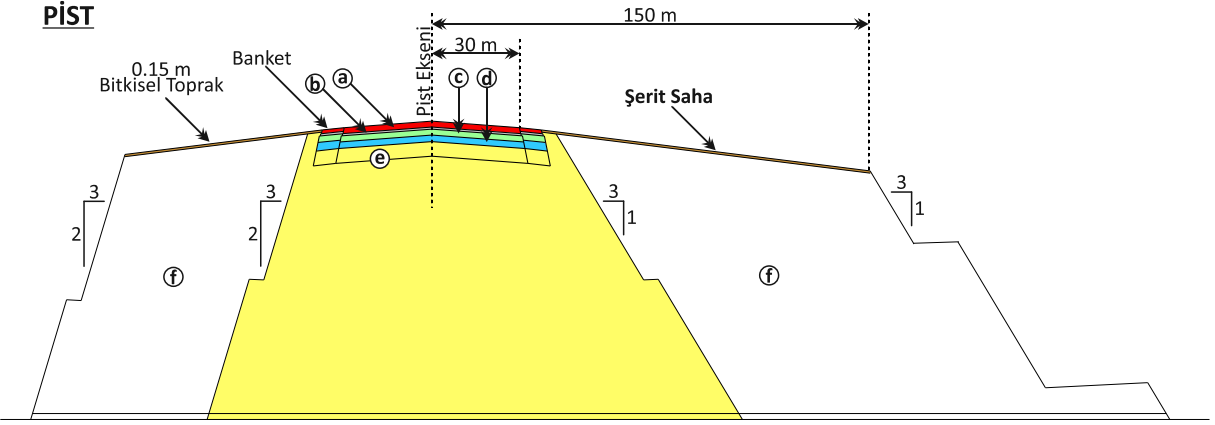
Dolgu yükü altında meydana gelen konsolidasyon sürecinin değerlendirilmesinde, kil birimler üzerinde 44.27 m yüksekliğe varan dolgu inşası ile önemli bir uygulama projesi olan Sabiha Gökçen Havalimanı Geliştirme Projesi, İstanbul İli, Pendik İlçesi sınırları içerisinde bulunan, yaklaşık 4,130,000 m<sup>2</sup> alanda gerçekleştirilmektedir. Havalimanı projeleri, bina türü yapılar dışında, pist, yardımcı pist, taksiyolu, hızlı çıkış yolu, apron, buz çözme, şeritsaha ve pist sonu emniyet alanlarının gerekli düzende planlanması ile oluşturulmaktadır. Mevcut havalimanının 2028 yılı hava trafik ve kapasite hesapları doğrultusunda geliştirilmesi amacıyla, yeni pist F Kodlu uçak trafiğine imkân tanıyacak şekilde planlanmıştır. Tez çalışmasının gerçekleştirildiği proje alanında, Oakman ve diğ. (2011) tarafından yapılan avan proje esas alınarak, uygulama projesi Makyol İnşaat Sanayi Turizm ve Tic. A.Ş. tarafından oluşturulmuştur. Tüm proje çalışmalarında, tasarımlar ICAO (2009) önerileri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Proje alanı, çevre şevlerinin kapladığı alanlar hariç, 400 m ile 1100 m arası değişken genişliklerde, yaklaşık 4244 m uzunlukta, Sabiha Gökçen Havalimanı güney sınırı boyunca, kuzeydoğu – güneybatı doğrultulu konumlandırılmıştır. Kazı ve dolgu çalışmalarında, stabilitenin sağlanması amacıyla alan çevresinde planlanan şevler, proje alanı batı kesiminde 150 m, doğu kesimde ise 200 m genişliğinde ve palyeli şekilde planlanmıştır.

Hazırlanan uygulama projesinde, kapasitesinin artırılması amacıyla, mevcut havalimanı sistemine, birer adet 4F kodlu pist, 4E kodlu yardımcı pist, F kodlu paralel taksiyolu ile 3 adet apron sahası, 1 adet motor test apronu, 2 adet buz çözme alanı, pist sonu emniyet sahaları (resa sahası) ve şerit saha ilavesi ile gerekli uygulama planı oluşturulmuştur. Ayrıca, pist, yardımcı pist ve paralel taksiyolu arası geçişlerin sağlanması amacıyla, hızlı çıkış ve bağlantı taksiyoları

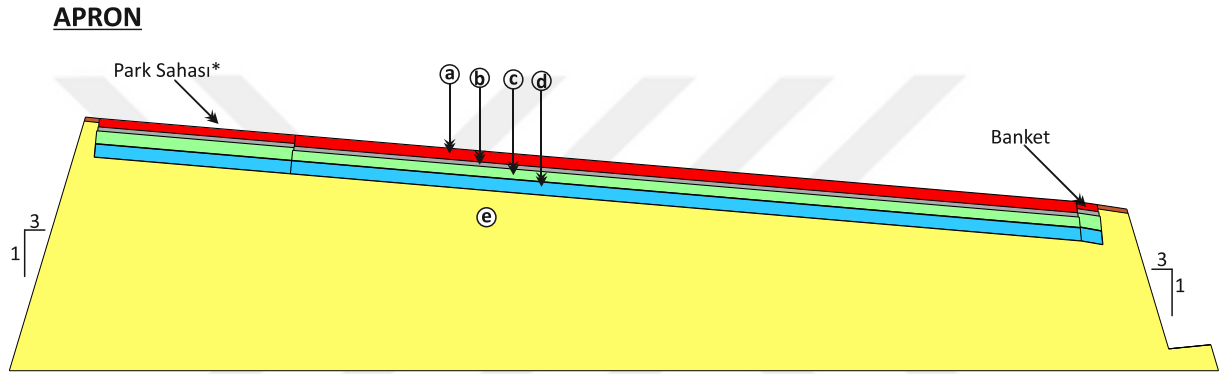
planlanmıştır. Projede, 64.56°K doğrultulu planlanan pist uzunlukları 3595 m olup, pist genişliği 60 m, yardımcı pist genişliği 45 m, taksiyolu genişlikleri ise 25 m'dir. Uygulama projesi hazırlanma aşamasında, pist ve yardımcı pist konumu, doğrultusu değiştirilmeden, avan projede belirtilen konumundan güneydoğu yönünde yer değiştirilmiştir. Bu yer değiştirme işlemi yapılarak, mevcut pist ile ilave yardımcı pist arası mesafe 915 m seviyesine çıkartılmıştır. Böylelikle, avan proje planının aksine, yeni pistin kullanılmadığı durumunda, yeni yardımcı pist ve mevcut pistin iniş ve kalkışlar için aynı anda kullanılabilirliği sağlanmıştır.

Uygulama projesinde konum ve kot bilgileriyle planlanan havalimanı bölümleri, kendi içerisinde de değişken kotlara sahip platformlar şeklindedir. Bu alanlar, belirlenen konumda, kazı veya dolgu çalışmalarıyla, projelendirilen kot seviyesine kadar inşa edilmektedir. Tüm bu kazı ve dolgu işleri uygulama projesi kapsamında, kullanım amacı ve trafik yüklerine göre yapılan analizler sonucu belirlenen tip kesitler temel alınarak düzenlenmektedir. Tip kesitlerin oluşturulmasında, kaplama tasarımı için, Amerika Birleşik Devletleri Ulaştırma Bakanlığı tarafından geliştirilen, havaalanı üstyapı tasarımı ve değerlendirmesinde standart kalınlık tasarım yazılımı olan Faarfield kullanılmıştır.

Tez kapsamında tüm proje için belirlenmiş olan tip kesitler incelenmiş ve alt kottan başlamak üzere, kaya dolgu, kırmataş alt temel, kırmataş temel, zayıf beton temel, katyonik asfalt emilsiyonu ve beton kaplama olmak üzere, proje bileşenlerinin türüne göre değişken kalınlıklarda katmanları içerecek şekilde planlandığı belirlenmiştir. Tüm proje alanları için, toplam 35 farklı tip kesit projelendirilmiş ve tüm kesitlerde yapılacak dolgu öncesi bitkisel toprağın kaldırılması gerektiği belirtilmiştir. Pist ve apron alanları için tip kesit şematik çizimleri Şekil 4.1'de, tip kesitlerde planlanan katman kalınlıkları Tablo 4.1'de sunulmuştur. Ayrıca, Tablo 4.1, yapılacak değerlendirmelerde kullanılmak üzere veri tabanına aktarılmıştır. Yardımcı Pist ve Paralel Taksi Yolu tip kesitleri Şekil 4.1'de sunulan Pist tip kesitiyle, apron alanları ise yine aynı şekilde sunulan Apron – 1 tip kesitiyle boyutlandırmalar dışında benzerdir. Tip kesitlerde şev eğimleri çalışma alanı çevresini oluşturan şevlerde 3 yatay 1 düşey, diğer şevlerde ise 3 yatay 2 düşey olarak planlanmıştır. Arazide, sıkıştırma işlemiyle oluşturulan temel katmanı dolgusu ile beton kaplama tabakası, proje bileşeninin türüne göre farklı eğimlerde yüzey oluşturularak şekilde projelendirilmiştir. Bu eğimlere ilişkin değerler Tablo 4.1'de sunulmuştur.



f: Kazıdan çıkan vasıflı malzeme ile dolgu veya kaya dolgu



\*Park Sahası yer hizmetleri araçları için yalnızca Apron - 1 alanında vardır.

**Şekil 4.1:** Pist ve apron alanları tip kesit şematik çizimleri.

**Tablo 4.1:** Proje bileşenleri için belirlenmiş eğim, genişlik ve tabaka kalınlıkları.

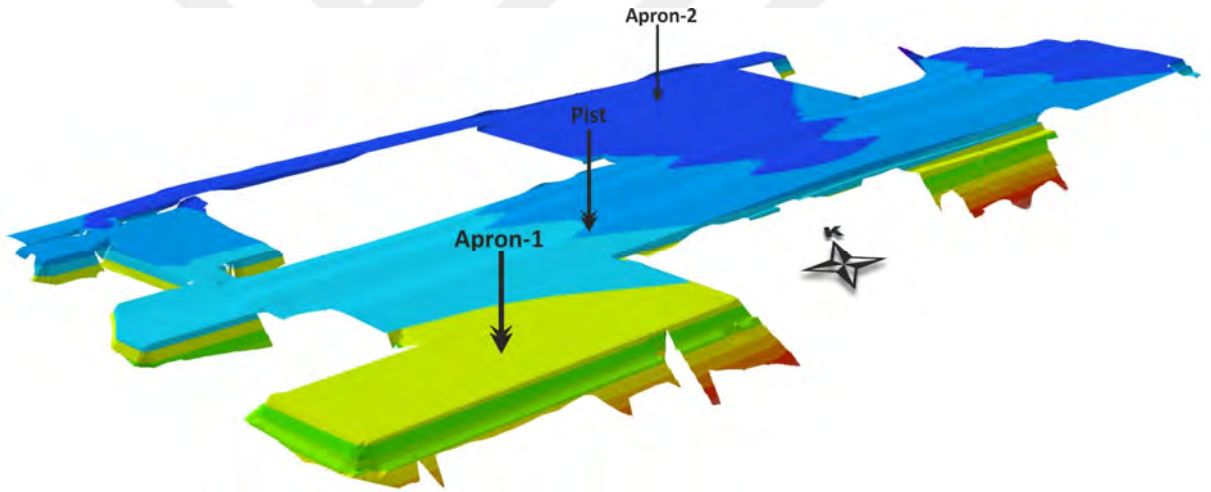
| Proje Bileşeni                 | Eğim (%)   | Genişlik (m) | Beton Kaplama (a) (m) | Zayıf Beton (b) (m) | Kırmataş Temel (c) (m) | Kırmataş Alt Temel (d) (m) | Kaya Dolgu (e) (m) |
|--------------------------------|------------|--------------|-----------------------|---------------------|------------------------|----------------------------|--------------------|
| Pist                           | 1.5        | 60           | 0.40                  | 0.15                | 0.40                   | 0.45                       | >1                 |
| Yardımcı Pist                  | 1.5        | 45           | 0.40                  | 0.15                | 0.40                   | 0.45                       | >1                 |
| Pist Banketleri                | 2.0        | 7.5          | 0.25                  | 0.15                | 0.30                   | 0.70                       | >1                 |
| Resa Sahası                    | 1.5        | 45 – 60*     |                       |                     |                        |                            | >1**               |
| Paralel Taksiyolu              | 1.0        | 25           | 0.40                  | 0.15                | 0.40                   | 0.45                       | >1                 |
| Hızlı Çıkış Taksiyolu          | 1.0        | 25           | 0.40                  | 0.15                | 0.40                   | 0.45                       | >1                 |
| Bağlantı Taksiyolu             | 1.0        | 40           | 0.40                  | 0.15                | 0.40                   | 0.45                       | >1                 |
| Taksiyolu Banketleri           | 1.5        | 17.5         | 0.25                  | 0.15                | 0.30                   | 0.70                       | >1                 |
| Apron – 1                      | 0.85       | 371.85       | 0.40                  | 0.15                | 0.40                   | 0.45                       | >1                 |
| Apron – 2                      | 0.41       | 600          | 0.40                  | 0.15                | 0.40                   | 0.45                       | >1                 |
| Apron – 3                      | 0.85       | 600          | 0.40                  | 0.15                | 0.40                   | 0.45                       | >1                 |
| Motor Test Apronu              | 0.00       | 110          | 0.40                  | 0.15                | 0.40                   | 0.45                       | >1                 |
| De-icing (buz çözme) Apronu 24 | 1.5/1.0*** | 202.30       | 0.40                  | 0.15                | 0.40                   | 0.45                       | >1                 |
| De-icing (buz çözme) Apronu 06 | 1.5/1.0*** | 173.80       | 0.40                  | 0.15                | 0.40                   | 0.45                       | >1                 |

\*İlişkili olduğu pist genişliğinde imal edilir.

\*\*Kaya dolgu üzerinde 0.15 m bitkisel toprak tabakası oluşturulur.

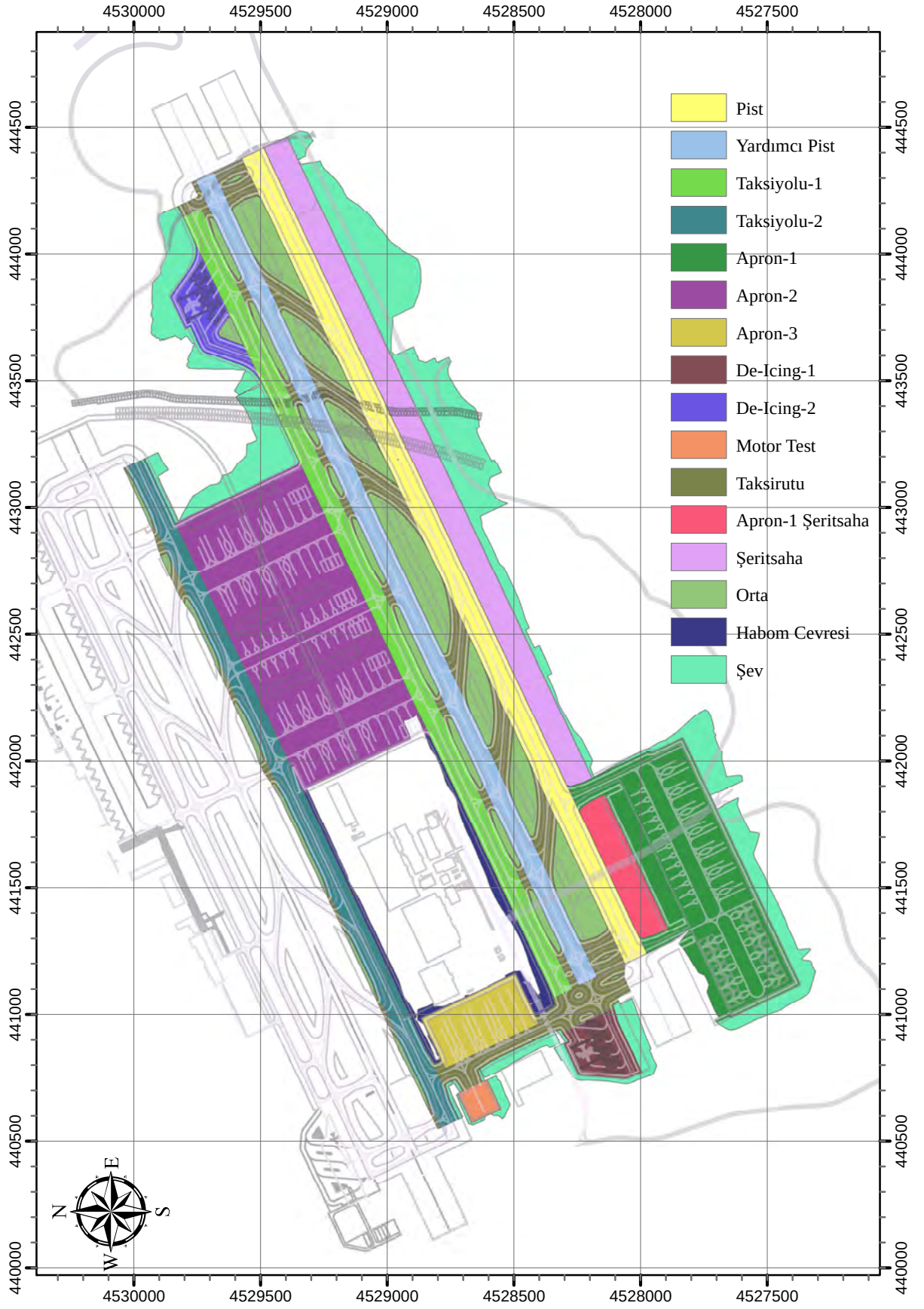
\*\*\* Boyuna eğim / enine eğim

Tez kapsamında, yukarıda açıklanan proje özellikleri, yapılacak konsolidasyon hesaplamalarında kullanılmak üzere, kazı ve dolgu alanlarının tespiti, alansal bazda yük değişimlerinin belirlenmesi ve proje bileşenleri ile üzerinde bulunduğu jeolojik birimlerin sınıflandırılabilmesi amacıyla kullanılmıştır. Proje eksen kotları ve tip kesitlerinden alınan eğim değerleri kullanılarak, üç boyutlu nihai proje yüzeyi oluşturulmuş ve proje bileşenlerinin kapladığı alanlara ait poligonlar tanımlanarak, ArcMap yazılımıyla oluşturulan veri tabanına aktarılmıştır (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3). Uygulama projesinde, son kaplama yüzeyleri temel alınarak yapılan değerlendirmede, en küçük yüzey kotunun 38.29 m, en büyük yüzey kotunun ise 113.00 m olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.4). Tip kesitlerin değerlendirilmesi sonucu, her bir proje bileşeni için üst yapı kaplama kalınlıklarına bağlı olarak, yapılması gerekli kazı veya dolgu kalınlığı hesaplanmış; alanda en az 2.40 m kalınlığında zorunlu kazı veya dolgu işleminin yapılması gerektiği belirlenmiştir (Tablo 4.1).

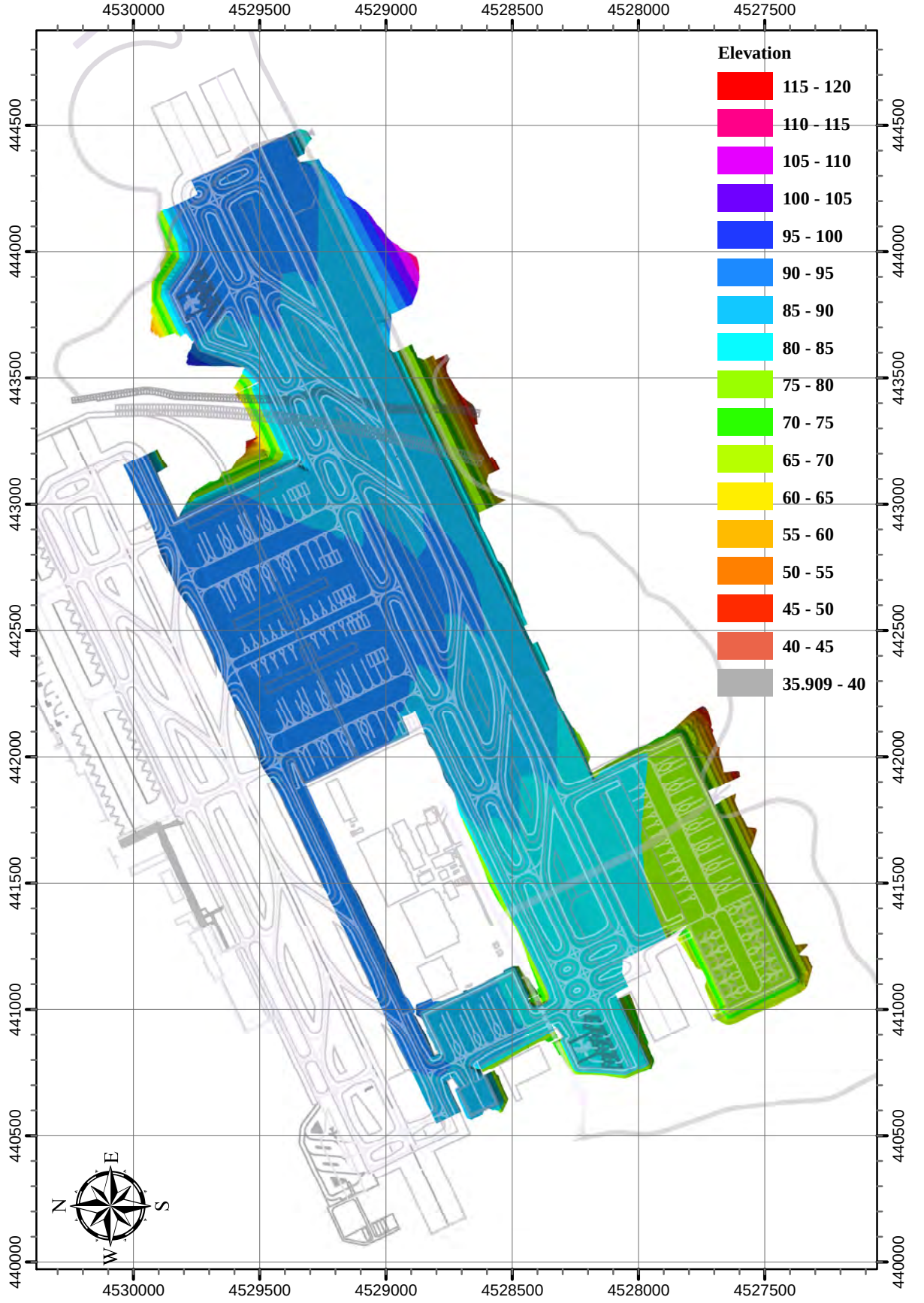


**Şekil 4.2:** Proje nihai yüzeyi üç boyutlu görünümü.





Şekil 4.3: Proje bileşenlerinin konumu.





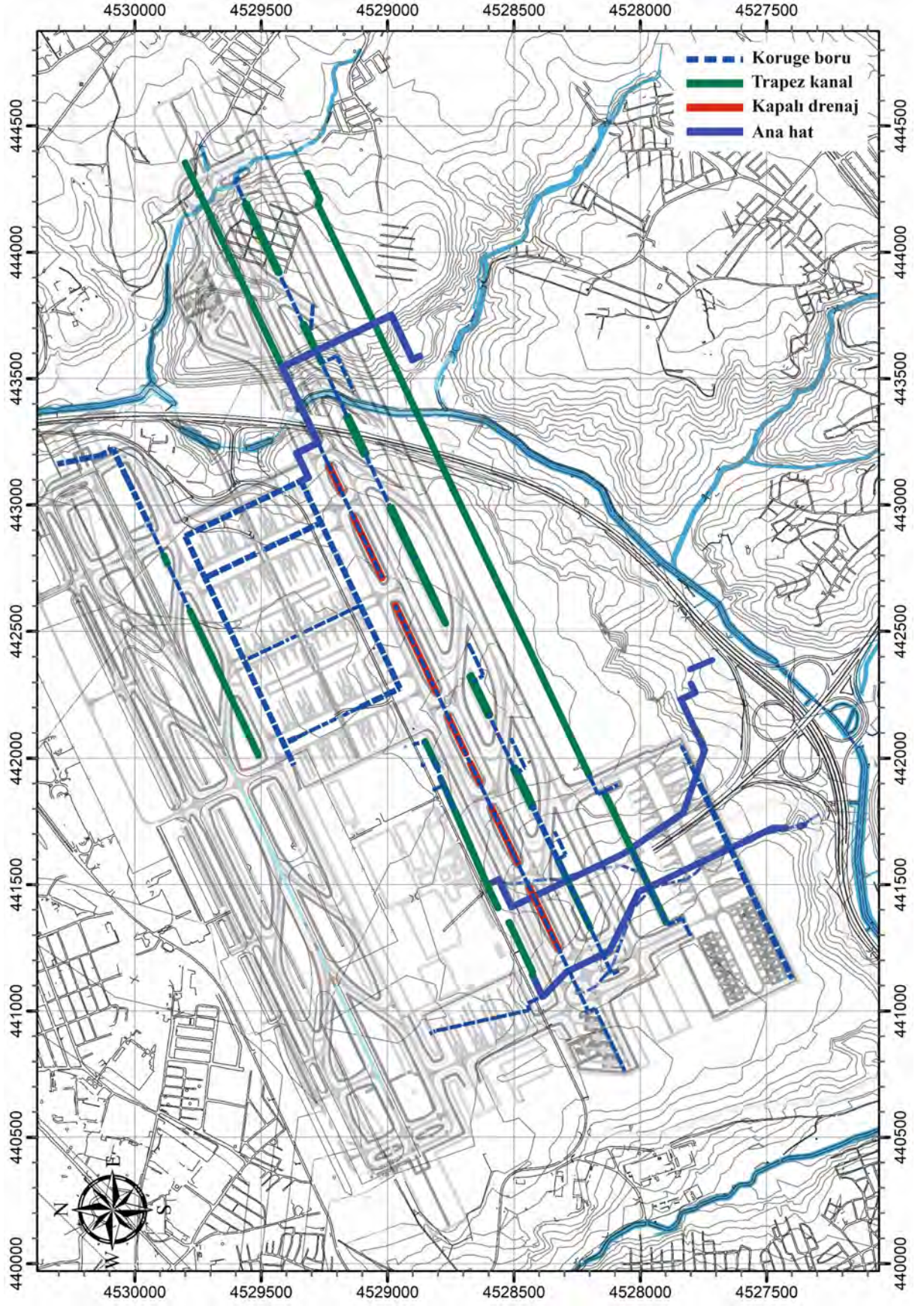
Proje tip kesitlerinin oluşturulması öncesinde, yaklaşık 4 milyon metrekare alana yayılacak olan yüzey sularının ve bununla birlikte yüzeysel akışa geçen yeraltı suyunun ortamdan uzaklaştırılması gerekmektedir. Bu doğrultuda, uygulama projeleri kapsamında, birbiriyle bağlantılı, iki drenaj projesi oluşturulmuştur. Bu projelerden ilki, beton yüzey kaplaması üstünden, yüzeyin eğimi ile kaplama kenarlarına doğru akışa geçen yüzey suyunun ortamdan uzaklaştırılmasını amaçlayan projedir. Bu proje kapsamında, tüm beton kaplama yüzeylerinin sınırları boyunca trapez kanal içerisine yerleştirilmiş, granül malzeme, geotekstil ve delikli boru vasıtasıyla toplanan suyun ana drenaj hattına aktarılması planlanmıştır (Şekil 4.5). Toplanan su düşey menholler ile dolgu altı genel drenaj projesi hatlarına aktarılacak şekilde planlanmıştır.



**Şekil 4.5:** Kaplamalı yüzey çevresi drenaj hattı imalatından bir görünüm.

Drenaj projelerinden ikincisi ise, trapez kanal, delikli korige boru ve kapalı kanallardan oluşan ana drenaj projedir (Şekil 4.6). Bu projeye, kaplamalı yüzeylerin yanında proje yüzeyinin diğer kesimlerinden gelen yüzey sularını ve dolgu altındaki doğal zemin yüzeyinde toplanacak suyun ortamdan uzaklaştırılması planlanmaktadır. Pist doğrultusu boyunca üç farklı trapez kanalın kaplamalı yüzey altından geçişlerinde ve apron sahalarının çevresinde korige boru kullanımı planlanmıştır. Proje genelinde kullanılan delikli korige borular 30 cm ile 120 cm arası çaplarda değişmektedir. Ana drenaj projesi kapsamında ayrıca, dolgu yüzeyi altında toplanabilecek suyun ortamdan uzaklaştırılması için, doğrudan Şekil 4.6’da sunulan ana hatlar ile bağlantılı, granül malzeme ile oluşturulmuş kılçık drenajlar planlanmış ve dolgu altında su birikiminin önüne geçilmeye çalışılmıştır. Oluşturulan drenaj projesiyle, toplanan tüm su, 3 ana drenaj hattı vasıtasıyla proje alanı dışına aktarılması sağlanmıştır.





Şekil 4.6: Proje alanında planlanan ana drenaj hatları.

#### **4.1.1. Dolgu İmalatlarında Kullanılacak Malzeme Kriterleri**

Belirlenen tip kesitler doğrultusunda, yapılacak olan dolgu çalışmalarında kullanılacak malzeme kriterleri, T.C. Ulaştırma Bakanlığı, Demiryollar, Limanlar ve Hava Meydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanmış teknik şartnamelerle belirlenmiştir. Çalışma alanında, tip kesitlerde tanımlanan 4 farklı katmana ait özellikler alt başlıklarda sunulmuştur.

##### **4.1.1.1. Kaya Dolgu Özellikleri**

Proje kapsamında en az 1 m kalınlığında yapılması öngörülen, karşılaşılan topoğrafik kot farklarına göre kalınlığı değişken olan kaya dolgu malzemesi, içerisinde %50'den fazla miktarda 100 mm'den büyük, %10'dan az miktarda ise 150 mm'den küçük tane içeren, maksimum tane büyüklüğü de 400 mm olan dolgu malzemesi olarak tanımlanmaktadır. Kaya dolgularında tabaka kalınlığı 750 mm'yi geçmemek üzere malzemenin en büyük tane boyutunun en fazla 1.5 katı olacak şekilde sahada sıkıştırılması gerekmektedir. Kaya dolgu malzemesinde, taşın doygun yüzey kuru birim hacim ağırlığı  $2.40 \text{ gr/cm}^3$ 'e eşit veya büyük, hacimce su emme oranı %3'e eşit ya da küçük, Los Angeles aşınma kaybı ise %35'e eşit veya küçük olmalıdır. Kaya dolgu, AYGM tasarım kriterlerinde de sunulan ortalama  $2.1 \text{ gr/cm}^3$  doğal birim hacim ağırlık değerine ulaşılmalıdır.

##### **4.1.1.2. Temel Altı ve Temel Tabakası Özellikleri**

Temel altı ve temel tabakasında kullanılacak malzeme; çakıl, kırılmış curuf ve blok taştan kırılmak suretiyle hazırlanacak olan kaba ile orta agrega karışımından oluşmaktadır. Kaba agrega, 4 no.lu elek üzerinde kalan, ince agrega ise yeterince filler içeren 4 no.lu elekten geçen malzeme olarak tanımlanmaktadır. Filler malzemesi ise, taş, çakıl ve kalker tozu veya silt malzemelerinden olup, kesinlikle kil ve yabancı madde ihtiva etmeyen, tamamı 30 no.lu elekten, ağırlıkça en çok %30'u 200 no.lu elekten geçen malzemedir. Temel altı ve temel tabakası olarak kullanılacak malzemeye ait karışım oranları, fiziksel ve dayanım özelliklerine ait sınırlandırmalar Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te verilmiştir.

**Tablo 4.2:** Temel altı ve temel tabakasında, agrega ve filler malzemesinin fiziksel özellikleri.

| Deney Adı                                             | Şartname Limiti |             |        | Deney Standardı                       |
|-------------------------------------------------------|-----------------|-------------|--------|---------------------------------------|
|                                                       | Kaba Agrega     | İnce Agrega | Filler |                                       |
| Aşınma (Los Angeles)                                  | <%40            |             |        | TS EN 1097-2 / AASHTO T 96            |
| Don dayanımı (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )       | <%12            | <%10        |        | TS EN 1367-1 / AASHTO T 104           |
| Likit limit                                           |                 | <%25        |        | TS 1900-1 / AASHTO T 89               |
| Plastisite indisi                                     |                 | <%4         |        | TS 1900-1 / AASHTO T 90               |
| Elekt analizi<br>(30 no.lu elektten ağırlıkça geçen)  |                 |             | %100   | TS 130 / TS 1900-1 / AASHTO T27 – T11 |
| Elekt analizi<br>(200 no.lu elektten ağırlıkça geçen) |                 |             | <%60   | TS 130 / TS 1900-1 / AASHTO T27 – T11 |
| Kum eşdeğeri                                          |                 |             | >%40   | TS EN 933-8 / AASHTO T 176            |

**Tablo 4.3:** Temel altı ve temel tabakası, dayanım ve sıkışma özellikleri.

| Deney Adı           | Şartname Limiti     |                | Deney Standardı          |
|---------------------|---------------------|----------------|--------------------------|
|                     | Temel Altı Tabakası | Temel Tabakası |                          |
| Laboratuvar yaş CBR | >%60                | >%65           | TS 1900-2 / ASTM D 1883  |
| Şişme yüzdesi       | <%0.5               | <%0.5          | TS 1900-2 / ASTM D 1883  |
| Arazi CBR           | >%75* – >%40**      | >%80* – >%40** | TS 5744 / ASTM D 4429    |
| k reaksiyon modülü  | >%650               | >%700          | TS 5744 / AASHTO T 222   |
| Arazi sıkışma       | >%95* – >%90**      | >%98* – >%90** | TS 1900-1 / AASHTO T 191 |

\* Kaplamalı saha

\*\* Kaplamasız saha

#### 4.1.1.3. Zayıf Beton Temel Tabakası Özellikleri

Zayıf beton temel tabakası, Tablo 4.4’te verilen granülometrik özelliklere sahip kaba ve ince agrega malzemesi ile Tablo 4.5’te sunulan karışım granülometrisi limitleri kullanılarak yapılan beton dizaynı doğrultusunda, su ve portland çimentosu karıştırılması sonucu oluşturulmaktadır. Yapılan dizayn çalışmalarında, çimento/agrega oranı ağırlıkça 1/15 ile 1/20 arasında seçilmekte ve 7 günlük basınç dayanımı en az 78 kg/cm<sup>2</sup>, 28 günlük dayanımı ise en az 120 kg/cm<sup>2</sup> olacak şekilde karışım oranları belirlenmektedir. Zayıf beton karışımında kullanılacak ince ve kaba agrega fiziksel özellikleri Tablo 4.6’da verilmiştir.

**Tablo 4.4:** Zayıf beton temel tabakasında kullanılan agrega malzemesinin gronülometrik özellikleri.

| Elekt No - Açıklık        | Ağırlıkça Geçen (%) |             |
|---------------------------|---------------------|-------------|
|                           | İnce Agrega         | Kaba Agrega |
| 37.5 mm elek              |                     | 100         |
| 20.0 mm elek              |                     | 40 – 90     |
| 4 No.lu elek (4.76 mm)    | 80 – 100            | 0 – 5       |
| 16 no.lu elek (1.18 mm)   | 45 – 80             |             |
| 50 No.lu elek (0.3 mm)    | 10 – 40             |             |
| 100 No.lu elek (0.15 mm)  | 5 – 25              |             |
| 200 No.lu elek (0.074 mm) | 0 – 6               |             |

**Tablo 4.5:** Zayıf beton temel tabakası agrega karışım gronülometrisi.

| Elekt No - Açıklık        | Ağırlıkça Geçen (%) |
|---------------------------|---------------------|
| 37.5 mm elek              | 100                 |
| 20.0 mm elek              | 67 – 100            |
| 4 No.lu elek (4.76 mm)    | 36 – 71             |
| 16 no.lu elek (1.18 mm)   | 20 – 56             |
| 50 No.lu elek (0.3 mm)    | 5 – 28              |
| 100 No.lu elek (0.15 mm)  | 2 – 17              |
| 200 No.lu elek (0.074 mm) | 0 – 4               |

**Tablo 4.6:** Zayıf beton temel tabakası agrega malzemesinin fiziksel özellikleri.

| Deney / Özellik                              | Şartname Limiti |             | Deney Standardı             |
|----------------------------------------------|-----------------|-------------|-----------------------------|
|                                              | İnce Agrega     | Kaba Agrega |                             |
| Aşınma Kaybı (Los Angeles)                   |                 | <%35        | TS EN 1097-2 / AASHTO T96   |
| Don kaybı (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) | <%10            | <%12        | TS EN 1367-1 / AASHTO T 104 |
| 200 No.lu elekten geçen malzeme oranı        | <%4             | <%1         | TS 1900-1 / AASHTO T 11     |
| Kil toprakları oranı                         | <%0.5           | <%0.5       | TS 3527 / AASHTO T 112      |
| Yumuşak parçalar (kömür, linyit, şist vb.)   | <%1             | <%1         | TS EN 1744-1 / AASHTO T 113 |
| Organik madde oranı                          | <%0.2           |             | TS EN 1744-1 / AASHTO T 194 |
| Kum eşdeğeri                                 | >%40            |             | TS EN 933-8 / AASHTO T 176  |
| İğnesellik limiti                            |                 | <2          | BS 812                      |
| Yapraksallık limiti                          |                 | >0.6        | BS 812                      |

#### 4.1.1.4. Beton Kaplama Tabakası Özellikleri

Havalimanı projesinde, pist, yardımcı pist, taksi yolları ve apron alanları ile bu alanların banket kısımlarında, nihai yüzeyi beton kaplama tabakası oluşturmaktadır. Banket alanlarında 0.25 m kalınlığında planlanan beton kaplama tabakası, diğer alanların yüzeyinde 0.40 m kalınlığında, 6.00 m x 7.50 m boyutlarında anolar şeklinde imal edilmek üzere projelendirilmiştir.



Beton santralinden temin edilen beton kiriş numunelerinin 7 günlük eğilme – gerilme dayanımları en az 35 kg/cm<sup>2</sup>, 28 günlük eğilme – gerilme dayanımları en az 48.5 kg/cm<sup>2</sup> değerinde ve 28 günlük silindirik basınç dayanımlarının ise en az 300 kg/cm<sup>2</sup> değerlerinde olacak şekilde beton dizaynı yapılmıştır. Beton dizaynında, çimento, kaba ve ince agregalar ile suyun en uygun oranlarda karıştırılarak en emniyetli yayılma, sıkışma ve işlenebilirlik kabiliyeti içinde yukarıda sıralanan mukavemet özelliklerinin sağlanabilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, Tablo 4.7’de sunulan fiziksel özellikler ile Tablo 4.8’de verilen granülometrik özelliklerin sağlandığı kaba ve ince agregalar karışımı ve dizayn kriterlerine göre belirlenen, su ve portland çimento karışımı birlikte kullanılarak beton kaplama malzemesi oluşturulmaktadır.

**Tablo 4.7:** Beton kaplama tabakası agregalar malzemesinin fiziksel özellikleri.

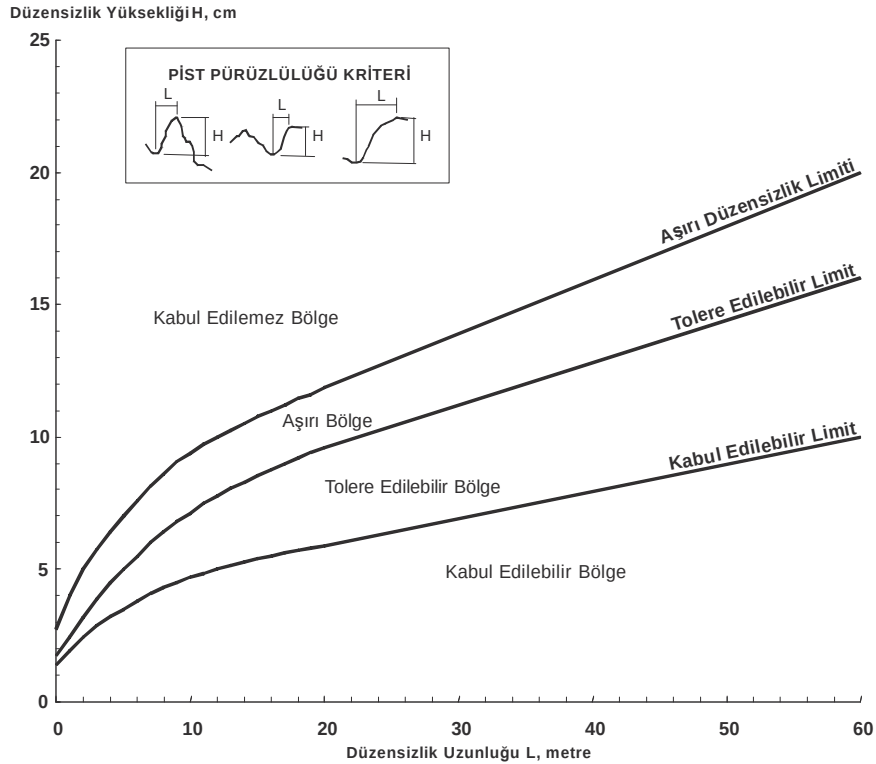
| Deney / Özellik                              | Şartname Limiti |                | Deney Standardı             |
|----------------------------------------------|-----------------|----------------|-----------------------------|
|                                              | İnce Agregalar  | Kaba Agregalar |                             |
| Aşınma Kaybı (Los Angeles)                   |                 | <%35           | TS EN 1097-2 / AASHTO T96   |
| Don kaybı (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) | <%10            | <%12           | TS EN 1367-1 / AASHTO T 104 |
| 200 No.lu elekten geçen malzeme oranı        | <%2             | <%1            | TS 1900-1 / AASHTO T 11     |
| Kil toprakları oranı                         | <%0.25          | <%0.5          | TS 3527 / AASHTO T 112      |
| Yumuşak parçalar (kömür, linyit, şist vb.)   | <%1             | <%1            | TS EN 1744-1 / AASHTO T 113 |
| Organik madde oranı                          | <%0.2           |                | TS EN 1744-1 / AASHTO T 194 |
| Kum eşdeğeri                                 | >%60            |                | TS EN 933-8 / AASHTO T 176  |
| İğnesellik limiti                            |                 | <2             | BS 812                      |
| Yapraksallık limiti                          |                 | >0.6           | BS 812                      |

**Tablo 4.8:** Beton kaplama tabakasında kullanılan agregalar malzemesinin granülometrik özellikleri.

| Elek No - Açıklık        | Ağırlıkça Geçen (%) |                |
|--------------------------|---------------------|----------------|
|                          | İnce Agregalar      | Kaba Agregalar |
| 50.8 mm elek             |                     | 100            |
| 38.1 mm elek             |                     | 95 – 100       |
| 25 mm elek               |                     | 60 – 80        |
| 19.0 mm elek             |                     | 45 – 60        |
| 9.50 mm                  | 100                 | 10 – 30        |
| 4 No.lu elek (4.76 mm)   | 95 – 100            | 0 – 5          |
| 8 No.lu elek (2.36 mm)   | 80 – 100            | 0 – 3          |
| 16 no.lu elek (1.18 mm)  | 50 – 85             |                |
| 30 no.lu elek (0.59 mm)  | 25 – 60             |                |
| 50 No.lu elek (0.3 mm)   | 10 – 30             |                |
| 100 No.lu elek (0.15 mm) | 2 – 10              |                |



Beton kaplama imalatında, ICAO (2009) tarafından belirtilen pist yüzeyi düzgünlüğü kriterinin sağlanması gerekmektedir. ICAO (2009) tarafından yüzey düzgünlüğü, kabul edilebilir, tolere edilebilir ve aşırı yüzey düzensizliği olmak üzere, üç sınırla tanımlanmıştır. Yüzey düzensizlikleri kabul edilebilir sınırın üzerinde, ancak tolere edilebilir sınırı aşmıyorsa, bakım planlanmalıdır ve pistin kapatılmasına gerek yoktur. Yüzey düzensizlikleri tolere edilebilir sınırın üzerinde, ancak aşırı yüzey düzensizliği sınırını aşmıyorsa, acil bakım planlanmalıdır ve pistin kapatılmasına gerek yoktur. Ancak, bu durumda uçaklarda yapısal hasar tehlikesi söz konusudur. Aşırı yüzey düzensizliği sınırını aşan yüzey düzensizliği durumunda ise pist alanı acilen kapatılmak zorundadır. Bu sınırlar, düzensizlik uzunluğu ve yüksekliği parametreleriyle tanımlanmaktadır. Şekil 4.7’de düzensizlik uzunluğuna karşılık sınır yükseklik değerleri tanımlanmıştır. Bitişik levhalar arasında bulunabilecek en büyük basamak tipi çıkıntı, Şekil 4.7’deki pürüzlülük kriterlerinin sıfır düzensizlik uzunluğuna karşılık gelen yüksekliğidir (ICAO, 2009). Buna göre; en büyük basamak tipi çıkıntı, kabul edilebilir limiti 1.6 cm, tolere edilebilir limiti 1.75 cm ve aşırı düzensizlik limiti ise 3 cm değerlerini almaktadır. Beton kaplama yüzeyin 6.00 m x 7.50 m ölçülerinde anolar halinde imal edildiği düşünüldüğünde, ano kısa boyutu olan 6 m mesafede, ano sınırlarında çıkıntı oluşturmayan, 3.8 cm’lik farklı oturmalar kabul edilebilir limit sınırındadır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7: Pürüzlülük kriterlerinin karşılaştırması (ICAO, 2009).

#### 4.1.2. Uygulama Projesinin Mevcut Altyapı ve Sanat Yapılarıyla İlişkisi

Proje alanının konumu ve boyutları nedeniyle, ulaşım yolları, akarsu yatakları ile altyapı hatları yapılacak olan kazı ve dolgu çalışmaları altında kalmaktadır. Bu nedenle, uygulama projesi dâhilinde bu alanların işlevselliğini yitirmeden kullanımı için gerekli düzenlemeler yapılmıştır.

Proje dolgusu altında kalacak ilk ve en önemli ulaşım yolu Sabiha Gökçen Havalimanı doğusundan, kuzeydoğu – güneybatı doğrultuda geçen TEM Otoyolu Kurtköy – Pendik Bağlantı Yolu’dur. Bu yolun havalimanı dolgusu altında kalacak kesiminde, proje inşa faaliyetleri öncesinde, T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü standartları doğrultusunda birbirine geçişli at nalı şekilli iki tünel projelendirilmiştir (Şekil 4.8). Projelendirilen her bir tünelin temel genişliği 18.75 m olmak üzere, her iki tünel toplam 42.30 m genişliğinde ve 1520 m uzunluğundadır.



**Şekil 4.8:** TEM Bağlantı Yolu’nun proje altında kalacak kesiminde oluşturulan tüneller.

Çalışma alanı doğu kesiminde, yaklaşık TEM Bağlantı Yolu boyunca uzanan Kemiklidere ile bu dereyi besleyen akarsuların bir bölümü, yapılacak dolgu çalışmaları altında kalmaktadır. Bu akarsu yatakları, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü standartları doğrultusunda, proje inşa faaliyetleri öncesinde derivasyon tünelleri ile koruma altına alınmıştır (Şekil 4.9). Derivasyon yapısının genişliği 24.20 m’dir. Ayrıca, proje alanının uzun eksen

boyunca orta kesiminde bulunan doğalgaz boru hattı ise proje alanın güney kesimine deplase edilmiştir.



**Şekil 4.9:** Kemiklidere derivasyon tüneli kesitinden bir görünüm.

Çalışma alanının kuzeybatı kesiminde, THY Havacılık Ağır Bakım Onarım Merkezi A.Ş. (HABOM) yapısı bulunmaktadır. Bu alana ulaşımın, proje bitimini takiben, alanın güneyinde bulunan TEM Bağlantı Yolu Aydınli kavşağından sağlanması planlanmaktadır. Bu nedenle, Aydınli Kavşağı ile HABOM arası Güney Yonca Tüneli adı verilen, kutu kesit bir tünel projelendirilmiştir. Projelendirilen yapının genişliği 23.90 m, yüksekliği 8.00 m ve uzunluğu 1020.00 m'dir.

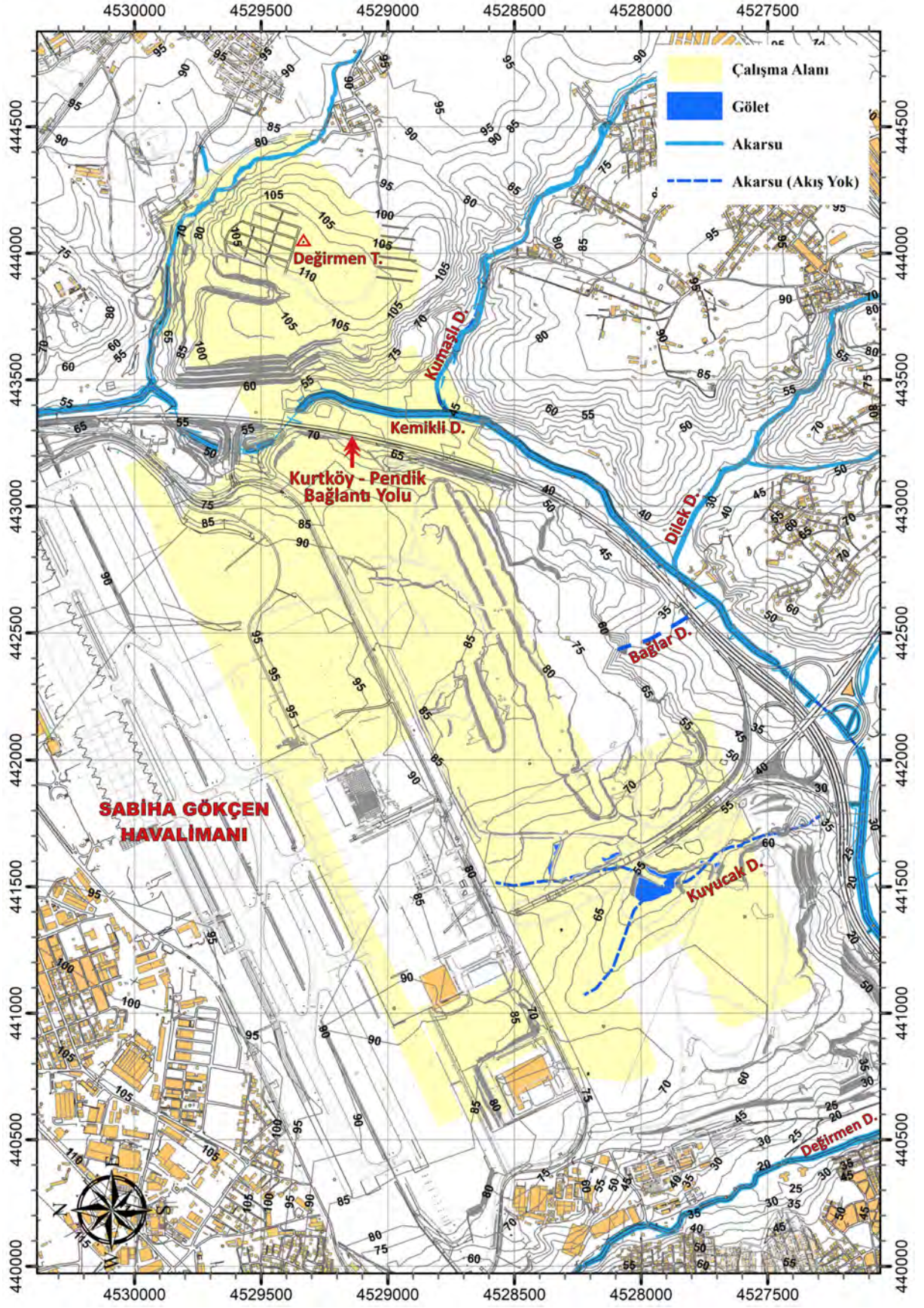
Proje alanının, yukarıda açıklanan mevcut sanat yapılarıyla ilişkisi, tez çalışması kapsamında yapılacak olan konsolidasyon hesaplamalarında önemli bir yer tutmaktadır. Bu alanlarda oluşturulan sanat yapılarının temellerinde gerekli inceleme ve değerlendirmeler ile gerekli zemin iyileştirme çalışmaları, sanat yapılarına ait projeler dâhilinde gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, sanat yapılarının bulunduğu alanlar poligon olarak tanımlanmış, oluşturulan veri tabanına eklenmiş ve bu alanlar konsolidasyon hesaplamaları dışında tutulacak şekilde sınıflandırılmıştır.

## 4.2. ÇALIŞMA ALANI MORFOLOJİSİ

Çalışma alanı olarak seçilen uygulama projesinin, büyük bir bölümü İstanbul İli, Pendik İlçesi sınırları içerisinde kalmakla birlikte, doğu kesimi Tuzla İlçesi'ne bağlı alanda inşa edilmektedir. Bu iki ilçe sınırını belirleyen ve TEM Otoyolu Kurtköy – Pendik Bağlantı Yolu ( TEM Bağlantı Yolu ) ile bu yol boyunca uzanan Kemiklidere, alanın en derin vadi yatağında bulunmaktadır. Bu dere hattı alan kuzeyinde yaklaşık 55 m akar kotunda olup, çalışma alanı batında, Pendik Tersanesi dolaylarında Marmara Denizi'ne dökülmektedir. Çalışma alanında en büyük kot değişimleri, bu vadi ve Kemiklidere'yi doğu kesiminden yaklaşık batı – kuzeybatı gidişli besleyen dereler ile kuzey kesiminden ise güneydoğu gidişli besleyen dereler boyunca gözlenmektedir (Şekil 4.10). Kemiklidere kuzey kesiminde bulunan dereler, bu çalışmanın yürütüldüğü dönemde yüzeysel bir akış göstermemekle birlikte, doğu kesiminde bulunan derelerde ise mevsimsel olarak kısmen akış gözlemlenmektedir.

TEM Bağlantı Yolu'nun doğu kesimi, batı kesimine göre daha yüksek eğimli bir morfoloji sergilemektedir. Doğu kesimde en yüksek alan 119.49 m kotuyla Değirmen Tepe'dir. Bu tepenin güney kesiminde bulunan, Kemikli Dere'yi besleyen drenaj hatlarından biri olan Kumaşlı Deresi'nin bulunduğu vadi, alanın en büyük eğimli kesimini oluşturmaktadır. Batı kesimde ise, yaklaşık 95 m yüksekliğiyle, Sabiha Gökçen Havalimanı, alanın en yüksek bölgesini oluşturmaktadır. Bu alan güneyinde, güneydoğu yönünde uzanan Bağlar ve Kuyucak Dereleri boyunca yamaçları az eğimli, Değirmen Dere boyunca ise yamaçları daha dik eğimli vadiler gelişmiştir. Değirmen Dere'nin doğu yamacı boyunca oluşan dik eğimli morfoloji, çalışma alanının batı sınırını oluşturmaktadır.

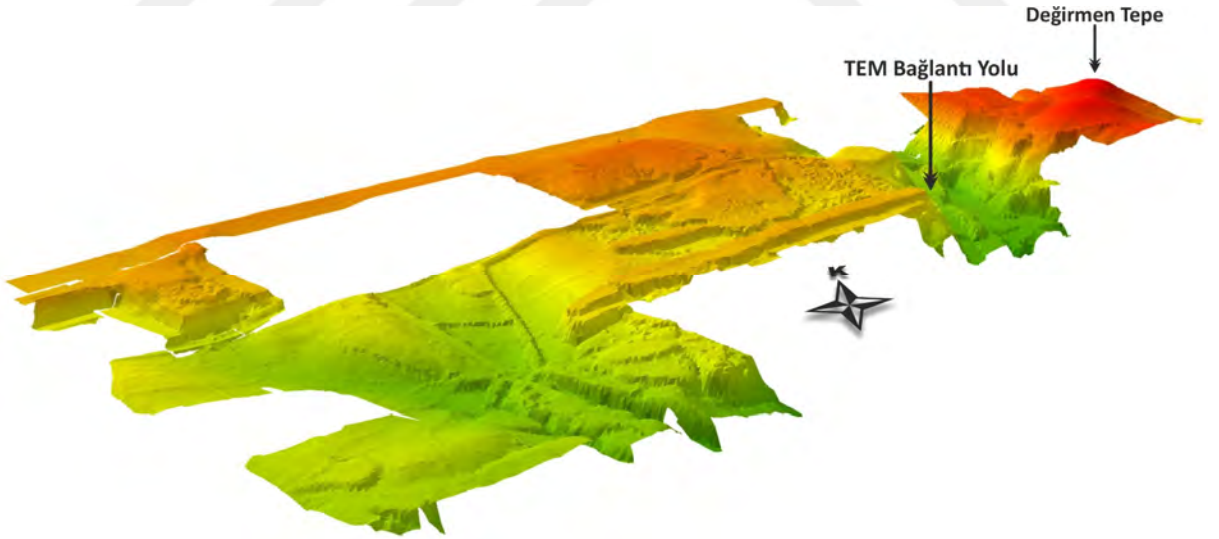




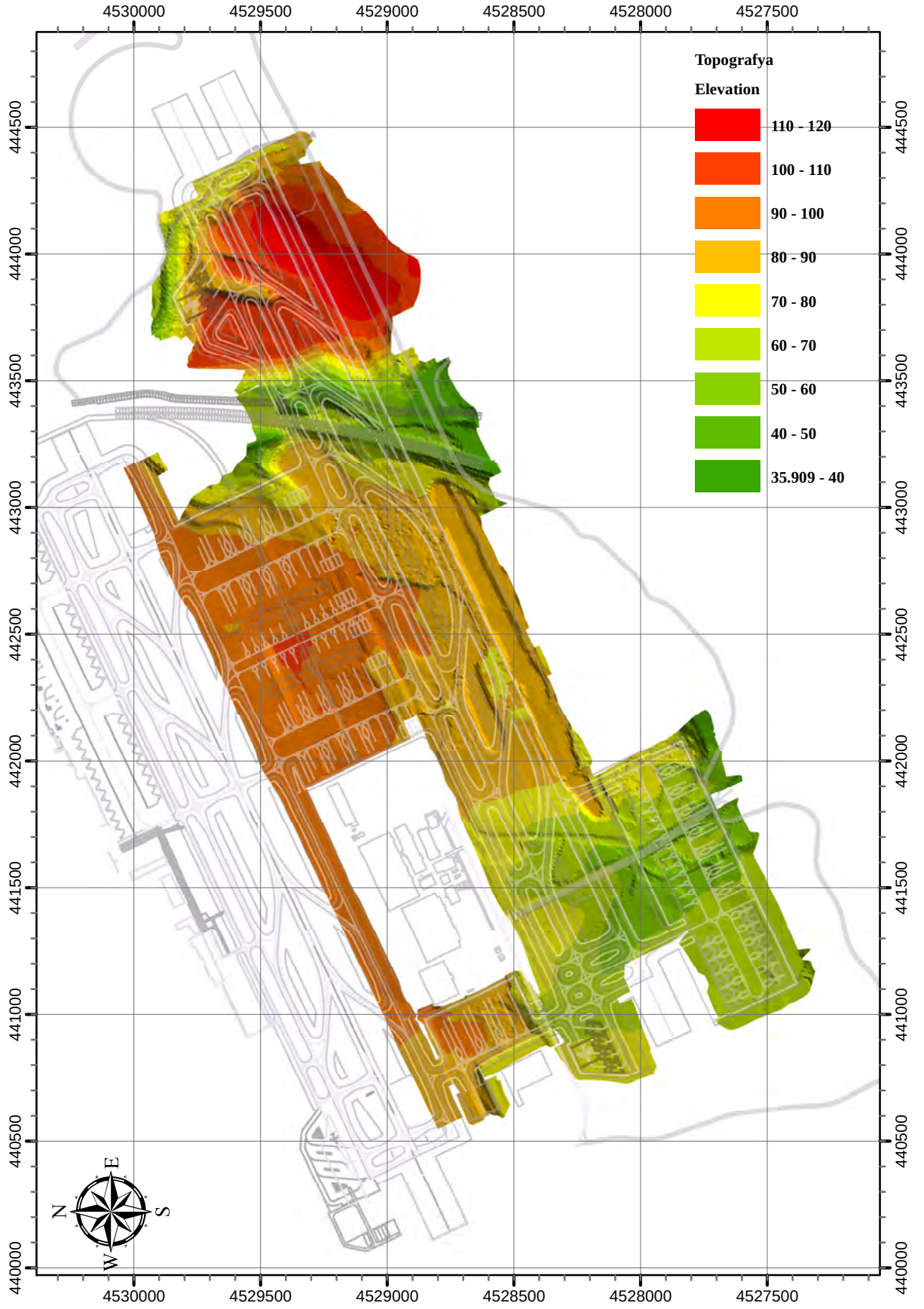
Şekil 4.10: Çalışma alanı ve çevresi 2016 tarihli topografya haritası.



Çalışma alanında topoğrafik kot değerlendirmelerinde, yapım tarihi farklı iki hâlihazır harita kullanılmıştır. Bu haritalardan ilki, Sabiha Gökçen Havalimanı inşaatının hemen sonrasında 2006 yılı hava fotoğraflarıyla hazırlanan 1/1000 ölçekli hâlihazır haritalardan genelleştirme yöntemiyle hazırlanmış 1/5000 ölçekli haritadır. İkincisi ise, 2016 yılı içerisinde, tez çalışmasına konu, havalimanı geliştirme projesi uygulama ekibi harita mühendisleri tarafından hazırlanmış 1/1000 ölçekli hâlihazır haritadır. Hazırlanan bu haritanın ölçümleri sırasında Trimble SCS900 marka GPS kullanılarak tüm ölçümler 0.015 m hassasiyette yapılmıştır. Proje imalatının yapılacağı alan dâhilinde, 1/1000 ölçekli hâlihazır harita verileri kullanılarak, üç boyutlu yüzey modeli oluşturulmuş ve topoğrafik kotların 35.90 m ile 119.49 m arasında değiştiği tespit edilmiştir (Şekil 4.11 ve Şekil 4.12). Ayrıca, çalışma alanı ve çevresini kapsayan, 1/5000 ölçekli hâlihazır harita kullanılarak, topoğrafik işlemler tekrarlanmış ve oluşturulan iki topoğrafik yüzey arası farklar dolgu kalınlıklarının tespitinde değerlendirilmiştir (Şekil 4.13). Çalışma alanı güney ve doğu kesiminde, topografyanın yapay dolgularla yeniden şekillendiği tespit edilmiş, bu doğrultuda farklı dönemleri yansıtan 1/5000 ile 1/1000 ölçekli hâlihazır haritalardan üretilen eşyüksekti eğrilerinin ilişkisini gösterir bir örnek Şekil 4.14'te sunulmuştur.

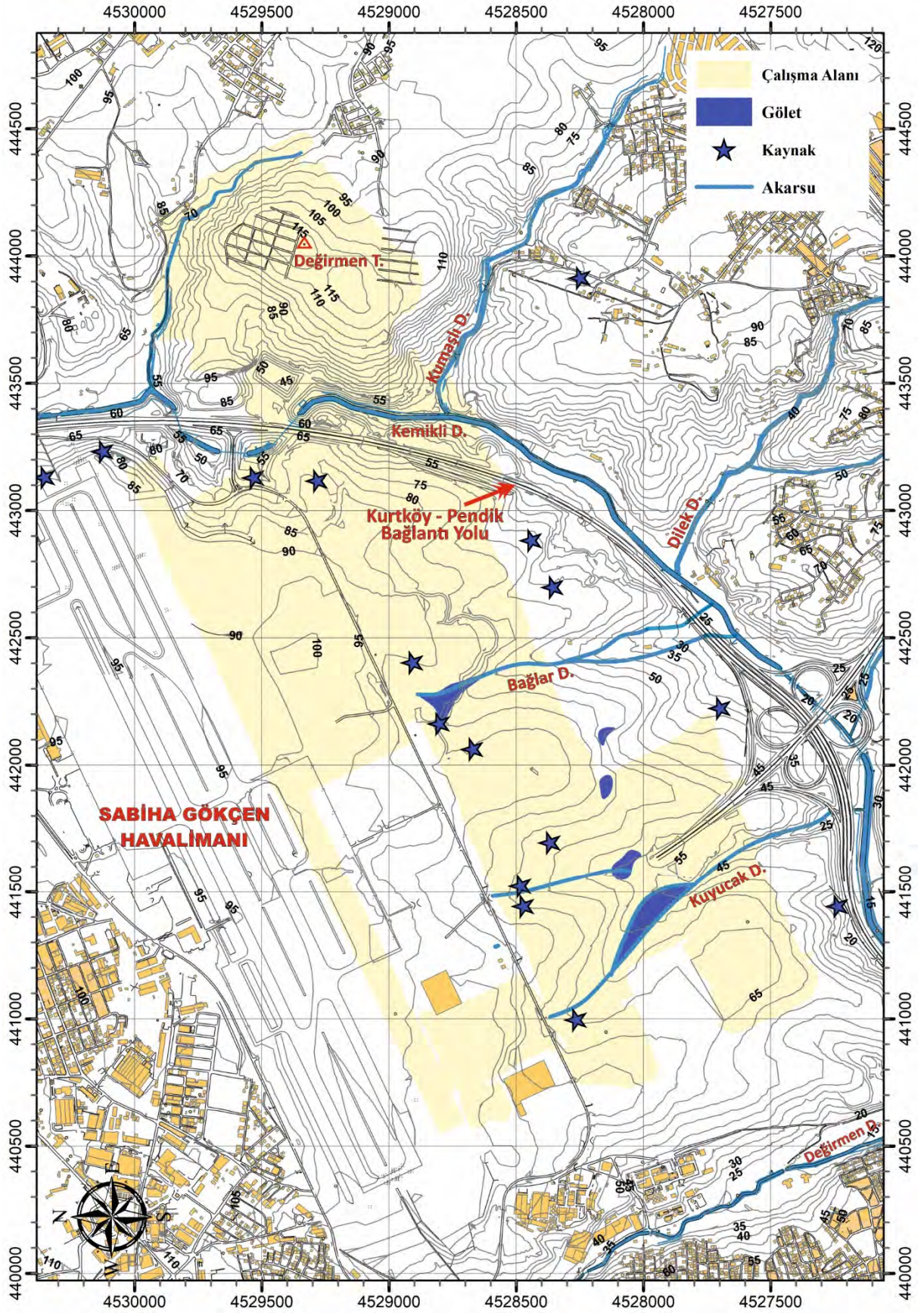


**Şekil 4.11:** Çalışma alanı üç boyutlu yüzey modeli.



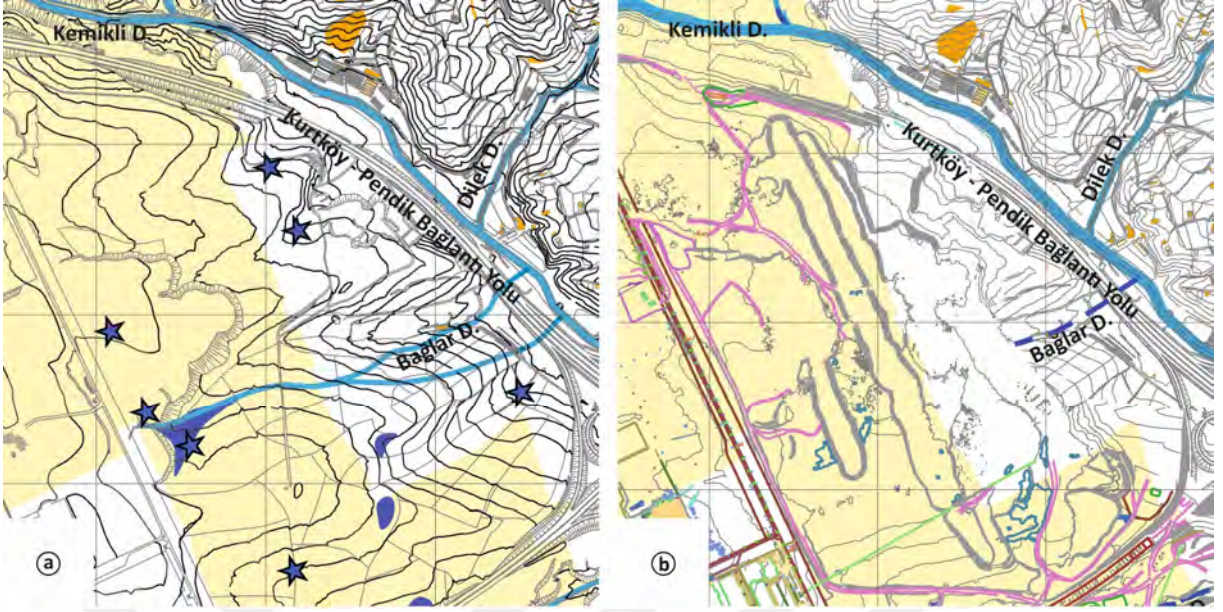
**Şekil 4.12:** Çalışma alanı 2016 yılı topoğrafik kotların değişimi.





Şekil 4.13: Çalışma alanı ve çevresi 2006 tarihli 1/5000 ölçekli haritadan üretilmiş topografya haritası.





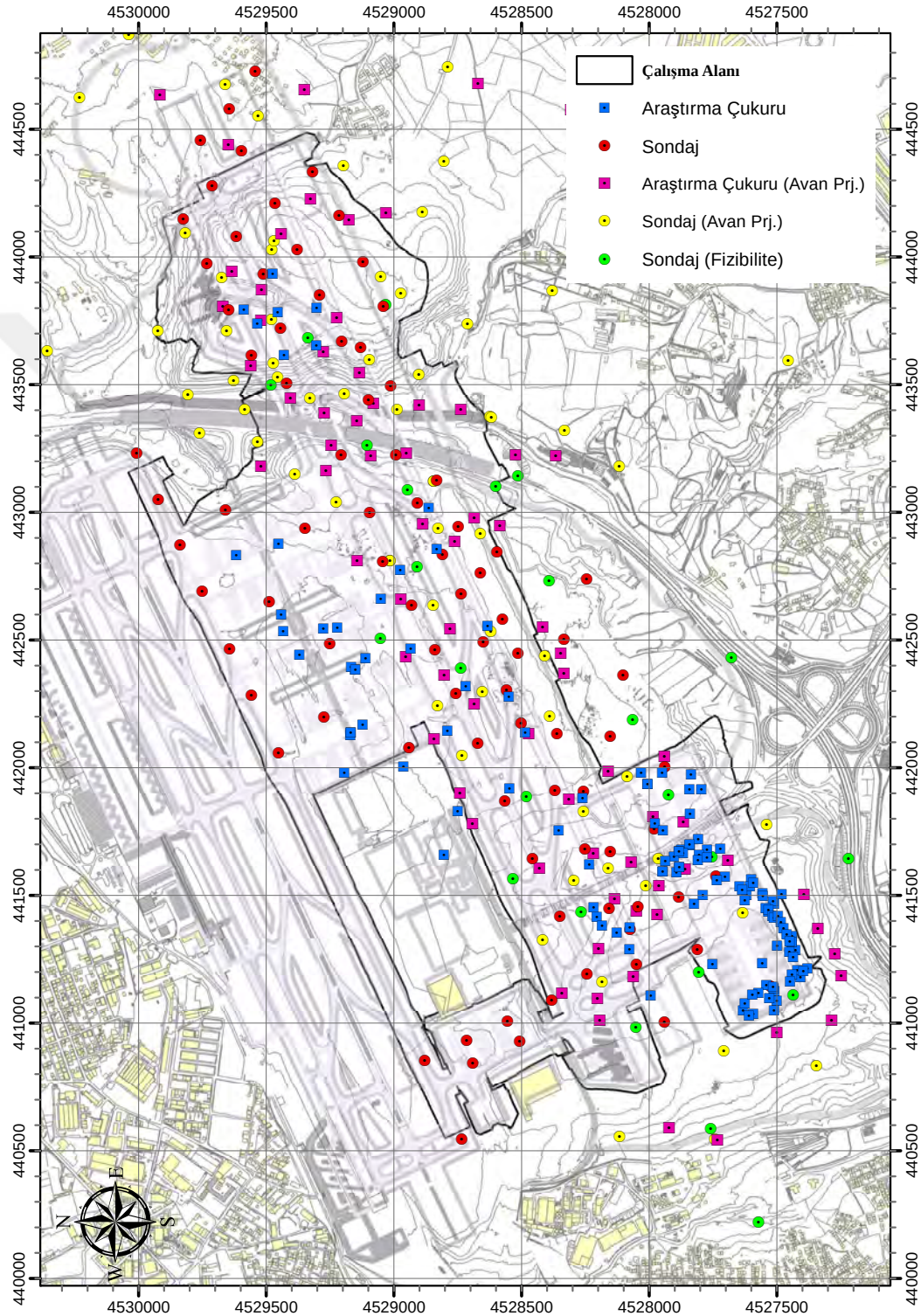
**Şekil 4.14:** Çalışma alanı güney kesiminde, farklı dönemleri temsil eden eşyüksekti eğrilerinin ilişkisi; a) 2006 yılı öncesi, b) 2016 yılı.

### 4.3. ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ

Çalışma alanı ve yakın çevresini kapsayan, önceki çalışmalar bölümünde değinilen Gedik ve diğ. (2005), Özgül ve diğ. (2005), OYO International Corporation (2009) ile avan proje çalışmaları sırasında Oakman ve diğ. (2011) tarafından, çeşitli ölçeklerde hazırlanmış jeoloji haritaları bulunmaktadır. Bu haritalar, alanda yapılmış olan zemin araştırma sondajı litolojik verileri de kullanılarak, revize edilmiş ve çalışma alanı ile çevresinin 14.31 km<sup>2</sup> alanı kapsayan 1/1000 ölçekli jeoloji haritası oluşturulmuştur.

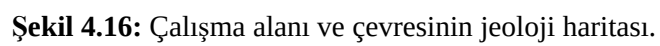
Jeolojik birimlerin alansal yayılımı ve derinlikle değişimlerinin belirlenmesinde, arazi gözlemlerinin yanı sıra, zemin araştırma sondajı ve araştırma çukuru verileri kullanılmıştır. Çalışma alanında, fizibilite ve avan proje çalışmaları sırasında yapılmış olan 102 adet zemin araştırma sondajı ve 83 adet araştırma çukuru verisi bulunmaktadır (Şekil 4.15). Bu zemin araştırma sondajları 11.1 m ile 73.5 m, araştırma çukurları ise 1.0 m ile 5.0 m arası derinliktedir. Tez çalışması sırasında ise 88 adet zemin araştırma sondajı ile 131 adet araştırma çukuru açtırılmıştır (Şekil 4.15). Özellikle dolgu birimlerin alansal yayılımı ile kalınlığının detaylı olarak tespiti ve birimlerin mühendislik parametrelerinin araştırılmasında kullanılmak üzere yapılan bu çalışmada, zemin araştırma sondajı derinlikleri 15.0 m ile 51.0 m arasında değişmektedir. Ayrıca, alanın doğu kesiminde, kısmen yapay dolgular altında kalan birimlerin ilişkisi, bu alanda yapılan proje kazıları sonucunda detaylandırılmıştır. Oluşturulan jeoloji

haritası Şekil 4.16’da, bu haritanın altlık teşkil ettiği ve birimlerin alansal yayılımının daha büyük ölçekte görülebildiği 1/5000 ölçekli mühendislik jeolojisi haritası Ek 1’de, saha gözlemleri ise aşağıda sunulmuştur.



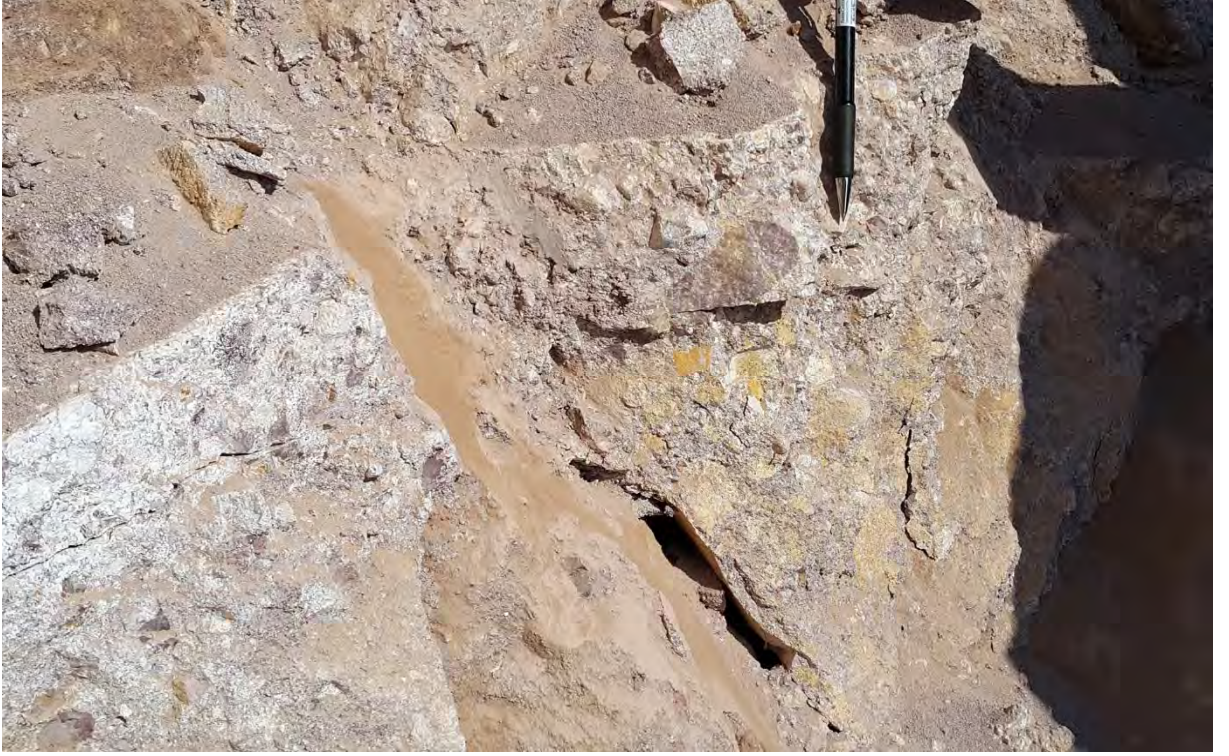
**Şekil 4.15:** Zemin araştırma sondajı ve araştırma çukurlarının konumu.





**Şekil 4.16:** Çalışma alanı ve çevresinin jeoloji haritası.

Çalışma alanında yüzeyleyen en yaşlı litostratigrafi birimi Kurtköy Formasyonudur. Birim alanda arkozik kumtaşları ile temsil edilmektedir. Açık mor ile grimsi mor taze yüzey rengi ve açık kahverengi ve mor ayrışma yüzeyi rengiyle alanda görülen birimde yer yer çakıllı kumtaşı ile kumlu çakıltası düzeylerine rastlanmaktadır (Şekil 4.17). Birim alanda orta – kalın tabakalı olarak gözlenmektedir. Genellikle süreksizlik aralığı 20 cm – 60 cm aralığındadır. Süreksizlikler, genellikle pürüzsüz ve açıklıkları 1 mm’den daha azdır. Alanın kuzeydoğu kesiminde gözlenen Kurtköy Formasyonu, üstüne uyumlu olarak gelen Aydos Formasyonu uyumlu sınır ilişkisindedir (Şekil 4.18). Bu alanın doğu kesiminde Neojen birimler kuzey kesiminde ise yapay dolgu ile örtülmektedir (Şekil 4.16 ve Ek 1).



**Şekil 4.17:** Çalışma alanı kuzey doğusunda Kurtköy Formasyonu içerisinde çakıltası seviyesinden bir görünüm.





**Şekil 4.18:** Çalışma alanı kuzey doğusunda Kurtköy Formasyonu ile Aydos Formasyonu sınırından bir görünüm.

Aydos Formasyonu alanda, genel olarak, açık gri ve bej renkte kuvarsit ile silttaşı – şeyl ardalanması olarak görülmektedir (Şekil 4.19). Kurtköy formasyonu ile sınır bölgelerinde kuvars çakıltası seviyeleri mevcuttur (Şekil 4.17). Aydos Formasyonu, çalışma alanının doğu kesiminde, Kemiklidere ile bu dereyi besleyen akarsuların bulunduğu vadi yamaçlarında, TEM Bağlantı Yolu doğu ve batı şevlerinde ve Değirmen Tepe doğu ve güneydoğusunda gözlenmektedir. Gedik ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmada en fazla 100 m kalınlıkta olduğu belirtilen birimin, alandaki kalınlığı yanal olarak değişkenlik sunmakla birlikte, çalışma alanında en fazla 40 m kalınlığa ulaştığı düşünülmektedir. Bu birim içerisinde, kuvarsit nadiren masif yapıdadır. Aydos Formasyonu’nda alanda, yaklaşık kuzeybatı doğrultulu, eğim bileşeni içeren birçok doğrultu atımlı sol yönlü fay geliştiği gözlenmiştir (Şekil 4.20.a). Fayların yanı sıra, genellikle üç farklı hâkim eklem takımı kuvarsit düzeylere bloklu yapı kazandırmıştır. Bu eklem takımları doğrultu ve eğimleri K50D 80GD, K30B 85GB ve DB 35G olarak belirlenmiştir. Süreksizlik aralığı en fazla 20 cm, açıklığı ise 1 mm’den daha azdır. Süreksizlik yüzeyleri az pürüzlü ve çeşitli derecede ayrılmıştır. Birim, alanın kuzey ve doğu kesiminde Neojen birimler ve yapay dolgu ile uyumsuz olarak örtülüdür (Şekil 4.16 ve Ek 1). Yayalar Formasyonu Formasyonu Gözdağ üyesi tarafından geçişli olarak üstlenen birim, çalışma alanında bu üye ile tektonik dokanak ilişkisine de sahiptir. Çalışma alanı güneydoğu kesiminde; Kumaşlı Dere’nin kuzey yamacı ile Kemiklidere boyunca ise, Pelitli Formasyonu Dolayoba üyesi’yle tektonik dokanak ilişkisindedir.





**Şekil 4.19:** Aydos Formasyonuna ait kuvarsit düzeylerinden bir görünüm, bakış yönü batı.



**Şekil 4.20:** Değirmen Tepe güney doğusunda, a) Aydos Formasyonu ve b) Yayalar Formasyonu Gözdağ üyesi'nde gelişmiş doğrultu atımlı faylardan bir görünüm (bakış yönü kuzeybatı).

Aydos Formasyonu üzerine uyumlu şekilde gelen, gri ve açık kahverengi, mikalı, killi kumtaşları, Özgül ve diğ. (2005) tarafından sunulan çalışma benimsenerek Yayalar Formasyonu Gözdağ üyesi olarak ayırtlanmıştır. Kumtaşları genellikle, kuvars vake ve feldispatik vake'dir. Genel olarak orta tabakalı olmakla birlikte, yer yer ince tabakalı olarak gözlenebilmektedir. Çalışma alanının doğusunda, Değirmen Tepe ve bu tepenin güneybatısında yüzeylenmektedir. Özellikle, alandaki doğrultu atımlı faylanmaya bağlı sık ve farklı yönelimlerde süreksizlik özelliği gösteren birimde, genellikle 6 cm – 20 cm aralıklı süreksizlikler, yüksek derecede ayrılmış pürüzsüz yüzeylere sahiptir (Şekil 4.20.b). Gözdağ üyesi, süreksizliklerin yoğun olarak gözlemlendiği alanlarda, bloklu yapısı, süreksizlikler boyunca su hareketinin artması ve yapısındaki feldispat nedeniyle, yüksek derecede ayrışma göstermektedir. Aynı zamanda, bu ayrışma koşullarının, birimin yüzeylendiği alanlarda da sağlanması nedeniyle, çoğu zaman bu alanlarda, yüksek derecede ayrılmış bir yüzey zonu görülmektedir. Birim, çalışma alanında, Değirmen Tepe kuzeybatı kesiminde yapay dolgu ile örtülüdür.

Önceki çalışmalar bölümünde değinilen, Gedik ve diğ. (2005) tarafından Dolayoba Formasyonu, Özgül ve diğ. (2005) tarafından ise Pelitli Formasyonu Dolayoba üyesi olarak adlanan birim, TEM Bağlantı Yolu doğu kesiminde, Kemiklidere'yi besleyen Kumaşlı Dere'nin bulunduğu vadi tabanında, çok sınırlı bir alanda, açık gri renkli, resifal kireçtaşları ile gözlenmiştir. Bu birim çalışma alanında, kendinden yaşlı birimler ve Pendik Formasyonu Kartal üyesi ile faylı dokanak ilişkisiyle görülmektedir. Pendik Formasyonu Kartal üyesi ise, çalışma alanı güneyinde, doğuda Kumaşlı Dere vadisi ile sınırlı geniş bir alanda yüzeylenmektedir. Kartal üyesi, çalışma alanında, grimsi açık kahverengi şeyl litolojisi ile ayırtlanmıştır (Şekil 4.21). Alanda kendinden yaşlı birimler ile faylı dokanak oluşturmakta, genç birimler olan, Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, alüvyon ve yapay dolguyla uyumsuz olarak örtülmektedir.





**Şekil 4.21:** Çalışma alanı batısı, TEM Bağlantı Yolu kuzeyinde Kartal Formasyonundan bir görünüm.

Alansal yayılımları ve saha gözlemleri sunulan, Paleozoyik zamanı içerisinde, Alt Ordovisiyen ile Orta Devoniyen arası dönemde uyumlu olarak çökelim gösterdiği bilinen, Kurtköy, Aydos, Yayalar, Pelitli ve Pendik Formasyonları, çalışma alanında büyük çoğunlukla fay kontrolünde yayılım göstermektedir. Saha çalışmalarıyla alanda, iki farklı doğrultuda gruplanabilecek doğrultu atımlı sol yönlü faylar belirlenmiştir (Şekil 4.16 ve Ek 1). Bu faylardan ilk grup yaklaşık kuzeybatı doğrultulu ve yüksek eğim açısıyla normal atım bileşeni de bulunan oblik faylardır. Bu fayların kontrolünde, Aydos Formasyonu ile Gözdağ üyesi ve Dolayoba üyesi ile Kartal üyesi, alanda aynı düzeyde yüzeylenmiştir. Bu fayların, miyosen öncesi dönemde Marmara Bölge tektoniği için bilinen doğu – batı yönlü sıkışmanın ürünü olduğu düşünülmektedir.

Çalışma alanında belirlenen diğer bir fay ise yaklaşık kuzey – güney doğrultulu, doğrultu atımlı sol yönlü faydır. Kemiklidere vadisi boyunca uzanan bu fayın atımı, miktarı ve yönü, Pelitli Formasyonu Dolayoba üyesi yardımıyla belirlenmiştir. Dolayoba üyesi vadide yaklaşık 150 m sol yönlü yanal yer değiştirme göstermektedir. Bu fayın ise, miyosen sonrası dönemde Marmara Bölge tektoniği için bilinen kuzey – güney yönlü sıkışmanın ürünü olduğu düşünülmektedir.

Çalışma alanında, Peleozoyik yaşlı litostratigrafi birimleri üzerine, Gedik ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmada, Meşetepe Formasyonu'nun, kıltaşı, şeyl, marn, silttaşı hâkim litolojisiyle ve az oranda kumtaşı ile çakıltaşlarından oluşan içeriğiyle uyumsuz olarak geldiği belirtilmiştir. Özgül ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmada ise alanda tüm birimleri uyumsuz olarak üzerleyen litostratigrafi birimi Sultanbeyli Formasyonunun Orhanlı üyesi olarak tanımlanmıştır. Orhanlı üyesi'nin, kil, mil ve ince kum boyu malzemedan oluştuğu, taze yüzeylerde mavimsi gri rengi ve kahverengi killi – milli malzemenin egemen olduğu kaya türü olarak belirtilmiştir. Bu çalışmalardan hareketle, tez çalışmaları kapsamında, gri – açık kahverengi, yer yer karbonat içerikli, çakıllı, kumlu, orta katı – sert, siltli kil çökelimi ile alanda gözlemlenen litoloji için Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi adlaması benimsenmiştir (Şekil 4.22 ve Şekil 4.23). Zemin araştırma sondajlarında birimin kalınlığı en fazla 61 m belirlenmiştir. Orhanlı üyesi, çalışma alanının kendinden yaşlı tüm birimler üzerinde uyumsuz olarak bulunmaktadır. Dere yataklarında alüvyon, çalışma alanı içerisinde geniş bir alanda ise yapay dolguyla uyumsuz olarak örtülmektedir.

Çalışma alanında, Alüvyon birimi, 7.50 m kalınlığa varan, koyu kahverengi renkli, oksitli, siltli, kumlu, katı – çok katı kil tabakası ile temsil edilmektedir. Bu birim, çalışma alanı batısında Değirmen Dere'nin bulunduğu vadi ve TEM Bağlantı Yolu güneyinde Kemiklidere boyunca gözlenmiştir. Ayrıca, alanın kuzeybatısında Acısu Deresi'nin Kemiklidereye birleştiği sınırlı alanda ayırtlanmıştır.



**Şekil 4.22:** Sultanbeyli formasyonu kil düzeylerinden bir görünüm, bakış yönü kuzeydoğu.

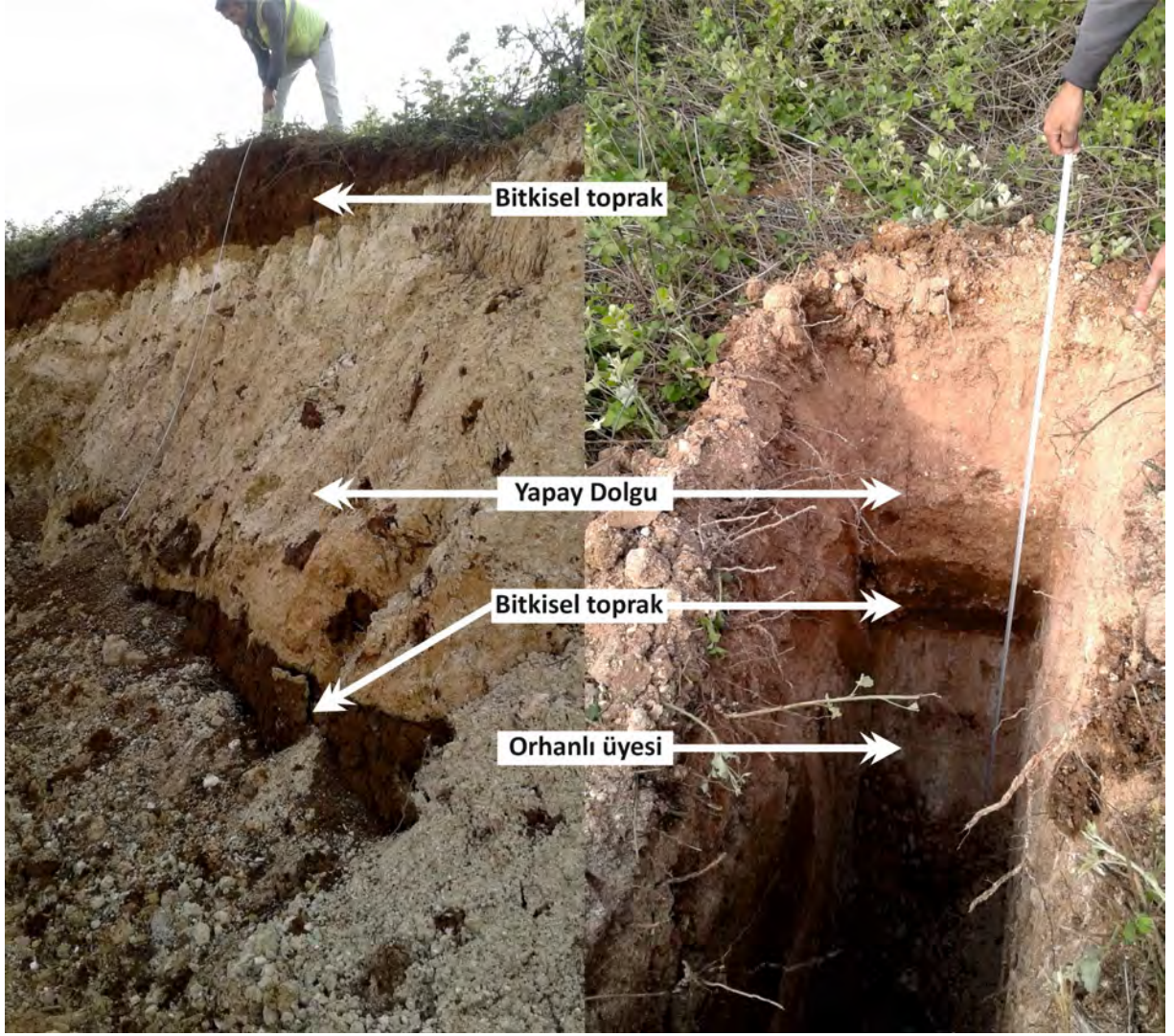




**Şekil 4.23:** Zemin araştırma sondajlarında Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı kil üyesi ve uyumsuz olarak üstüne geldiği Aydos Formasyonu kuvarsit düzeyleri.

Yapay dolgu, çalışma alanının genelinde geniş alanlar kaplamaktadır. Yapay dolgular alanda, kil boyu malzemeden oluşmakta, yer yer kaya blok, moloz, beton ve evsel atıklar ile çakıl, kum bulunmaktadır. Lokal olarak sınırlı alanlarda gözlenen inşaat artığı ve evsel atık türündeki yapay dolgular yanında, alan çevresinde bulunan Sultanbeyli formasyonu'na ait litolojilerin çalışma alanına yayılmasıyla oluşturulduğu düşünülen, düzensiz bir şekilde az oranda çakıl ve kum boyu malzeme içeren, egemen olarak siltli kil ile temsil edilmektedir. Arazi çalışmalarında, kil boyu malzemenin egemen olduğu bu birim, çoğu zaman Sultanbeyli formasyonu Orhanlı üyesi ile karıştırılacak niteliktedir. Ancak, araştırma çukurlarında, siltli kil birim altında değişken kalınlıklarda toprak gelişiminin olduğu tespit edilmiş ve Sultanbeyli formasyonu Orhanlı üyesi'nden, bu oluşum ile ayrılmıştır. Bu nedenle, Neojen çökellerin yüzeylendiği tüm alanlarda yapılan çalışmalar, araştırma çukuru açımı ile birlikte yürütülmüştür. Böylece, Sultanbeyli formasyonu Orhanlı üyesi üzerinde oluşturulan kil dolgu alanı ayrıntılı olarak haritalanmıştır. Ayrıca, TEM Bağlantı Yolu doğusunda, Değirmen Tepe kuzeybatı yamacında Marmaray Projesi dolgu alanı bulunmaktadır.

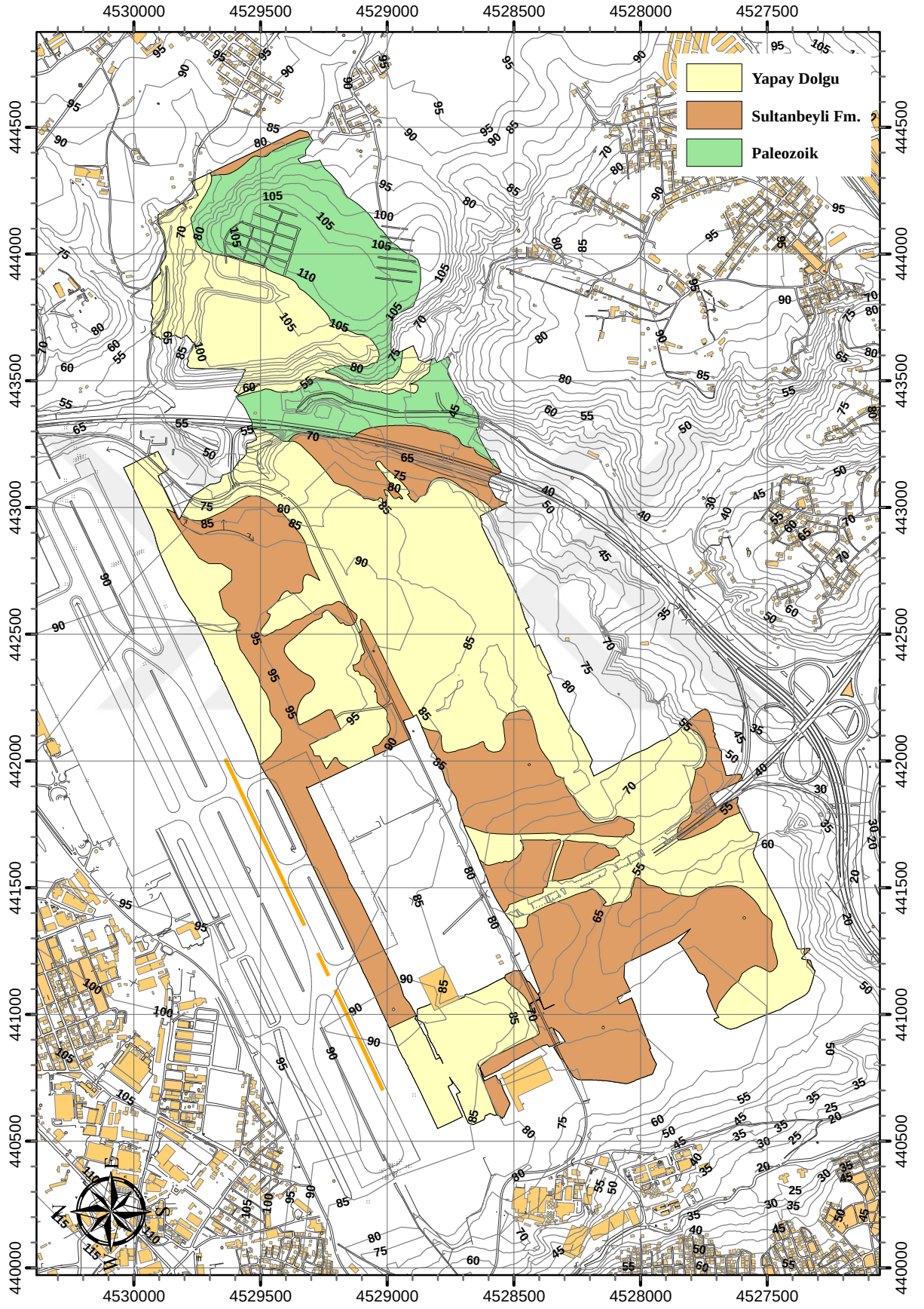
Yapılan arazi çalışmaları sonucu oluşturulan mühendislik jeolojisi haritasında ayrıntılarıyla sunulan litostratigrafi birimleri, tez konusu konsolidasyon analizi çalışmaları için paleozoik birimler, Sultangazi formasyonu Orhanlı üyesi, yapay dolgu kil alanları olarak üç grupta sınıflanmıştır. Yapılan sınıflamada, her bir grubun yayılım gösterdiği alanlar coğrafi bilgi sistemleri (CBS) veri tabanına işlenmiştir. Proje alanı dâhilinde oluşturulan harita Şekil 4.25'te sunulmuştur.



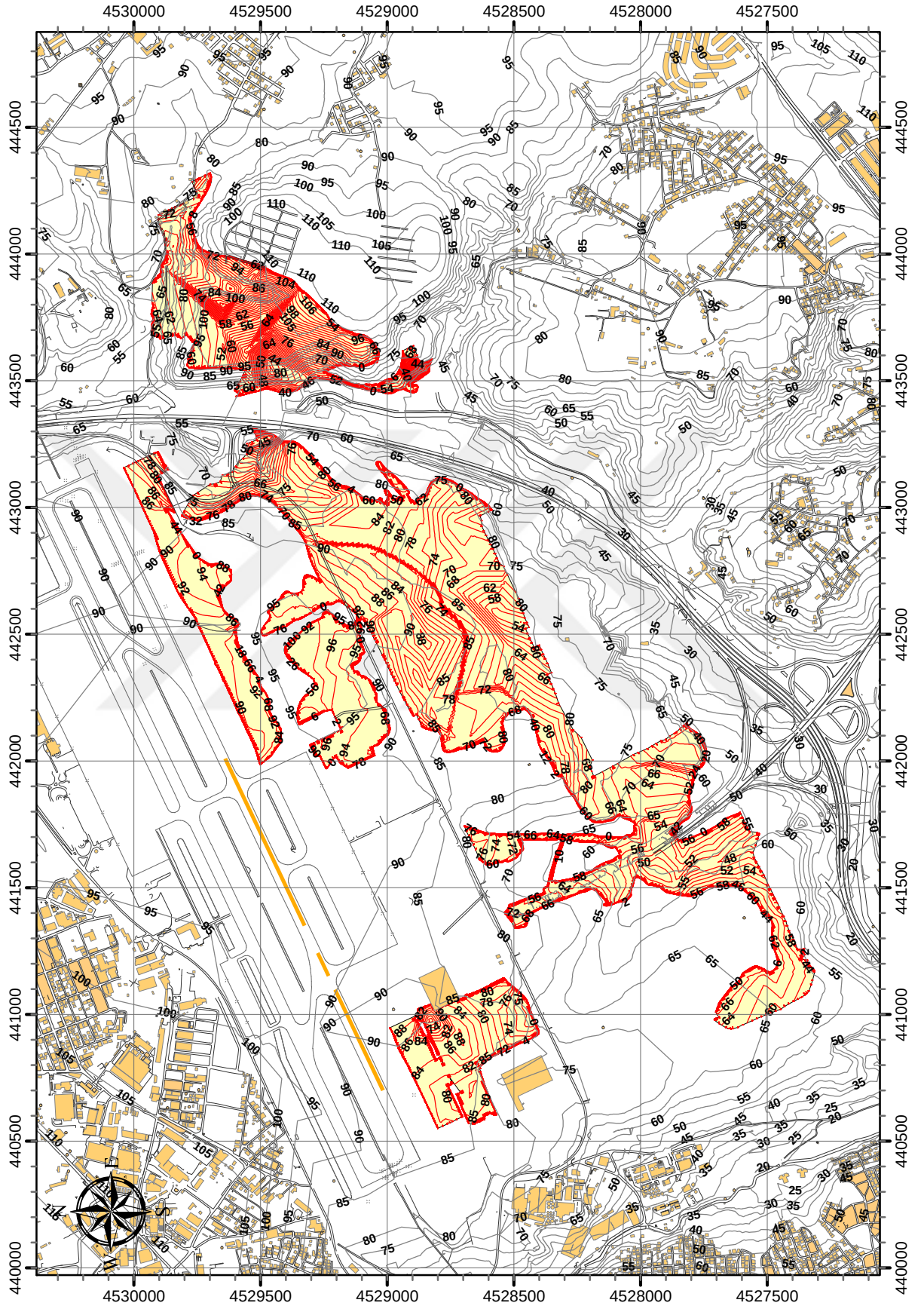
**Şekil 4.24:** Bitkisel toprak, yapay dolgu ardalanması ve Orhanlı üyesinin konumu.

Çalışma alanı ve çevresi için oluşturulan jeoloji haritası ile zemin araştırma sondajları ve araştırma çukuru verileri kullanılarak, yapay dolgu ve Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesine ait kil birimlerin taban kontur haritaları oluşturulmuştur (Şekil 4.26 ve Şekil 4.27). Oluşturulan bu haritalar ve hâlihazır harita yüzeyleri kullanılarak, konsolidasyon analizlerinde kullanmak üzere, her iki birimin kalınlık değişimi tespit edilmiştir (Şekil 4.28 ve Şekil 4.29). Oluşturulan haritalar ve yapılan hesaplamalara göre, alanda Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi kil düzeyleri 61 m kalınlığa, yapay dolgu birim kil düzeyler ise 90 m kalınlığa ulaşmaktadır.



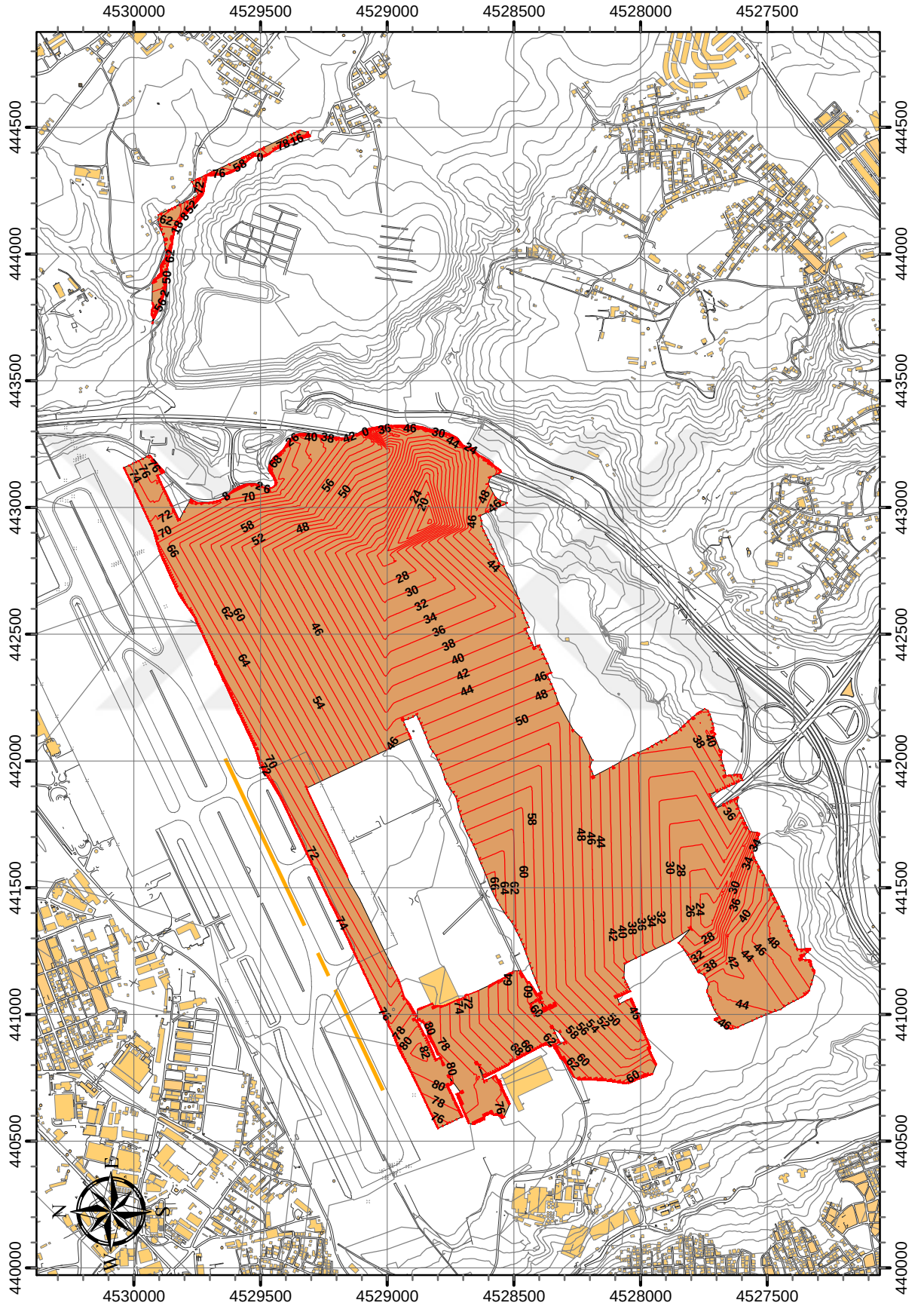


**Şekil 4.25:** Çalışma alanında Paleozoik birimler, Sultanbeyli formasyonu Orhanlı üyesi ve kil dolgu birimlerin alansal yayılımı.

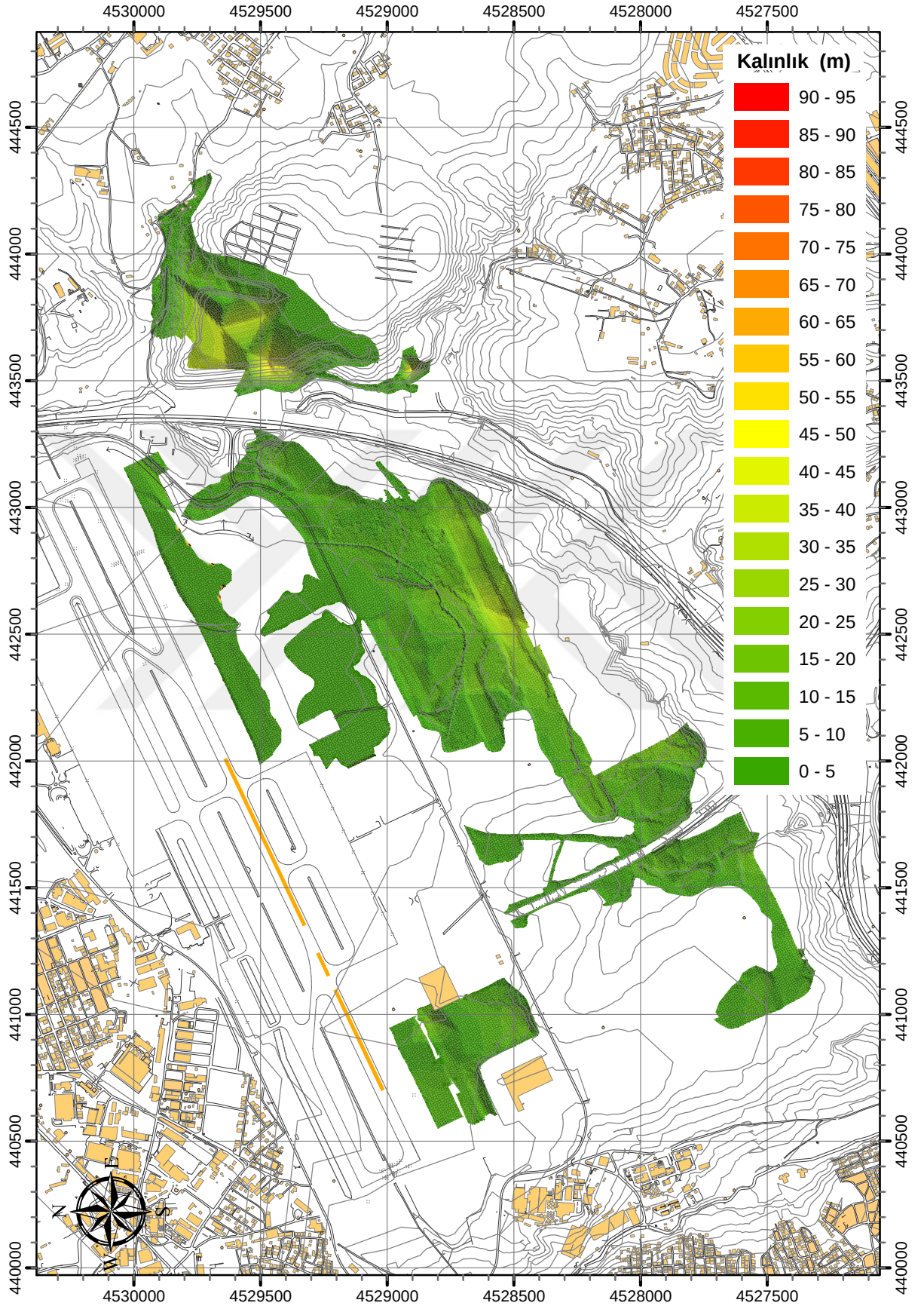


Şekil 4.26: Yapay dolgu taban kontur haritası.



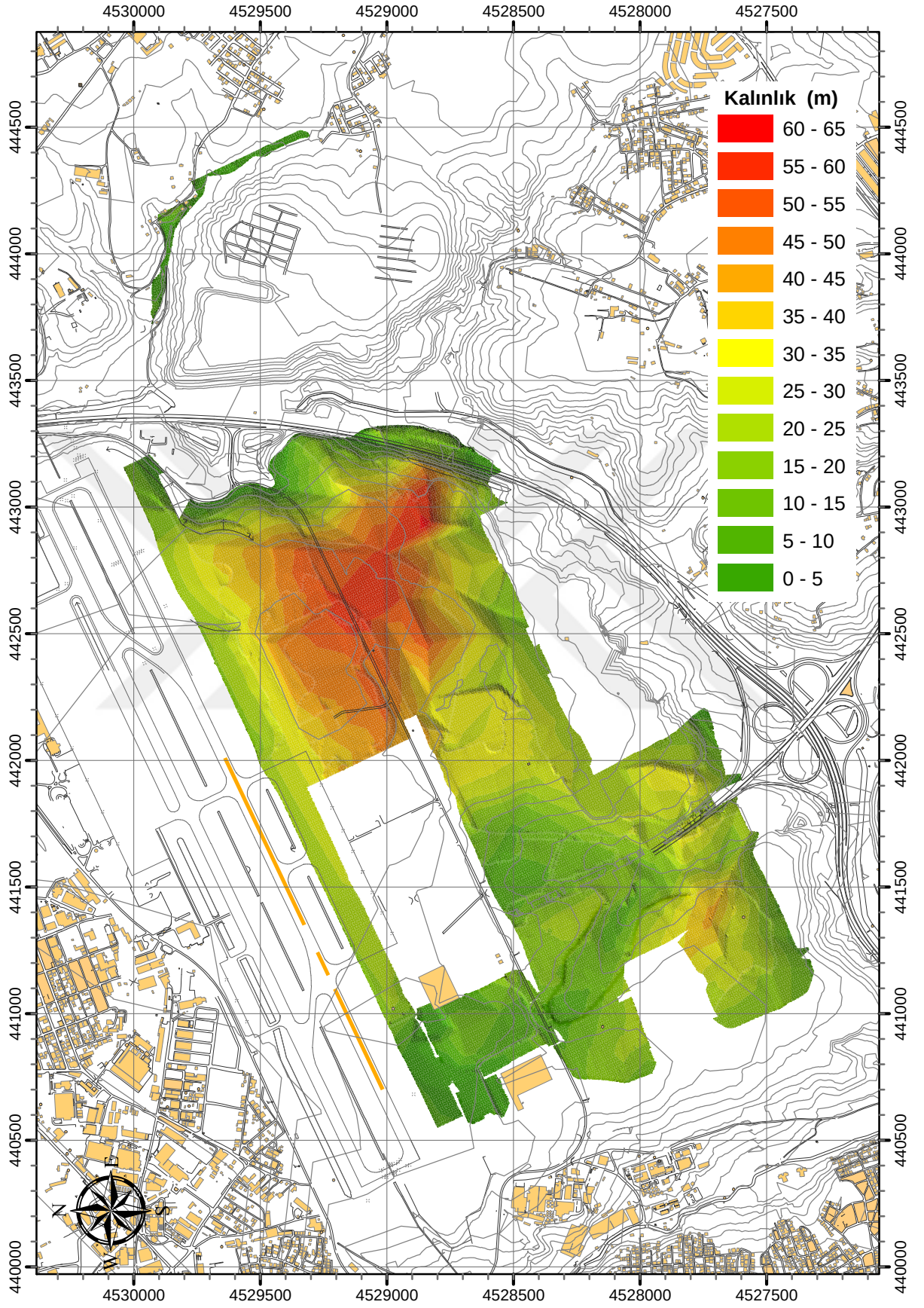


Şekil 4.27: Sultanbeyli Formasyonu taban kontur haritası.



Şekil 4.28: Çalışma alanında, yapay dolgu kalınlık değişimi.





#### 4.4. ÇALIŞMA ALANININ MÜHENDİSLİK JEOLJİSİ

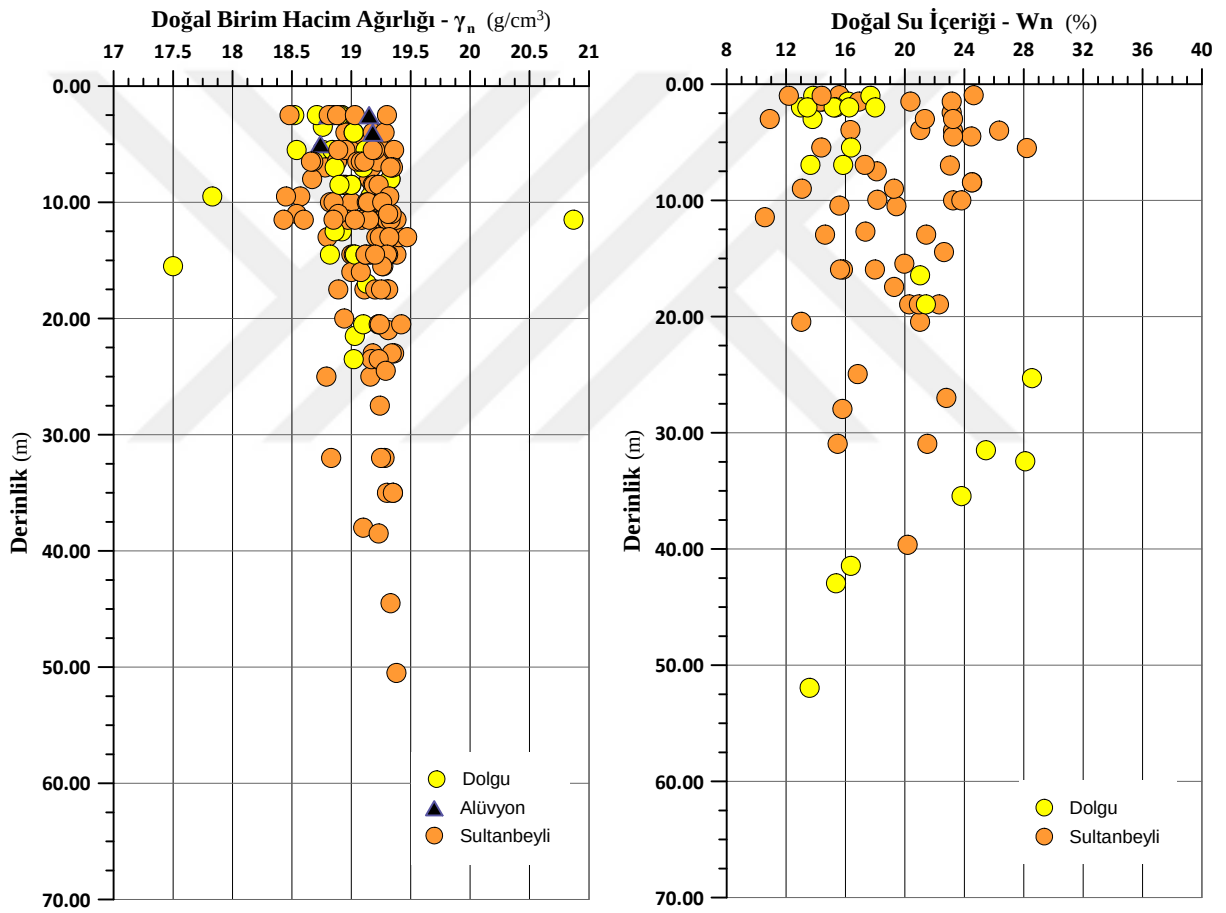
Tez çalışmasının ana konusunu oluşturan dolgu yükü altında konsolidasyonun sınırlandırılması ve bu amaç doğrultusunda geliştirilen yöntemle yapılan hesaplamalarda, alanda yüzeylenen jeolojik birimlerin mühendislik özelliklerinin, hesaplamalarda gerekli parametreler doğrultusunda tanımlanması önem arz etmektedir. Konsolidasyon oturması hesaplarında, efektif gerilme değişimi, sıkışabilir tabaka kalınlığı, boşluk oranı, sıkışma indeksi ve konsolidasyon katsayısı ana parametreleri oluşturmaktadır. Çalışmada, proje yükü altında kalacak olan birimlerin, fiziksel ve mekanik özellikleri, yeraltı suyu durumu ve proje yüklerinin uygulanma şekli değerlendirilmiş ve konsolidasyon oturması hesabı için gerekli parametreler belirlenmiştir. Değerlendirmeye alınan veriler, havalimanının fizibilite ve avan proje aşamasında yapılan arazi ve laboratuvar çalışmaları ile bu çalışmalara ilave olarak uygulama projesi safhasında yapılan çalışmalardan sağlanmıştır. Uygulama projesi safhasında yapılan ilave arazi ve laboratuvar çalışmaları, tez konusu çalışma doğrultusunda yapılan, yönlendirme ve kontrollerle yürütülmüştür. Çalışmada, değerlendirmeye alınan arazi ve laboratuvar deneyleri Tablo 4.9’da sunulmuştur. Deney sonuçları, sondaj ve araştırma çukuru litolojik verileri kullanılarak, her bir sonucun ait olduğu litostratigrafi birimi belirlenmiş ve bu sınıflama doğrultusunda yapılan değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur.

**Tablo 4.9:** Çalışma alanında değerlendirmeye alınan arazi ve laboratuvar deneyleri

| <b>Deney Türü</b>                  | <b>Deney Sayısı</b> |
|------------------------------------|---------------------|
| <b>Arazi Deneyleri</b>             |                     |
| Kanatlı kesici                     | 70                  |
| Değişken seviyeli geçirimsizlik    | 60                  |
| Menard presiyometre                | 190                 |
| Standard penetrasyon               | 835                 |
| <b>Laboratuvar Deneyleri</b>       |                     |
| Su muhtevası                       | 340                 |
| Atterberg limitleri                | 390                 |
| Elek/Hidrometre                    | 400                 |
| Birim hacim ağırlığı               | 160                 |
| Özgül ağırlık                      | 50                  |
| Serbest basınç                     | 90                  |
| Üç eksenli basınç (UU)             | 40                  |
| Üç eksenli basınç (CU)             | 10                  |
| Zeminde direk kesme                | 54                  |
| Konsolidasyon                      | 130                 |
| Tek eksenli basınç dayanımı (kaya) | 20                  |
| Nokta yükleme                      | 80                  |

#### 4.4.1. Fiziksel Özellikler

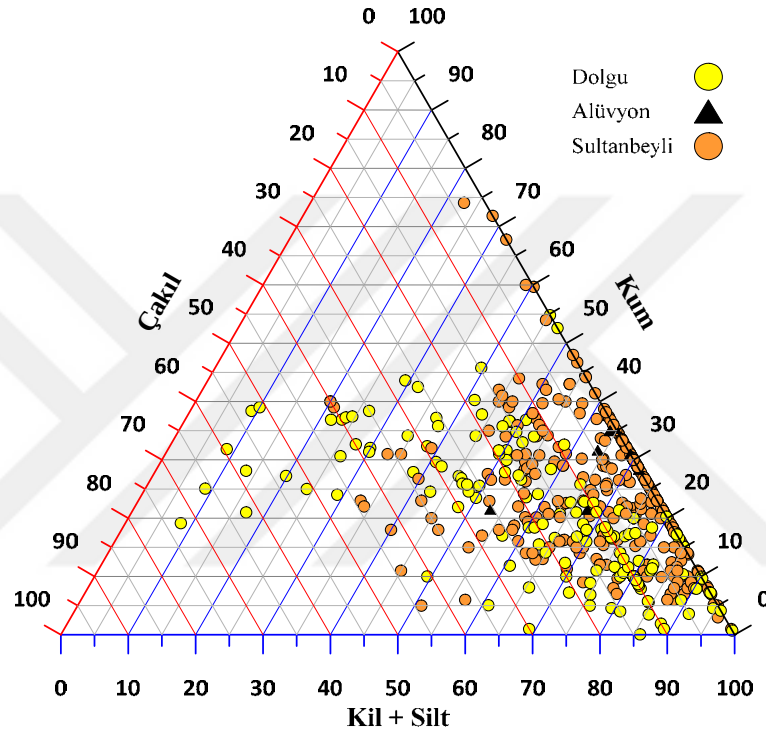
Çalışma alanında Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, alüvyon ve yapay dolgu birimlerinde, indeks özelliklerin belirlenmesi amacıyla yapılan, zemin araştırma sondajlarından elde edilen örnekler üzerinde, doğal su içeriği, doğal birim hacim ağırlık elek analizi ve atterberg limitleri deneyleri yapılmıştır. Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, Alüvyon ve Yapay Dolgu örnekler üzerinde yapılan doğal birim hacim ağırlığı deneylerinde, genel olarak  $18.5 \text{ g/cm}^3$  ile  $19.5 \text{ g/cm}^3$  arasında değerler tespit edilmiştir. Orhanlı üyesi ve Yapay Dolgu birimlerde doğal su içeriği ise yaklaşık %11 ile %29 arasında değişmektedir (Şekil 4.30).



**Şekil 4.30:** Doğal birim hacim ağırlığı ve su içeriği sonuçlarının derinlikle değişimi.

Elek analizi sonuçlarına göre; Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait örnekler, en fazla %45 çakıl, %75 kum ve en az %20 kil dane boyu malzeme içermektedir. Bu birimde, kum boyu danelerin %50'den fazla olduğu örneklerin, tüm örneklerle oranı %1.9 seviyesindedir. Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait örneklerin %90'ı, %50'den fazla kil ve silt boyu dane içermektedir. Alüvyon örneklerinin tümünde kil ve silt boyu dane oranı %53'ten fazladır. Bu örneklerde, ortalama %30.7 kum boyu danelerden oluşmakta ve çakıl oranı ise %0 ile

%25.48 arasında değişmektedir. Dolgu olarak sınıflanan birimde ise çakıl boyu daneler en fazla %72, kum boyu daneler ise en fazla %54 düzeyindedir. Dolgu birimde kil ve silt boyu danelerin ağırlıkça %50'den fazla bulunduğu örnekler tüm örneklerin %67'sini oluşturmaktadır. Tüm örneklerin sayısına göre hesaplanan bu oran, kum boyu daneler için %1.2, çakıl boyu daneler için ise %5.5 düzeyindedir. Sonuç olarak, değerlendirilen üç birimde de baskın dane boyu kil ve silttir.

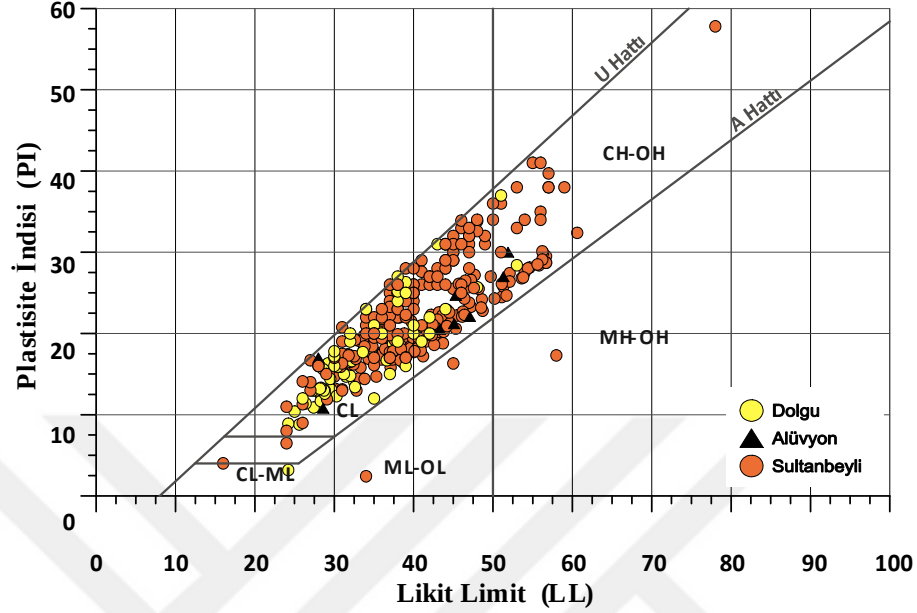


**Şekil 4.31:** Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, alüvyon ve yapay dolgu birimleri dane boyu dağılımı.

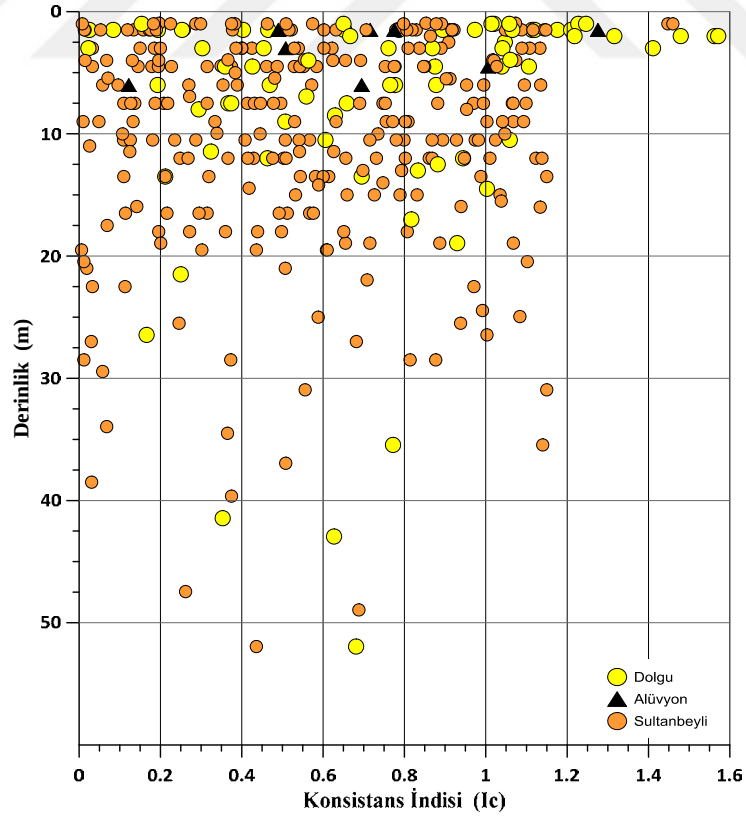
Orhanlı üyesi, alüvyon ve yapay dolguya örneklerinde yapılan, atterberg limitleri deneyi sonuçları plastisite kartında değerlendirilmiştir (Şekil 4.32). Kil örneklerin %88'i, birleştirilmiş zemin sınıflamasına göre, düşük ve orta plastisiteli inorganik killler, kumlu, çakıllı ve siltli killler (CL) sınıfındadır. Aynı örneklerin %11'i yüksek plastisiteli inorganik killler (CH) sınıfında olup %1'i gibi az bir oranı ise ince kum, killi kum, killi silt ve siltli zeminler (ML ve MH) sınıfındadır. Bununla birlikte yapay dolgu birime ait kil örneklerin %97'sinin CL sınıfında killeri olduğu hesaplanmıştır. Kil örnekler için belirlenen, su içeriği, likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri kullanılarak, rölatif konsistans ile likitlik indisi değerleri hesaplanmış ve her iki indise göre; tüm örneklerin %81'inin plastik kıvamlı, %19'unun ise katı kıvamlı olduğu saptanmıştır (Şekil 4.33 ve Şekil 4.34). Hesaplanan indis değerlerinin derinlikle



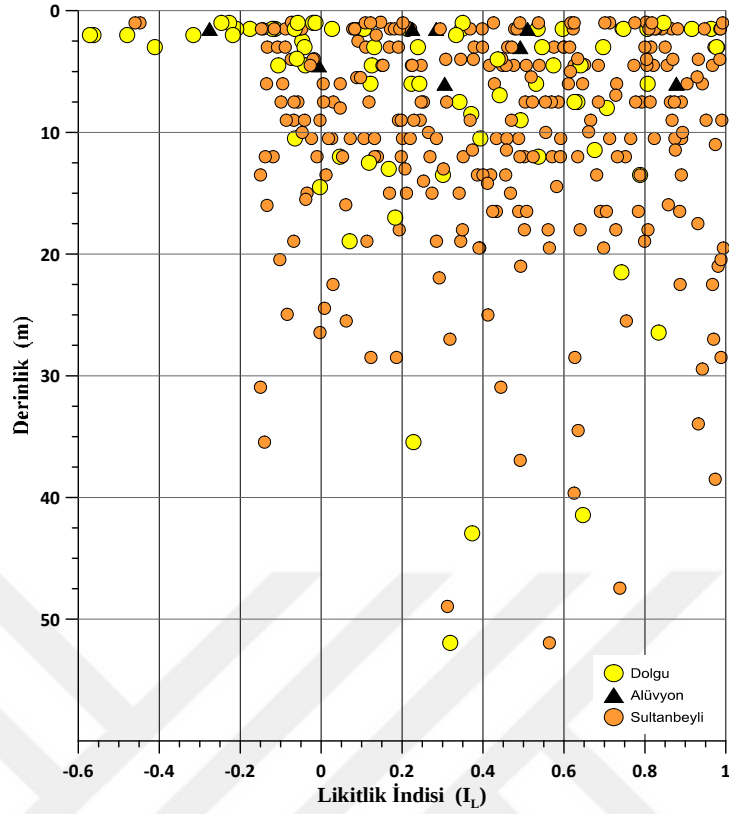
değişiminin değerlendirilmesi amacıyla hazırlanan Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'te, derinliğe bağlı belirgin bir kıvam artışının bulunmadığı saptanmıştır.



Şekil 4.32: Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, alüvyon ve yapay dolgu birimleri, kil örneklerin plastisite kartındaki konumu.

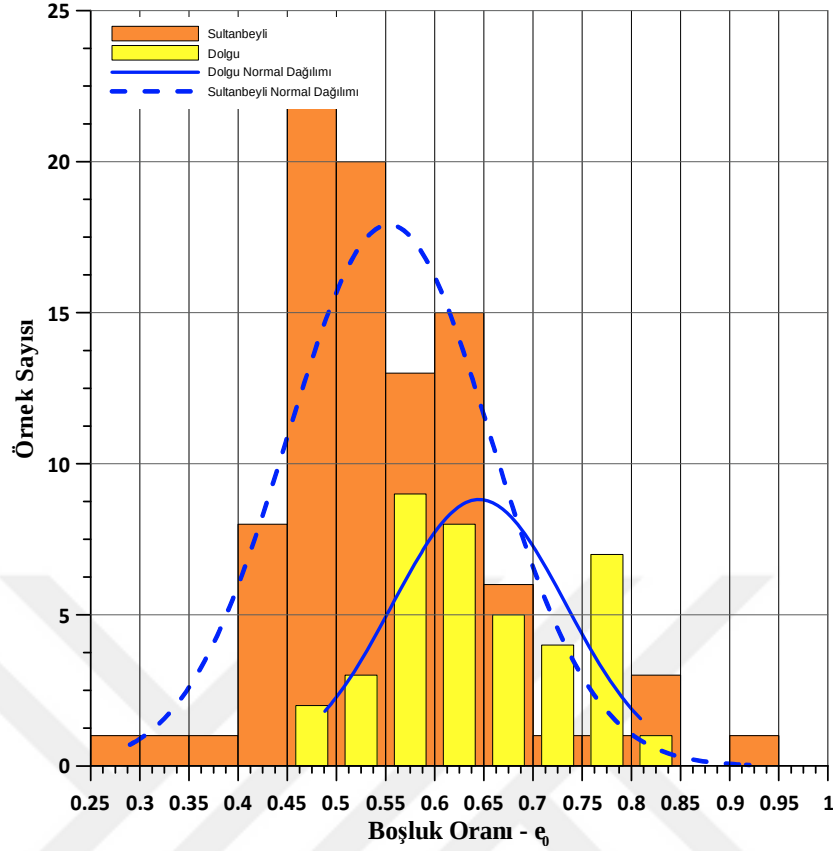


Şekil 4.33: Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, alüvyon ve yapay dolgu birimleri, kil örneklerin konsistans indisi değerlerinin derinlikle değişimi.



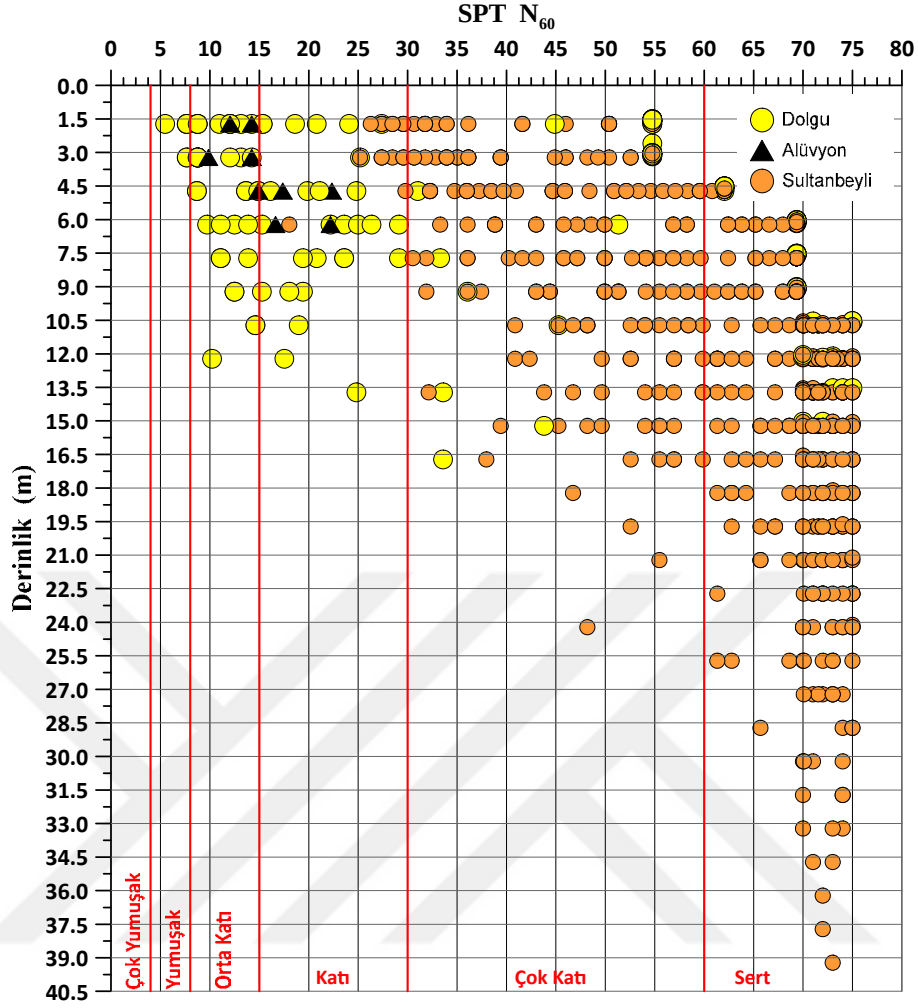
**Şekil 4.34:** Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, alüvyon ve yapay dolgu birimleri, kil örneklerin likitlik indisi değerlerinin derinlikle değişimi.

Ödometre deneyleri sırasında örneklerin ilk boşluk oranları hesaplanmıştır. Hesaplanan bu boşluk oranı değerlerinin, Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait killerde %29 ile %92, yapay dolgu birimde ise %48 ile %81 arasında değiştiği belirlenmiştir (Şekil 4.35). Alüvyon örneklerde ise %30 ile %73 arasında değişmektedir. Genel dağılımı etkileyecek şekilde saçılım gösteren değerlerin, genel dağılımdaki etkisinin azaltılması için boşluk oranı değerlerinin geometrik ortalaması alınmış ve Orhanlı üyesi örnekleri için %54, yapay dolgu için ise %64 değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu ortalama değerler, Şekil 4.35'te verilen, pik noktası aritmetik ortalamayı temsil eden, normal dağılım eğrileriyle karşılaştırıldığında, aritmetik ortalamadan ağırlıklı dağılım yönünde saptığı ve daha kapsayıcı sonuçlar verdiği görülmektedir.



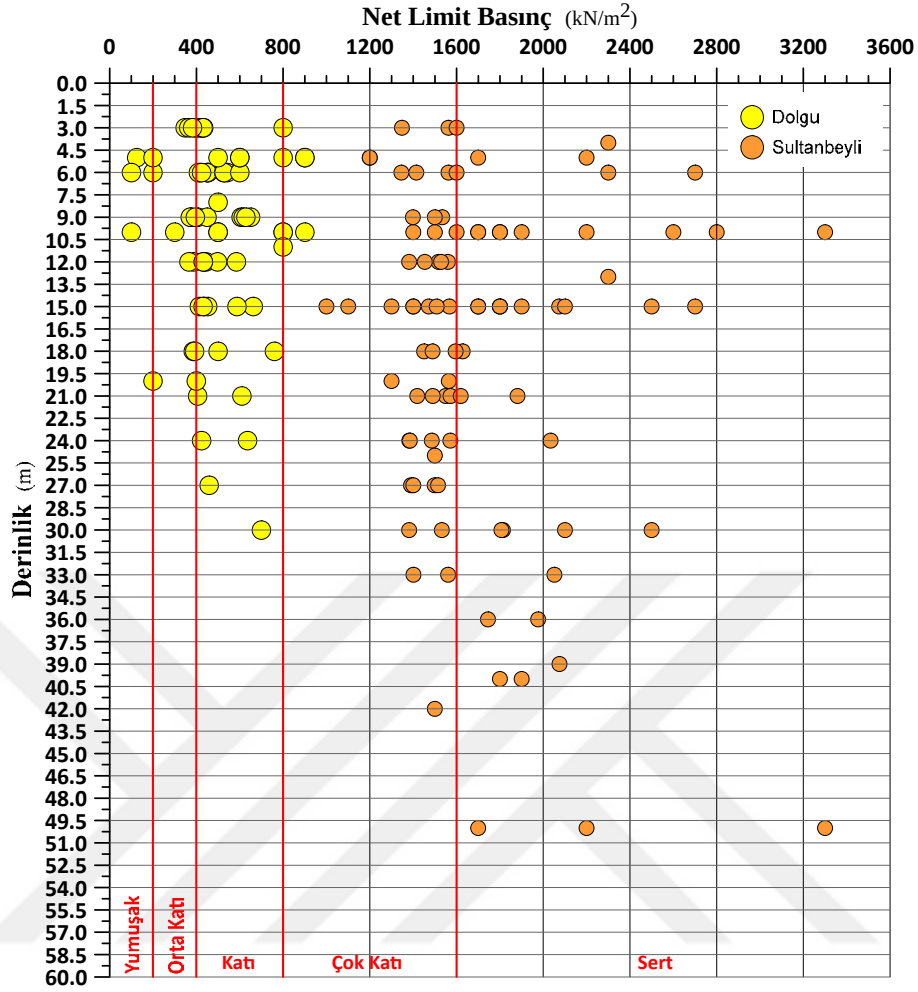
**Şekil 4.35:** Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi ve yapay dolgu birime ait örneklerde, boşluk oranı değerlerinin örnek sayılarına göre değişimi ve normal dağılım eğrileri.

Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, alüvyon ve yapay dolgu birimlerde, kıvam özelliklerinin derinlikle değişiminin yerinde yapılan deneyler ile değerlendirilmesi amacıyla, ilave zemin araştırma sondajlarında yaptırılan standart penetrasyon deneyi sonuçları kullanılmıştır. Bu deneyler sonucunda elde edilen N darbe sayılarında, delgi çapı, tij uzunluğu ve tüp tipine göre enerji düzeltmesi yapılmış, %60 enerji oranına karşılık gelen ( $N_{60}$ ) değerleri hesaplanmıştır.  $N_{60}$  değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 4.36’da sunulmuştur. Orhanlı üyesi kil düzeyleri, Clayton (1993) kıvam sınıflamasına göre katı – sert, alüvyon orta katı – katı, dolgu birim ise yumuşak – sert kıvam aralığındadır. Dolgu birim ile Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi arasında, kıvam özellikleri açısından belirgin bir fark saptanmıştır. Dolgu birim yüksek oranda katı kıvamdayken Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi yüksek bir oranda çok katı – katı kıvam özelliğindedir. Orhanlı üyesi, en küçük  $N_{60}$  değerleri derinlikle artmakta ve 21 m’den daha derin seviyelerde sert kıvamlıdır (Şekil 4.36).



Şekil 4.36: Standart penetrasyon testi  $N_{60}$  değerlerinin derinlikle değişimi.

Çalışma alanında, zemin araştırma sondajlarında yapılan presiyometre deneyleri sonucu elde edilen net limit basınçların, Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi ve yapay dolgu birimleri bazında, derinlikle ilişkilendirilerek sınıflanması sonucu, iki birim açısından net bir ayırım ortaya çıktığı belirlenmiştir (Şekil 4.37). Presiyometre deneyi sonucu elde edilen net limit basınç değerleri kullanılarak, Briaud (1993) sınıflamasına göre, yapay dolgu birimlerin orta katı – katı, Orhanlı üyesi’nin ise çok katı – sert kıvamlı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.37).



Şekil 4.37: Net limit basınç değerlerinin derinlikle değişimi.

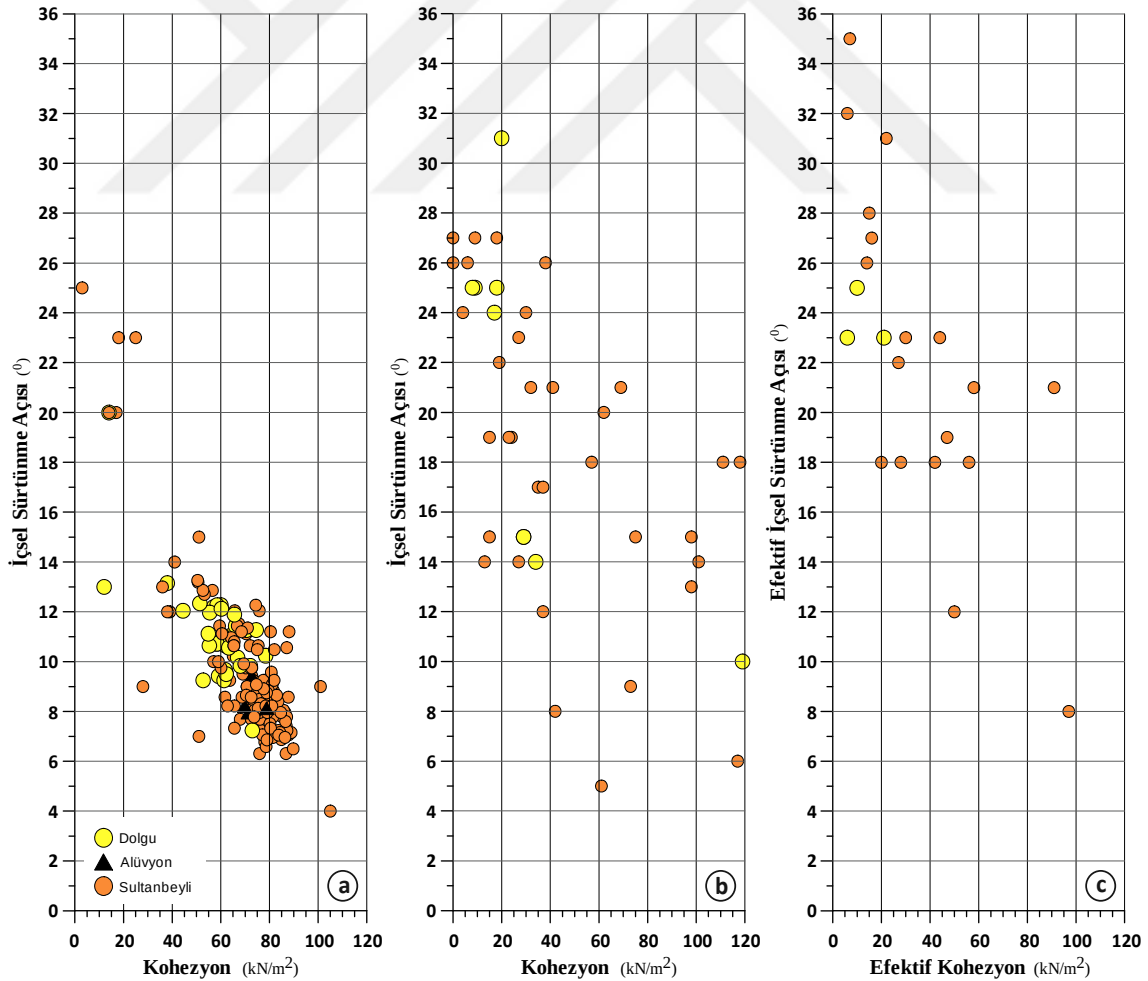
#### 4.4.2. Mekanik Özellikler

Zemin türü birimlerde; konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli basınç (UU), konsolidasyonlu ve drenajsız üç eksenli basınç (CU), direk kesme, tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Bu deneylere ilave olarak, veyn ve cep penetrometresi ile arazi deneyleri yapılmış, toplam ve efektif gerilme koşulları için kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri saptanmıştır. Arazi veyn ve cep penetrometresi kullanılarak yapılan deneyler araştırma çukurunda gerçekleştirilmiş ve aynı derinlikte elde edilen her iki deney sonucu karşılaştırılmıştır. Tüm mekanik deneylere ait sonuçlar, Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, alüvyon ve yapay dolgu birimleri bazında sınıflandırılmış, tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonucu hesaplanan drenajsız kohezyon ( $c_u$ ) değerleri, ayrıca derinlikle ilişkilendirilmiştir. UU, CU ve direk kesme deneylerinin sonuçları Şekil 4.38’de sunulmuştur. Toplam gerilmeler türünden içsel sürtünme açısı değerlerinin yapay dolgu zeminde, Orhanlı üyesi’ne göre daha yüksek olduğu, aynı zamanda, kohezyon değerlerinin 40 kN/m<sup>2</sup> ile 80 kN/m<sup>2</sup> arası genel dağılım göstermesine karşın, Sultanbeyli

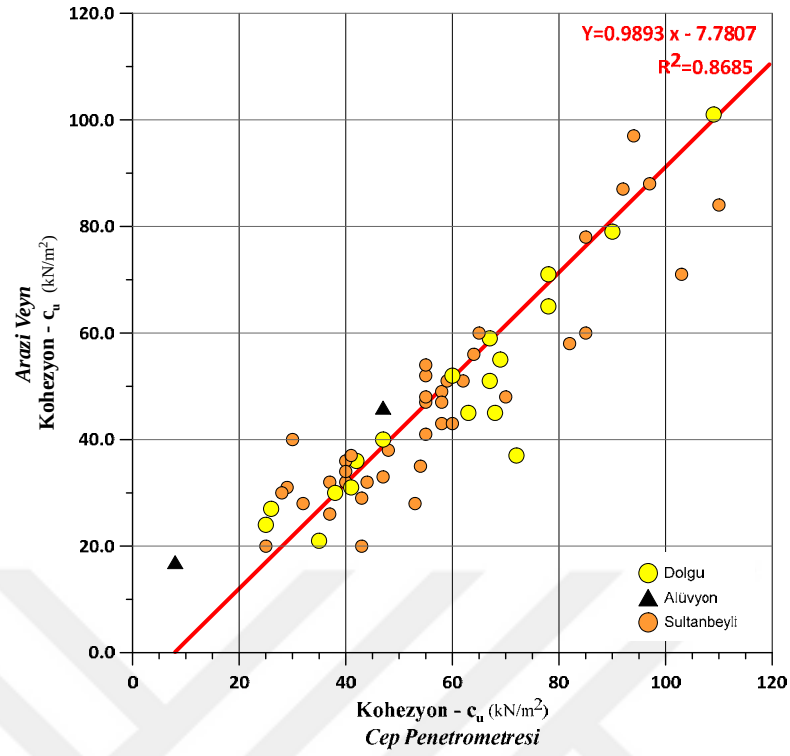


Formasyonu Orhanlı üyesi'nde bu değerlerin  $60 \text{ kN/m}^2$  ile  $100 \text{ kN/m}^2$  arasında yoğunlaştığı saptanmıştır (Şekil 4.38.a). Direk kesme ve CU deneyler ile belirlenen kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri ise, zemin türleri bazında bir farklılık sunmamaktadır (Şekil 4.38.b ve Şekil 4.38.c).

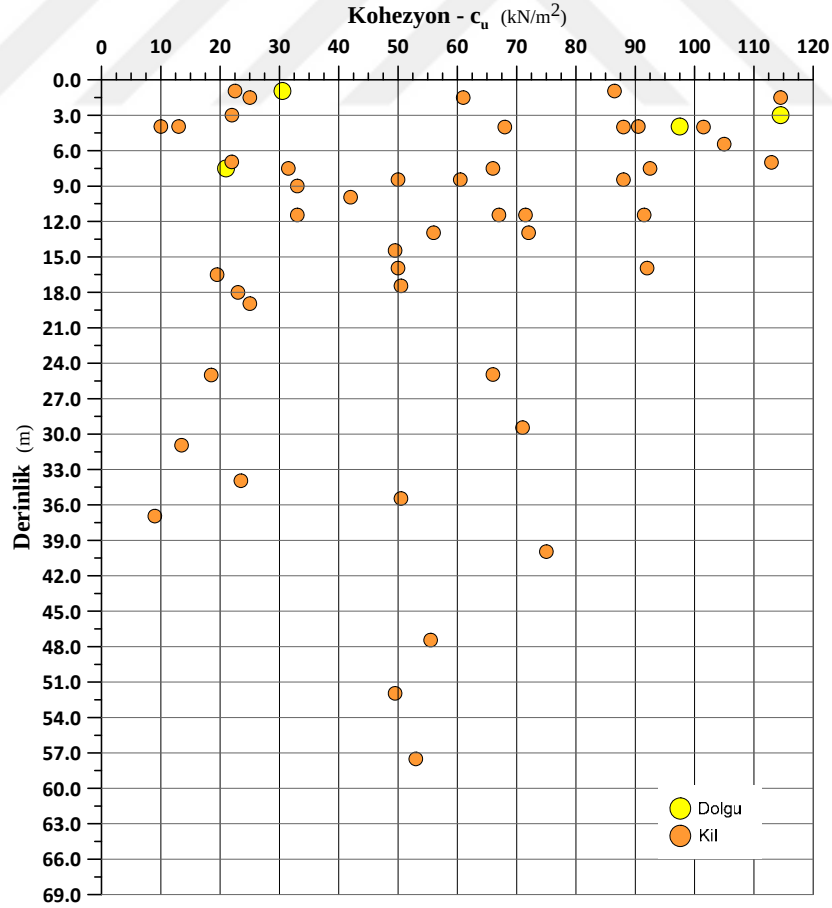
Çalışma alanında açılan 73 adet araştırma çukurunda, arazi veyn ve cep penetrometresi ile drenajsız kohezyon ( $c_u$ ) değerleri belirlenmiştir. Elde edilen  $c_u$  değerlerinin, Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, alüvyon ve yapay dolgu zeminler türünde bir ayrım sunmadığı belirlenmiştir. Aynı seviye ve zemin türünde yapılan her iki deney sonucu karşılaştırıldığında,  $R^2=0.8685$  değerine sahip doğrusal bir ilişki tespit edilmiştir (Şekil 4.39). Drenajsız kohezyon değerleri arasında benzer sonuçlar elde edilmiş, tek eksenli basınç deneyi sonucu hesaplanan değerlerin derinlikle ilişkilendirilmesi sonucu, derinlikle birlikte belirgin bir artış belirlenmemiştir (Şekil 4.38.b, Şekil 4.38.c ve Şekil 4.40).



**Şekil 4.38:** Kohezyon ve içsel sürtünme açısı ilişkisi, a) üç eksenli basınç deneyi (UU-CU), b) direk kesme deneyi, c) üç eksenli basınç deneyi (CU).

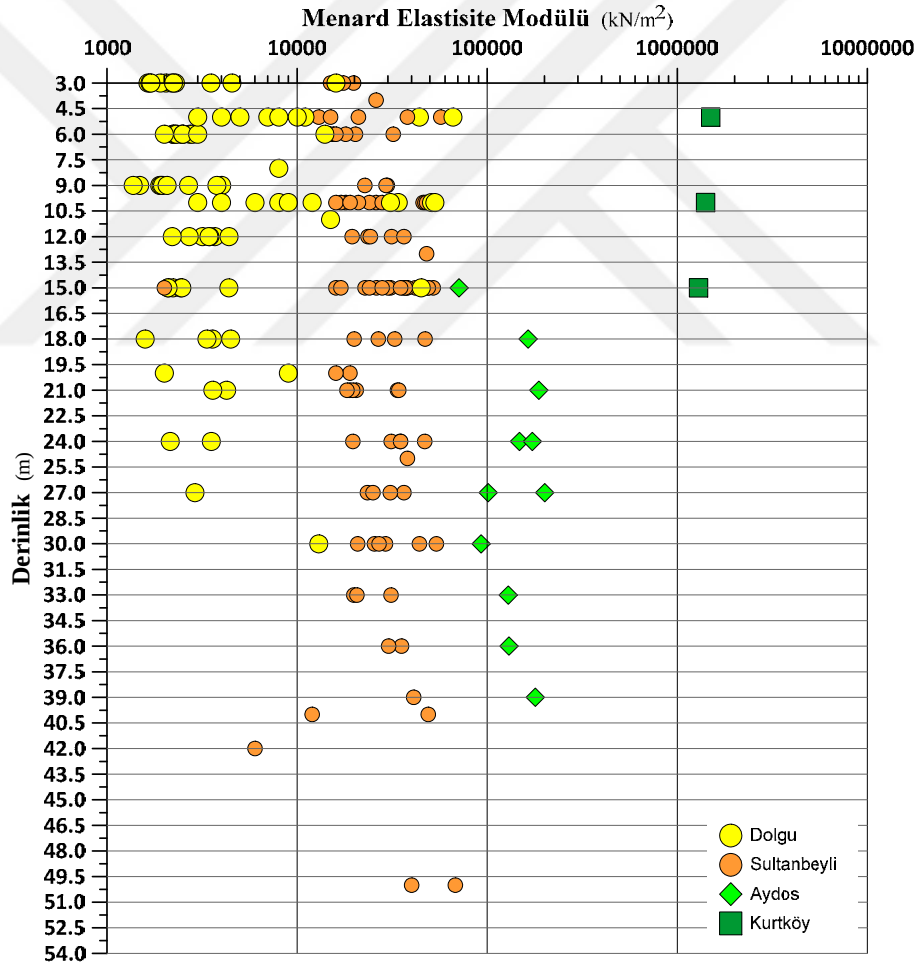


Şekil 4.39: Cep penetrometresi ve arazi veyn deneyi, drenajsız kohezyon ( $c_u$ ) ilişkisi.



Şekil 4.40: Serbest basınç deneyi sonucu elde edilen drenajsız kohezyon değerlerinin derinlikle değişimi.

Zemin araştırma sondajlarının 37 adedinde toplam 190 seviyede presiyometre deneyi yapılmıştır. Zemin araştırma sondajları ile deney seviyelerinin ilişkilendirilmesiyle, deneylerin, 3 adedinin Kurtköy Formasyonu, 11 adedinin Aydos Formasyonu, 95 adedinin Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, 80 adedinin ise yapay dolgu seviyesinde gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. Deneyler sonucu oluşturulan gerilme – hacim değişimi grafikleri kullanılarak Menard Elastisite Modülleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler, temsil ettikleri deney zonuna göre sınıflanmıştır (Şekil 4.41). Dört farklı birim için sınıflanmış Menard elastisite modülü değerleri derinlikle ilişkilendirildiğinde, elastisite modülü değerlerinin, her bir birim için birbirinden farklı aralıklarda yoğunlaştığı belirlenmiştir. Elastisite modülleri, en küçük, en büyük, ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 4.10’da verilmiştir.

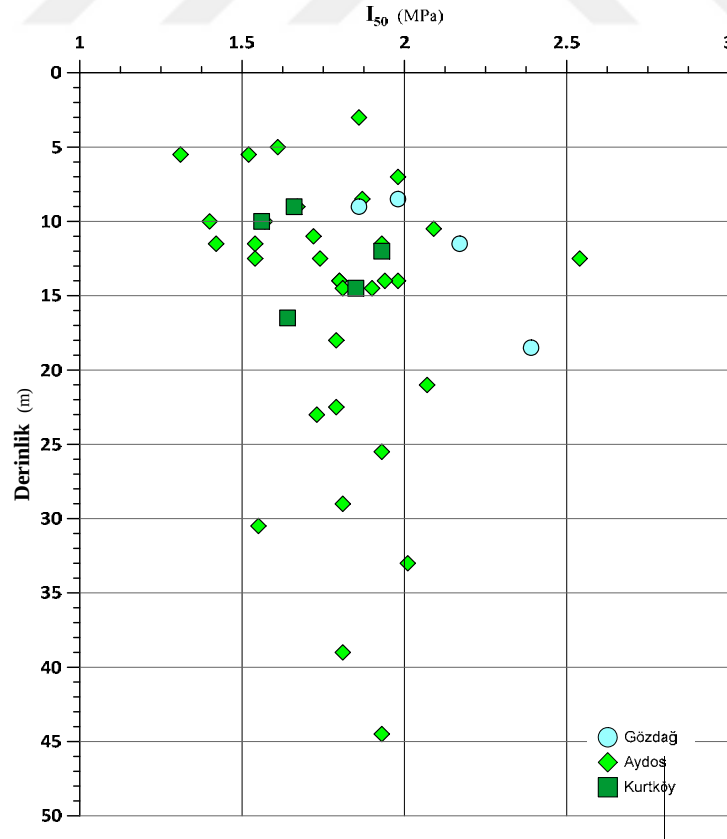


Şekil 4.41: Menard Elastisite Modülü değerlerinin derinlikle değişimi.

**Tablo 4.10:** Menard elastisite modülü, en küçük, en büyük, ortalama ve standart sapma değerleri.

| Deney Zonundaki Birim        | Menard Elastisite Modülü (kN/m <sup>2</sup> ) |          |          |                |
|------------------------------|-----------------------------------------------|----------|----------|----------------|
|                              | En Küçük                                      | En Büyük | Ortalama | Standart Sapma |
| Yapay Dolgu                  | 1372                                          | 66000    | 7990     | 12801          |
| Sultanbeyli Fm. Orhanlı Üy.. | 2000                                          | 68000    | 29178    | 12216          |
| Aydos F.                     | 71110                                         | 200490   | 143246   | 40104          |
| Kurtköy F.                   | 1293000                                       | 1501000  | 1401333  | 85136          |

Çalışma alanında, kaya özelliğindeki, Kurtköy, Aydos ve Gözdağ formasyonlarına ait örnekler üzerinde sınırlı sayıda örnekte (80 adet) nokta yükleme deneyi yapılmıştır. Nokta yükleme dayanım indeksi değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 4.42’de sunulmuştur. Dayanım indeksi değerlerinin Kurtköy formasyonuna ait örneklerde, 1.56 MPa – 1.93 MPa, Aydos formasyonuna ait örneklerde, Nokta yükleme indeksi Kurtköy formasyonu için 1.31 MPa – 2.54 MPa, Gözdağ formasyonu örneklerinde ise 1.86 MPa – 2.39 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir (Şekil 4.42). Laboratuvar deneyi sonuçları ve arazi çalışmaları ile Bieniawski (1989) kaya kütlesi sınıflaması sistemi (RMR) kullanılarak sınıflandırılmıştır (Tablo 4.11). Bu sınıflamaya göre, üç formasyona ait kaya kütlesi orta kaliteli sınıftadır.

**Şekil 4.42:** Nokta yük dayanım indeksi ( $I_{50}$ ) değerlerinin derinlikle değişimi.

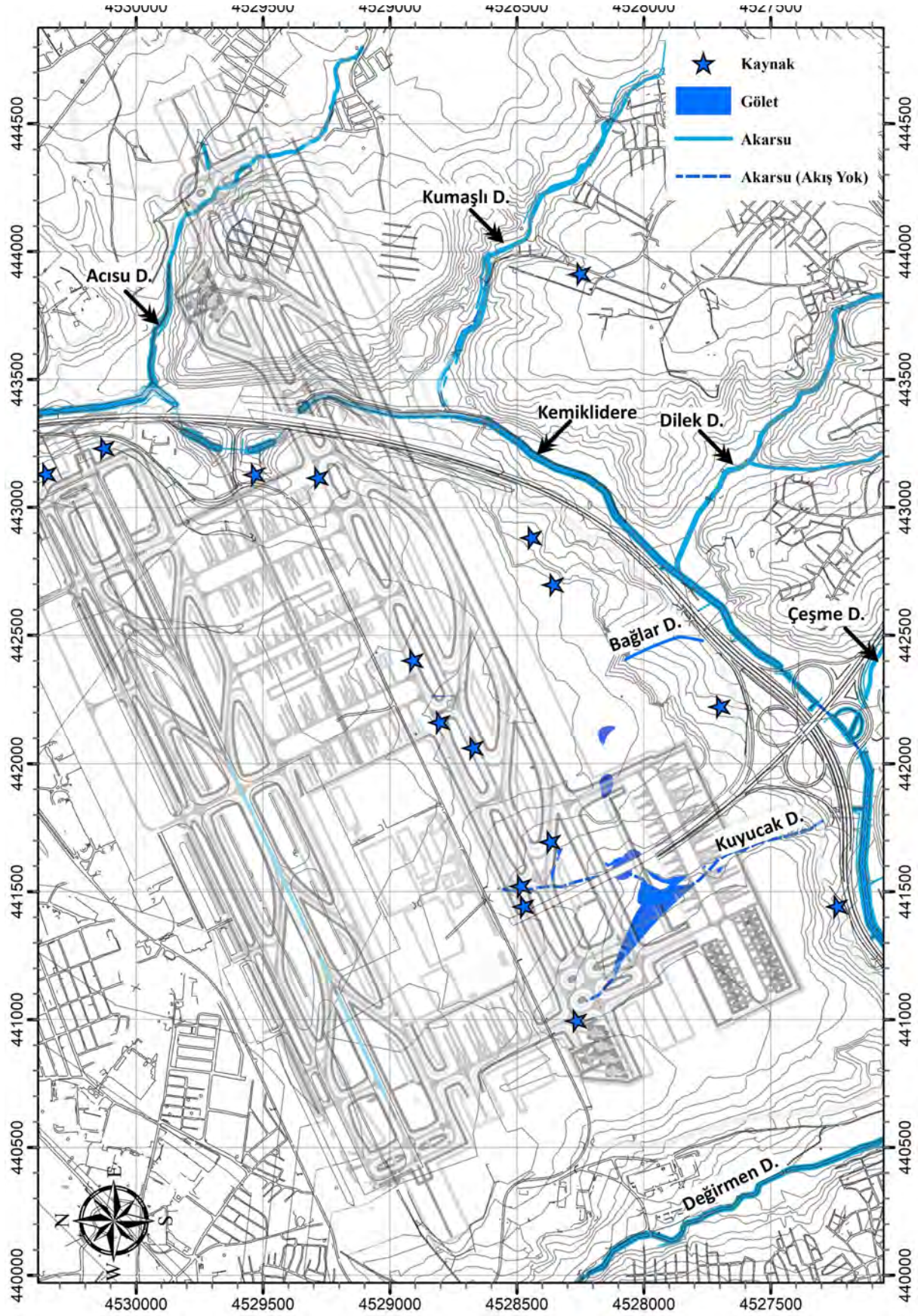
**Tablo 4.11:** Çalışma alanında yüzeylenen kaya stratigrafi birimlerinin RMR (1989) sınıflaması

|                                              | Gözdağ Formasyonu<br>(Kumtaşı)                                  |                                                        |                                                        | Kurtköy Formasyonu<br>(Arkozik Kumtaşı)                         |                                                        |                                                        | Aydos Formasyonu<br>(Kuvarsit)                                                 |                                                        |                                                        |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
|                                              | En kötü                                                         | Ortalama                                               | En iyi                                                 | En kötü                                                         | Ortalama                                               | En iyi                                                 | En kötü                                                                        | Ortalama                                               | En iyi                                                 |
| <b>Taze Kaya Malzemesinin Dayanımı</b>       | 1.5                                                             | 9.6                                                    | 46.4                                                   | 1.4                                                             | 27.9                                                   | 240.2                                                  | 1.0                                                                            | 50.0                                                   | 186.5                                                  |
| <b>RMR Puanı</b>                             | 1                                                               | 2                                                      | 4                                                      | 1                                                               | 4                                                      | 12                                                     | 1                                                                              | 4                                                      | 12                                                     |
| <b>RQD</b>                                   | <25%                                                            | 25%-50%                                                | 90%-100%                                               | <25%                                                            | 25%-50%                                                | 90%-100%                                               | <25%                                                                           | 25%-50%                                                | 75%-90%                                                |
| <b>RMR Puanı</b>                             | 3                                                               | 8                                                      | 20                                                     | 3                                                               | 8                                                      | 20                                                     | 3                                                                              | 8                                                      | 17                                                     |
| <b>Süreksizlik Açıklığı</b>                  | <60mm                                                           | 60-200 mm                                              | 200-600 mm                                             | <60mm                                                           | 60-200 mm                                              | 200-600 mm                                             | <60mm                                                                          | 60-200 mm                                              | 60-200 mm                                              |
| <b>RMR Puanı</b>                             | 5                                                               | 8                                                      | 10                                                     | 5                                                               | 8                                                      | 10                                                     | 5                                                                              | 8                                                      | 8                                                      |
| <b>Süreksizlikleri n Durumu</b>              | Yumuşak dolgu, kalınlık >5 mm veya yarı genişliği >5 mm sürekli | Az pürüzlü yüzeyler, yarı genişliği <1 mm çok bozuşmuş | Az pürüzlü yüzeyler, yarı genişliği <1 mm çok bozuşmuş | Yumuşak dolgu, kalınlık >5 mm veya yarı genişliği >5 mm sürekli | Az pürüzlü yüzeyler, yarı genişliği <1 mm çok bozuşmuş | Az pürüzlü yüzeyler, yarı genişliği <1 mm çok bozuşmuş | Çizikli yüzeyler veya dolgu kalınlığı <5 mm veya yarı genişliği 1-5 mm sürekli | Az pürüzlü yüzeyler, yarı genişliği <1 mm çok bozuşmuş | Az pürüzlü yüzeyler, yarı genişliği <1 mm çok bozuşmuş |
| <b>RMR Puanı</b>                             | 5                                                               | 20                                                     | 25                                                     | 5                                                               | 20                                                     | 25                                                     | 5                                                                              | 20                                                     | 25                                                     |
| <b>Yeraltı Suyu</b>                          | Nemli                                                           | Nemli                                                  | Nemli                                                  | Nemli                                                           | Nemli                                                  | Nemli                                                  | Nemli                                                                          | Nemli                                                  | Nemli                                                  |
| <b>RMR Puanı</b>                             | 10                                                              | 10                                                     | 10                                                     | 10                                                              | 10                                                     | 10                                                     | 10                                                                             | 10                                                     | 10                                                     |
| <b>Süreksizlik yönelimi derecelendirmesi</b> | Uygun değil                                                     | Uygun                                                  | Uygun                                                  | Uygun değil                                                     | Orta                                                   | Uygun                                                  | Uygun değil                                                                    | Orta                                                   | Uygun                                                  |
| <b>RMR Puanı</b>                             | -15                                                             | -7                                                     | -2                                                     | -15                                                             | -7                                                     | -2                                                     | -15                                                                            | -7                                                     | -2                                                     |
| <b>Değerlendirme</b>                         | 9                                                               | 41                                                     | 67                                                     | 9                                                               | 43                                                     | 75                                                     | 9                                                                              | 43                                                     | 70                                                     |
| <b>Sımf No.</b>                              | V                                                               | III                                                    | II                                                     | V                                                               | III                                                    | II                                                     | V                                                                              | III                                                    | II                                                     |
| <b>Tanım</b>                                 | Çok kötü                                                        | Orta kaliteli                                          | İyi                                                    | Çok kötü                                                        | Orta kaliteli                                          | İyi                                                    | Çok kötü                                                                       | Orta kaliteli                                          | İyi                                                    |

#### 4.4.3. Yüzey Suları, Yeraltı Suyu ve Geçirimsizlik

Yüzey suları ile yeraltı suyu seviyesi, özellikle zemin türü jeolojik birimlerin, fiziksel, mekanik ve konsolidasyon özelliklerini doğrudan etkileyen bir parametredir. Çalışma alanında en büyük akarsu, alanı kuzey – güney ve kuzeydoğu – güneybatı doğrultuda uzanan Kemiklidere’dir (Şekil 4.43). Alanda diğer akarsular bu dereyi beslemektedir. Kemiklidere batı kesiminde, Değirmen, Kuyucak ve Bağlar, doğu kesimden ise Acısu, Kumaşlı, Dilek ve Çakal bulunmaktadır. Kemiklidere doğu kesiminde bulunan akarsular ile batı kesiminde bulunan Değirmen Dere’de mevsimsel olarak değişkenlik göstermekle birlikte, yüzeysel akış gözlemlenebilmektedir. Çalışmalar süresince diğer derelerde yüzeysel akışa rastlanmamasına karşın, batı kesimde bulunan ve proje alanı altında kalan Kuyucak ve Bağlar Derelerinde oluşturulmuş derin drenajlarda su gelişleri sürekli dir. Yüzeysel akışın gözlenmediği Kuyucak Deresi üzerinde, göletlerin olduğu alanlar gözlenmiştir (Şekil 4.44).





Şekil 4.43: Çalışma alanında bulunan akarsuların ve yüzeysel kaynakların konumu.

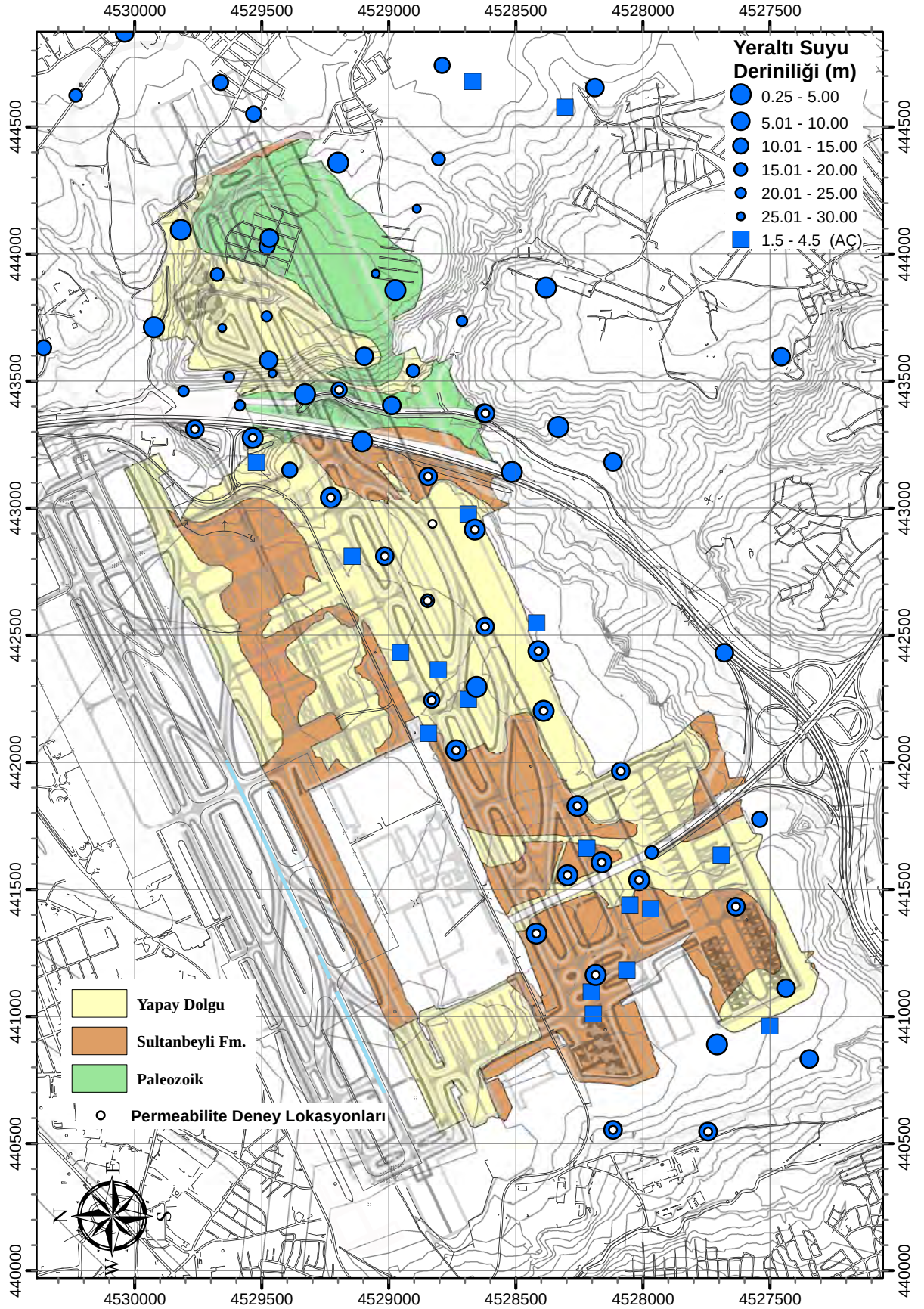




**Şekil 4.44:** Kuyucak Deresi ve üzerinde bulunan Güney Yonca Tüneli batı kesiminde oluşan göletten bir görünüm.

Çalışma alanında, avan proje ve tez çalışması ile birlikte yürütülen, uygulama projesi çalışmaları sırasında yapılan zemin araştırma sondajlarında, zaman içindeki yeraltı suyu değişimlerinin gözlenmesi amacıyla 80 farklı lokasyonda, haftalık periyotta, 5 ay süresince ölçümler yapılmıştır. Ayrıca, tez çalışması sırasında açılan araştırma çukurlarında yeraltı suyu seviyeleri gözlenmiştir. Yeraltı suyu ölçümü yapılan zemin araştırma sondajı ve araştırma çukuru lokasyonları Şekil 4.45'te verilmiştir. Zemin araştırma sondajlarında, yeraltı suyu derinliği 0.25 m ile 28.05 m arasında değişmektedir. Yeraltı suyunun yüzeye yakın, hatta yüzeyde sayılabilecek kadar sığ derinlikte olduğu birimler çalışma alanının batı kesiminde Neojen birimlerin yüzeylendiği alanlardır. Bu alanlarda açılan bazı araştırma çukurlarında yeraltı suyuna rastlanmıştır, bazılarında ise yeraltı suyunun hidrostatik basınç etkisi ve düşük geçirimsizlik nedeniyle, yıkılmalarla karşılaşmıştır (Şekil 4.46).





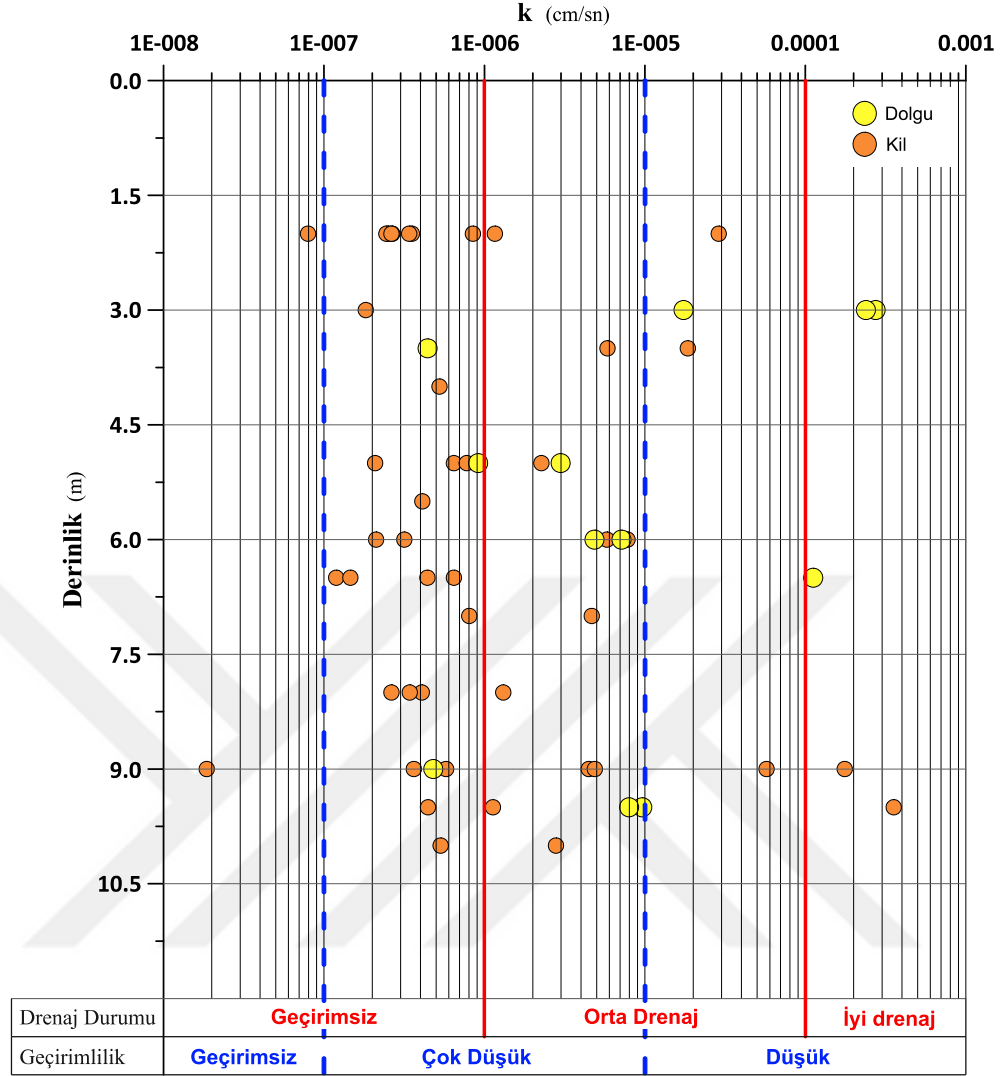
**Şekil 4.45:** Yeraltı suyu derinlik ölçümü ve permeabilite deneyi yapılan zemin araştırma sondajı ve araştırma çukuru lokasyonları ile yeraltı suyu derinlikleri.





**Şekil 4.46:** Yeraltı suyunun yüzeye yakın bulunduğu araştırma çukurundan bir görünüm.

Avan proje çalışmaları sırasında, 22 farklı zemin araştırma sondajında, Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi (Kil) ve yapay dolgu (Dolgu) zeminlere ait 50 cm kalınlığındaki zonlarda olmak üzere, 61 farklı derinlikte, düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılmıştır. Deneylerin yapıldığı sondaj lokasyonları Şekil 4.46’da, permeabilite katsayısı (k) değerleri ise derinliğe bağlı olarak Şekil 4.47’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre her iki birimde Ameratunga ve diğ. (2016) tarafından yapılan sınıflamaya göre çok düşük ve düşük geçirimsilik sınıfındadır.



**Şekil 4.47:** Permeabilite katsayısı değerlerinin derinlikle değişimi ve drenaj durumu ile geçirimsizlik sınıflaması.

#### 4.4.4. Proje Alanında Yük ve Gerilme Değişimi

Proje alanında yük değişimi, proje kotlarını sağlanması amacıyla yapılan kazı ve dolgu çalışmaları ile uçak ve yer hizmet araçlarının alandaki hareketi sonucu ortaya çıkan hareketli yükler sonucu oluşmaktadır. Yük değişimlerinin belirlenmesinde temel kıstas, kazı ve dolgu çalışmalarındaki proje kotları, hareketli yüklerde ise proje tasarımında temel alınan en büyük uçak sınıfıdır. Hareketli yük etkisi ve sabit yüklerde belirlenen değişim miktarları alt başlıklarda sunulmuştur.

##### 4.4.4.1. Hareketli Yükler ve Gerilme Değişimi

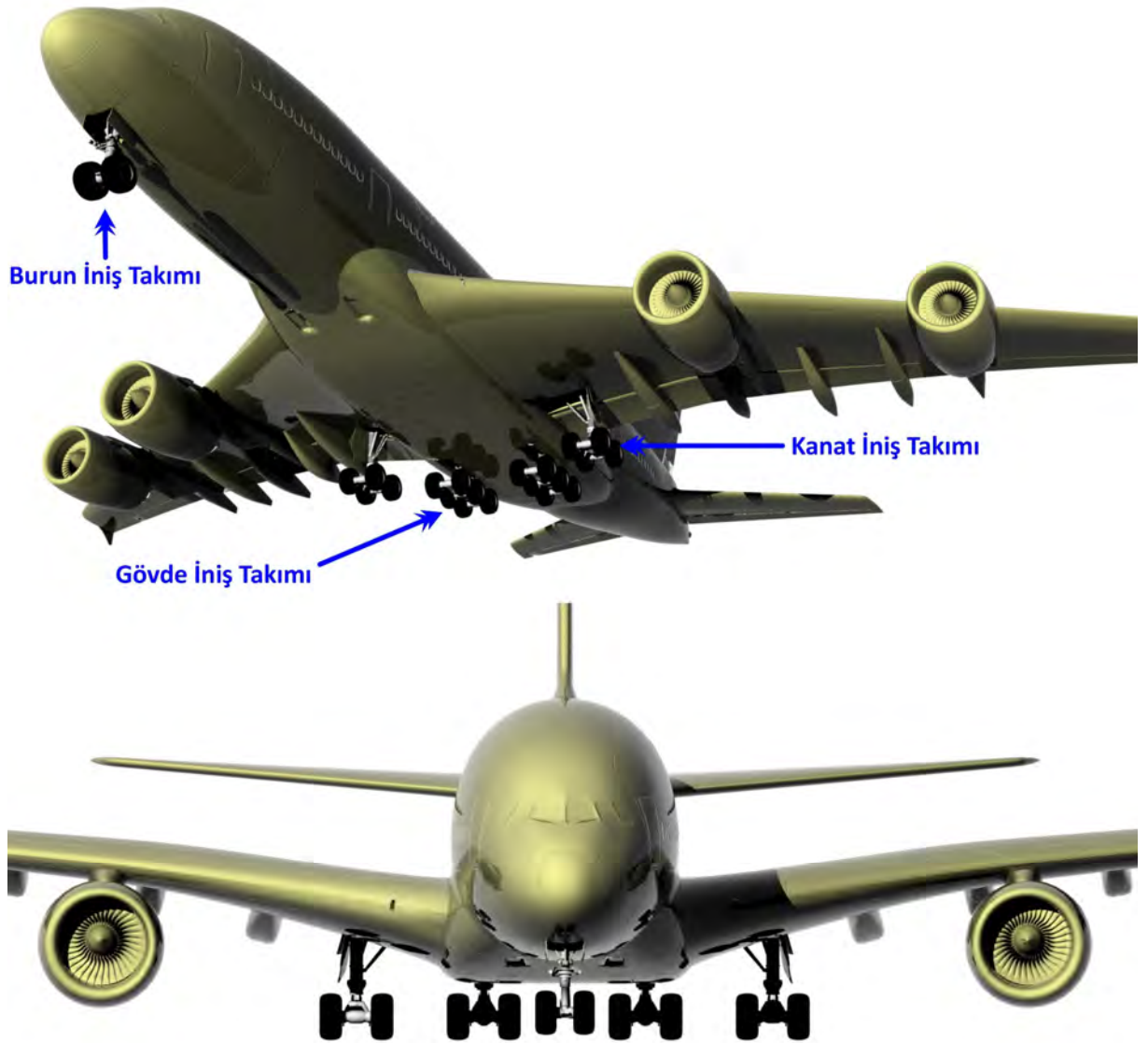
Havalimanı geliştirme projesi temel kriteri, 2028 yılı beklenen hava trafiği hesapları doğrultusunda, 4F kodlu uçak sınıfına göre pist oluşturulmasıdır. Bu kriterin yanı sıra, beklenen

hava trafiğine hizmet verecek pist yardımcı alanlarının oluşturulması esastır. Hava tarafı tasarımı aşamasında, avan proje çalışmaları kapsamında, en yüksek trafiği E Kodlu B747–400ER tipi uçağın oluşturacağı belirlenmiştir (Oakman ve diğ., 2011). Aynı zamanda, havacılık sektöründe, ileride geliştirilecek uçaklara ve ICAO (2009) kriterleri çerçevesinde belirtilen en üst düzey havaalanı referans koduna uyum sağlayabilmek için ise F kodlu A380–800 tipi uçak referans alınmış, 4F kodlu pist ve yardımcı alanları tasarıma dâhil edilmiştir.

Proje alanında, en büyük yükü oluşturması öngörülen A380–800 tipi uçak, 10 farklı yük çeşidine sahiptir. Bu yük çeşitlerinden en ağır olanı, Airbus (2005) tarafından WV011 olarak belirtilmiş ve apron ağırlığı (MRW) 5658.64 kN, kalkış ağırlığı (MTOW) 5639.03 kN, iniş ağırlığı (MLW) 3873.77 kN, yakıtsız ağırlığı (MZFW) ise 3618.78 kN olarak tanımlanmıştır. Uçakların zemine aktaracakları yükler, iniş, kalkış veya statik durumdaki ağırlıklarının yanında, iniş takımları ve bu takımlardaki lastik kombinasyonlarına göre değişiklik göstermektedir. A380–800 tipi uçakta, 2 adet kanatta ve 2 adet gövdede olmak üzere, 4 ana iniş takımı ile 1 adet burun iniş takımı bulunmaktadır (Şekil 4.48). Kanat iniş takımlarının her biri 4, gövde iniş takımının her biri 6 ve burun iniş takımı 2 adet lastikten oluşmaktadır. Bu uçağın MRW durumunda en büyük ağırlığa sahip olduğu düşünüldüğünde, apron beton kaplaması üzerinde etkin yükü 5658.64 kN’dur. Bu durumda, zeminde oluşturulan gerilme artışının belirlenmesi için iniş takımlarından, dolayısıyla lastiklerden kaplamaya aktarılan yükün belirlenmesi ve yükün aktarıldığı alanın bilinmesi gerekmektedir. Lastik temas yüzeylerinde oluşacak gerilme lastik basıncı ile sınırlıdır. Etkin yüke karşılık, uygulanan lastik basıncına bağlı olarak, lastik temas alanı değişmekte ve lastik tabanında oluşan gerilme her zaman için lastik basıncına eşit olmaktadır. Bu doğrultuda, öncelikle Airbus (2005) tanımlarına göre iniş takımı ağırlık oranları belirlenmiş, iniş takımlarına aktarılan yük ve lastik basınçları kullanılarak, her bir lastiğin temas alanı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.12’de sunulmuştur. Tüm operasyon kombinasyonlarında en büyük statik yük, ana iniş takımlarında bulunan lastiklerde 266.86 kN, burun iniş takımında ise 197.07 kN olarak hesaplanmıştır. Bu yük kombinasyonunda belirlenen yükler, referans uçağın en büyük etkin yükleridir ve ana iniş takımlarında bulunan her bir lastik  $0.178 \text{ m}^2$  alanda  $1500 \text{ kN/m}^2$ , burun iniş takımında ise her bir lastik  $0.114 \text{ m}^2$  alanda  $1410 \text{ kN/m}^2$  gerilme oluşturmaktadır (Tablo 4.12).

Yukarıda, referans uçak için hesaplanan yük ve oluşan gerilme, tip kesitlerle belirlenmiş olan beton kaplamaya aktarılmaktadır. Proje uygulama koşullarında, beton kaplama ise  $6.00 \text{ m} \times$

7.50 m ölçülerinde anolar halinde 0.4 m kalınlığında imal edilmektedir ve hareketli yükler öncelikle bu anoların herhangi bir bölgesine aktarılmaktadır. Beton kaplama yüzeyi altında, ayrıntıları Dolgu İmalatlarında Kullanılacak Malzeme Kriterleri başlığı altında verilen, 0.15 m kalınlığında zayıf beton temel, 0.40 m kalınlığında kırmataş temel, 0.45 m kalınlığında kırmataş alt temel imal edilmektedir. Bu katmanlar altında ise, zemin katmanları öncesi son olarak, en az 1.00 m kalınlığında kaya dolgu malzemesi bulunmaktadır.



**Şekil 4.48:** Airbus A380–800 iniş takımı konumları ve lastik sayıları.

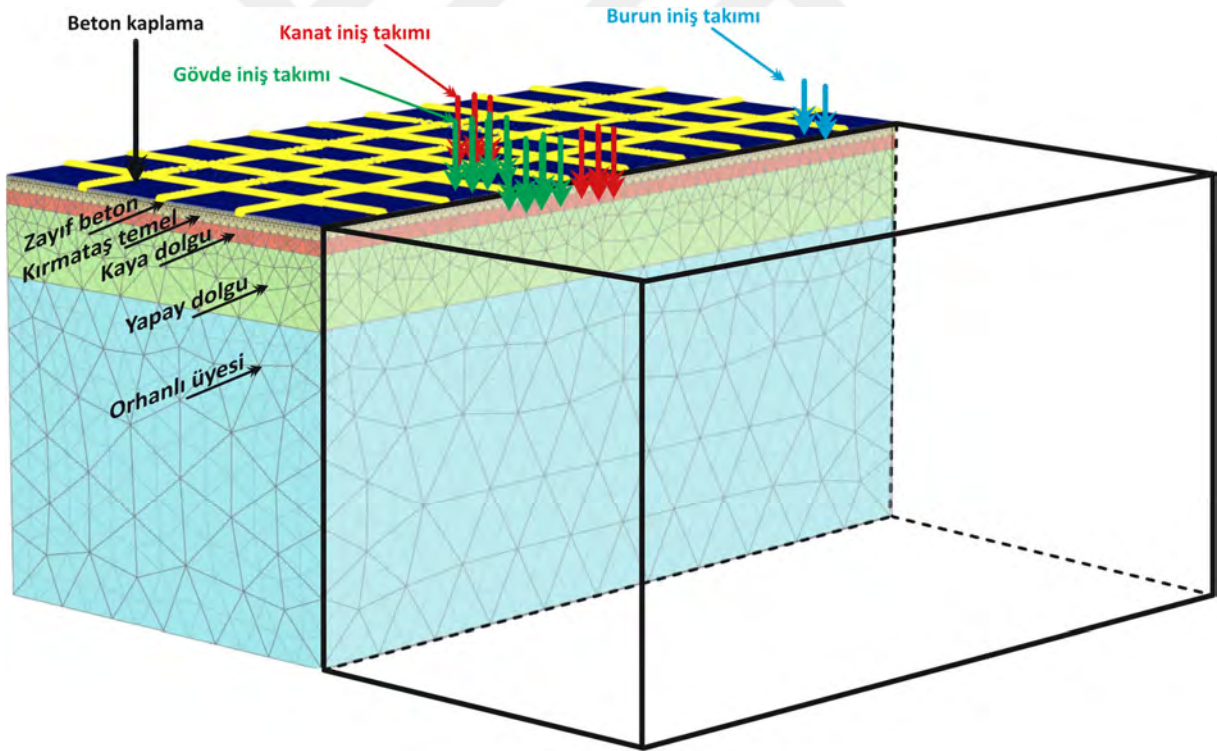


**Tablo 4.12:** Airbus A380–800 WV011 ağırlık çeşidine göre yapılan, yük, gerilme ve temas yüzeyi hesapları.

|                                                                                   |                      |              |              |               |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------|--------------|---------------|
| <b>Apron Ağırlığı (MRW)</b>                                                       | (kN)                 | 5658.64      |              |               |
| <b>Kalkış Ağırlığı (MTOW)</b>                                                     | (kN)                 | 5639.03      |              |               |
| <b>İniş Ağırlığı (MLW)</b>                                                        | (kN)                 | 3873.77      |              |               |
| <b>Yakıtsız Ağırlık (MZFW)</b>                                                    | (kN)                 | 3618.78      |              |               |
| <b>MRW'ye Göre İniş Takımı Yük Kombinasyonları</b>                                |                      |              |              |               |
| Ana İniş Takımı Ağırlık Oranı                                                     | (%)                  | 94.30        |              |               |
| Burun İniş Takımı Ağırlık Oranı                                                   | (%)                  | 5.70         |              |               |
| Ana İniş Takımı Yüğü                                                              | (kN)                 | 5336.10      |              |               |
| Burun İniş Takımı Yüğü                                                            | (kN)                 | 322.54       |              |               |
| <b>Lastik Boyutları ve Basınçları</b>                                             |                      | <b>Gövde</b> | <b>Kanat</b> | <b>Burun</b>  |
| Yükseklik                                                                         | (m)                  | 1.40         | 1.40         | 1.27          |
| Genişlik                                                                          | (m)                  | 0.530        | 0.530        | 0.455         |
| Lastik Basıncı                                                                    | (bar)                | 15           | 15           | 14.1          |
| <b>MRW'ye Göre Yükler ve Basınç Alanları</b>                                      |                      | <b>Gövde</b> | <b>Kanat</b> | <b>Burun</b>  |
| İniş Takımı Yüğü                                                                  | (kN)                 | 3201.66      | 2134.44      | 322.54        |
| İniş Takımı Lastik Sayısı                                                         | (adet)               | 2x6          | 2x4          | 2             |
| Lastik Yüğü                                                                       | (kN)                 | 266.80       | 266.80       | 161.27        |
| Lastik Basınç Alanı                                                               | (m <sup>2</sup> )    | 0.178        | 0.178        | 0.114         |
| Lastik Basınç Alanı Boyutları                                                     | (mxm)                | 0.53 x 0.34  | 0.53 x 0.34  | 0.455 x 0.25  |
| Lastik Tabanında Etkin Gerilme                                                    | (kN/m <sup>2</sup> ) | 1500         | 1500         | 1410          |
| <b>Tüm Operasyon Kombinasyonlarında En Büyük Statik Yükler ve Basınç Alanları</b> |                      | <b>Gövde</b> | <b>Kanat</b> | <b>Burun</b>  |
| İniş Takımı Statik Yüğü                                                           | (kN)                 | 3202.38      | 2134.98      | 394.14        |
| İniş Takımı Lastik Sayısı                                                         | (adet)               | 2x6          | 2x4          | 2             |
| Lastik Yüğü                                                                       | (kN)                 | 266.86       | 266.86       | 197.07        |
| Lastik Basınç Alanı                                                               | (m <sup>2</sup> )    | 0.178        | 0.178        | 0.140         |
| Lastik Basınç Alanı Boyutları                                                     | (mxm)                | 0.53 x 0.34  | 0.53 x 0.34  | 0.455 x 0.31  |
| Lastik Tabanında Etkin Gerilme                                                    | (kN/m <sup>2</sup> ) | 1500         | 1500         | 1410          |
| <b>3.048 m/s<sup>2</sup> İvmeyele Durma Anındaki Fren Durumunda</b>               |                      | <b>Gövde</b> | <b>Kanat</b> | <b>Burun*</b> |
| İniş Takımı Yüğü                                                                  | (kN)                 | 1055.23      | 703.55       | 692.28        |
| İniş Takımı Lastik Sayısı                                                         | (adet)               | 2x6          | 2x4          | 2             |
| Yatay Lastik Yüğü                                                                 | (kN)                 | 87.94        | 87.94        | 346.14        |
| Lastik Basınç Alanı                                                               | (m <sup>2</sup> )    |              |              | 0.245         |
| Lastik Basınç Alanı Boyutları                                                     | (mxm)                |              |              | 0.455 x 0.54  |
| <b>Ani Fren Durumunda</b>                                                         |                      | <b>Gövde</b> | <b>Kanat</b> |               |
| İniş Takımı Statik Yüğü                                                           | (kN)                 | 2561.98      | 1707.99      |               |
| İniş Takımı Lastik Sayısı                                                         | (adet)               | 2x6          | 2x4          |               |
| Yatay Lastik Yüğü                                                                 | (kN)                 | 213.50       | 213.50       |               |

\*Fren durumunda burun iniş takımı en büyük yüğü düşey olarak uygulamaktadır. Sütun düşey yükleri belirtmektedir.

Çalışmada, hesaplanan uçak yüklerinin etkisinde zeminde oluşacak gerilme değişiminin belirlenmesi amacıyla Plaxis 3D yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplamalar yapılmıştır. Yapılan hesaplamada temsili üç boyutlu hesap modeli için, Pist bölgesi seçilmiştir. Modelde, pist eksenine boyunca 60 m’lik bir uzunluk kullanılmış ve derinlik 30 m olarak tanımlanmıştır (Şekil 4.49). En üst yüzeyde bulunan kaplama beton tabakası, projesindeki şekliyle 6.0 m x 7.5 m ölçülerinde anolar halinde birbirinden bağımsız hareket edebilen beton plakalar şeklinde modellenmiştir. Beton kaplama altında pist tip kesitinde belirlenmiş temel katmanları ve bu katmanlar altında, olabilecek en olumsuz koşullar göz önüne alınarak, üstten alta doğru 5 m kalınlığında yapay dolgu ve Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı kil üyesi tanımlanmıştır (Şekil 4.49). Hesaplamalarda, modellenen katmanlara ait, çalışma kapsamında yapılan arazi ve laboratuvar deneyleri ile ICAO (2018) ve AYGM teknik şartnamelerine bağlı tasarım kriterlerine uygun seçilen, hesap parametreleri Tablo 4.13, Tablo 4.14 ve Tablo 4.15’te sunulmuştur.



Şekil 4.49: Plaxis 3D analiz modeli.

Tablo 4.13: Beton kaplama tabakası hesap modeli parametreleri.

| Malzeme türü        | Elastik - izotropik        |                  |
|---------------------|----------------------------|------------------|
| Kalınlık            | d m                        | 0.40             |
| Birim hacim ağırlık | $\gamma$ kN/m <sup>3</sup> | 12.00            |
| Elastisite modülü   | E kN/m <sup>2</sup>        | $27 \times 10^3$ |
| Poisson oranı       | $\nu$                      | 0.2              |

**Tablo 4.14:** Zayıf beton temel tabakası hesap modeli parametreleri.

|                               |                         |                                         |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------|
| Malzeme modeli                |                         | Beton                                   |
| Doğal birim hacim ağırlığı    | $\gamma_{\text{unsat}}$ | kN/m <sup>3</sup> 24.00                 |
| Doygun birim hacim ağırlığı   | $\gamma_{\text{sat}}$   | kN/m <sup>3</sup> 24.00                 |
| Başlangıç boşluk oranı        | $e_{\text{init}}$       | 0.50                                    |
| Minimum boşluk oranı          | $e_{\text{min}}$        | 0.0                                     |
| Maksimum boşluk oranı         | $e_{\text{max}}$        | 999.0                                   |
| Elastisite Modülü             | E                       | kN/m <sup>2</sup> 29.70x10 <sup>6</sup> |
| Poisson oranı                 | $\nu$                   | 0.2000                                  |
| Silindirik basınç dayanımı    | $f_c$                   | kN/m <sup>2</sup> 30.00x10 <sup>6</sup> |
| Maksimum içsel sürtünme açısı | $\phi_{\text{max}}$     | ° 35.00                                 |
| Hacimsel genişleme açısı      | $\psi$                  | ° 13.00                                 |
| Tek eksenli çekme dayanımı    | $f_t$                   | kN/m <sup>2</sup> 2000                  |

**Tablo 4.15:** Kırmataş temel, kaya dolgu, yapay dolgu ve Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi katmanlarına ait hesap modeli parametreleri.

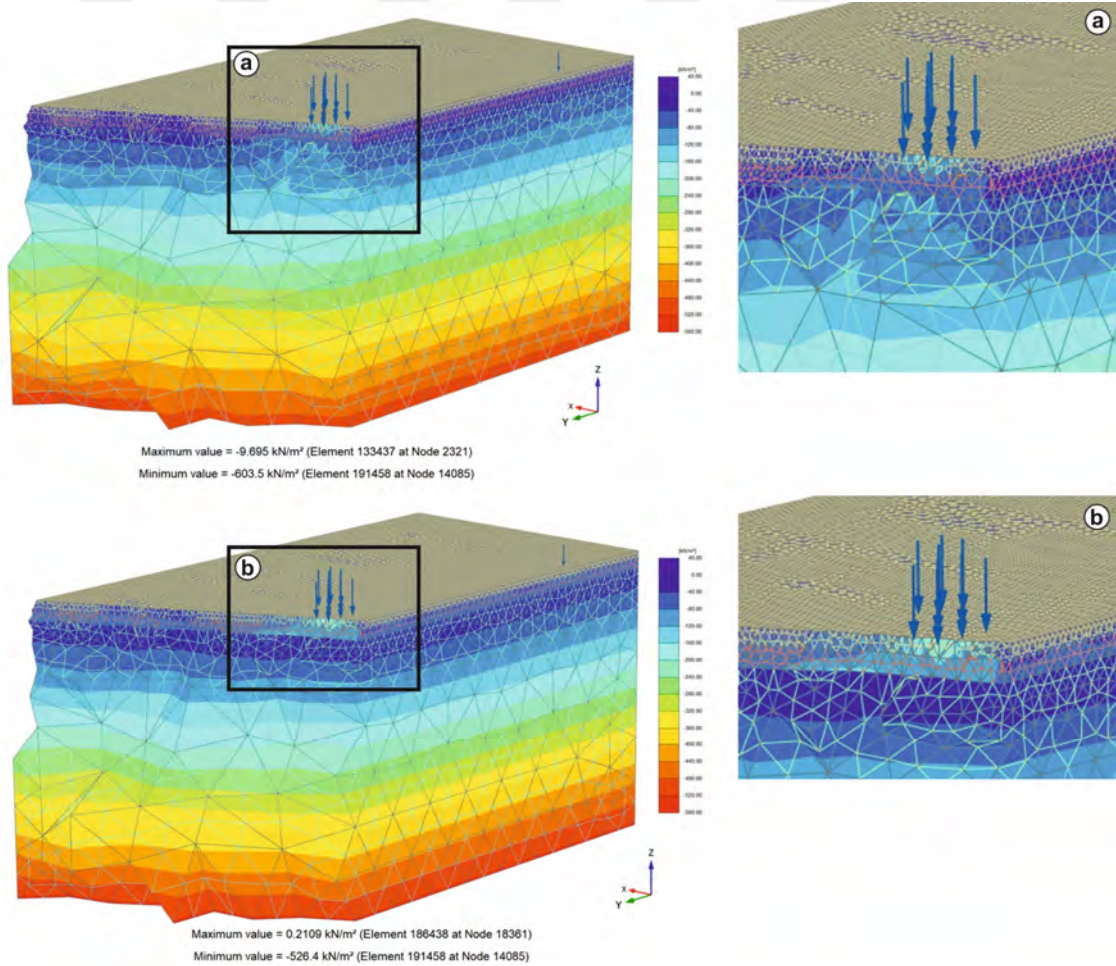
|                                    |                               |                   | Kırmataş<br>Temel     | Kaya<br>Dolgu         | Yapay<br>Dolgu        | Orhanlı<br>üyesi      |
|------------------------------------|-------------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Malzeme Modeli                     |                               |                   | HS*                   | HS                    | HS                    | HS                    |
| Davranış tipi                      |                               |                   | Drenajlı              | Drenajlı              | Drenajlı              | Drenajlı              |
| Doğal birim hacim ağırlığı         | $\gamma_{\text{unsat}}$       | kN/m <sup>3</sup> | 21.00                 | 21.00                 | 18.00                 | 19.00                 |
| Doygun birim hacim ağırlığı        | $\gamma_{\text{sat}}$         | kN/m <sup>3</sup> | 22.00                 | 22.00                 | 19.00                 | 20.00                 |
| Başlangıç boşluk oranı             | $e_{\text{init}}$             |                   | 0.50                  | 0.50                  | 0.64                  | 0.54                  |
| Minimum boşluk oranı               | $e_{\text{min}}$              |                   | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 |
| Maksimum boşluk oranı              | $e_{\text{max}}$              |                   | 999.0                 | 999.0                 | 999.0                 | 999.0                 |
| Sekant elastisite modülü           | $E_{50}^{\text{ref}}$         | kN/m <sup>2</sup> | 85.00x10 <sup>3</sup> | 70.00x10 <sup>3</sup> | 30.00x10 <sup>3</sup> | 50.00x10 <sup>3</sup> |
| Tanjant elastisite modülü          | $E_{\text{öed}}^{\text{ref}}$ | kN/m <sup>2</sup> | 70.00x10 <sup>3</sup> | 64.00x10 <sup>3</sup> | 30.00x10 <sup>3</sup> | 50.00x10 <sup>3</sup> |
| Yükleme/boşaltma elastisite modülü | $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  | kN/m <sup>2</sup> | 240.0x10 <sup>3</sup> | 210.0x10 <sup>3</sup> | 90.00x10 <sup>3</sup> | 150.0x10 <sup>3</sup> |
| Kohezyon                           | $c_{\text{ref}}$              | kN/m <sup>2</sup> | 0.1                   | 0.1                   | 10.00                 | 10.00                 |
| İçsel sürtünme açısı               | $\phi$                        | °                 | 45.00                 | 45.00                 | 23.00                 | 28.00                 |
| Hacimsel genişleme açısı           | $\psi$                        | °                 | 15.00                 | 15.00                 | 0.000                 | 0.000                 |
| Geçirgenlik katsayısı              | $k_{x-y-z}$                   | m/day             | 1.000                 | 50.000                | 0.008                 | 0.002                 |

\*Hardening soil model

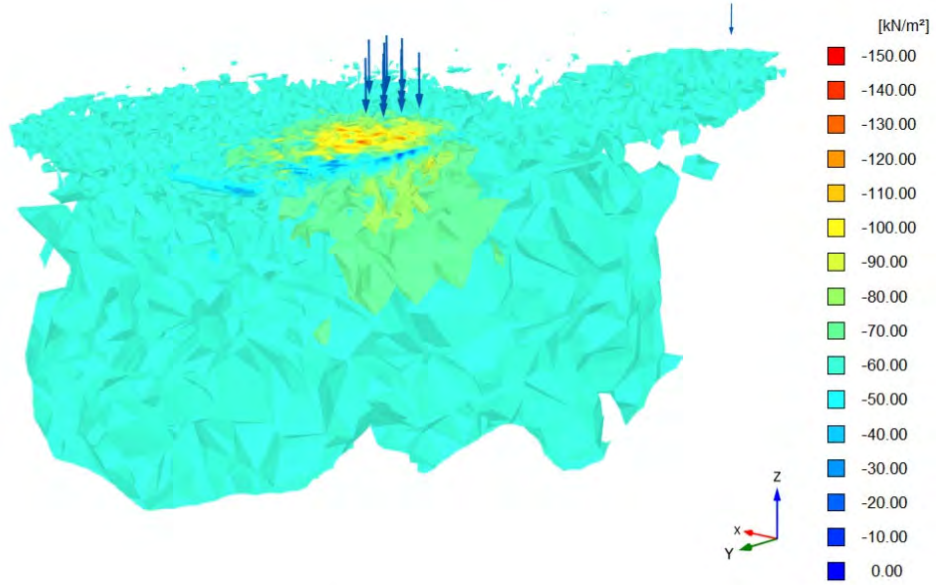
Hesaplamalar için oluşturulan analiz modelinde, A380 – 800 tipi uçağın pist eksenine paralel ve bu eksen ortalayacak şekilde konumlandığı kabul edilmiştir. Böylelikle, pist eksen boyunca hesap modeli için tam bir simetri düzlemi sağlanmış ve modelin bu düzlem boyunca ayrılmasıyla oluşan bir parçası yazılıma aktarılmıştır. Tablo 4.12’de verilen tüm operasyon kombinasyonlarında en büyük statik yükler, iniş takımlarında bulunan her bir lastik için hesaplandığı şekliyle, lastiklerin konumları da göz önüne alınarak, noktasal yük olarak modellenmiştir. Bu yüklerin, pist üzerinde eksen boyunca 30 km/saat hızla hareket ettiği kabulüyle model tanımlamaları yapılmıştır.

Yukarıda, geometrik özellikleri, zemin profili ve hareketli yük tanımlama bilgileri sunulan model kullanılarak, dinamik hesaplar gerçekleştirilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda,

tanımlanan model kapsamında, toplam gerilme, efektif gerilme ve boşluk suyu basınçlarının derinlikle değişimi belirlenmiştir. Uçağın beton kaplama yüzey üzerinde 30 km/saat hızla 15 m hareket etmiş olduğu 1.8'inci saniyedeki analiz durumunu gösteren Şekil 4.50.a'dan görüleceği üzere, model genelinde düzenli bir şekilde derinlikle artan toplam gerilme, uçak kanat ve gövde lastiklerini temsil eden noktasal yükler altında artan bir şekilde yoğunlaşmaktadır. Ancak, aynı alanda, model genelinde derinlikle artan efektif gerilme, Şekil 4.50.b'de görüleceği üzere yalnızca kırmataş temel içerisinde değişime uğramaktadır. Hareketli yükün, zemin katmanlarında hesaplanan efektif gerilme üzerinde etkisinin olmaması veya yok denecek kadar az olması, aşırı boşluk suyu basıncı oluşması nedeniyledir (Şekil 4.51). Başka bir deyişle, artan toplam gerilme, aşırı boşluk suyu basıncıyla karşılanmakta ve efektif gerilmelerde önemli bir değişim meydana gelmemektedir.



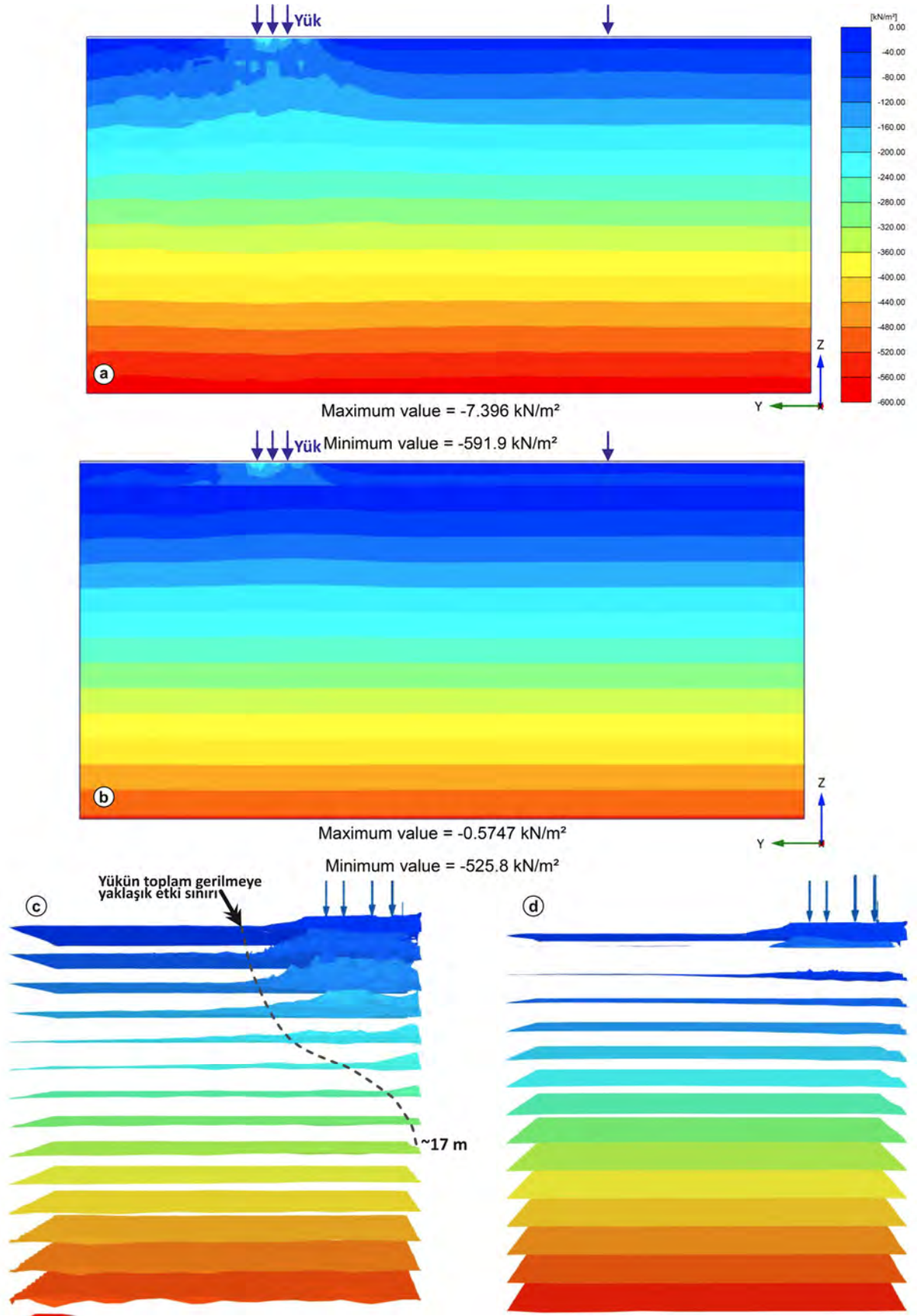
Şekil 4.50: Toplam ve efektif gerilmenin derinlikle değişimi, a: toplam gerilme, b: efektif gerilme.



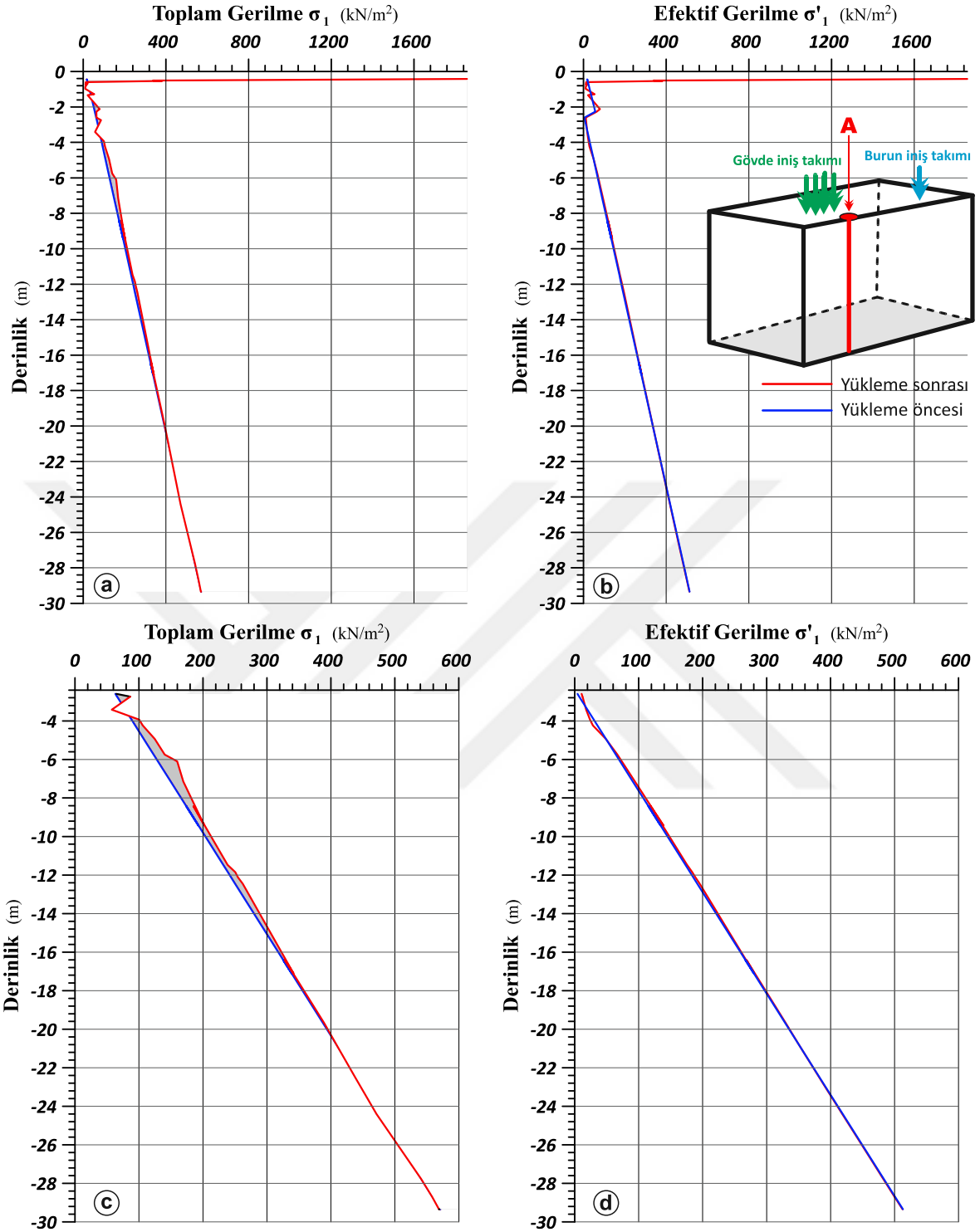
**Şekil 4.51:** Aşırı boşluk suyu basıncı dağılımı.

Hareketli yükün toplam ve efektif gerilmeler üzerindeki etkisi, pist eksenine paralel ve dik oluşturularak Şekil 4.52’de sunulan kesitlerde çok daha net ortaya konulmuştur. Şekil 4.52.a’da görüleceği üzere, derinlikle artan ancak hareketli yük altında yoğunlaşan toplam gerilme artışları, yaklaşık 17 m derinliğe kadar zemin katmanlarında değişime neden olmaktadır (Şekil 4.52.c). Şekil 4.52.b ve Şekil 4.52.d’de ise hareketli yük artışıyla zemin katmanlarında önemli bir efektif gerilme değişimi meydana gelmediği görülmektedir. Bu durum, beton kaplama yüzey üzerine en fazla yük aktaran, gövde iniş takımları hizasında pist eksenini üzerinde seçilen bir noktada (A), gerilme – derinlik grafikleri oluşturularak incelendiğinde, yükleme sonrası, toplam gerilmede 17 m derinliğe kadar değişim olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.53.a ve Şekil 4.53.c). Hareketli yük sonrası oluşan efektif gerilme ise 2.4 m kalınlığındaki proje dolgusunda değişim göstermesine karşın, bu dolgu altındaki, yaklaşık 4 m’den daha derinde bulunan, zemin katmanlarında yükleme öncesi değerlerle aynı değerleri almaktadır (Şekil 4.53.b ve Şekil 4.53.d). Proje dolgusu alt sınırı olan 2.4 m derinliği ile 4 m derinliği arasındaki zemin katmanlarında ise azalan ve artan yönde 20 kN/m<sup>2</sup>’ye varan efektif gerilme değişimleri belirlenmiştir (Şekil 4.53.d).





**Şekil 4.52:** Toplam ve efektif gerilmenin derinlikle değişimi (a ve b pist eksenine paralel, c ve d pist eksenine dik görüşler).



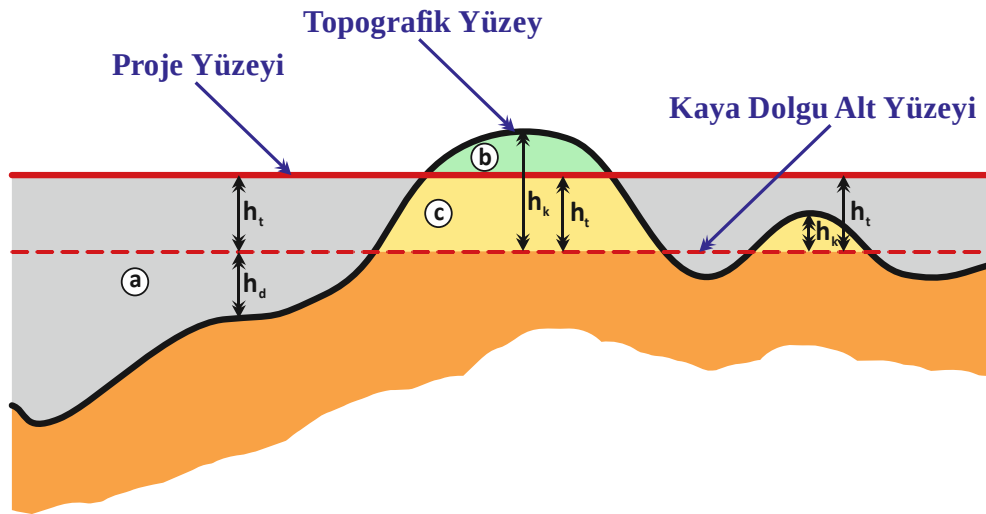
**Şekil 4.53:** Yük öncesinde ve yükleme sonrasında, pist eksenı gövde iniş takımı hizasında (A), toplam ve efektif gerilmenin derinlikle değışimi; a ve b tüm kesit, c ve d kesitin 2.4 m'den daha derin kesimi.

Sonuç olarak, geçirimsizliği yüksek proje dolgu su altındaki düşük – çok düşük geçirimsizlik sınıfında yapay dolgu ve Orhanlı üyesi kil katmanlarında, hareketli yüklere bağı olarak gelişen toplam gerilme artışları, derinlikle azalmakta, ancak, aşırı boşluk suyu basınçlarının ortaya çıkması nedeniyle, efektif gerilme değışimi meydana gelmemektedir.

#### 4.4.4.2. Kazı ve Dolgu Çalışmalarında Yük ve Gerilme Değişimi

Uygulama projesinde planlanan havalimanı bölümleri, kendi içerisinde de değişken kotlara sahip eğimli platformlar şeklindedir. Bu alanlar, Uygulama Projesinin Özellikleri başlığı altında ayrıntılarıyla sunulan özellikleriyle, projelendirilen kot seviyesine kadar, kazı veya dolgu çalışmalarıyla inşa edilmektedir. Bu çalışmalarıyla meydana gelen yük değişimlerinin belirlenmesi amacıyla öncelikle meydana gelen kot değişimleri tespit edilmiştir. Sonrasında bu kot değişimleri, konsolidasyon analizlerinde kullanılmak üzere hazırlanan, ayrıntıları Malzeme ve Yöntem başlığı altında verilen alansal değerlendirme yönteminin uygulanabilmesi amacıyla, hesap noktaları veri tabanı ile ilişkilendirilmiştir.

Tüm bu kazı ve dolgu çalışmaları uygulama projesi kapsamında, kullanım amacı ve trafik yüklerine göre yapılan analizler sonucu belirlenen tip kesitler temel alınarak düzenlenmektedir. Tip kesit kalınlıklarının proje bölümlerinde farklılık göstermesi nedeniyle, tüm kazı ve dolgu çalışmaları, bu kesitlerin en alt katmanı olan, en az 1 m kalınlığında yapılması planlanan, kaya dolgu alt kotu temel alınarak planlanmakta ve uygulanmaktadır. Proje ve kaya dolgu alt yüzeyinin topoğrafik kottan büyük olması durumunda, bitkisel toprağın kaldırıldığı topoğrafik yüzey üzerine kaya dolgu ile başlayan dolgu çalışması ( $h_d$ ), tip kesitin ( $h_t$ ) uygulanmasıyla sonlanmaktadır (Şekil 4.54.a). Aksi durumda, kaya dolgu alt kotuna kadar kazı yapılmakta ( $h_k$ ) ve tip kesit özelliklerinde tekrar dolgu ( $h_t$ ) yapılarak proje yüzey kotuna ulaşılmaktadır (Şekil 4.54).

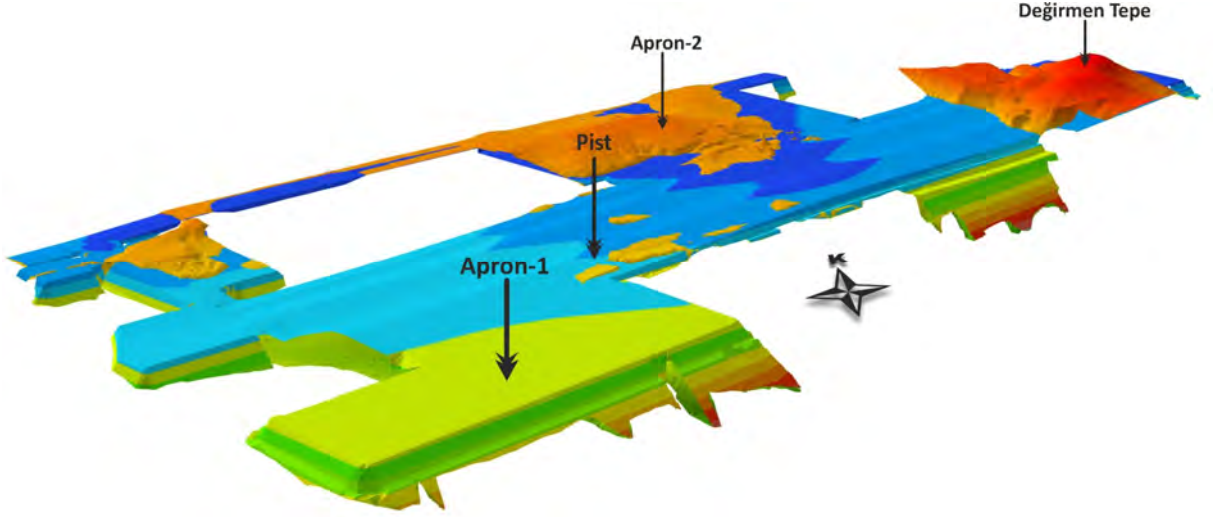


**Şekil 4.54:** Kazı ve dolgu çalışmaları şematik kesiti, a) dolgu alanı, b) kazı alanı, c) kazı ve tekrar dolgu alanı.

Çalışmada, proje ve topoğrafik yüzey modelleri kullanılarak, her bir hesap noktası için proje ve topoğrafik yüzey kotları CBS veri tabanına aktarılmıştır. Bu hesap noktaları, proje bölümleri veri tablosuyla ilişkilendirilmiş ve her bir hesap noktası için tip kesit kalınlıkları bu nokta veri tabanına eklenmiştir. Oluşturulan bu son veri tabanı kullanılarak, kazı ve dolgu alanları, hacimleri ve yükseklikleri belirlenmiştir. Proje kotları, alan çevresinde oluşturulacak şev yüzeyleri de dâhil olmak üzere, 38.29 m ile 113.00 m arasında değişmektedir. Alanda, topoğrafik kotlar ise 35.90 m ile 119.49 m arasındadır. Proje yüzeyi ve topoğrafik yüzey 3D modelleri kullanılarak yapılan hesaplamalarda, toplam kazı alanı 1,312,643 m<sup>2</sup>, dolgu alanı ise 2,817,545 m<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir (Şekil 4.55 ve Şekil 4.56). En büyük kazı yüksekliği 29.78 m, proje dolgusu yüksekliği ise 44.27 m'dir (Şekil 4.57). Toplam kazı hacmi 10,046,571 m<sup>3</sup>, toplam dolgu hacmi ise 29,019,825 m<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, alanda 39,066,397 m<sup>3</sup> hacminde malzeme yer değiştirilecektir.

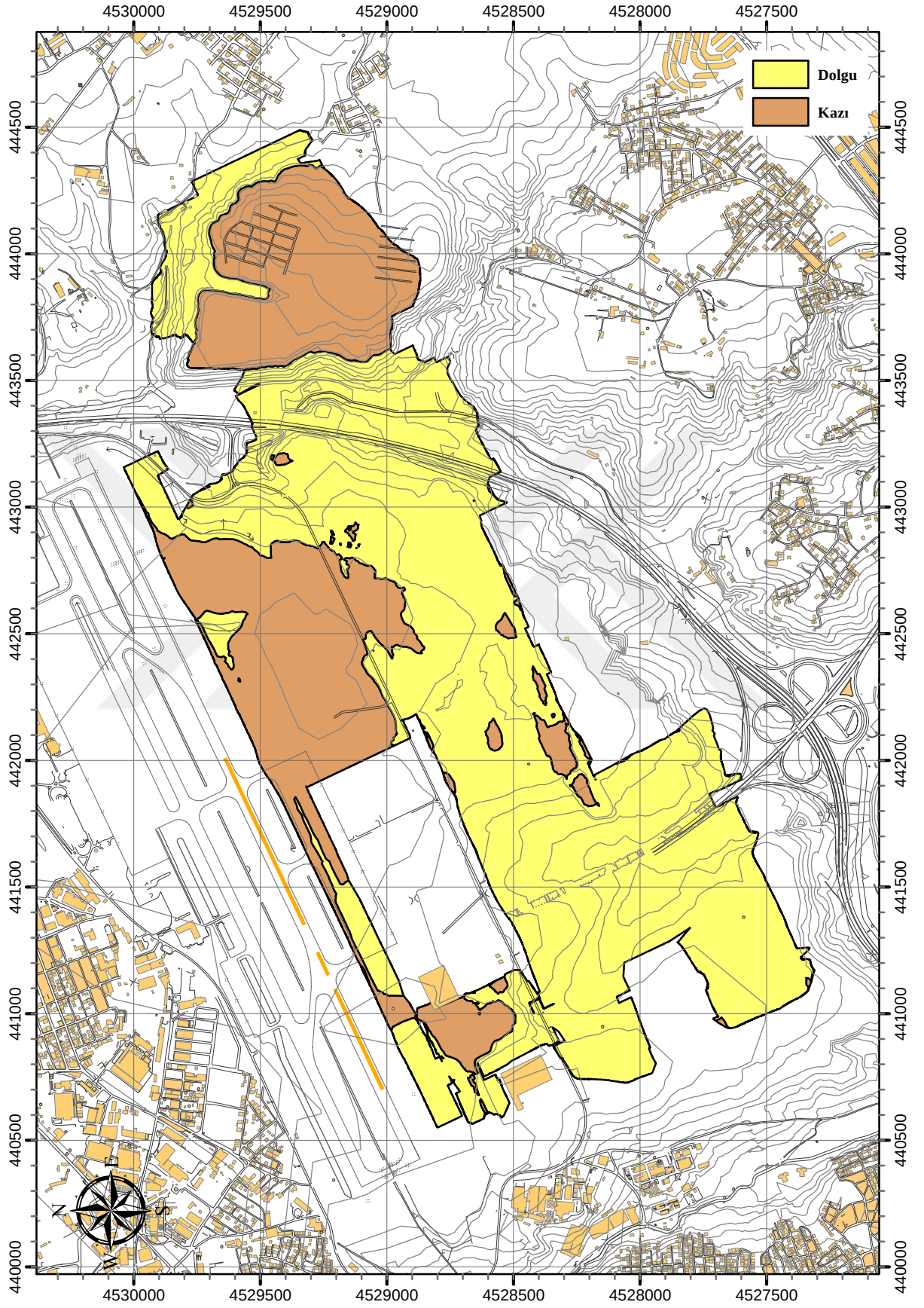
Çalışma alanında yüzeylenen birimler CBS veri tabanında paleozoik birimler, Sultangazi formasyonu Orhanlı üyesi, yapay dolgu kil alanları olarak gruplanmıştır. Bu birimlerin proje dolgusuna ait alanlar ile birlikte değerlendirilmesi sonucu, paleozoik birimler üzerinde 188,997 m<sup>2</sup> alanda 44.27 m, Sultangazi Formasyonu Orhanlı kil üyesi üzerinde 1,232,832 m<sup>2</sup> alanda 36.51 m ve yapay dolgu birimler üzerinde ise 1,395,736 m<sup>2</sup> alanda 39.20 m'ye varan yüksekliklerde proje dolgusu yapılacağı belirlenmiştir (Şekil 4.57 ve Şekil 4.58).

Gray (1936), Osterberg (1957), Das (2008) ile Das ve Sobhan (2014, 2018) tarafından, dolgu yükü altında nihai gerilme değişiminin belirlenmesi için sunulan yaklaşımlar, çalışma alanı için değerlendirildiğinde, geniş alanlar kaplayan dolgu çalışması nedeniyle, Orhanlı üyesi ve yapay dolgu kil birimleri üzerinde artan gerilmenin derinlikle değişmeyeceği söylenebilir. Bu noktadan hareketle, kazı alanlarında, ortalama 19 kN/m<sup>3</sup> birim hacim ağırlığa sahip malzeme ortamdaki uzaklaştırılacak olması nedeniyle, kazı yüksekliğine bağlı olarak, bu alanlarda 565.82 kN/m<sup>2</sup> düzeyine varan, gerilme azalımı ortaya çıkacaktır. Proje dolgusu yapılacak alanlarda ise, ortalama 21 kN/m<sup>3</sup> birim hacim ağırlığa sahip proje dolgusu sonucu, yine dolgu yüksekliğine bağlı olarak, 823.20 kN/m<sup>2</sup> düzeyine ulaşan, toplam gerilmede artış meydana gelecektir. Proje alanında, kazı ve dolgu çalışmaları sonrasında, ortamdaki suyun uzaklaştırılması için yapılacak olan drenaj çalışması ise zemin katmanlarında efektif gerilmeyi arttıracak yönde etkili olacaktır.



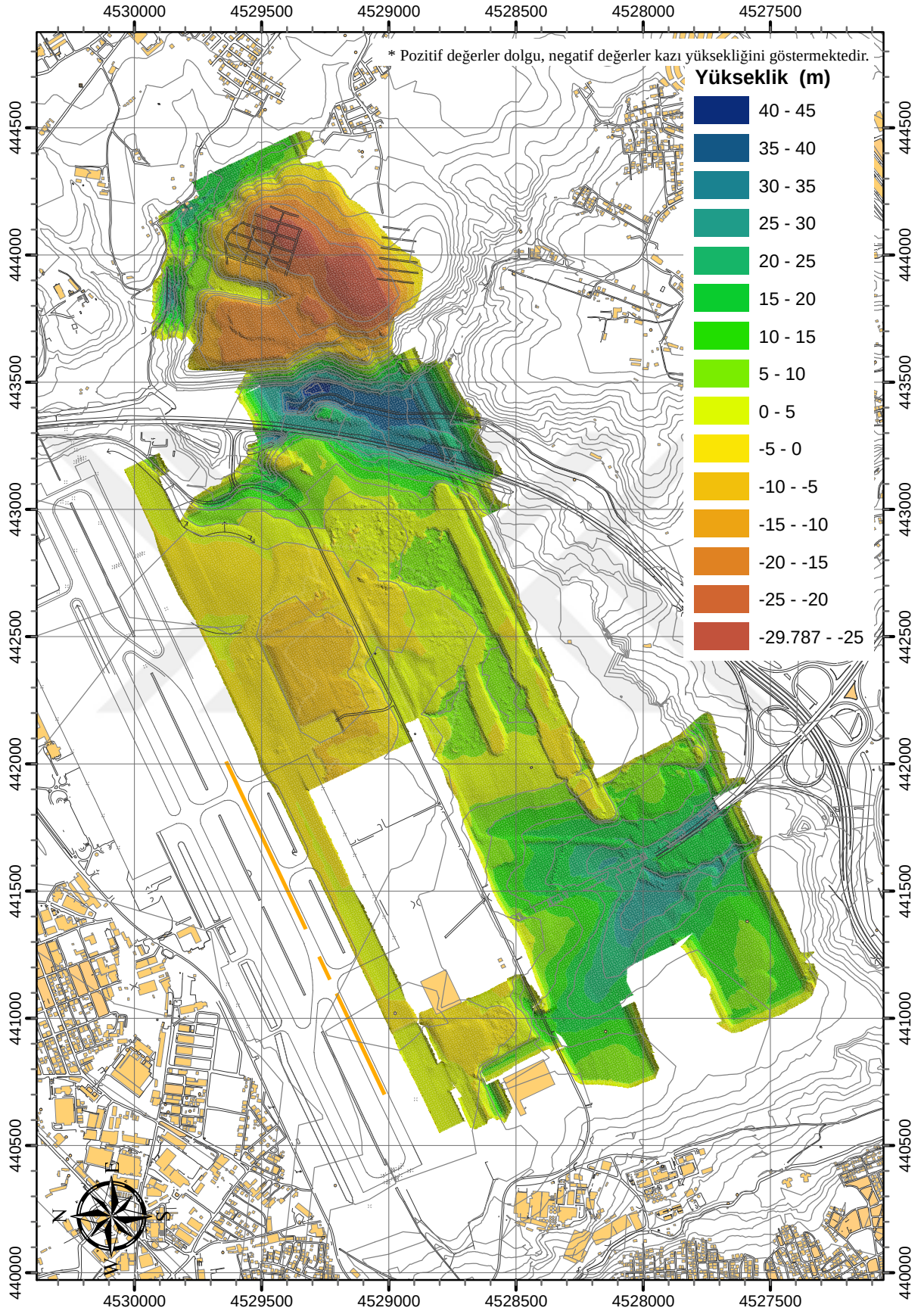
Şekil 4.55: Proje yüzeyi ve topoğrafik yüzey ilişkisinin 3D modelde görünümü.



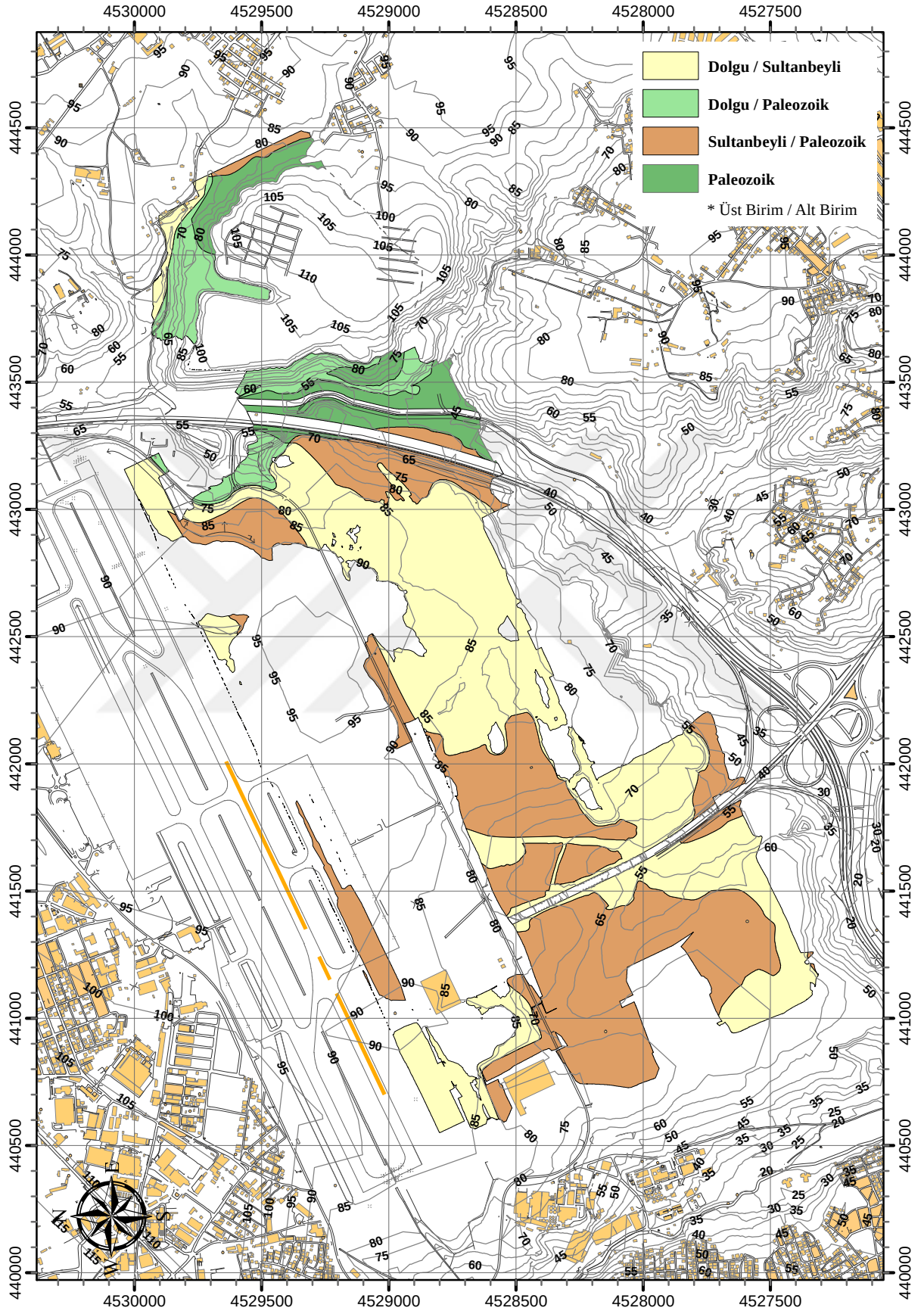


Şekil 4.56: Kazı ve dolgu alanları.









Şekil 4.58: Jeolojik birimler bazında proje dolgusu alanlarının yayılımı.

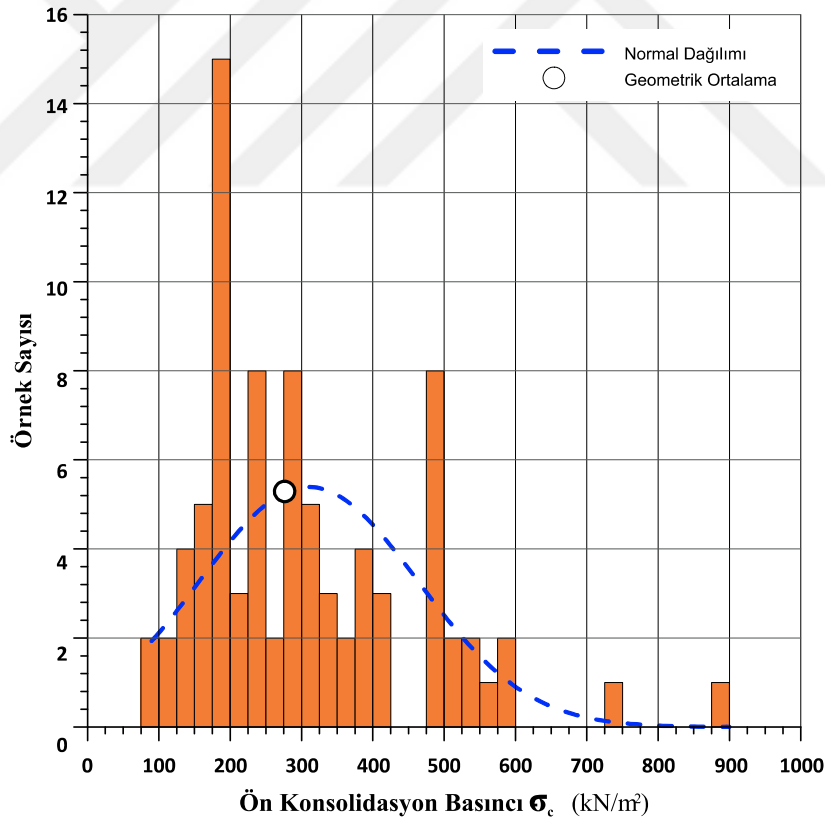
#### 4.4.5. Konsolidasyon Özellikleri

Çalışma alanında, Sultangazi üyesi ve yapay dolgu, düşük ve yüksek plastisiteli (CH – CL) killerden oluşmaktadır. Yapay dolgunun büyük bir bölümü düşük plastisiteli kildir. Alanda yapay dolgu birim içerisinde, yüzeye yakın kesimlerde, yer yer inşaat atıkları ve çöplere rastlanabilmektedir. Tez çalışması kapsamında bu iki birimin konsolidasyon özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 60 farklı lokasyonda, 49 farklı derinlikte, toplam 131 adet kademeli yükleme yöntemiyle ödometre deneyi yapılmıştır. Bu deneylerin, 38 adedi yapay dolgu birime, 93 adedi ise Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait örselenmemiş zemin örneklerinde gerçekleştirilmiştir. Yapay dolgu, alanda genel olarak kil boyu malzeme ile temsil edilmektedir. Bu birimde, yüzeye yakın kotlarda bulunan inşaat artığı ve çöp seviyeleri, ödometre deney örnekleri arasında bulunmamakla birlikte, proje uygulaması sırasında ortamdan uzaklaştırılacak olması nedeniyle, tez kapsamında değerlendirmeye alınmamıştır.

Ödometre deneylerinde, numune üzerinde  $3200 \text{ kN/m}^2$  düzeyine kadar kademeli artışlarla konsolidasyon basıncı oluşturulmuştur. Deney sonu konsolidasyon basıncı, değişken artışlarla 7 kademedede sağlanmış, yeniden sıkışma indisinin belirlenebilmesi amacıyla, bir kısım deneyde kısmen, bir kısım deneyde ise tümüyle, kademeli olarak düşürülmüştür. Deneyler sonucu oluşturulan boşluk oranı – gerilme grafiklerinden, ön konsolidasyon basıncı, sıkışma indisi ve yeniden sıkışma indisi değerleri hesaplanmıştır.

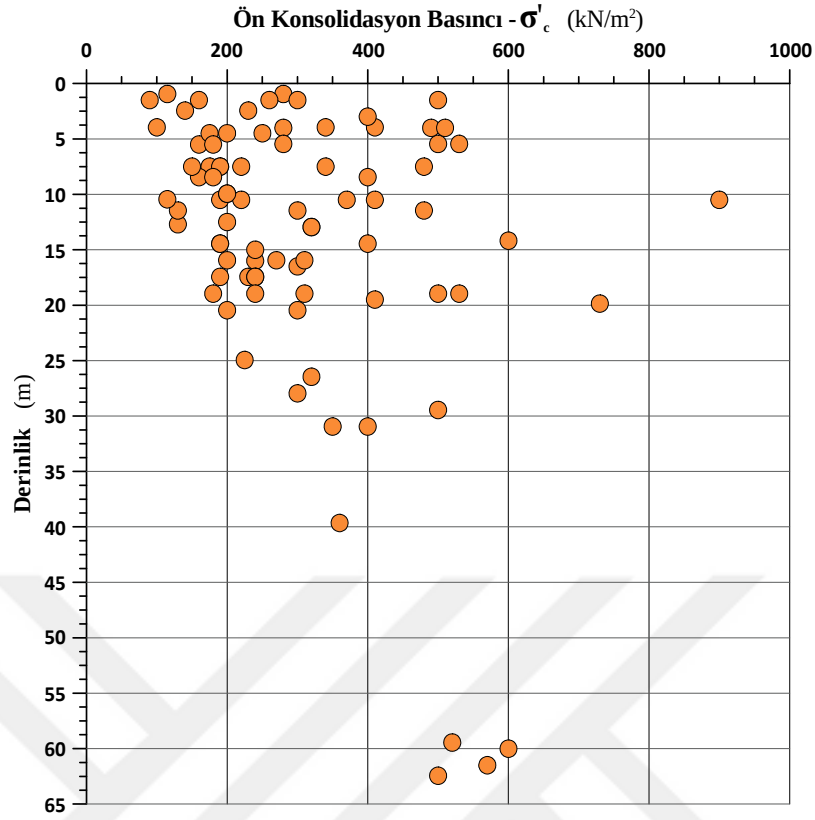
Örneğin oluşturulduğu zamana kadar, maruz kaldığı en büyük efektif gerilmeye karşılık gelen basınç ön konsolidasyon basıncı olarak tanımlanmaktadır. Bu noktadan hareketle, yapay dolgu kil düzeyleri, mevcut ortamından taşınarak getirilmiş, tekrardan yapı kazanmış olduklarından, halihazırda etkin gerilme koşulları, bu killerde etkin ön konsolidasyon basıncı durumundadır. Ancak, Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi Üst Miyosen – Pliyosen yaşlıdır. Güncel gerilme koşullarından önce, tarihsel süreç içerisinde gerilme koşulları değişiklik göstermiştir. Çalışmada, Orhanlı üyesi'ne ait kil düzeylerde yapılan ödometre deneyleri sonucu, boşluk oranı ve efektif gerilme ile oluşturulan grafikler kullanılarak, Casagrande (1936) yöntemiyle ön konsolidasyon basınçları belirlenmiştir. Ön konsolidasyon basınçları,  $90 \text{ kN/m}^2$  ile  $900 \text{ kN/m}^2$  arasında değişmekte olup, geometrik ortalaması  $276 \text{ kN/m}^2$  hesaplanmıştır. Belirlenen değerler,  $153.56 \text{ kN/m}^2$  standart sapma değeriyle ortalamadan sapmaktadır (Şekil 4.59). Elde edilen değerlerin örnek derinliği ile karşılaştırılması durumunda net bir ilişki belirlenememiştir (Şekil 4.60). Likitlik indeksi değerleri kullanılarak, ön konsolidasyon basıncının tahmini için Stas ve

Kulhawy (1984) tarafından önerilen ampirik ilişkiye göre yapılan hesaplama sonuçları, ödometre deneyleri ile hesaplanan ön konsolidasyon basıncı sonuçlarından, %0.5 – %11 arası değişen oranlarda, büyük belirlenmiştir (Şekil 4.61). Örnek derinliklerinde etkin efektif gerilme ile ön konsolidasyon basınçları karşılaştırıldığında ise, ön konsolidasyon basınçlarının tamamına yakın bir bölümünün efektif gerilmeden büyük olduğu saptanmıştır (Şekil 4.62). Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi ait kil birimlerin aşırı konsolide olduğunu ortaya koymaktadır. Aşırı konsolidasyon oranları, drenajsız kayma mukavemetini temel alan Mayne ve Mitchell (1988) ve standart penetrasyon deneyi N darbe sayılarını temel alan Kulhawy ve Mayne (1990) yaklaşımlarıyla da hesaplanmış, ödometre deneyi sonucu hesaplananlarla büyük oranda uyumlu olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.63). Yüzeye yakın kesimlerde, Kulhawy ve Mayne (1990) yaklaşımıyla hesaplanan değerler, diğer yöntemlere göre daha büyük sonuçlar vermektedir. Bu farkın, Kulhawy ve Mayne (1990) yaklaşımlarında, düzeltilmemiş darbe sayılarının kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

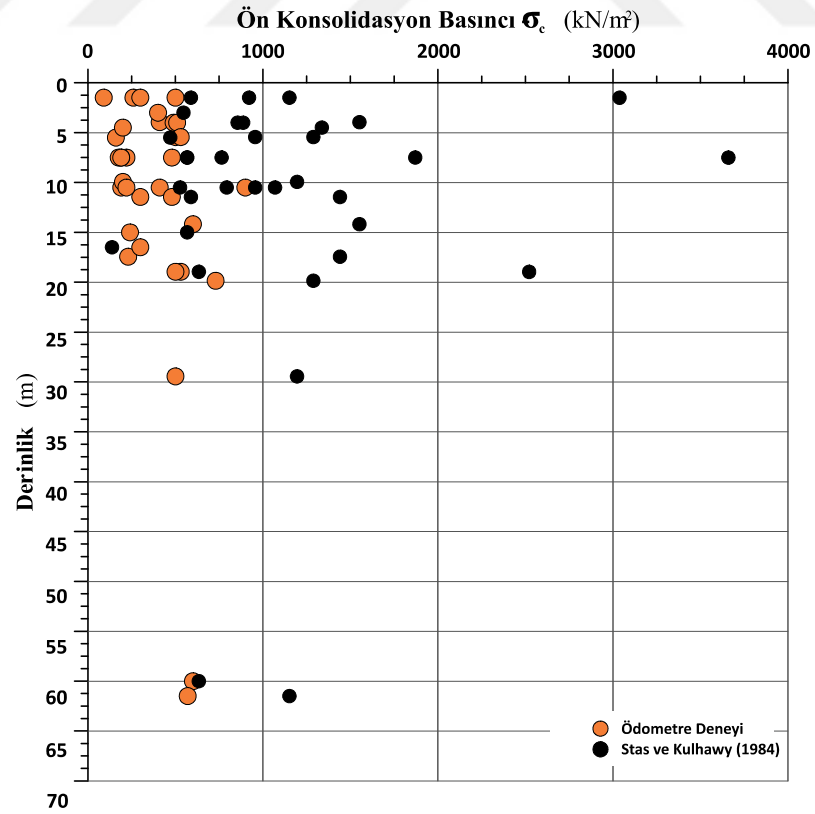


**Şekil 4.59:** Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait örneklerde belirlenen ön konsolidasyon basıncını değerlerinin normal dağılım eğrisi ve geometrik ortalaması.

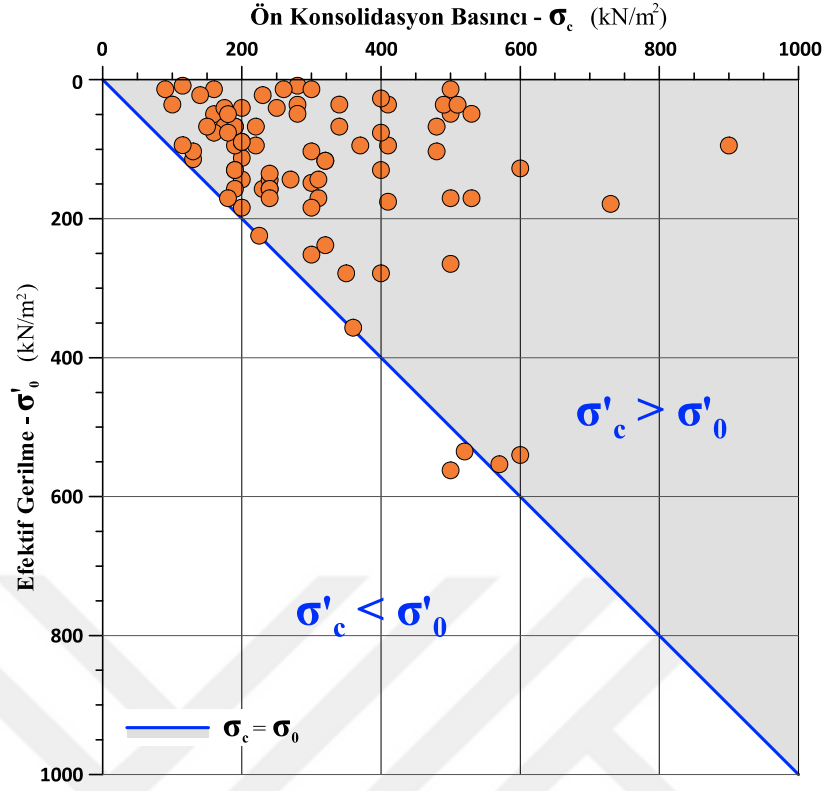




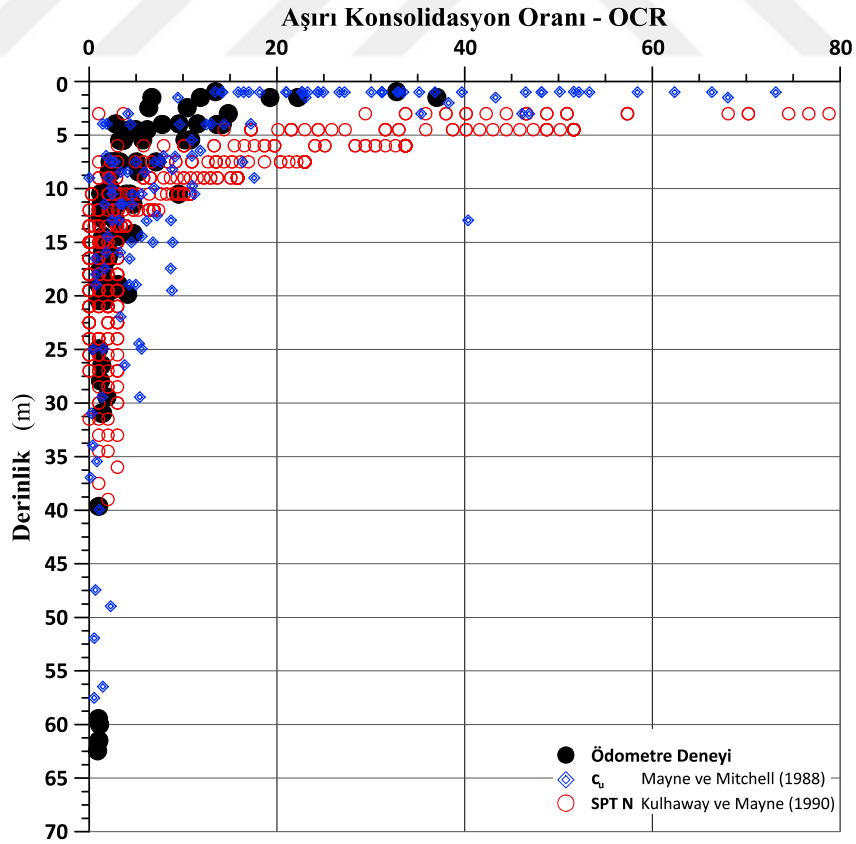
Şekil 4.60: Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait örneklerde belirlenen ön konsolidasyon basıncının derinlikle değişimi.



Şekil 4.61: Ödometre deneyi sonucu belirlenen ön konsolidasyon basıncı değerlerinin Stas ve Kulhawy (1984) yaklaşımı sonuçlarıyla ilişkisi.



Şekil 4.62: Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait örneklerde efektif gerilme – ön konsolidasyon basıncı ilişkisi.



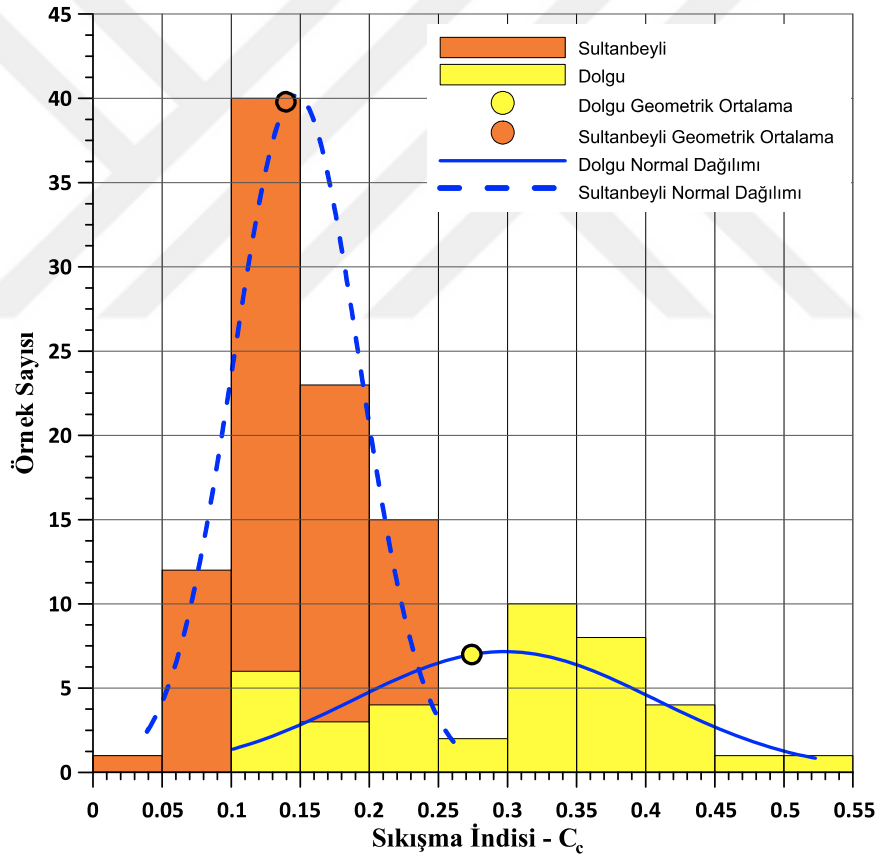
Şekil 4.63: Aşırı konsolidasyon oranlarının karşılaştırılması.

Boşluk oranı – gerilme grafiklerinden, toplam 131 adet sıkışma indisi ( $C_c$ ) ve yeniden sıkışma indisi ( $C_r$ ) değerleri hesaplanmıştır. Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait örneklerin  $C_c$  değerleri 0.039 ile 0.264, yapay dolguya ait örneklerin ise 0.231 ile 0.522 arasında hesaplanmıştır. Yeniden sıkışma indisi değerleri ise Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait örneklerde 0.007 ile 0.088, yapay dolgu örneklerde ise 0.039 ile 0.148 arasındadır. Hesaplanan  $C_c$  ve  $C_r$  değerlerine ait en düşük, en yüksek, ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 4.16'da sunulmuştur. Bu değerler, iki ayrı birim bazında histogramlarda değerlendirildiğinde, elde edilen normal dağılım eğrileri ve geometrik ortalama değerleri Şekil 4.64 ve Şekil 4.65'te sunulmuştur. Bu grafiklerde sıkışma indisi ( $C_c$ ) değerleri ile örnek sayısı arasındaki ilişkiye bakıldığında, Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi kil örneklerinde, büyük oranda simetrik bir çan eğrisi dağılımı elde edilirken, yapay dolgu birimlerde eksikli bir seri ortaya çıkmaktadır. Yapay dolgu için tespit edilen bu düzensiz durum, yeniden sıkışma indisi ( $C_r$ ) değerleri dağılımında, her iki birim içinde geçerlidir (Şekil 4.65). Her iki sıkışma indisi de, uygulanan konsolidasyon basıncı ve bu basınç karşısında boşluk oranındaki değişimi simgelemektedir. Bu nedenle, ödometre deneyleri sırasında belirlenen ilk boşluk oranlarıyla ( $e_0$ ), bu boşluk oranı koşullarında yapılan deneylerde belirlenen  $C_c$  ve  $C_r$  değerleri Şekil 4.66, Şekil 4.67, Şekil 4.68, Şekil 4.69, Şekil 4.70 ve Şekil 4.71'de ilişkilendirilmiştir. Bu grafiklerde, ikinci dereceden parabolik eğilim ilişkisi ile %95 güven aralıkları, ilişkinin 0.49 ve 0.53 gibi düşük belirleme katsayısına ( $R^2$ ) sahip olmasına rağmen, genel yayılımı temsil etmesi amacıyla oluşturulmuştur (Şekil 4.66 ve Şekil 4.67). sıkışma indisi ( $C_c$ ) ve yeniden sıkışma indisi ( $C_r$ ) değerlerinin büyük olması, konsolidasyon oturması hesaplarında, daha büyük oturma miktarı değerlerine ulaşılması sağlamaktadır. Bu nedenle, oturma miktarının belirlenmesinde, proje maliyeti ve güvenliğini optimum düzeyde tutmak için, uygun sıkışma indislerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Oluşturulan  $e_0 - C_c$  ile  $e_0 - C_r$  grafikleriyle, Orhanlı üyesi için temsilci olduğu değerlendirilen  $e_0 = \%54$  ve yapay dolgu için ise  $e_0 = \%64$  değerleri kullanılarak sıkışma indisi ( $C_c$ ) ve yeniden sıkışma indisi ( $C_r$ ) değerleri belirlenmiştir. Değerlerin belirlenmesinde,  $e_0$  değerine karşılık gelen ve eğilim ilişkisi için grafiklerde tanımlanmış olan güven eğrilerinin üst sınırları kullanılmıştır. Böylelikle, optimum düzeyde büyük, sıkışma indisi ( $C_c$ ) ve yeniden sıkışma indisi ( $C_r$ ) değerleri tanımlanmıştır. Sıkışma indisi değerleri, Orhanlı üyesi için 0.160, yapay dolgu için 0.382 ve yeniden sıkışma indisi değerleri ise sırasıyla 0.037 ve 0.083 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.68, Şekil 4.69, Şekil 4.70 ve Şekil 4.71). Benzer grafik şekliyle, ödometre deneyi sonucu elde edilen sıkışma indisi ( $C_c$ ) ve yeniden sıkışma indisi ( $C_r$ ) değerleri ilişkilendirilmiştir (Şekil 4.72). Böylelikle,  $e_0$  ekseninde ayrı ayrı değerlendirilerek belirlenen

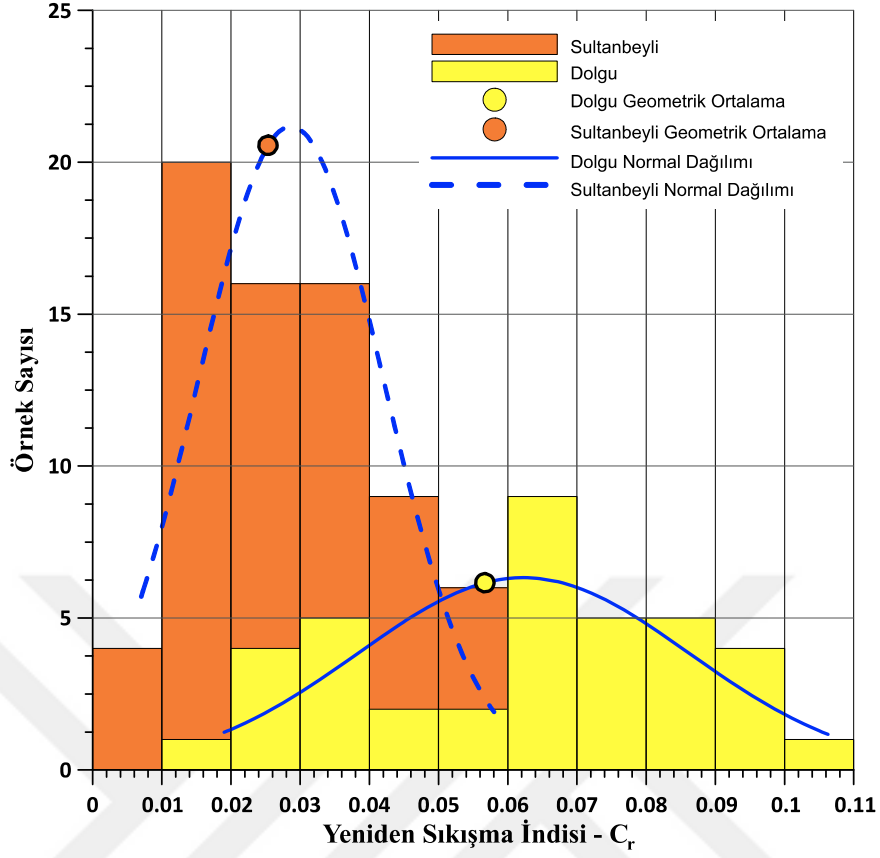
sıkışma indisi ( $C_c$ ) ve yeniden sıkışma indisi ( $C_r$ ) değerlerinin, birbirine uyumu denetlenmiştir. Şekil 4.72’de her iki birim için belirlenmiş sıkışma indisi ( $C_c$ ) değerleri sunulmuş olup,  $e_0$  ekseninde yapılan ayrı ayrı değerlendirmeye uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

**Tablo 4.16:** Sıkışma indisi ve tekrar sıkışma indislerinin en düşük, en yüksek, ortalama ve standart sapma değerleri.

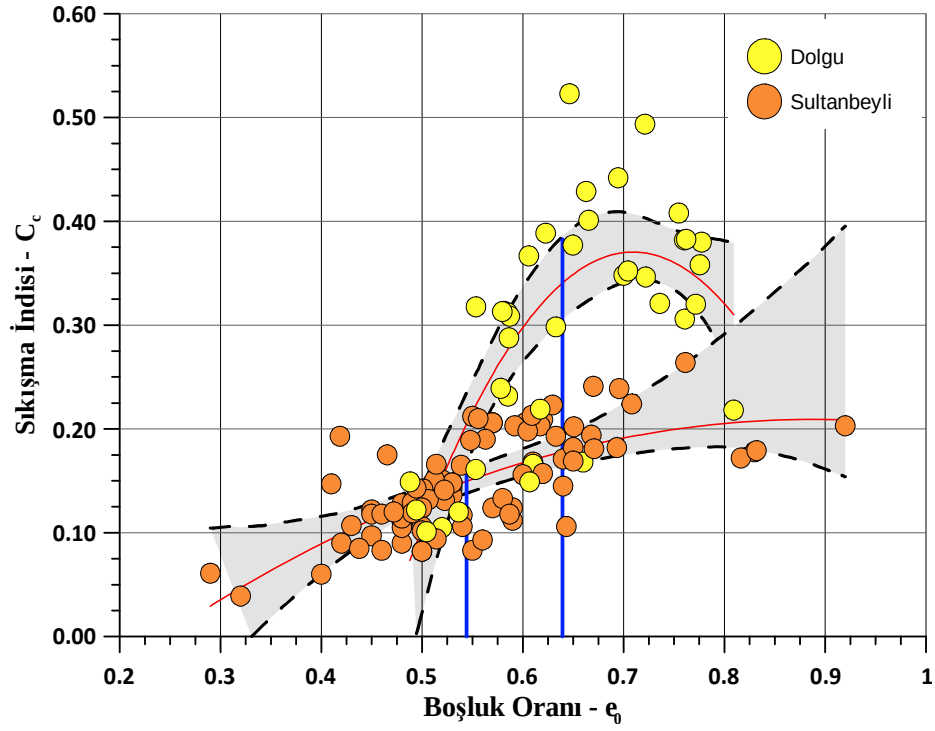
|                | Sıkışma İndisi ( $C_c$ ) |               | Tekrar Sıkışma İndisi ( $C_r$ ) |               |
|----------------|--------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|
|                | Yapay dolgu              | Orhanlı üyesi | Yapay dolgu                     | Orhanlı üyesi |
| Örnek sayısı   | 38                       | 93            | 38                              | 93            |
| En düşük       | 0.231                    | 0.039         | 0.039                           | 0.007         |
| En yüksek      | 0.522                    | 0.264         | 0.148                           | 0.088         |
| Ortalama       | 0.360                    | 0.076         | 0.076                           | 0.035         |
| Standart sapma | 0.059                    | 0.046         | 0.018                           | 0.016         |



**Şekil 4.64:** Sıkışma indisi değerlerinin örnek sayılarına göre dağılımı, normal dağılım eğrileri ve geometrik ortalamaları.

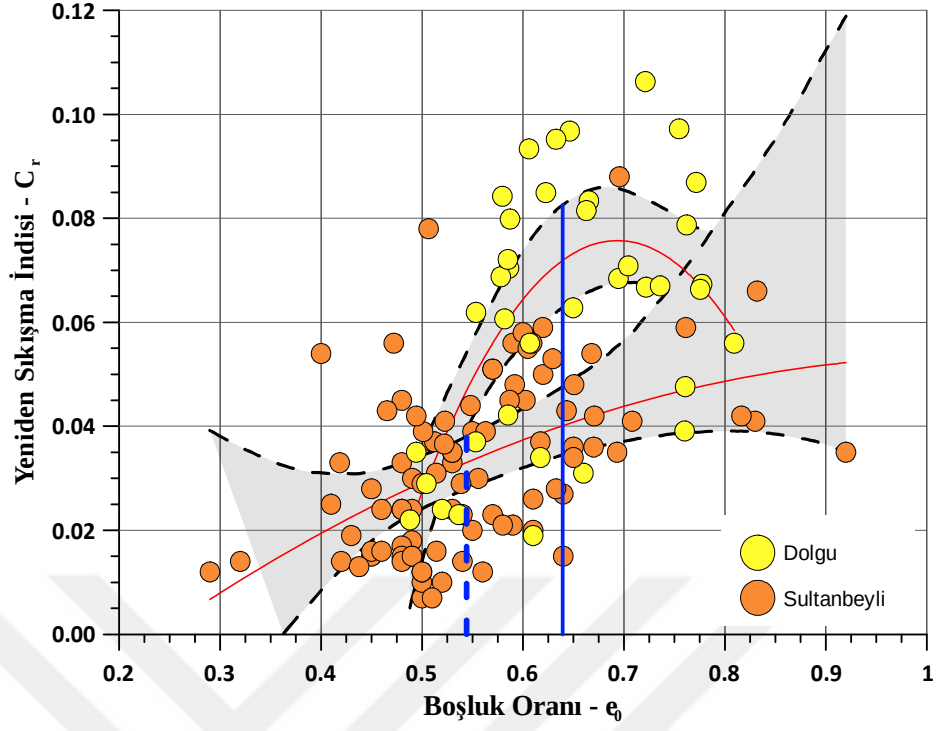


Şekil 4.65: Yeniden sıkışma indisi değerlerinin örnek sayılarına göre dağılımı, normal dağılım eğrileri ve geometrik ortalamaları.

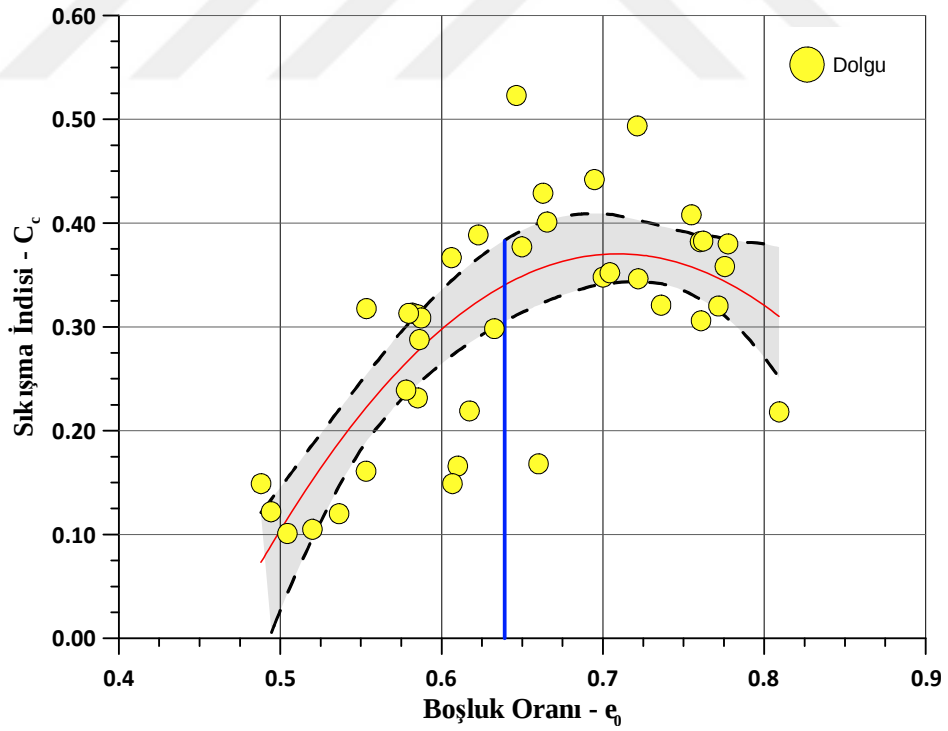


Şekil 4.66: Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi ve yapay dolgu birime ait örneklerde, boşluk oranı – sıkışma indisi ilişkisi.

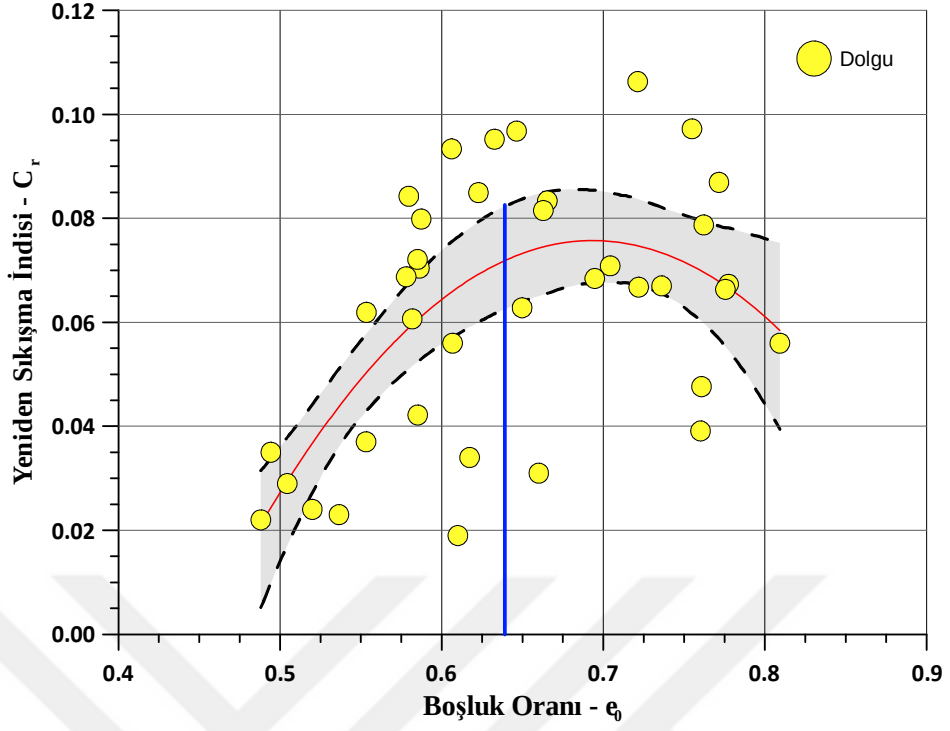




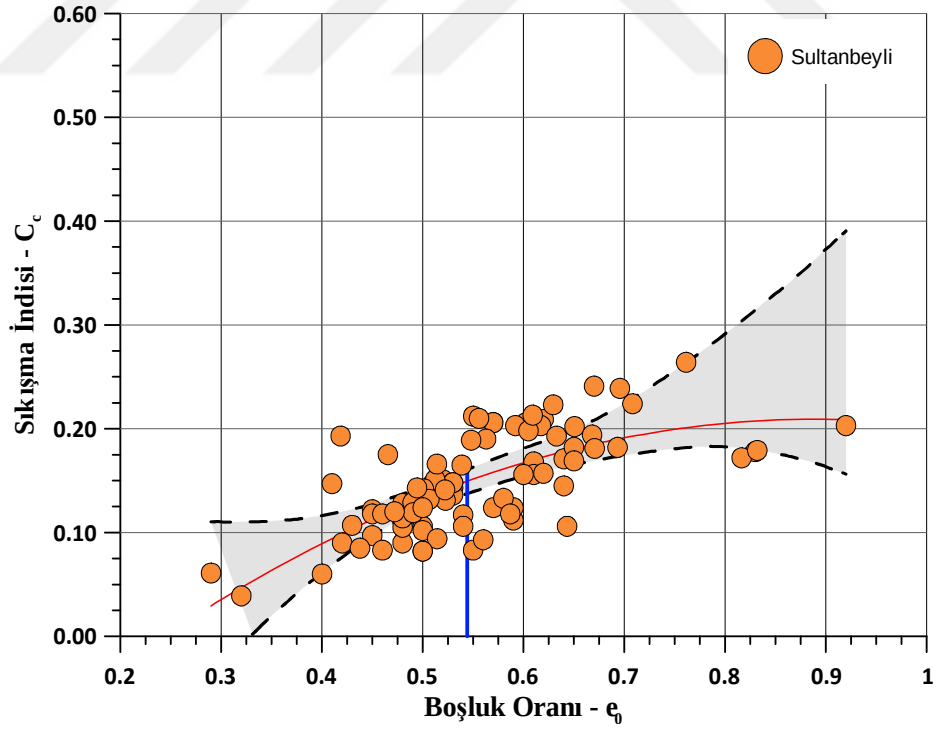
Şekil 4.67: Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi ve yapay dolgu birime ait örneklerde, boşluk oranı – yeniden sıkışma indisi ilişkisi.



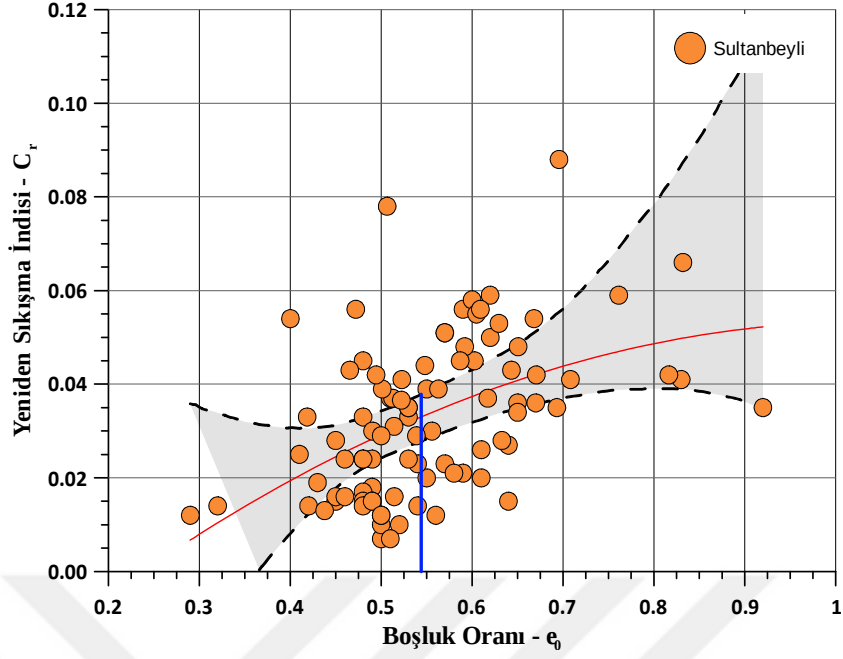
Şekil 4.68: Yapay dolgu birime ait örneklerde, boşluk oranı – sıkışma indisi ilişkisi.



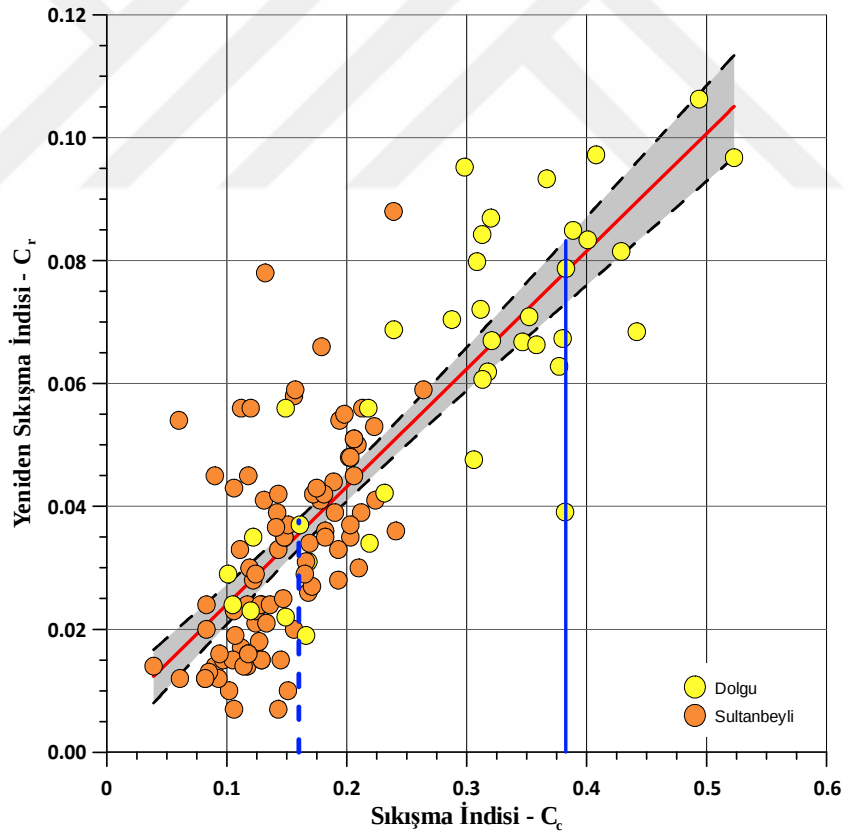
Şekil 4.69: Yapay dolgu birime ait örneklerde, boşluk oranı – yeniden sıkışma indisi ilişkisi.



Şekil 4.70: Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait örneklerde boşluk oranı – sıkışma indisi ilişkisi.



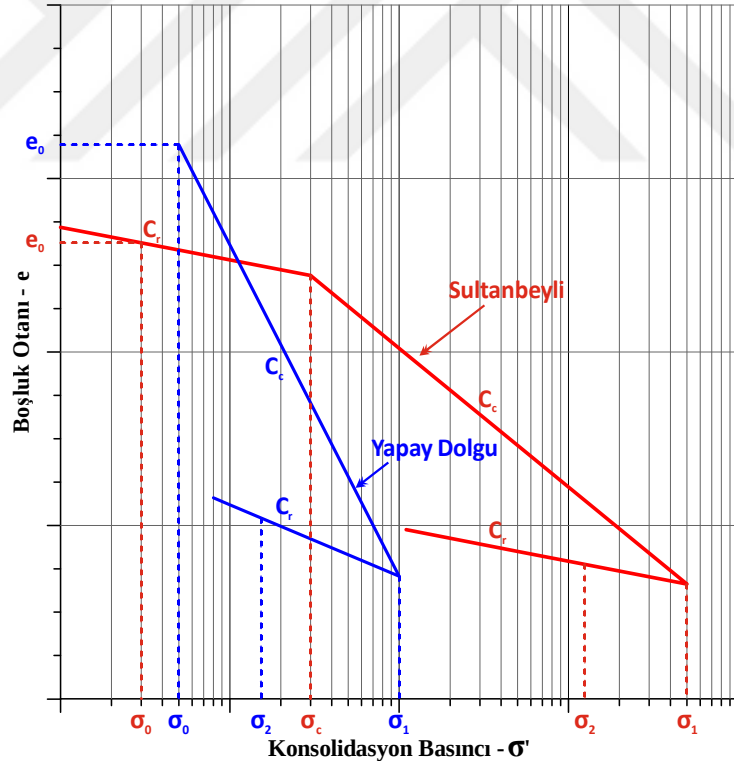
Şekil 4.71: Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait örneklerde boşluk oranı – yeniden sıkışma indisi ilişkisi.



Şekil 4.72: Sıkışma indisi ve yeniden sıkışma indisi ilişkisi.

Konsolidasyon oturması miktarının tahmininde, efektif gerilme artışı bulunan zeminin, bu artış karşısında gösterdiği konsolidasyon davranışının belirlenmesi önemlidir. Başka bir deyişle, hesaplarda kullanılacak parametrelerin yanında, davranış özelliklerinin de ortaya konulması

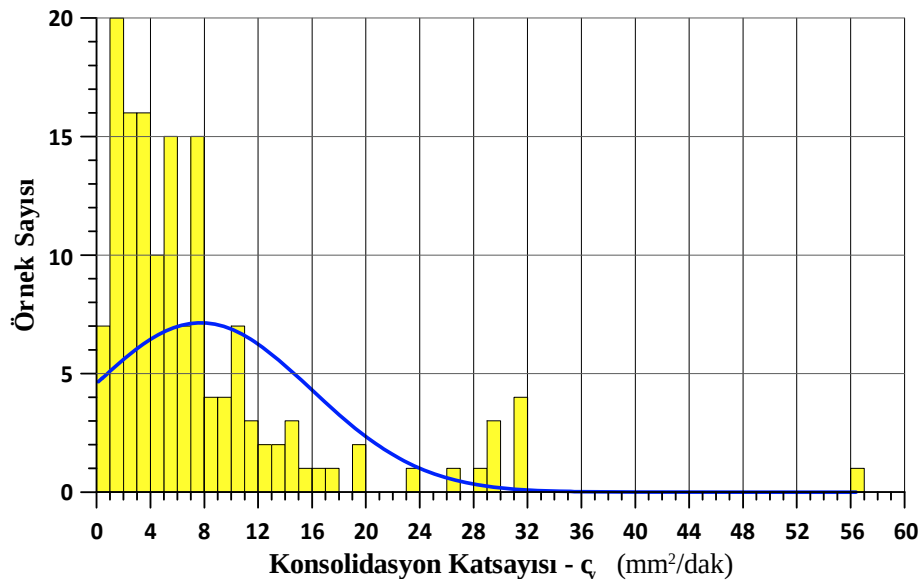
gerekmektedir. Bu noktadan hareketle, her iki birim için, elde edilen tüm bulgular ışığında, gerilme değişimine karşın boşluk oranı değişimini tanımlayan bir konsolidasyon modeli oluşturulmuştur (Şekil 4.73). Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, alanda aşırı konsolide kille temsil edilmektedir. Konsolidasyon süreci içerisinde, ön konsolidasyon basıncına ( $\sigma_c$ ) kadar yeniden sıkışma indisi ( $C_r$ ), bu basınç sonrasında ise sıkışma indisi ( $C_c$ ) etkin olacaktır. Ön konsolidasyon basıncından fazla bir basınç seviyesinde efektif gerilme azalımı durumunda ( $\sigma_2$ ), eski efektif gerilmesine ( $\sigma_1$ ) ulaşana kadar, oturma miktarı yeniden sıkışma indisi ( $C_r$ ) denetiminde gerçekleşecektir. Yapay dolgu biriminde ön konsolidasyon basıncı değerlendirmeye alınmamıştır. Bu birimde gerçekleşen her boyutta gerilme artışı sıkışma indisi ( $C_c$ ) denetiminde bir konsolidasyon süreci ortaya çıkaracak, efektif gerilmede azalma ( $\sigma_2$ ) durumunda ise eski efektif gerilmesine ( $\sigma_1$ ) ulaşana kadar yeniden sıkışma indisi ( $C_r$ ) etkin olacaktır.



**Şekil 4.73:** Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi ve yapay dolgu birimlerin konsolidasyon basıncı – boşluk oranı değişim modeli.

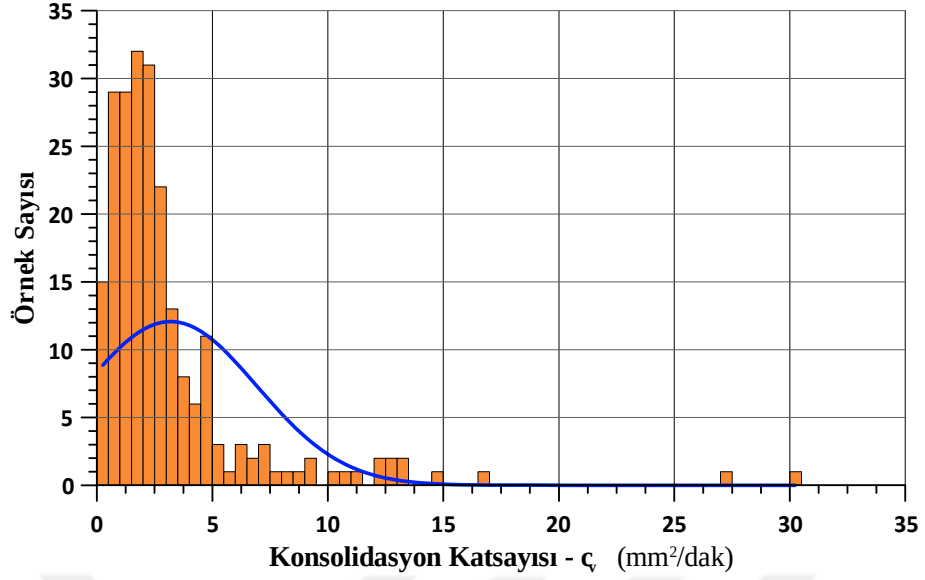
Konsolidasyon oturmasının, zamansal bazda göstereceği değişimin belirlenebilmesi için konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ) değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Konsolidasyon hızını kontrol eden konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ), permeabilite katsayısı ( $k$ ) ve zeminin hacimsel

sıkışma katsayısına ( $m_v$ ) bağlıdır. Hem permeabilite katsayısı ( $k$ ) hem de hacimsel sıkışma katsayısı ( $m_v$ ) konsolidasyon basıncı artınca azalmaktadır ve permeabilite katsayısı ( $k$ ), hacimsel sıkışma katsayısı ( $m_v$ ) kadar basınca bağlı değildir. Bazı killerde, basıncın artmasına rağmen, permeabilite katsayısının değişmediği görülmüştür (Öztoprak, 2002). Konsolidasyon sırasında, ön konsolidasyon basıncından sonraki gerilme durumlarında konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ) değeri, ön konsolidasyon basıncından önceki gerilme durumlarına göre önemli miktarda azalmaktadır. Zemin ön konsolide olduktan sonra konsolidasyon hızı azalmaya başlamaktadır. Çalışmada, ödometre deneyleri sonucu hesaplanan konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ), deneyler sırasında uygulanan basınç farklarıyla ilişkilendirilmiştir. Her iki birim için hesaplanan konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ) değerleri, değerlendirmeye alınan örnek sayıları ve bu örnek sayılarına göre konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ) değerlerinin normal dağılım eğrileri Şekil 4.74 ve Şekil 4.75'te sunulmuştur. Her iki şekilde de, normalden aşırı derecede sapan sonuçların ve iki birim karşılaştırıldığında yapay dolgu örneklerin konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ) değer dağılımının daha büyük olduğu belirlenmiştir. Aynı konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ) değerleri, ödometre deneylerinde uygulanan konsolidasyon basıncı değişimleri bazında ilişkilendirilerek, dağılımları karşılaştırılmıştır (Şekil 4.76 ve Şekil 4.77). Yapay dolgu örneklerde hesaplanan  $c_v$ , 200 kN/m<sup>2</sup> basıncına kadar önce azalan, 400 kN/m<sup>2</sup> değerine kadar artan ve 3200 kN/m<sup>2</sup> değerine kadar ise azalan bir eğilim içeresindedir. Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi kil örneklerinde ise 200 kN/m<sup>2</sup> basıncına kadar artmakta, sonraki basınç artışıyla birlikte azalan bir eğilim göstermektedir.

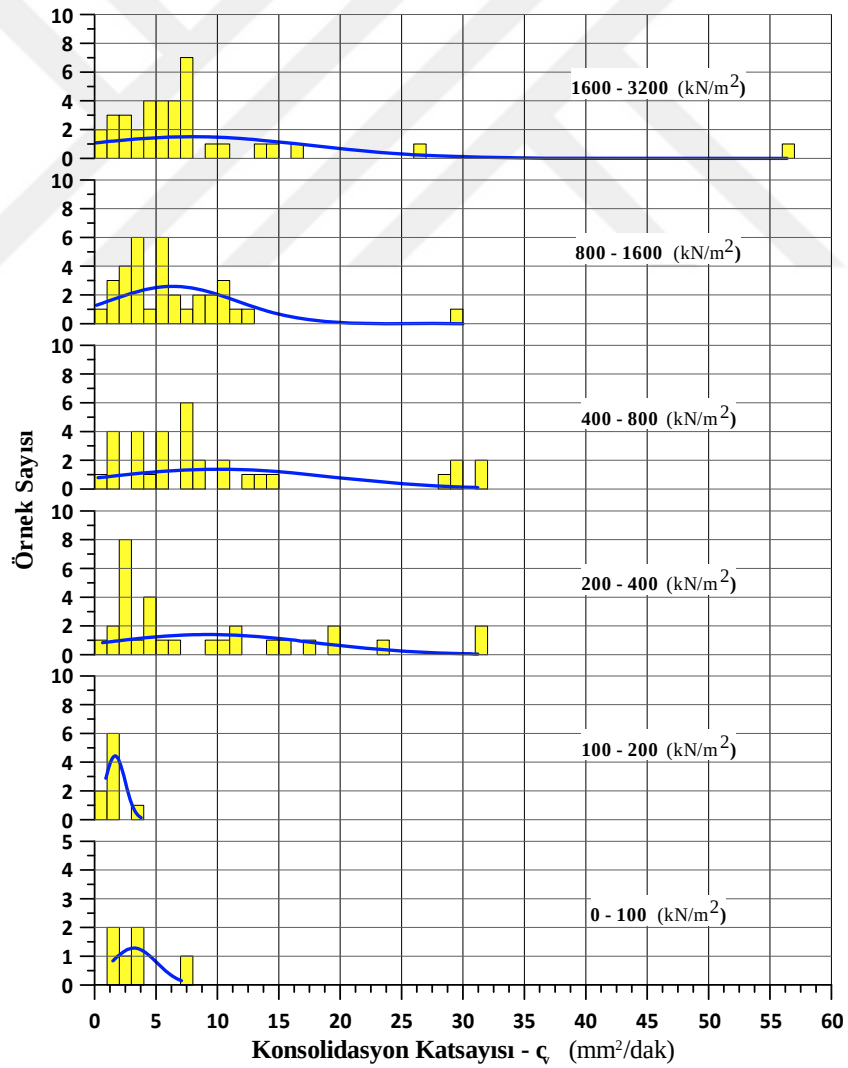


**Şekil 4.74:** Yapay dolgu örneklerde belirlenen konsolidasyon katsayısı değerlerinin, örnek sayıları ve normal dağılım eğrisi.

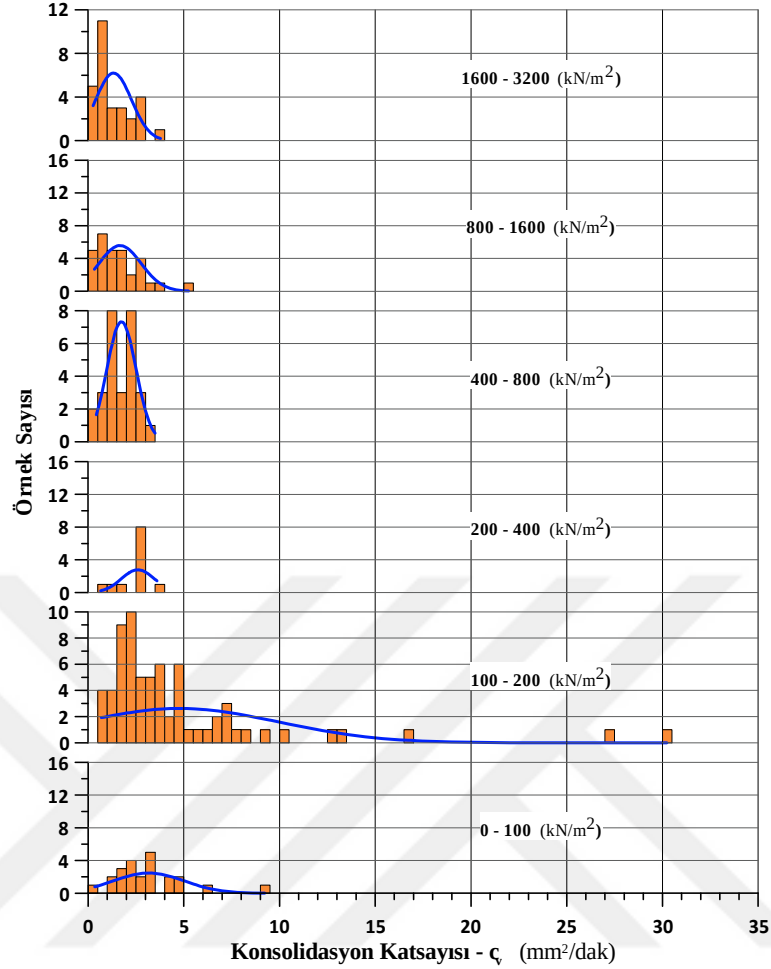




Şekil 4.75: Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait örneklerde belirlenen konsolidasyon katsayısı değerlerinin, örnek sayıları ve normal dağılım eğrisi.



Şekil 4.76: Yapay dolgu örneklerde belirlenen konsolidasyon katsayısı değerlerinin, konsolidasyon basıncı ve örnek sayılarına göre dağılımı.



**Şekil 4.77:** Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait örneklerde belirlenen konsolidasyon katsayısı değerlerinin, konsolidasyon basıncı ve örnek sayılarına göre dağılımı.

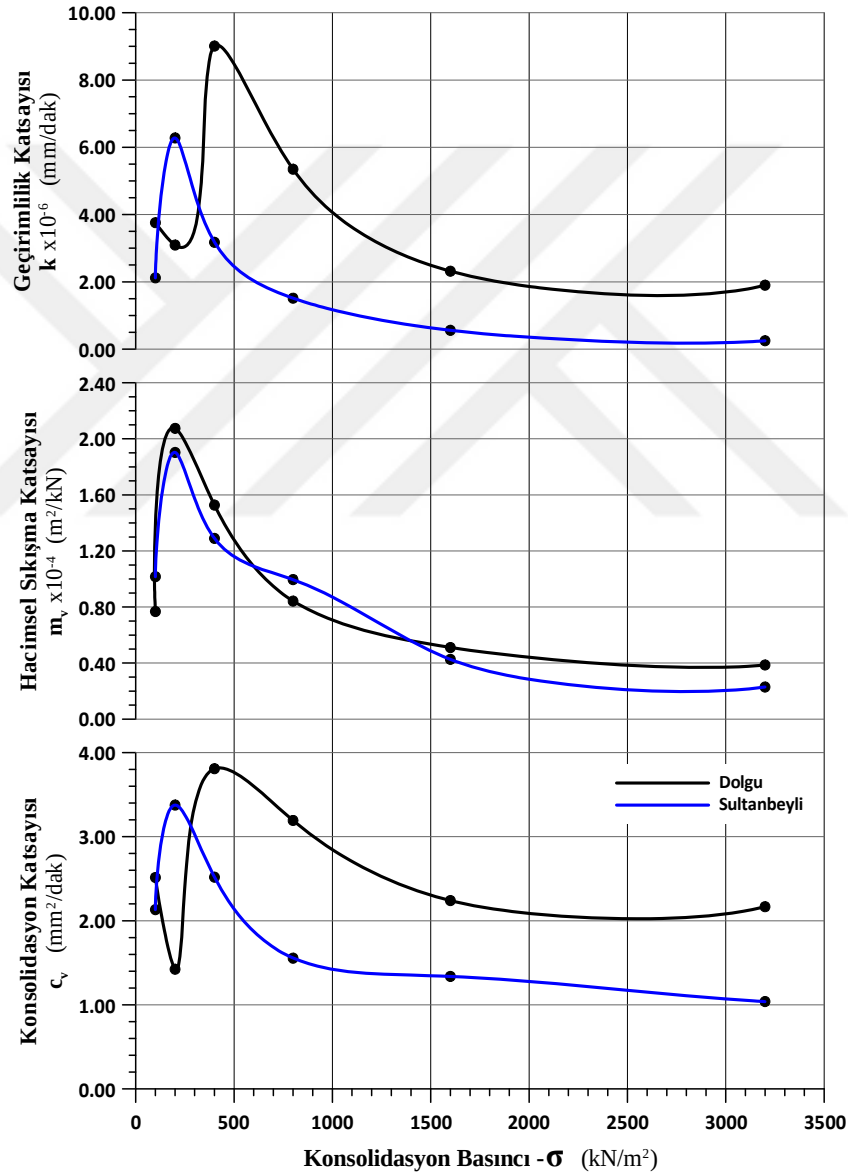
Konsolidasyon sürecinde hızı, suyun boşluklardaki hareketi kontrol etmektedir. Bu hareket, temelde zeminin geçirimliliğine bağlı olmakla birlikte, konsolidasyon süreci içerisinde boşluk oranı değişimini denetleyen konsolidasyon basıncı ise geçirimlilik üzerinde etkin olmaktadır. Böylelikle, daha öncede değinildiği gibi, konsolidasyon sürecinde zaman, hacimsel sıkışma katsayısı ( $m_v$ ) ve permeabilite katsayısı ( $k$ ) değişimlerinden etkilenmektedir. Ödometre deneyi sonucu hesaplanan konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ), hacimsel sıkışma katsayısı ( $m_v$ ) ve permeabilite katsayısı ( $k$ ), deneyler sırasında uygulanan konsolidasyon basınçlarıyla ilişkilendirilerek Şekil 4.78'de sunulmuştur. Bu şekilde, Şekil 4.76 ve Şekil 4.77'de sunulan,  $\sigma - c_v$  ilişkisi daha net bir şekilde ortaya konulmaktadır. Konsolidasyon basıncı değişimlerine karşılık benzer bir  $m_v$  değişimi sergileyen iki birimde, geçirimlilik değişimlerinin, özellikle ilk basınç kademesinde ( $100 \text{ kN/m}^2$ ) birbirinden çok farklı olduğu görülmektedir. Bu farklılığında, temelde Sultanbeyli kili ile aynı olan yapay dolguda, ilk basınç artışıyla, kısmen yüksek boşluk oranından kaynaklı olarak suyun yüksek hızla drene olmasının bir sonucu olduğu

düşünülmektedir. Daha yüksek basınç kademelerinde geçirimsizliğin, her iki birim için birbirinden farklı olmakla birlikte, benzer yönde değiştiği, aynı şekilde konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ) değişiminin de bunu takip ettiği görülmektedir. Bu değerlendirmeler sonucunda, basınç değişimi karşısında  $c_v$ 'nin değişiminde, Öztoprak (2002) tarafından da tanımlandığı şekilde, sıkışmanın etkisinden ziyade geçirimsizliğin değişiminin etkin olduğu saptanmıştır. Ön konsolidasyon basıncı değerlerine ve/veya örneğin alındığı derinlikteki efektif gerilme koşullarına kadar, farklı yönlerde değişim sergileyebilen konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ) değerlerinin, bu gerilme koşulu sonrasında önemli derecede azaldığı belirlenmiştir. Konsolidasyon zamanına yönelik yapılan hesaplamalarda bu özelliğin göz ardı edilmemesi, özellikle yeniden yükleme koşullarında, farklı konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ) değerlerinin kullanılması gerekmektedir.

Yapay dolgu birimde,  $c_v$  geometrik ortalaması, 200 kN/m<sup>2</sup> konsolidasyon basıncına kadar artışlarda 1.71 mm<sup>2</sup>/dak, bu basınç sonrası artışlarda 2.65 mm<sup>2</sup>/dak, hesaplanmıştır. Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi kil düzeyleri için bu değerler 400 kN/m<sup>2</sup> basınç artışına kadar 2.07 mm<sup>2</sup>/dak, bu basınç sonrası artışlarda ise 1.43 mm<sup>2</sup>/dak değerlerindedir.

Laboratuvarda elde edilen  $c_v$  değerleri ile yapılan oturma hesapları arazideki zeminin makro yapısından dolayı oturma hızını çok büyük bir şekilde küçük tahmin edildiği iyi bilinmektedir (Rowe, 1972). Brand ve Premchitt (1989)'e göre pratikte tasarım için laboratuvarda elde edilen  $c_v$  değerinin 3 ila 10 gibi bir değerle çarpılarak kullanıldığını belirtmiştir. Ödometre deneyi sonuçları ile arazi ölçümleri arasındaki bu farklılık, laboratuvar deneylerinde kullanılan örneklerin temsil ettiği zemin tabakasından daha homojen bir yapıda olmasının yanı sıra, temel olarak, drenaj ve yükleme koşullarındaki farklılıktan ileri gelmektedir. Konsolidasyon basıncını oluşturan yük; deney koşullarında, 24 saatlik periyotta, ani olarak değiştirilmesine karşın, arazi koşullarında, imalat tekniğine ve alansal büyüklüğe bağlı olarak yine sabit bir periyotta ancak çok daha küçük yük artışlarıyla oluşturulmaktadır. Bununla birlikte, laboratuvar koşullarında, bir sonraki yük artışına kadar geçen sürede, numunede gerçekleşen ani oturma tamamlanmasına karşın, bu durum arazi koşullarında, ani oturma tamamlanma süresinin yükleme periyodundan büyük olduğu koşullarda gerçekleşmemektedir. Bu nedenle, arazi koşullarında yapılan ölçümlerde, konsolidasyon davranışı en net şekilde, dolgu imalatının tamamlanmasından sonra gözlemlenebilmektedir. Yükleme koşulları arasındaki farklılıkların yanı sıra, laboratuvar deneyi ile arazi ölçümleri arasında ortaya çıkan farklılığın en önemli

nedeni, konsolidasyon basıncıyla aktif hale geçen gözenek suyu hareketliliği olarak tanımlanabilir. Ödometre deneylerinde, tek boyutlu konsolidasyon teorisine uygun olarak, numunenin üst ve alt yüzeyinden drene olan gözenek suyu, arazi koşullarında, bu teori kabulünün aksine, üç boyutta da hareket edebilmektedir. Arazi koşullarındaki suyun bu hareketi nedeniyle, Rowe (1972) ile Brand ve Premchitt (1989) çalışmalarında da değindiği üzere, ödometre deneyleri sonucu belirlenen konsolidasyon katsayısı kullanılarak, konsolidasyon zamanına yönelik yapılan tahminler, önemli ölçüde uzun zamanlarla sonuçlanmaktadır.



**Şekil 4.78:** Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi ve yapay dolgu örneklerinin, konsolidasyon basıncına göre, konsolidasyon katsayısı, hacimsel sıkışma katsayısı ve geçirimsizlik katsayısı değişimleri.

Tez çalışmasında uygulama alanı olarak seçilen proje için, oturma miktarının hesaplanandan farklı sonuçlanması, proje kotlarına göre yapılacak son bir mühendislik dolgusu çalışmasıyla telafi edilebilecekken, zaman açısından başarısız olan tahminlerin proje maliyetini önemli ölçüde etkileyecek, hatta projenin işletme aşamasına geçmesinde önemli aksaklıklara neden olacaktır. Hesaplanan konsolidasyon zamanının gerçekleşenden daha uzun olması durumunda, öngörülen bu süreyi kısaltmak için, önlem çalışmalarını gündeme getirerek, gereksiz maliyetler ortaya çıkartacak, daha kısa olması durumunda ise proje dolguları tamamlandıktan sonra oturmaların sonlanmaması ve dolayısıyla üstyapı imalatlarının aksaması ile projenin işletmeye alınamaması gibi olumsuz sonuçları ortaya çıkartacaktır. Çalışma kapsamında, proje üzerinde etkin olması muhtemel bu risklerin ortadan kaldırılması amacıyla, yapay dolgu kil birimlerine göre daha düşük geçirimsizliğe sahip, doğal olarak konsolidasyon sürecinin daha uzun olması beklenen, Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'ne ait kil düzeyler üzerinde ön yükleme çalışması yapılmıştır. Bu çalışma için, 20 m ile 40 m arası değişken kalınlıklarda kil düzeylerinin bulunduğu Apron – 1 alanı seçilmiş ve alanda yapılacak olan mühendislik dolgusu öncesi, bitkisel toprak seviyesi alandan uzaklaştırılmıştır. Kazılar sonrası oluşan topoğrafik yüzey üzerine, 5 farklı lokasyonda milimetre hassasiyetinde kot değişimlerinin belirlenmesine imkân tanıyan, oturma kolonları yerleştirilmiştir (Şekil 4.79). Ölçüm lokasyonlarında, 10.55 m ile 21.03 m yükseklikleri arasında değişen kalınlıklarda proje dolgusu oluşturulmuştur (Tablo 4.17). Ortalama 21 kN/m<sup>2</sup> birim hacim ağırlığı ile oluşturulan proje dolgusu sonucunda, alanda 221.55 kN/m<sup>2</sup> ile 441.63 kN/m<sup>2</sup> arasında değişen, gerilme artışı sağlanmıştır. Yapılan dolgu çalışmaları, imalat şartları gereği 60 cm kalınlığında serilen granüler malzemenin sıkıştırılması ile 3 ay içerisinde tamamlanmıştır. Tüm yükleme alanı için ortalama dolgu hızı günlük 23 cm'dir. Oluşturulan ölçüm sisteminde yükleme öncesi ilk okumalar yapılmış ve dolgu imalatı sonrası, 2017 yılının Mart ayından 2019 yılı Aralık ayına kadar süren, 34 ay süresince, günlük periyottan aylık periyoda kadar farklı zaman aralıklarında tekrarlanan ölçümler gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 4.17:** Ön yükleme yapılan alanda oluşturulan oturma plakaları ile bu lokasyondaki kil ve proje dolgusu kalınlıkları.

| Ölçüm Noktası | Kil Kalınlığı<br>(m) | Proje Dolgusu Kalınlığı<br>(m) |
|---------------|----------------------|--------------------------------|
| PLK – 1       | 20                   | 10.73                          |
| PLK – 2       | 30                   | 10.55                          |
| PLK – 3       | 25                   | 16.42                          |
| PLK – 4       | 25                   | 13.60                          |
| PLK – 5       | 40                   | 21.03                          |



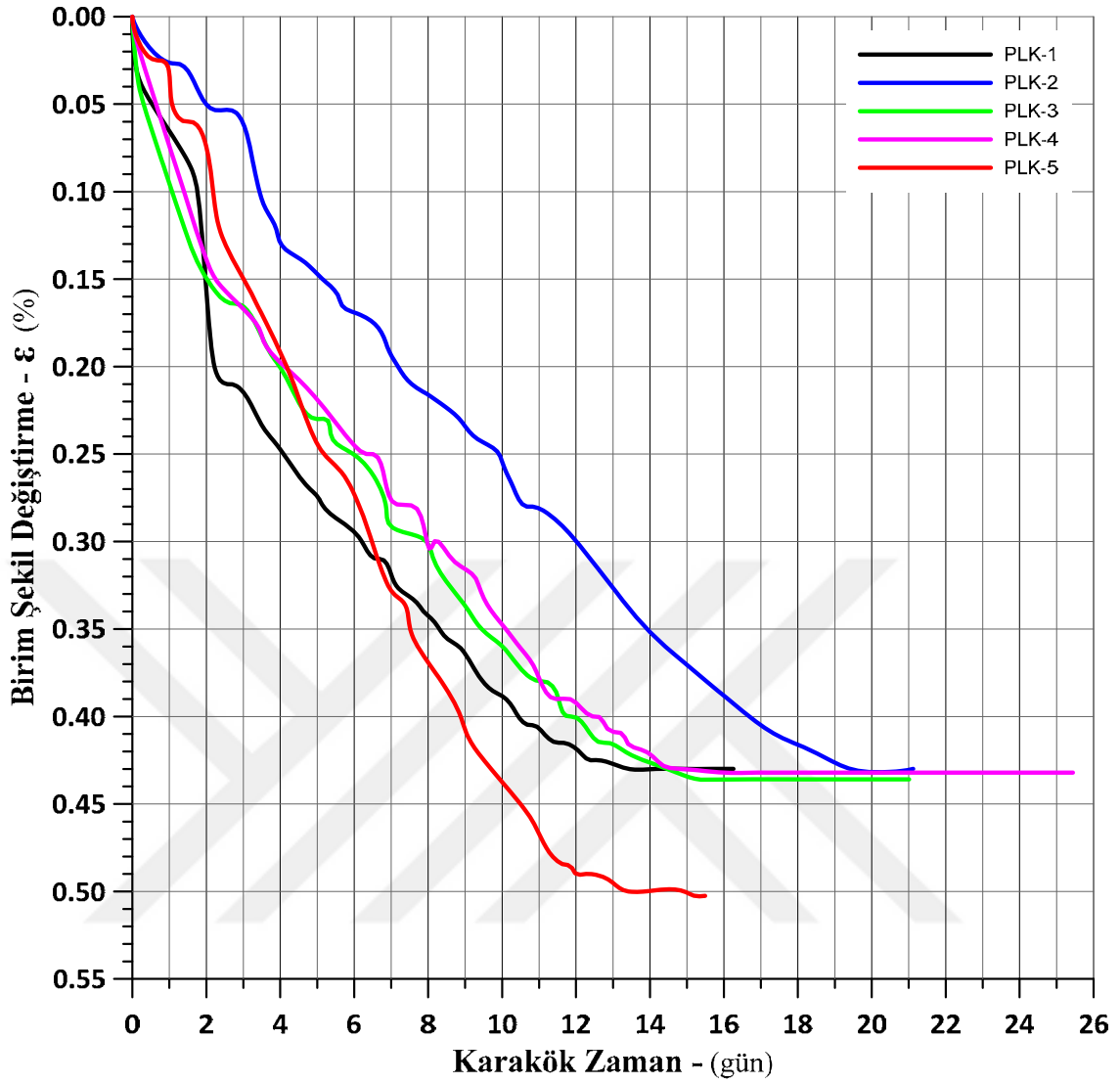


**Şekil 4.79:** Deneme dolgusu yapılan alan ve oturma miktarı ölçüm lokasyonları.

ASTM International (2011) standardına göre, ödometre deneyi ile konsolidasyon katsayısının tespitinde, her bir yük artışıyla oluşan gerilme aralığında, Casagrande ve Fadum (1940) tarafından önerilen logaritma zaman yöntemi veya Taylor (1942) tarafından önerilen karekök zaman yöntemlerinden biri kullanılabilir. Bununla birlikte, Duncan (1993) tarafından yapılan çalışmada, karekök zaman yönteminin kullanılması, diğer yöntemlere göre daha büyük sonuçlar vermesi nedeniyle, önerilmektedir. Apron – 1 alanında yapılan ölçümlerin değerlendirilmesinde, Duncan (1993) çalışması benimsenmiş ve her bir ölçüm lokasyonu için ölçümler kullanılarak karekök zaman – birim şekil değiştirme grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 4.80). Grafiklerin oluşturulmasında, son yüklemeyi takiben oturma kolonlarından elde edilen kot değerleri  $\Delta H = 0$  olarak kabul edilmiş ve kil birim kalınlığı kullanılarak zamana bağlı birim şekil değiştirme ( $\varepsilon$ ) değerleri hesaplanmıştır. Oturma kolonu ölçümlerinde, 240 gün ile 647 gün arasında değişen zaman dilimi içerisinde kaydedilen sonuçlara göre, en küçük kot değişimi PLK – 1 lokasyonunda 8.6 cm, en büyük kot değişimi PLK – 5 lokasyonunda 10.5 cm olarak belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalar neticesinde, birim şekilde değiştirme değerlerinin %0.43 ile %0.50 arasında değiştiği belirlenmiştir. Tüm ölçüm lokasyonları için, sıkışabilir tabaka kalınlığı, proje dolgusu kalınlığı, ölçüm süresi, en büyük oturma miktarı ve birim şekil değiştirme değerleri Tablo 4.18’de sunulmuştur.

Karakök zaman yöntemine göre, konsolidasyon sürecini tanımlayan karakök zaman – birim deformasyon eksenleriyle oluşturulan teorik eğrinin, gerilmenin artışıyla birlikte ani birim deformasyonun artışı gösterdiği ve sonrasında konsolidasyon oranının (U) %60 olduğu sınıra kadar ise doğrusal olduğu kabul edilmektedir. Bu eğrinin ani birim deformasyon artışı gösterdiği kesimi, ani oturma bölgesi olarak yorumlanabilir. Eğri, U=%100'den sonra ise ikincil konsolidasyon sürecini tanımlamaktadır. Bu noktadan hareketle, Şekil 4.80'de sunulan karakök zaman – birim şekil değiştirme grafiği incelendiğinde, 2.68 gün ile 16 gün aralığında ani birim şekil değiştirme artışlarının olduğu ve dolgu inşaatının tamamlanmasını takiben ani oturmaların 16 gün kadar devam ettiği söylenebilmektedir. Bununla birlikte, ani oturmalar en hızlı PLK – 3 lokasyonun, en yavaş ise PLK – 2 lokasyonunda sonlanmıştır. Zemin kütleğinde efektif gerilme artış oranları ile ani oturma sonlanma süreleri karşılaştırıldığında ise, artış oranının yükselmesiyle ani oturma sonlanma sürenin azaldığı belirlenmiştir (Şekil 4.81).

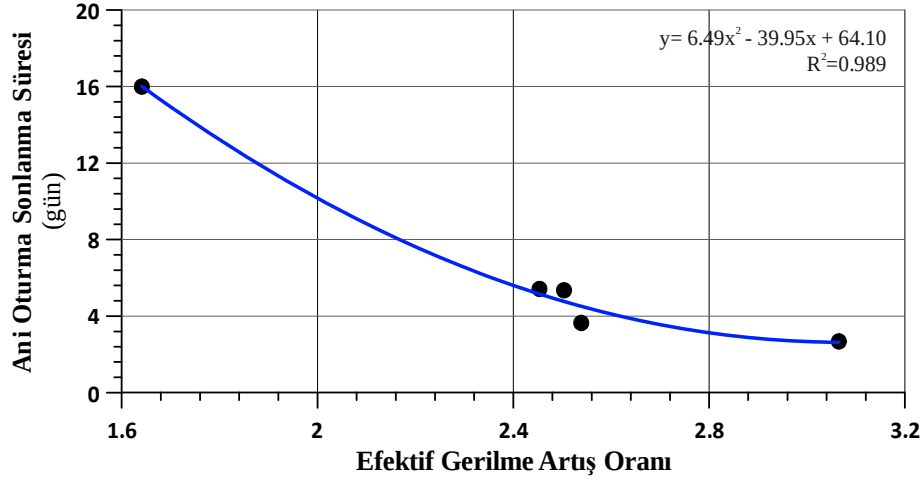
Arazide yapılan ön yükleme sonucunda alınan ölçümlerle oluşturulan zamana ( $\sqrt{t}$ ) bağlı birim şekil değiştirme ( $\varepsilon$ ) grafiği kullanılarak, Taylor (1942) tarafından önerilen karakök zaman yöntemiyle yapılan hesaplamalar sonucu, konsolidasyon katsayıları ( $c_v$ ) 317 mm<sup>2</sup>/dak ile 1544 mm<sup>2</sup>/dak arasında hesaplanmıştır (Tablo 4.19). Hesaplanan bu değerler, laboratuvarında bulunan değerlerden, en az 150 kat gibi, çok daha yüksek sonuçlar ortaya koymuştur. Bu denli yüksek değerlere ulaşılmasının başlıca nedeni, drenaj şartlarının laboratuvar örneklerinde olduğu gibi tek boyutta gerçekleşmemesi, proje dolgusu öncesinde zemin yüzeyinde oluşturulan drenaj sistemidir.



Şekil 4.80: Oturma kolonu ölçüm sonuçları karakök zaman – birim şekil değiştirme ilişkisi.

Tablo 4.18: Oturma plakalarının bulunduğu lokasyonda kil ve proje dolgusu kalınlıkları ile ölçüm süresi, en büyük oturma miktarı ve en büyük birim şekil değiştirme oranları

| Ölçüm Noktası | Kil Kalınlığı<br>(m) | Proje Dolgusu<br>Kalınlığı<br>(m) | Ölçüm Süresi<br>(gün) | En Büyük<br>Oturma<br>Miktarı<br>(cm) | En Büyük<br>Birim Şekil<br>Değiştirme<br>(%) |
|---------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|
| PLK – 1       | 20                   | 10.73                             | 264                   | 8.6                                   | 0.430                                        |
| PLK – 2       | 30                   | 10.55                             | 446                   | 12.9                                  | 0.430                                        |
| PLK – 3       | 25                   | 16.42                             | 442                   | 10.9                                  | 0.436                                        |
| PLK – 4       | 25                   | 13.60                             | 647                   | 10.8                                  | 0.432                                        |
| PLK – 5       | 40                   | 21.03                             | 240                   | 20.1                                  | 0.502                                        |



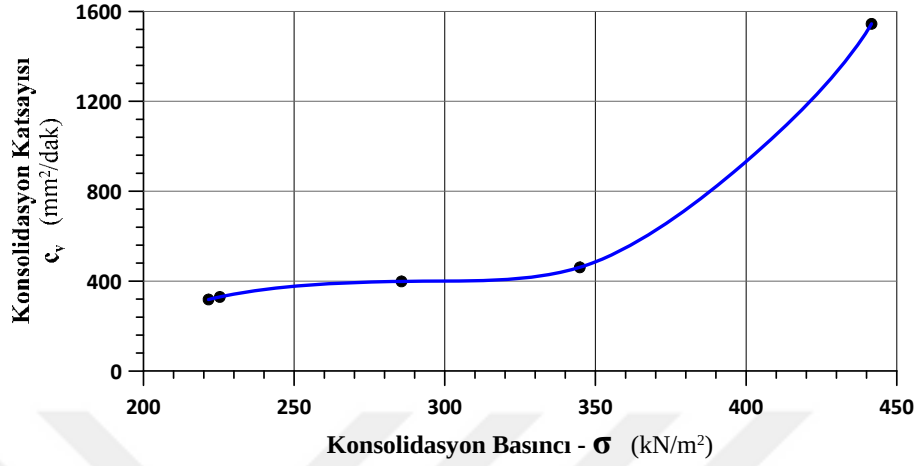
Şekil 4.81: Efektif gerilme artış oranı ile ani oturma sonlanma süresi ilişkisi.

Tablo 4.19: Oturma plakası ölçümleri kullanılarak belirlenen konsolidasyon katsayısı değerleri

| Ölçüm Noktası | U=%90 Konsolidasyonun Tamamlanma Süresi |                   | Drenaj Uzunluğu<br>d<br>(m) | Konsolidasyon Katsayısı        |                                 |
|---------------|-----------------------------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
|               | $\sqrt{t_{90}}$<br>(gün)                | $t_{90}$<br>(gün) |                             | $c_v$<br>(m <sup>2</sup> /gün) | $c_v$<br>(mm <sup>2</sup> /dak) |
| PLK – 1       | 13.37                                   | 178.75            | 10.0                        | 0.474                          | 329                             |
| PLK – 2       | 20.42                                   | 416.97            | 15.0                        | 0.457                          | 317                             |
| PLK – 3       | 14.12                                   | 199.37            | 12.5                        | 0.664                          | 461                             |
| PLK – 4       | 15.19                                   | 230.73            | 12.5                        | 0.574                          | 398                             |
| PLK – 5       | 12.35                                   | 152.52            | 20.0                        | 2.224                          | 1544                            |

Arazide yapılan ön yükleme deneyi sonucunda PLK – 5 lokasyonunda hesaplanan konsolidasyon katsayısı ( $c_v$ ), diğer lokasyonlara göre çok daha yüksek olarak tespit edilmiştir. Bu alanda oluşturulan dolgu yüksekliği 21.03 m ile en yüksek değere sahiptir (Tablo 4.19). En küçük  $c_v$  değeri ise PLK – 2 lokasyonunda hesaplanmıştır. Bu lokasyonda ise oluşturulan dolgu yüksekliği 10.55 m ile en düşük değere sahiptir. Dolgu yüksekliklerine bağlı oluşturulan konsolidasyon basınçlarıyla, bu lokasyonlarda hesaplanan  $c_v$  değerleri karşılaştırıldığında, yaklaşık 325 kN/m<sup>2</sup> konsolidasyon basıncı değerine kadar,  $c_v$  değerlerinde düşük oranda bir artış olduğu, bu basınç sonrasında ise ani artış gerçekleştiği tespit edilmiştir. Konsolidasyon basıncı arttırıldıkça özellikle 350 kN/m<sup>2</sup> değeri sonrası konsolidasyon süresi önemli ölçüde azalacaktır. Konsolidasyon sürecinde, konsolidasyon basıncı artışlarıyla, bu basınçlara karşılık  $c_v$  değerlerinin düşük oranda artışlarından sonra, gözenek suyunda artan basınçlara karşılık hızlanma nedeniyle,  $c_v$  değerinde artış, ön konsolidasyon basıncının geçildiği durumlarda ise azalma beklenen bir durumdur. Ancak yapılan arazi çalışması sonucunda hesaplanan  $c_v$  değerlerinde, yalnızca, az oranda artış ve sonrasında ön konsolidasyon basıncı aşılması öncesi beklenen  $c_v$  artışları belirlenmiştir (Tablo 4.19). Bu durum, 21 m yüksekliğe varan ve 441

$\text{kN/m}^2$  gerilme artışına neden olan dolgular ile ön konsolidasyon basıncının aşılamadığını göstermektedir.



**Şekil 4.82:** Oturma kolonu lokasyonlarında oluşturulan konsolidasyon basıncı ile hesaplanan konsolidasyon katsayısı ilişkisi.

Kil zemin olarak tanımlanan yapay dolgu ve kısmen bu birim altında, kısmen ise yüzeyde yayılımı gözlenen Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi örnekleri üzerinde yapılan arazi ve laboratuvar çalışmalarına ait sonuçlar değerlendirildiğinde, konsolidasyon oturması miktarının ve bu oturma miktarının gerçekleşeceği sürenin tahmininde kullanılmak üzere Tablo 4.20'de sunulan konsolidasyon analiz parametreleri belirlenmiştir. Yapay dolgu birimin, boşluk oranı ve geçirimsizlik özellikleri değerlendirildiğinde, aynı yük artışlarında, konsolidasyon sürecinin Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi'nden daha uzun sürede tamamlanması beklenmemektedir. Ancak, Orhanlı üyesi üzerinde yapılan ön yükleme sonucu belirlenen konsolidasyon katsayısı değerleri ile yapay dolgu için yapılan laboratuvar deneyi sonuçları arasında büyük farklılık bulunmaktadır. Bu nedenle, yapay dolgu için temsilci bir konsolidasyon katsayısı değeri tanımlanmamıştır.

**Tablo 4.20:** Yapay dolgu ve Orhanlı üyesi konsolidasyon analizi parametreleri.

|                           |            |          | Yapay Dolgu | Orhanlı Üyesi |
|---------------------------|------------|----------|-------------|---------------|
| Doğal birim hacim ağırlık | $\gamma_n$ | (kN/m³)  | 18          | 19            |
| İlk Boşluk Oranı          | $e_0$      | (%)      | 64          | 54            |
| Sıkışma indisi            | $C_c$      | –        | 0.38        | 0.16          |
| Ön konsolidasyon basıncı  | $\sigma_c$ | (kN/m²)  | –           | 450           |
| Yeniden sıkışma indisi    | $C_r$      | –        | 0.083       | 0.038         |
| Konsolidasyon katsayısı   | $C_v$      | (m²/gün) | –           | 0.54          |



#### 4.4.6. Konsolidasyon Analizleri

Proje alanında 44.27 metre yüksekliğe varan mühendislik dolguları 2,817,545 m<sup>2</sup> alan kaplamakta ve ayrıntıları Çalışma Alanının Jeolojisi başlığı altında anlatıldığı şekliyle, bir bölümü Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, bir bölümü yapay dolgu, bir bölümü ise paleozoik birimler üzerinde oluşturulmaktadır. Önceki bölümlerde değinilen, uygulama projesinin özellikleri ve çalışma alanının mühendislik jeolojisi bulgularından hareketle, mühendislik dolgusunun oluşturacağı gerilme artışlarıyla, Orhanlı üyesi ve yapay dolgu olarak tanımlanan kil birimlerinde, konsolidasyon oturmalarının gerçekleşeceği söylenebilmektedir. Projenin başarılı bir şekilde sonuçlandırılabilmesi için bu iki birimde gelişecek konsolidasyon sürecinin tanımlanması ve proje kriterlerine uygun bir şekilde kontrol altında tutulması gerekmektedir. Bu kapsamda, çalışmada öncelikle mevcut şartlar altında proje dolgusu yapılması durumunda ortaya çıkacak konsolidasyon miktarı ve %95 konsolidasyonun gerçekleşmesi için gereken süre hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, uygulanan yüke karşılık gerilme artışlarında Gray (1936) ve Das (2008) yaklaşımları temel alınmış, geniş alan kaplayan dolgu imalatı altında, meydana gelen gerilme artışlarının, sıkışabilir tabaka içerisinde derinlikle önemli ölçüde değişiklik göstermeden sabit olduğu belirlenmiştir. Konsolidasyon oturması miktarının belirlenmesinde ise Terzaghi (1943) tarafından önerilen tek boyutlu konsolidasyon teorisinden hareketle oluşturulmuş, Das (2008) tarafından da oluşturulma kabulleri ayrıntılarıyla açıklanan ve konsolidasyon hesaplarında kullanılması önerilen Denklem (2.69) ve Tablo 4.20’de sunulan parametreler kullanılmıştır. Alanda inşa edilen tünel yapılarında deformasyona karşın farklı tedbirler alınması nedeniyle, bu yapıların bulunduğu alanlarda hesaplama yapılmamıştır.

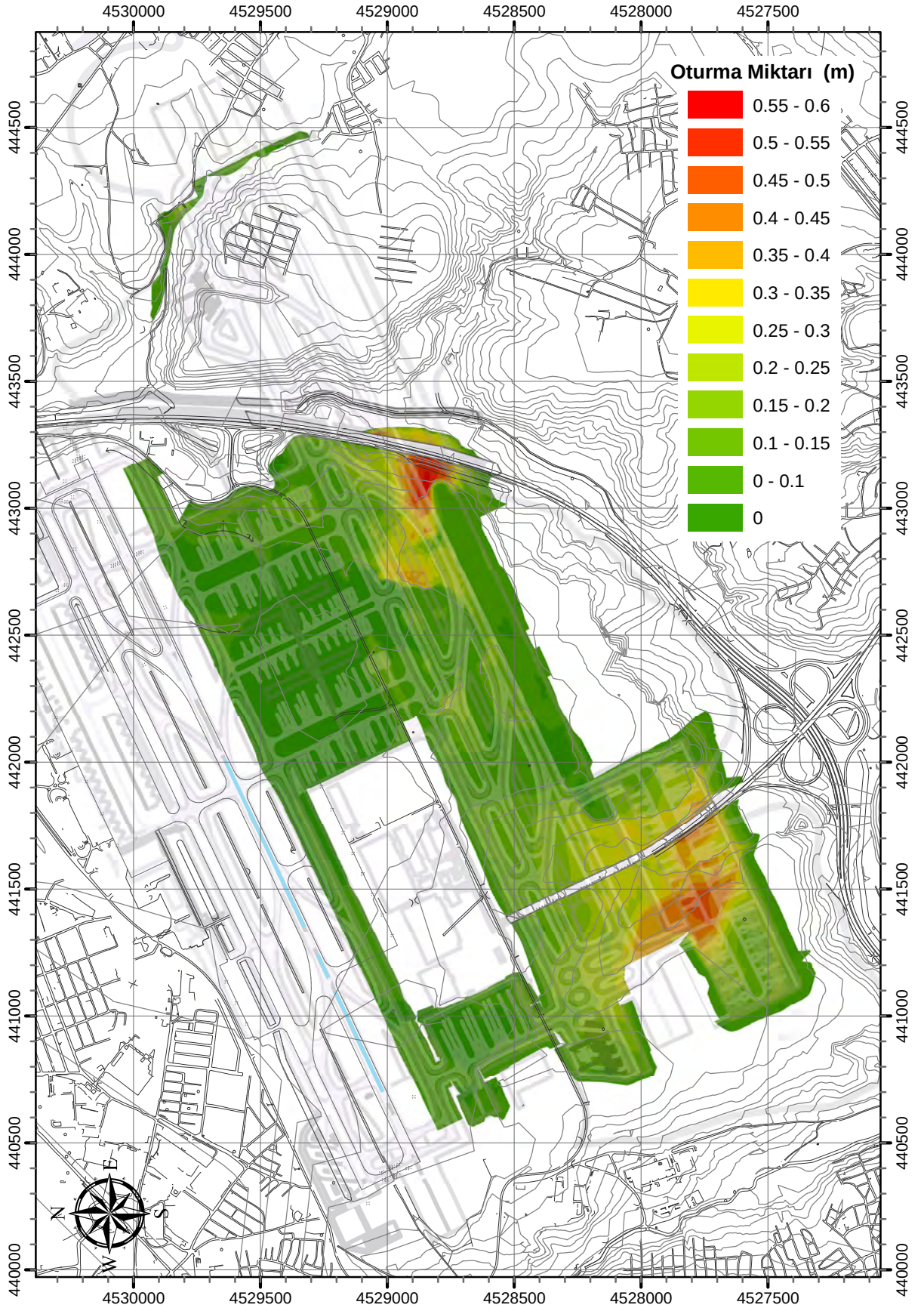
Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesinin yayılım gösterdiği alanlar için, yapılan hesaplamaların sonucunda en büyük konsolidasyon oturması miktarı 0.57 m olarak belirlenmiştir. Birimin yayılım gösterdiği tüm alan için elde edilen sonuçlar, alansal değerlendirme yöntemiyle haritalanmış ve Şekil 4.83’te sunulmuştur. En büyük oturma miktarlarının, TEM Bağlantı Tüneli güney batı kesiminde ve Apron – 1 alanında Yonca Tüneli batı kesiminde gerçekleşeceği belirlenmiştir (Şekil 4.83). Bu alanlardan; TEM Bağlantı Tüneli batısında, Pist başlangıca mesafe Km 1+970’ten başlamak üzere tünel sınırına kadar olan bölge ve bu bölge güney kesiminde, oturma miktarının 0.40 m’den fazla olacağı belirlenmiştir. Apron – 1 alanında ise Pist ve diğer alanlarla geçişi sağlayan iki bağlantı taksi yolundan batıdaki Bağlantı Taksi Yolu – 35 ve bu taksi yolunun güneyinde hesaplanan oturma miktarı 0.55 m’ye

çıkılmaktadır. En az oturma miktarı ise Apron – 2 alanında ve pist güneyi boyunca Şerit Saha’da hesaplanmıştır. Bu alanda hesaplanan oturma miktarları en fazla 0.10 m olarak belirlenmiştir.

Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi alanlarında %95 konsolidasyon yüzdesine ulaşması için geçecek olan sürenin belirlenmesi için yapılan hesaplamalarda, tüm alanda 4 yıl içerisinde bu konsolidasyon yüzdesine ulaşılabileceği belirlenmiştir (Şekil 4.84). En uzun süre Pist başlangıca mesafe Km 1+800 ile Km 2+050 arası, 250 m’lik alanda ve bu alan kuzeyinde Yardımcı Pist ile Paralel Taksi Yolu – 1 alanlarında tespit edilmiştir. Belirlenen konsolidasyon yüzdesine en kısa sürede, Apron – 1 alanı kuzeyinde, Apron – 2 ve Şerit Saha’da ulaşılabilecektir. Bu alanlarda belirlenen konsolidasyon yüzdesine 1 yıl içinde ulaşılabileceği hesaplanmıştır.

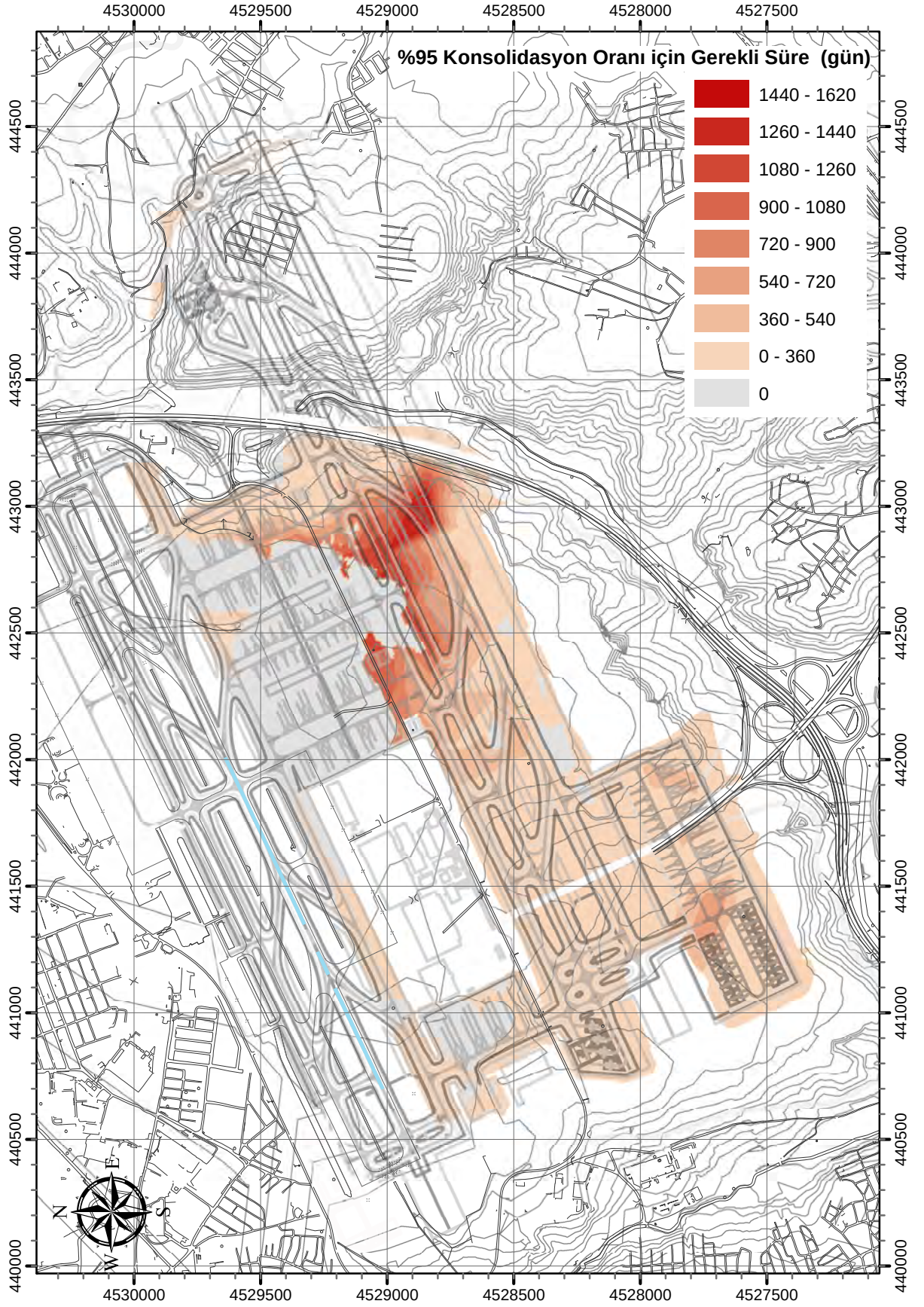
Çalışma alanında, kil boyu malzemeden oluşan yapay dolgu biriminin yayılım gösterdiği ve proje kazısı yapılmayan alanlar için konsolidasyon hesaplarında en büyük oturma miktarı 2.45 m olarak belirlenmiştir. Bu oturma miktarı, TEM Bağlantı Tüneli ve Kemiklidere doğu yamacında, Yardımcı Pist – 1 alanı altında gerçekleşeceği tespit edilmiştir (Şekil 4.85). Pist eksenini üzerinde 1.30 m seviyesine varan oturma miktarı, Apron – 1 alanı kuzeyinde Yonca Tüneli batı kesiminde 1.65 m seviyesine ulaşmaktadır (Şekil 4.85). Bu birimde en az oturma miktarı ise Paralel Taksi Yolu – 2 başlangıç kesimi ve Şerit Saha alanında hesaplanmıştır.

Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi’nin Yapay Dolgu altında bulunduğu alanlarda, her iki birim için hesaplanan oturma miktarı değerlerinin birlikte değerlendirilerek sonuçların toplanması gerekmektedir. Bu doğrultuda, her iki birim için hesaplanan değerler kullanılarak oluşturulan ve oturma miktarlarını temsil eden yüzeyler birleştirilerek Şekil 4.86’da sunulan harita elde edilmiştir. Pist ekseninin, Apron – 1 kuzeyinde ve Km 1+135 sonrasında oturma miktarının 1 m seviyelerine varacağı Apron – 1 alanında ise 1.65 m seviyesine varan oturma miktarlarının, birimler için ayrı ayrı yapılan hesap sonuçlarına göre, daha geniş alan kapsayacağı belirlenmiştir.



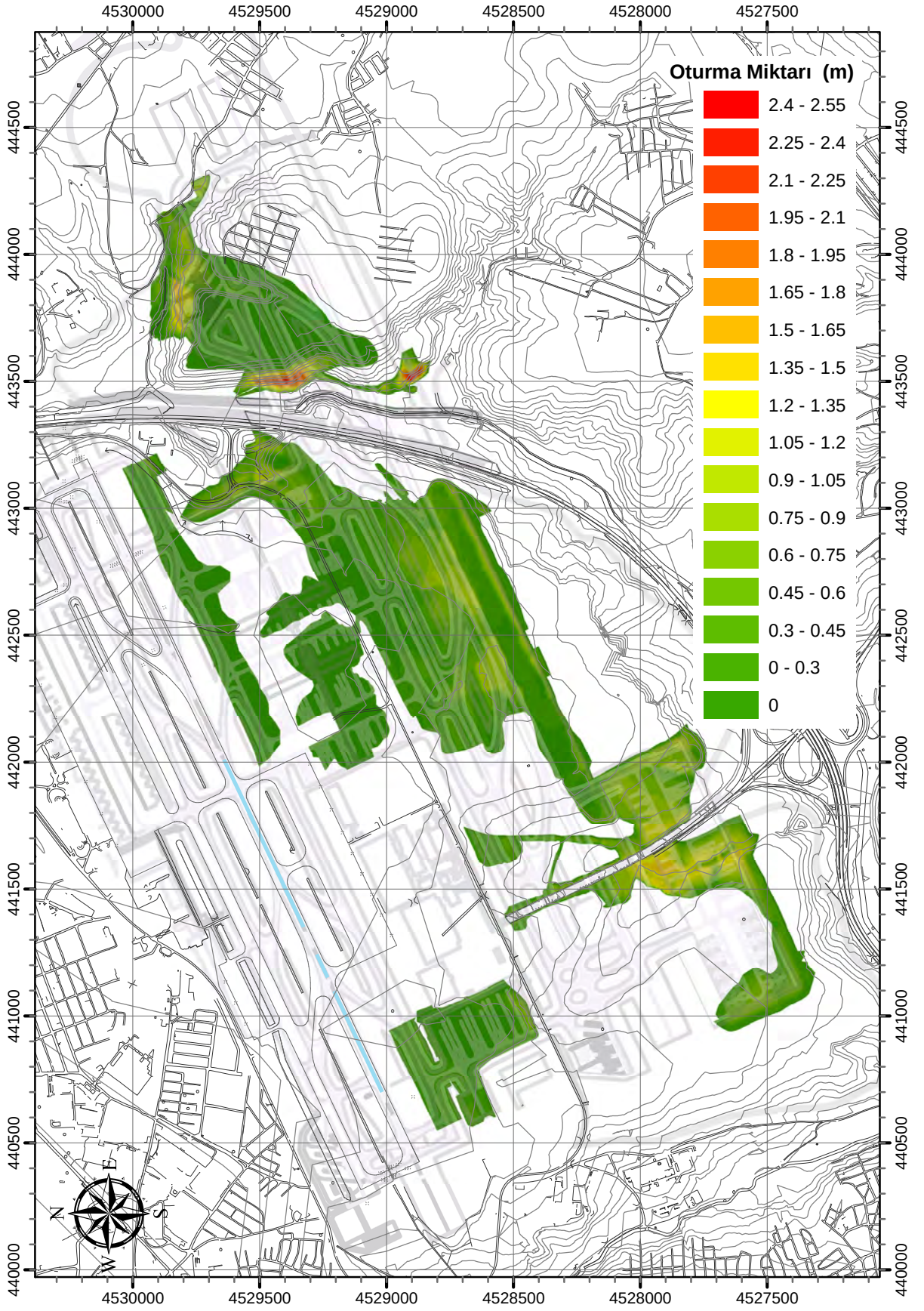
**Şekil 4.83:** Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi konsolidasyon oturması miktarı alansal değişimi.





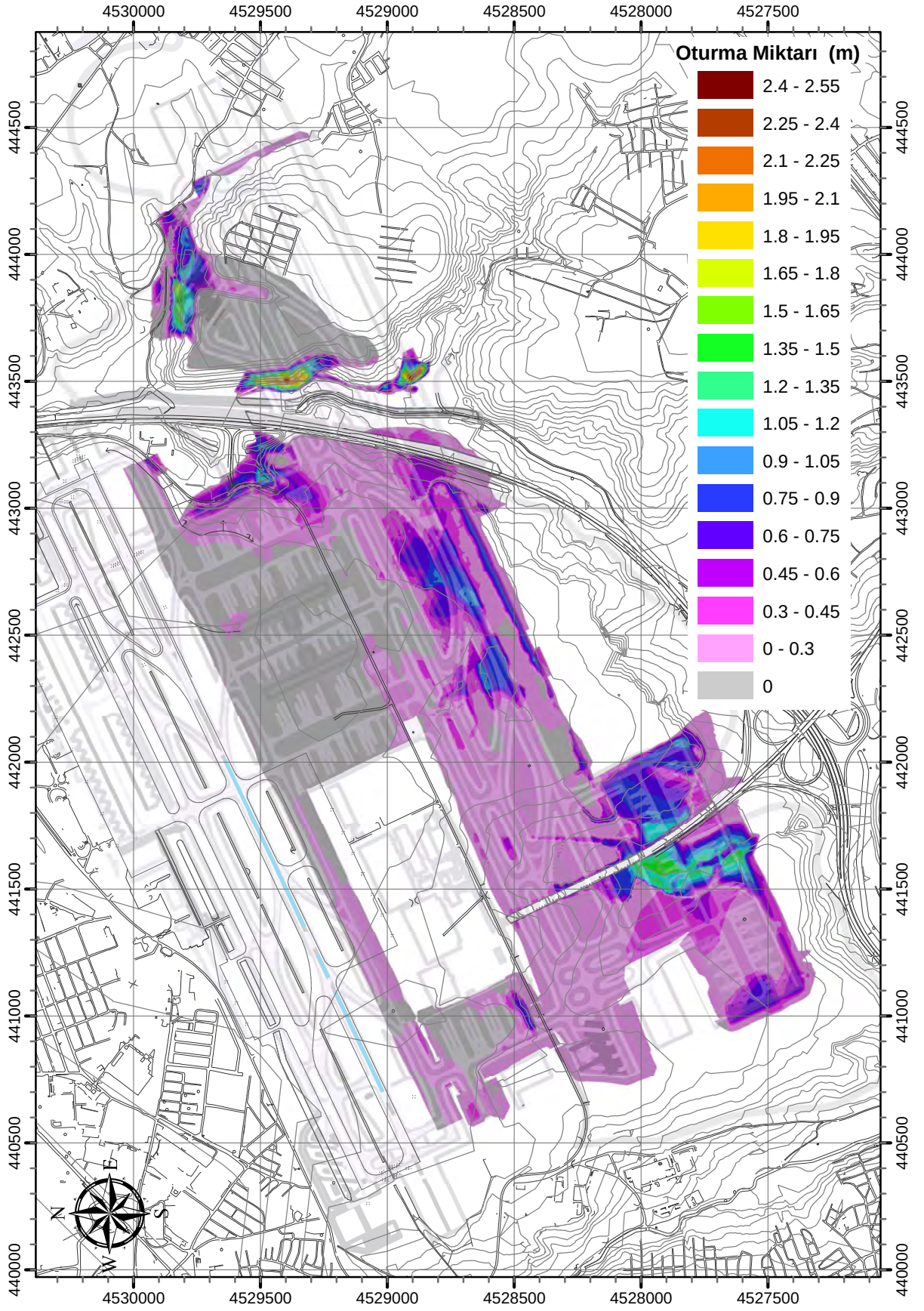
**Şekil 4.84:** Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi %95 konsolidasyon süresi alansal değişimi.





Şekil 4.85: Yapay dolgu konsolidasyon oturması miktarı alansal değişimi.





**Şekil 4.86:** Çalışma alanında hesaplanan konsolidasyon oturması miktarlarının alansal değişimi.



#### 4.5. KONSOLIDASYONUN SINIRLANDIRILMASI

Konsolidasyon kontrolüne yönelik hemen hemen tüm zemin iyileştirme çalışmaları, iyileştirilmesi gerekli olan zemin kesitinin, ya teknik olarak müdahale edilebilir kesiminde, ya da tümünde yürütülmektedir. Oysaki; konsolidasyon açısından proje kriterlerini gözeterek, yalnızca gerekli olan derinlikte çalışmaları yürütmek, diğer zemin kesiminde ise konsolidasyona izin vermek, özellikle büyük ölçekli projelerde ekonomik açıdan tasarruf sağlayabilecektir. Çalışmanın bu bölümünde, mühendislik dolgusu altında konsolide olabilir birimlerde, proje özellikleri ve mühendislik jeolojisi bulguları kullanılarak konsolidasyon oturması ve zamanına yönelik yapılan yaklaşımlardan hareketle, proje kriterlerinin sağlanması için geliştirilen iyileştirme yöntemi ve yöntem performansının kontrolünü içeren bulgular sunulmuştur.

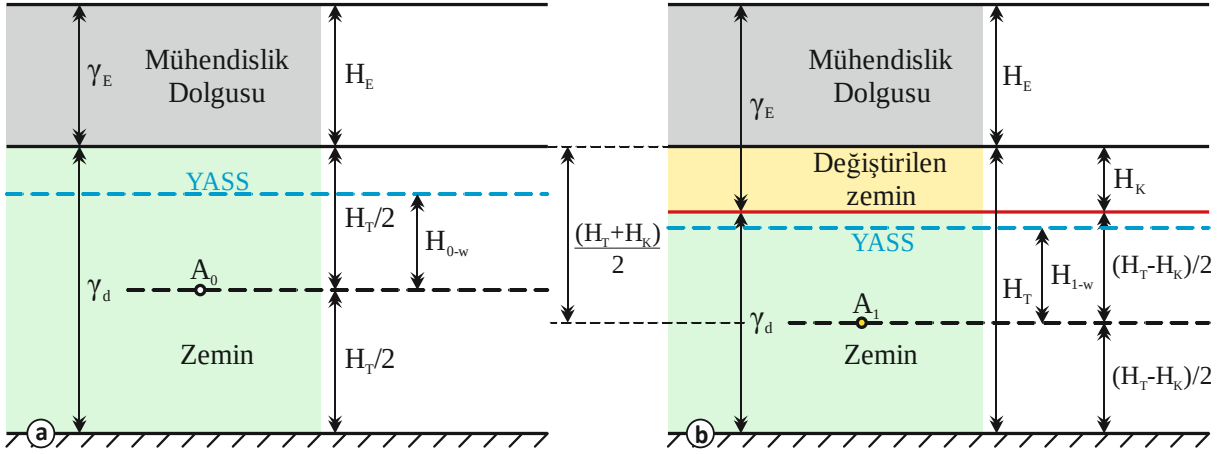
##### 4.5.1. Zemin İyileştirme Yöntemi

Konsolidasyon süreci, zemin katmanında gerçekleşen gerilme artışı ile başlamakta ve bu gerilme artışı ile yükselen boşluk suyu basıncının sönmülmesiyle sonlanmaktadır. Gerilme değişimi konsolidasyon sonucu ortaya çıkacak oturma miktarını kontrol ederken, bu değişime karşılık gözeneklerdeki suyun hareketi ise oturma miktarı hızının belirlenmesinde etkin rol oynamaktadır. Konsolide olabilir zemin katmanları üzerinde gerçekleştirilecek projelerde, meydana gelecek gerilme artışı, proje özelliklerine bağlı olarak, istenilen düzeye indirilemeyecek veya çoğu zaman değiştirilemeyecek durumdadır. Bu noktadan hareketle, geliştirilen iyileştirme yöntemleri, zemin katmanının özelliklerinin değiştirilmesine odaklanmakta, zemin katmanı kalınlığı elverdiği bazı durumlarda ise bu katman ortamdan tamamen uzaklaştırılmaktadır. Çalışma alanı olarak seçilen havalimanı geliştirme alanında yapılan avan proje çalışmaları kapsamında da, ortamda bulunan yapay dolguların tamamen uzaklaştırılması, Sultanbeyli formasyonu Orhanlı üyesine ait kil düzeylerin bulunduğu bazı alanlarda ise iyileştirilme çalışmalarının projelendirilmesi önerilmiştir. Ancak, önceki bölümlerde değinildiği üzere, alanda yapay dolgu kalınlığı 90 m seviyelerine varmaktadır. Orhanlı üyesi kil düzeyler için yapılan konsolidasyon analizlerinde, meydana gelecek konsolidasyon oturmasının proje yapım süreci içerisinde tamamlanacağı öngörülmektedir. Yapay dolgu birimler için avan projede önerilen çözüm yönteminin uygulanması durumunda ise proje maliyeti olumsuz yönde etkilenecektir.

Çalışmada, yapay dolguların ortamdan uzaklaştırılmasını en aza indirecek, böylelikle proje maliyetlerini önemli ölçüde düşürecek bir yöntem olarak, gerekli ölçüde zemin katmanın ortamdan uzaklaştırılmasını, yerli yerinde bırakılan zemin katmanında ise proje kriterleri içerisinde belirlenen düzeyde bir oturmanın sağlanmasını hedefleyen konsolidasyon sınırlandırma yöntemi geliştirilmiştir. Yöntemde, uygulanan yüke karşılık gerilme artışlarında Gray (1936) ve Das (2008) yaklaşımları temel alınmış, geniş alan kaplayan mühendislik dolgusu imalatı altında, meydana gelen gerilme artışlarının, sıkışabilir tabaka içerisinde derinlikle önemli ölçüde değişiklik göstermeden sabit olduğu belirlenmiştir. Yöntem analizlerinde kullanılan denklemin oluşturulmasında ise, konsolidasyon oturması miktarının hesaplanması için Terzaghi (1943) tarafından önerilen tek boyutlu konsolidasyon teorisinden hareketle oluşturulmuş, Das (2008) tarafından da oluşturulma kabulleri ayrıntılarıyla açıklanan ve konsolidasyon hesaplarında kullanılması önerilen Denklem (2.69) kullanılmıştır.

Yöntemde, mühendislik dolgusu nedeniyle meydana gelecek gerilme artışına karşılık, zemin katmanında yapılacak kazı ( $H_K$ ) sonucu, istenilen düzeyde oturma miktarı sağlanması için, sıkışabilir zemin katmanı kalınlığının ( $H_T$ ) azaltılması amaçlanmaktadır. Böylelikle, ilave mühendislik dolgusuyla,  $H_K$  kalınlığında zemin katmanı değiştirilerek, proje kotları sağlanmış olacaktır (Şekil 4.87.b). Yöntem, avantajları birçok bilimsel çalışmayla kanıtlanmış doğrusal veya doğrusal olmayan zemin modelleri kullanarak, günümüzde kapsamlı bilgisayar yazılımlarıyla gerçekleştirilebilen analizlere alternatif olarak geliştirilmiştir. Bu yazılımların aksine, belirli bir zemin modelinde konsolidasyon süreçlerinin analizi yerine, geliştirilen yöntem analizi sonucunda, kazılarak uzaklaştırılacak zemin katmanı kalınlığı belirlenmektedir.

Yukarıda, derinlikle gerilme değişimi konusunda açıklanan yöntem kabullerine göre, ilk efektif gerilme ( $\sigma'_0$ ), efektif gerilme değişimi ( $\Delta\sigma'$ ) ve son efektif gerilme ( $\sigma'_{son}$ ) ortalama değerleri, oturma miktarının belirleneceği zemin katmanının orta noktasında ( $A_0$ ) hesaplanmalıdır (Şekil 4.87.a). Bu noktadan hareketle, kazı yapılmadığı durumda  $A_0$  seviyesinde  $\sigma'_0$ ,  $\Delta\sigma'$  ve  $\sigma'_{son}$  değerleri Denklem (4.1), Denklem (4.2) ve Denklem (4.3)'de tanımlanmıştır (Şekil 4.87.a).



**Şekil 4.87:** Analiz yönteminde kullanılan denklem parametreleri, a) kazı yapılmayan b) kazı yapılan durum.

$$A_0 \rightarrow \sigma'_{0(A_0)} = \frac{H_T \gamma_d}{2} - H_{0-w} \gamma_w \quad (4.1)$$

$$A_0 \rightarrow \sigma'_{son(A_0)} = \frac{H_T \gamma_d}{2} + H_E \gamma_E - H_{0-w} \gamma_w \quad (4.2)$$

$$A_0 \rightarrow \Delta \sigma'_{(A_0)} = H_E \gamma_E \quad (4.3)$$

Mühendislik dolgusu öncesinde  $H_K$  kalınlığında kazı yapılması durumunda sıkışabilir zemin tabakası kalınlığı azalacak ve  $A_0$ ,  $H_K$ 'nın yarısı kadar alt seviyede, kazı sonrası kalacak zeminin orta seviyesi olan,  $A_1$ 'deki yeni konumunu alacaktır (Şekil 4.87.b). Ayrıca, kazı taban kotunun ilk yeraltı suyu seviyesinin altına inmesi durumunda, mühendislik dolgusunda drenaj sağlanması nedeniyle, yeraltı suyu seviyesi daha alt kotta konumlanacak şekilde değişikliğe uğrayacaktır. Bu durumda, zemin tabakasında yapılacak kazı miktarına bağlı  $A_1$  seviyesinde, kazı yapılmadan önceki ilk efektif gerilme ( $\sigma'_{0(A_1)}$ ) Denklem (4.4), kazı yapılarak proje kotlarına kadar imal edilen mühendislik dolgusu sonrası son efektif gerilme ( $\sigma'_{son(A_1)}$ ) ise Denklem (4.5)'de tanımlanmıştır. Kazı ve dolgu işlemi sonrası efektif gerilme değişimi ( $\Delta \sigma'_{(A_1)}$ ) ise Denklem (4.6)'de sunulmuştur.

$$A_1 \rightarrow \sigma'_{0(A_1)} = \left( \frac{H_T + H_K}{2} \right) \gamma_d - \left( H_{0-w} + \frac{H_K}{2} \right) \gamma_w \quad (4.4)$$

$$A_1 \rightarrow \sigma'_{son(A_1)} = \frac{H_T - H_K}{2} \gamma_d + (H_K + H_E) \gamma_E - H_{1-w} \gamma_w \quad (4.5)$$

$$A_1 \rightarrow \Delta \sigma'_{(A_1)} = H_K (\gamma_E - \gamma_d) + H_E \gamma_E - (H_{1-w} - H_{0-w}) \gamma_w + \frac{H_K}{2} \gamma_w \quad (4.6)$$

$H_K$ 'nın efektif gerilme üzerindeki etkisini tanımlayan bu denklemler ile Denklem (2.68) ve Denklem (2.69) kullanılarak, kazılarak zemin değiştirilmesi sonucu konsolidasyon oturması miktarı Denklem (4.7) ve Denklem (4.8)'de sunulmuştur.

$$\sigma'_{son(A_1)} < \sigma'_c \rightarrow \Delta H = (H_T - H_K) \frac{c_r}{1 + e_0} \log \left( \frac{\sigma'_{son(A_1)}}{\sigma'_0} \right) \quad (4.7)$$

$$\sigma'_{0(A_1)} < \sigma'_c < \sigma'_{son(A_1)} \rightarrow \Delta H = (H_T - H_K) \left[ \frac{c_r}{1 + e_0} \log \left( \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{0(A_1)}} \right) + \frac{c_c}{1 + e_0} \log \left( \frac{\sigma'_{son(A_1)}}{\sigma'_c} \right) \right] \quad (4.8)$$

Denklem (4.4), Denklem (4.5) ve Denklem (4.6) incelendiğinde  $H_K$  artışıyla birlikte efektif gerilme değerlerinde artışın meydana geleceği açıktır. Ancak,  $\Delta\sigma'$  artışının  $\sigma'_0$  artışına göre daha az olması, bir başka deyişle  $\sigma'_{son}$ 'nin  $\sigma'_0$ 'a göre daha az oranda artması koşulunda, Denklem (4.7) veya Denklem (4.8) logaritma bileşenleri daha küçük sonuçlanacak ve gerilme değişiminin etkisi  $\Delta H$ 'ı azaltacak yönde etkileyecektir. Efektif gerilme, toplam gerilme ve boşluk suyu basıncına bağlıdır. Bu doğrultuda, çok sayıda bağımsız değişkene sahip Denklem (4.4) ve Denklem (4.6), öncelikle toplam gerilmeler türünde değerlendirilmiştir. İlk toplam gerilme ( $\sigma_0$ ) ve toplam gerilme değişimi ( $\Delta\sigma$ ), kazı yapılması durumunda Denklem (4.9), kazı yapılmaması durumunda ise Denklem (4.10) sunulduğu şekilde ifade edilebilir. Bu iki denklemden, proje dolgusu birim hacim ağırlığının zeminin birim hacim ağırlığından daha büyük olması koşuluyla ( $\gamma_E > \gamma_d$ ),  $H_K$ 'nın ilk gerilme üzerindeki etkisinin  $\gamma_d$ , gerilme değişimi üzerindeki etkisinin ise  $\gamma_E - \gamma_d$  oranında olduğu belirlenmiştir (Denklem (4.11)). Sonuç olarak, toplam gerilmeler türünden,  $H_K$ 'nın  $\Delta H$  değerine etkisi  $\gamma_E / \gamma_d$  oranına bağlıdır. Bu oranın  $\gamma_E / \gamma_d = 1$  olması durumunda  $H_K$ 'nın hiçbir değeri toplam gerilme değişimine etki etmeyecek,  $\gamma_E / \gamma_d > 1.5$  olması durumunda ise  $H_K$ 'nın toplam gerilmedeki değişime etkisi ( $\Delta(\Delta\sigma)$ ), ilk toplam gerilmeye olan etkisinden ( $\Delta\sigma_0$ ) daha fazla olacak ve  $\sigma'_{son} / \sigma'_0$  oranını arttıracak yönde etkileyecektir.

$$H_K > 0 \rightarrow \sigma_0 = \left( \frac{H_T + H_K}{2} \right) \gamma_d \quad \Delta\sigma = H_K (\gamma_E - \gamma_d) + H_E \gamma_E \quad (4.9)$$

$$H_K = 0 \rightarrow \sigma_0 = \left( \frac{H_T}{2} \right) \gamma_d \quad \Delta\sigma = H_E \gamma_E \quad (4.10)$$

$$H_K > 0 \rightarrow \Delta\sigma_0 = \left(\frac{H_K}{2}\right)\gamma_d \quad \Delta(\Delta\sigma) = H_K(\gamma_E - \gamma_d) \quad (4.11)$$

Kazı yapılması durumundaki, boşluk suyu basıncının efektif erilme üzerindeki etkisi Denklem (4.12)'de, kazı yapılmaması durumundaki ise Denklem (4.13)'de sunulmuştur. Kazı yapılması durumunda boşluk suyu basıncındaki değişim ise Denklem (4.14)'le tanımlanmıştır. Kazı yapılması durumunda ( $H_K > 0$ ), yeraltı suyu seviyesinin değiştirilmediği kabul edildiğinde, sıkışabilir tabaka orta seviyesi  $H_K$  ile orantılı olarak alt seviyeye taşınacağından, efektif gerilme hesabında kullanılan ilk boşluk suyu basıncı daha büyük değer olarak, Denklem (4.4)'den de görüleceği üzere,  $H_K$ 'nın artışı ilk efektif gerilmeyi azaltır yönde etkileyecektir. Ancak, yüzeye yakın yeraltı suyu seviyesine sahip alanlarda yapılacak kazılarda, mühendislik dolgusu altında oluşturulacak drenaj sisteminin bu seviyeyi düşürecek olması nedeniyle, bu düşüm miktarının ( $H_{0-w} - H_{1-w}$ ),  $H_K$ 'nın yarısından fazla olması durumunda boşluk suyu basıncı değişimi, Denklem (4.14)'den de görüleceği üzere efektif gerilmeyi arttıracak yönde etkileyecektir.

$$H_K > 0 \rightarrow u_0 = \left(H_{0-w} + \frac{H_K}{2}\right)\gamma_w \quad (4.12)$$

$$H_K = 0 \rightarrow u_0 = H_{1-w}\gamma_w \quad (4.13)$$

$$H_K > 0 \rightarrow \Delta u = (H_{1-w} - H_{0-w})\gamma_w + \frac{H_K}{2}\gamma_w \quad (4.14)$$

Yukarıdaki değerlendirmeler neticesinde, kazı yapılacak alanda oluşturulacak mühendislik dolgularının doğal birim hacim ağırlığı, zeminin doygun birim hacim ağırlığının 1.5 katını geçmediği veya yeraltı suyu seviyesi düşümünün en az yapılan kazı miktarının yarısından fazla olması durumunda,  $H_K$ 'nın  $\Delta H$ 'ı azaltacak yönde etkili olacağı belirlenmiştir. Belirtilen bu limit değerlerin dışında, kazılar sonucu boşluksuyu basıncı artışının, toplam gerilme artışından daha az olduğu durumlarda  $\Delta H$ 'ın azalan yönde etkileyecektir.  $H_K$ 'nın  $\Delta H$  üzerinde, efektif gerilmede meydana getirdiği olumlu değişim yanında, Denklem (4.7) ve Denklem (4.8)'den de görüleceği üzere, sıkışabilir tabaka kalınlığında değişiminde doğrusal bir etkisi bulunmaktadır.

Yöntem analizlerinde, istenilen sınır değerde  $\Delta H$ 'a karşılık,  $H_K$ 'nın belirlenmesi esastır. Ancak, elde edilen eşitlikler logaritma bileşeni içermesinin yanında çok değişkene bağımlı durumdadır. Bu nedenle, klasik grafik ve aritmetik yöntemlerle  $H_K$  eşitliği sağlanamamış, eşitlikler üzerinde yapılan çeşitli iterasyon yöntemlerinden sonuç alınamamıştır. Bu nedenle, Microsoft Excel

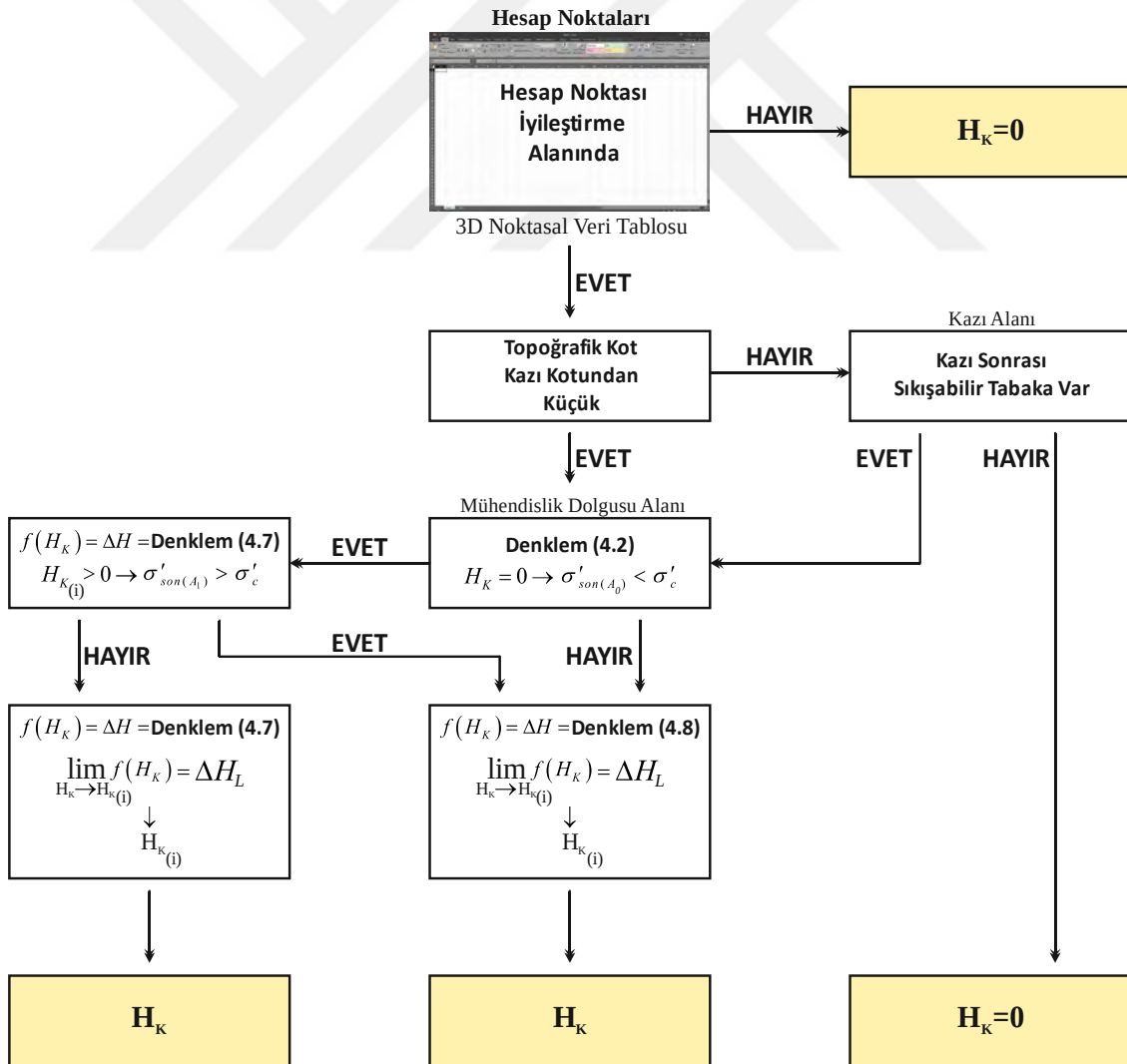


tabanlı bir yazım geliştirilerek,  $H_r$  kalınlığı boyunca 5 cm aralıkla artan  $H_k$  değerleriyle,  $\Delta H$  değerlerinin hesaplanması sağlanmış ve limit  $\Delta H$  en fazla yaklaşan sonucu veren  $H_k$  değeri tespit edilmiştir.  $H_k$  değişim miktarının azaltılması,  $\Delta H$  limitine daha yakın sonuç veren  $H_k$  değerlerinin belirlenmesini sağlamaktadır. Ancak, çalışmada, alansal değerlendirme yönteminde kullanılacak olan hesap noktalarının sayısı, bilgisayar işlem kapasitesi ve en önemlisi kazı uygulanabilirlik sınırları göz önüne alınarak, 5 cm artış miktarı belirlenmiştir.

Tanımlanan denklemler kullanılarak, kazı veya yükseklikleri ile konsolidasyon oturması miktarının hesaplanacağı tabaka kalınlığı ve konsolidasyon parametreleri bilinen tek bir nokta için analiz yapılarak  $H_k$  değerinin belirlenmesi, hazırlanan yazılım sayesinde pratik olarak yapılabilmektedir. Ancak, çalışma alanında yapılacak hesaplamalarda, değişken özelliklere sahip proje bölümlerinin bulunması ve alanda sadece dolgu yapılmaması nedeniyle, denklem ve parametrelerinin seçimi doğrultusunda bir analiz algoritması geliştirilme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu doğrultuda, öncelikle alansal değerlendirme yönteminde oluşturulan 3D noktasal veri tablosundaki hesap noktalarının, iyileştirme alanı içerisinde olup olmadıkları belirlenmiştir. Alanda yayılım gösteren kaya birimlerin ve sanat yapılarının bulunduğu alanlar dışındaki tüm noktalar iyileştirme alanı içerisinde olarak sınıflanmıştır. İyileştirme alanı içerisinde bulunup topoğrafik kotun kazı kotundan küçük olduğu alanlar mühendislik dolgusu alanları, diğer alanlar ise kazı alanları olarak belirlenmiştir (Şekil 4.88). Mühendislik dolgusunun bulunduğu tüm alanlarda konsolide olabilir katman bulunmasına karşın, kazı alanının bir bölümünde bu katmanın tamamının, proje kazısı nedeniyle, alandan uzaklaştırılacak olma olasılığı bulunmaktadır. Bu nedenle, yazılımda, katman kalınlığı ve kazı miktarı arası ilişki değerlendirilerek, katman kalınlığından fazla kazının yapıldığı noktaların iyileştirme kazısı yapılmayacak noktalar ( $H_k=0$ ) olarak sınıflaması sağlanmıştır (Şekil 4.88). Şimşek ve Dalgıç (1997) tarafından yapılan çalışmada da belirtildiği gibi, artan gerilmenin ön konsolidasyon basıncını geçtiği durumun değerlendirilmesi, yapılan hesapların, arazi ölçümleriyle uyumu için önemli bir faktördür. Özeti Şekil 4.88’de verilen yazılım algoritması dâhilinde yapılan sınıflamaya göre belirlenen, mühendislik dolgusu alanında bulunan tüm noktalarda, Denklem (4.2) kullanılarak, kazı yapılmaması durumunda, dolgu sonrası oluşacak son efektif gerilme hesaplanarak, ön konsolidasyon basıncı ile karşılaştırılmış, yazılım tarafından analiz denkleminin Denklem (4.7) veya Denklem (4.8) yönünde seçimi sağlanmıştır. Denklem (4.7)’le başlayan analizlerde,  $H_{k(i)}$ ’nin  $\sigma'_{son} > \sigma'_c$  koşulunu sağladığı durumda,

$H_{K(i)}$ 'nin bu koşulu sağlayan son değerinden başlayarak analizin Denklem (4.8)'le devam etmesi sağlanmıştır.

Bu denklemlerin çözümünde;  $\Delta H$ 'ın, bir çok değişken yanında,  $H_K$ 'ya bağımlı bir fonksiyonun sonucu belirlendiği düşünüldüğünde,  $H_T$ 'ye kadar artan  $H_{K(i)}$ 'nin değişken olduğu bu fonksiyon limitinin, belirlenen konsolidasyon oturması miktarına ( $\Delta H_L$ ) eşit olduğu  $H_{K(i)}$ , iyileştirme kazısı miktarını ( $H_K$ ) verecektir. Bir başka deyişle, belirlenen artışla değişen her  $H_K$  değerine karşılık hesaplanan  $\Delta H$  değerleri, bir limitte  $\Delta H_L$ 'ye eşit olacak ve bu eşitliği minimum yakınlıkta sağlayan  $H_{K(i)}$  değeri ise iyileştirme kazısı miktarı ( $H_K$ ) olarak belirlenecektir. Analiz sonucu, her bir hesap noktası için belirlenen  $H_K$  değeri, alansal değerlendirme veri tabanına eklenerek, çalışma alanı tamamı için, üçüncü boyutta analiz sonuç verilerini içeren harita yardımıyla, alansal değerlendirmeye imkân sağlanmış olacaktır.



Şekil 4.88: Oluşturulan yazılımdaki analiz algoritmasının özeti.

#### 4.5.2. İyileştirme Yöntemi Analizleri

Çalışmanın ana amacı olan, proje alanında, dolgu yükü altında konsolidasyon oturmasının sınırlandırılması için Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı kil üyesi ve geniş bir alanda bu birim üzerinde bulunan yapay dolgunun bulunduğu proje alanı için yapılan konsolidasyon analizlerinde, 2.5 m'ye yakın konsolidasyon oturmasının gerçekleşeceği hesaplanmıştır. Bu oturma miktarının bir kısmı Orhanlı kil üyesi, bir kısmı ise yapay dolgu kaynaklı ortaya çıkmaktadır. Yapılan hesaplamalarda, Orhanlı üyesine ait kil düzeylerin dolgu yükü altında, %95 konsolidasyon yüzdesine 4 yıl gibi bir sürede ulaşacağı belirlenmiştir. Yapay dolguda ise konsolidasyon süresini hesaplamaya yönelik laboratuvar verileri, Orhanlı üyesi'nde arazide elde edilen konsolidasyon katsayısı değerleriyle uyum sergilememektedir. Bu nedenle, yapay dolgu konsolidasyon süresine göre bir tasarım yapmak, havaalanı projesinde risk oluşturacak durumdadır. Bu doğrultuda, proje süresi içinde konsolidasyonunu önemli ölçüde tamamlayan Orhanlı üyesi'nde ortaya çıkacak konsolidasyon miktarının, projeye etkilerine karşın herhangi bir iyileştirme çalışması yapmadan, yapay dolgu'da konsolidasyon miktarını istenilen düzeyde sınırlamak, proje maliyetlerini optimum düzeyde etkileyen en güvenli seçenek olarak görülmüştür. Çalışma alanı genelinde Orhanlı üyesi kaynaklı meydana gelecek konsolidasyon oturması proje imalat süreci içerisinde tamamlanacak, yapay dolgu'da ise oturmalar gerekli süre içinde tamamlanmasa dahi, belirlenen limitte kalarak pistlerin kullanımını etkilememiş olacaktır.

İyileştirme yöntemi analizlerinde, yapay dolgu alanında tanımlanan 34,635 hesap noktasının her birinin, oluşturulan algoritma gereği, iyileştirme alanında bulunup bulunmadığı tanımlanmıştır. Bu tanımlama için iyileştirme alanı seçiminde, tüm beton kaplamalı yüzeyler alana dâhil edilmiştir. Beton kaplamalı alan dışında bulunan, ancak, tip kesitlerde en alt düzeyi oluşturan kaya dolgunun, belirlenen şev eğimiyle topoğrafik kota ulaştığı alanlar, başka bir deyişle, kaya dolgunun imal edileceği tüm alanlar iyileştirme alanına dâhil edilmiş ve nihai iyileştirme alanı belirlenmiştir (Şekil 4.89).

Belirlenen 1,714,000 m<sup>2</sup>lik iyileştirme alanı dâhilinde bulunan Apron – 2 alanında, proje kazısı sonrası, en altta 1.0 m kalınlığında kaya dolgu ile başlayan tip kesit oluşturulacak ve 2.40 m yüksekliğinde dolgu imal edilmiş olacaktır. Bu alanda yapay dolgu kalınlığı 1.65 m düzeyindedir. Proje kazısı sonrası dolgu kalınlığı 0.5 m kalınlığa kadar düşecektir. Alanda hareketli yüklere ilave olarak, uçak park alanı olarak da kullanılacak olması nedeniyle, statik

yüklerde uzun süreli etkin olabilecektir. Bu nedenle, proje kazısı sonrası kalacak olan 0.5 m kalınlığa varan yapay dolgunun da tamamının ortamdan uzaklaştırılmasının uygun olacağı düşünülmüş, hesaplamalarda, Apron – 2 alanındaki yapay dolgu tümüyle kaldırılacak birim olarak tanımlanmıştır.

Çalışma alanında yapılan iyileştirme yöntemi analizlerinde, konsolidasyon analizlerinde kullanılan zemin parametrelerine ilave olarak, izin verilen konsolidasyon oturması miktarının ( $\Delta H_L$ ) belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıntıları, Beton Kaplama Tabakası Özellikleri başlığı altında açıklanan ICAO (2009) Pist Yüzeyi Düzgünlüğü önerilerine göre, bitişik pist kaplaması anoları sınırında, kabul edilebilir kot farkı olan 0.016 m,  $\Delta H_L$  olarak belirlenmiştir. Böylelikle, farklı oturmaların gerçekleşmesi durumunda havaalanı trafiği etkilenmemiş olacaktır.

İyileştirme yöntemi analizlerinde ortalama 5.60 m yapay dolgu kalınlığı bulunan çalışma alanında, ortalama 2.21 m kazı yüksekliği ( $H_K$ ) hesaplanmıştır. Alanda, 47 m'ye varan en büyük kazı yüksekliği ise Kemiklidere doğu kesiminde belirlenmiştir (Şekil 4.90). Pistin Şerit Saha kuzeyinde, Apron – 1'in doğu sınırında ve 24 Buz Çözme Apronu kuzey doğu kesiminde 25 m yüksekliğe varan yapay dolgu'nun kaldırılması gerektiği belirlenmiştir. Apron – 1, Yardımcı Pist ve Paralel Taksi Yolu alanlarının genelinde, kazı yüksekliği 2 m ila 10 m arasında değişmektedir. Çalışma alanında, yapay dolgu yayılım alanı 2,172,230 m<sup>2</sup>'dir. Toplam yapay dolgu hacmi 17,886,890 m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Geliştirilen yöntem sonuçlarına kullanılarak yapılacak olan iyileştirme kazılarında ise bu dolgunun 7,345,936 m<sup>3</sup> hacmindeki yalnızca %41'lik bir kısmı alandan uzaklaştırılacaktır. Yapılan bu hacim hesaplarına, alanda yer yer gözlenen ve hesap parametreleriyle uyumsuzluk gösteren özellikteki yapay dolgular ile iyileştirme kazı sırasında oluşturulacak kazı şevleri nedeniyle ortaya çıkacak ilave kazılar dâhil edilmemiştir.

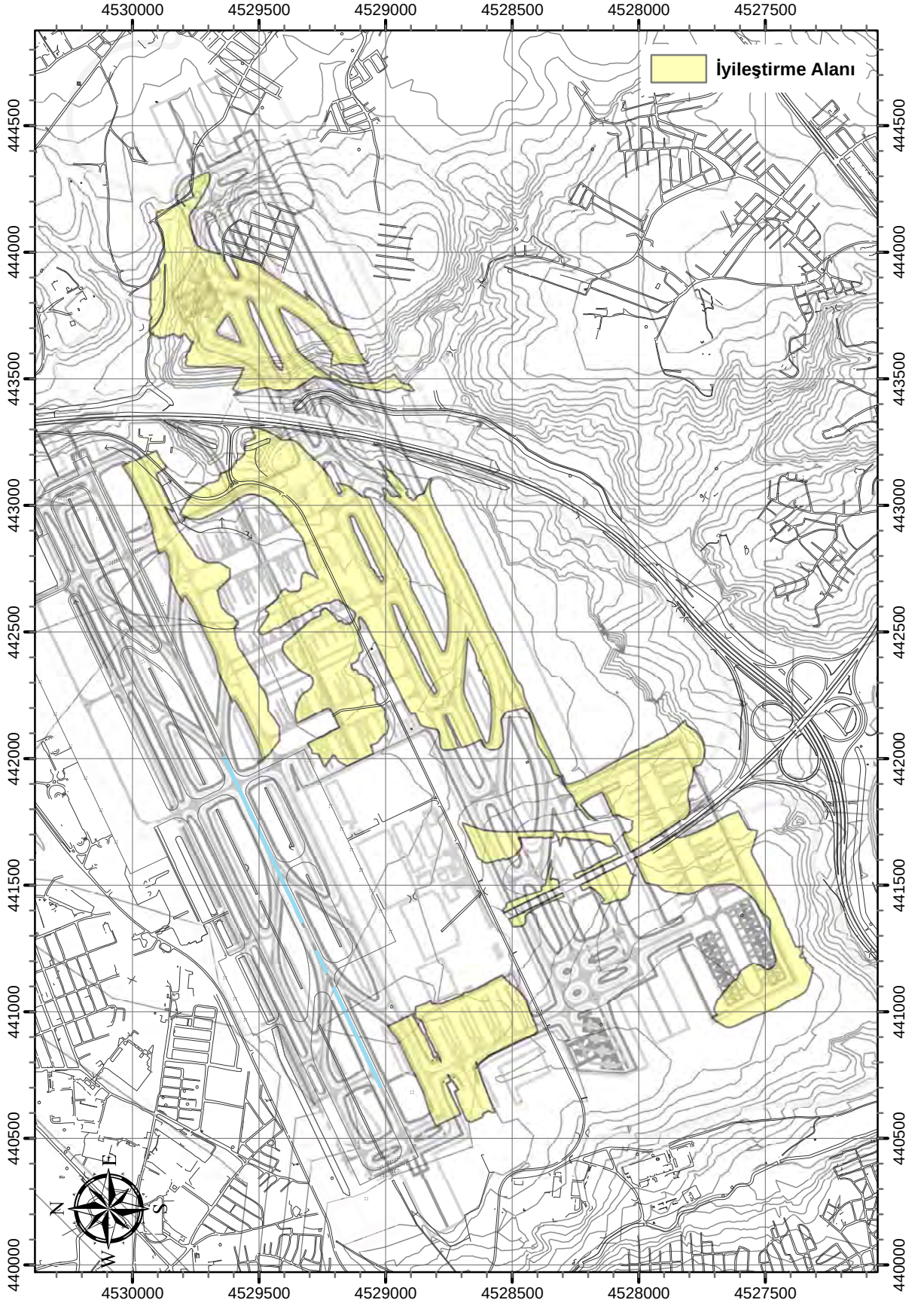
İyileştirme kazılarının yapılması ve proje imalatı sonrasında, başka bir deyişle, zemin iyileştirmesi sonrası nihai durum için, yapay dolguya ait beklenen oturma miktarı iyileştirme analizleri sırasında tekrardan hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların alansal değişimlerini gösterir, Şekil 4.91'de sunulan haritadan da görüleceği üzere, iyileştirme alanı olarak tanımlanan alanın tümünde konsolidasyon oturması miktarı 0.016 m'den daha küçüktür. Sabiha Gökçen Havaalanı Geliştirme Projesi ana bölümleri olan Pist, Yardımcı Pist ve Paralel Taksiyolu beton kaplama yüzey alanı içerisinde tanımlanan hesap noktaları kullanılarak, bu

bölümler özelinde, başlangıca mesafeye göre, yapay dolgu kalınlığı, hesaplanan iyileştirme kazısı yüksekliği ve hesaplanan oturma miktarı ilişkilendirilmiştir (Şekil 4.92, Şekil 4.93 ve Şekil 4.94). Pist alanında yaklaşık 35 m yüksekliğe varan yapay dolguda, 25 m seviyesine varan değişen yüksekliklerde kazı yapılarak, konsolidasyon oturması miktarının 0.016 m ve altında sınırlanabildiği belirlenmiştir. Yardımcı Pist ve Paralel Taksi Yolu alanlarında da 0.016 m oturma miktarı sınırının sağlandığı hesaplanmıştır (Şekil 4.93 ve Şekil 4.94).

Konsolidasyon oturması miktarının yanı sıra bu oturmanın alanda ortaya çıkartabileceği farklı oturmalarında ortaya konulması gerekmektedir. Bu noktadan hareketle, Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı kil üyesi'ne ait birimde konsolidasyonun sonlanması ancak yapay dolgu birimde bu durumun gerçekleşmemesi durumunda, meydana gelebilecek en büyük yüzey düzensizliği, hesap noktalarında elde edilen oturma miktarı verileri kullanılarak belirlenmiştir. Hesap noktaları ara mesafesi 10 m'dir ve iki nokta arası oturma miktarındaki fark ise farklı oturma miktarını ortaya koymaktadır. ICAO (2009, 2018) tarafından, 10 m uzunluk için kabul edilebilir yüzey düzensizliği limiti 4.61 cm, tolerans limiti ise 7.06 cm olarak verilmiştir. Bu limitler, hesap noktaları ara mesafesi olan 10 m uzunluk için sırasıyla, 0.0046 m/m ve 0.0070 m/m oranı olan yüzey düzensizlik limitlerine karşılık gelmektedir. Pist, Yardımcı Pist ve Paralel Taksiyolu alanları için bu limitlerin kontrolü doğrultusunda yapılan hesaplamalarda, birkaç hesap noktası hariç, her bir alanın hemen hemen tamamında kabul edilebilir limitin sağlanabileceği belirlenmiştir (Şekil 4.92, Şekil 4.93 ve Şekil 4.94).

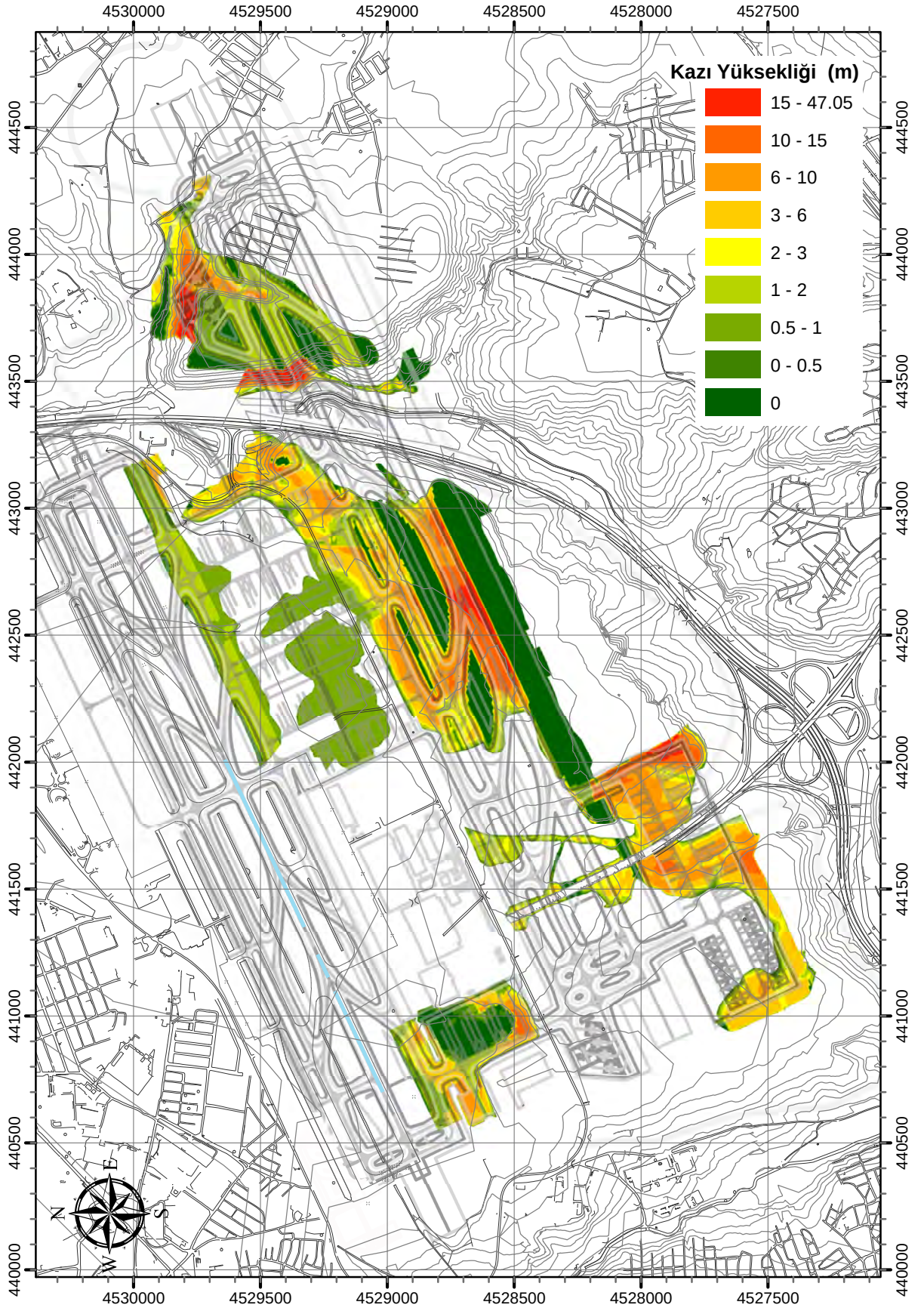
Yapay dolgu kil biriminde iyileştirme sonrası oturma miktarının 0.016 m seviyesinde sınırlandırılabilir. Ancak, bu değer, iyileştirme çalışmaları sırasında doğal koşullarına müdahale edilmeyecek olan Orhanlı kil üyesi'nde gerçekleşecek konsolidasyon oturmasıyla birlikte, daha yüksek seviyeye çıkacağı kaçınılmaz bir gerçektir. Bu kapsamda, yapay dolgu birimi için belirlenen oturma miktarı değerleri, Konsolidasyon Analizleri başlığı altında sunulan, Orhanlı kil üyesi için elde edilen sonuçlarla birleştirilerek, çalışma alanı için toplam konsolidasyon oturması miktarı hesaplanmıştır. Bu oturma miktarının, tüm beton kaplamalı alanlarda 0.5 m'den daha az olacağı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların alansal bazda değişimi Şekil 4.95'te sunulmuştur.





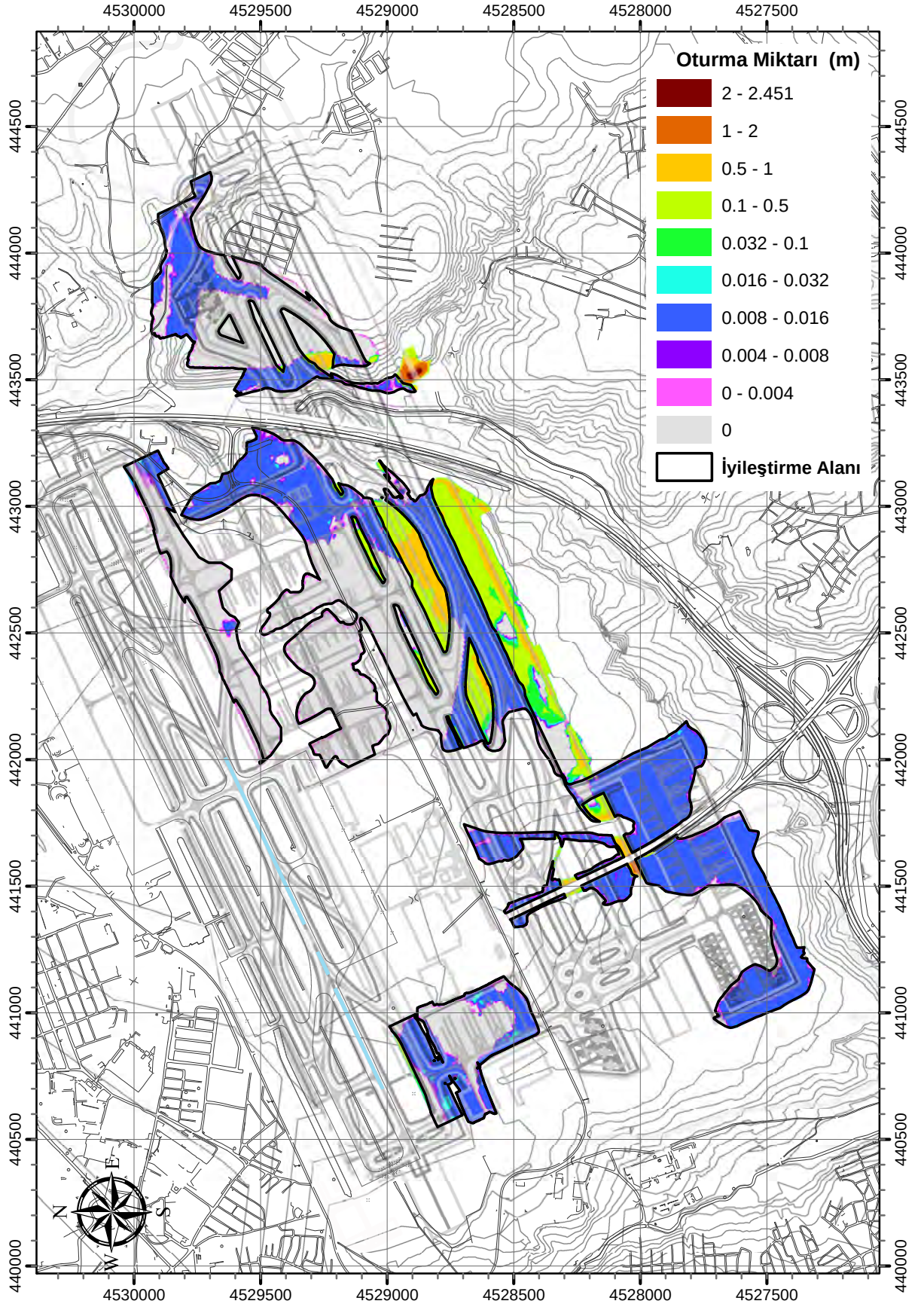
Şekil 4.89: İyileştirme alanının konumu.



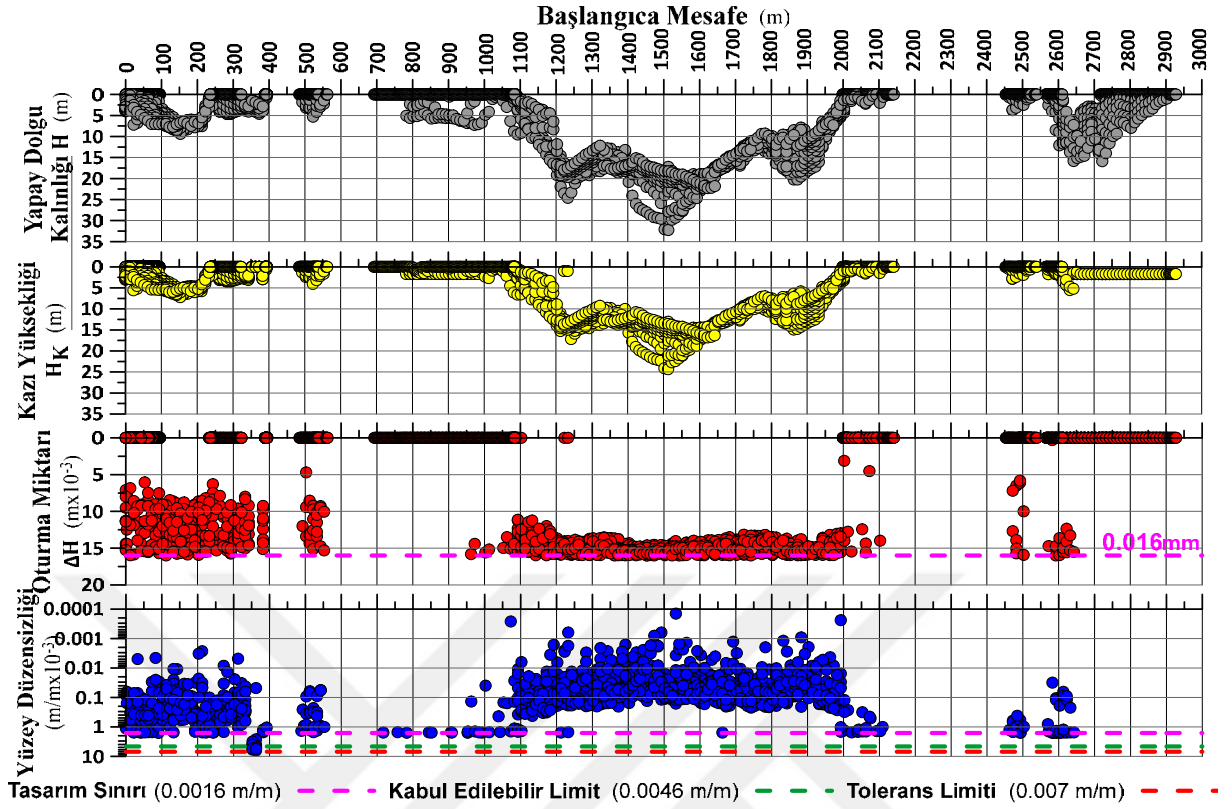


Şekil 4.90: İyileştirme kazısı yüksekliği alansal değişimi.

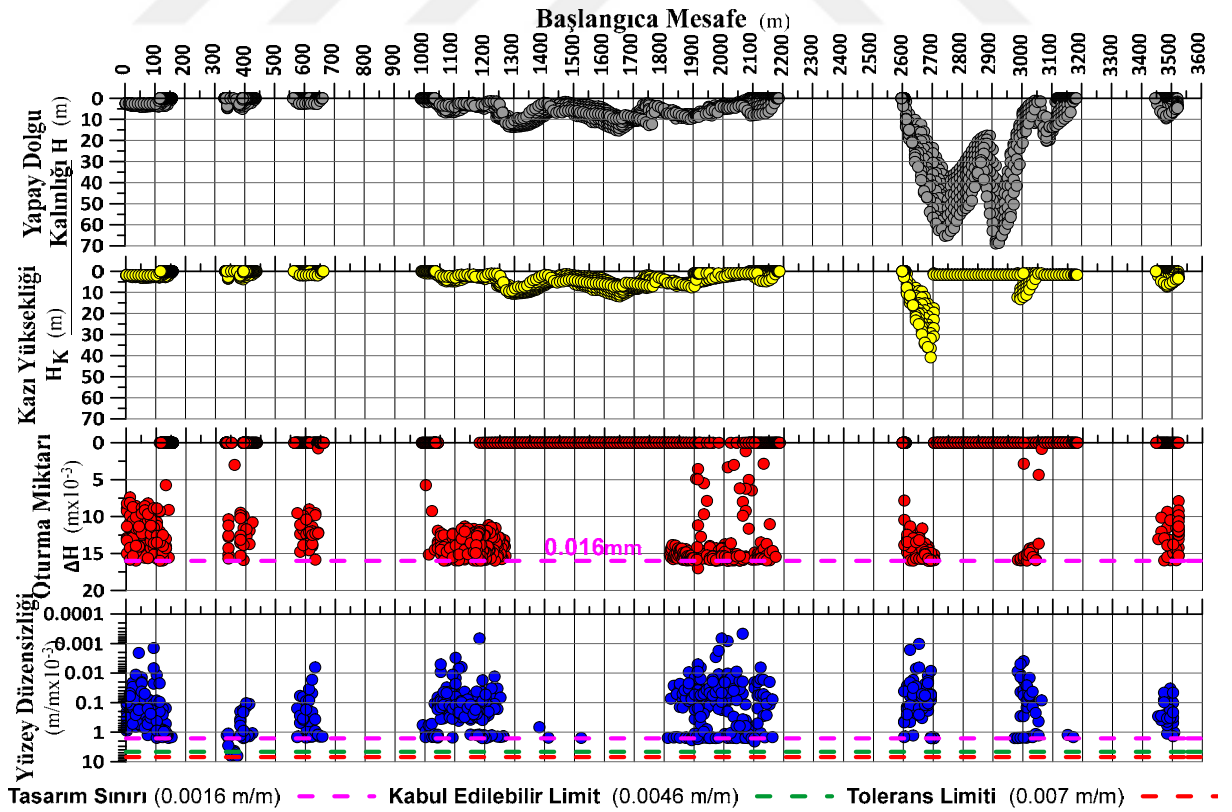




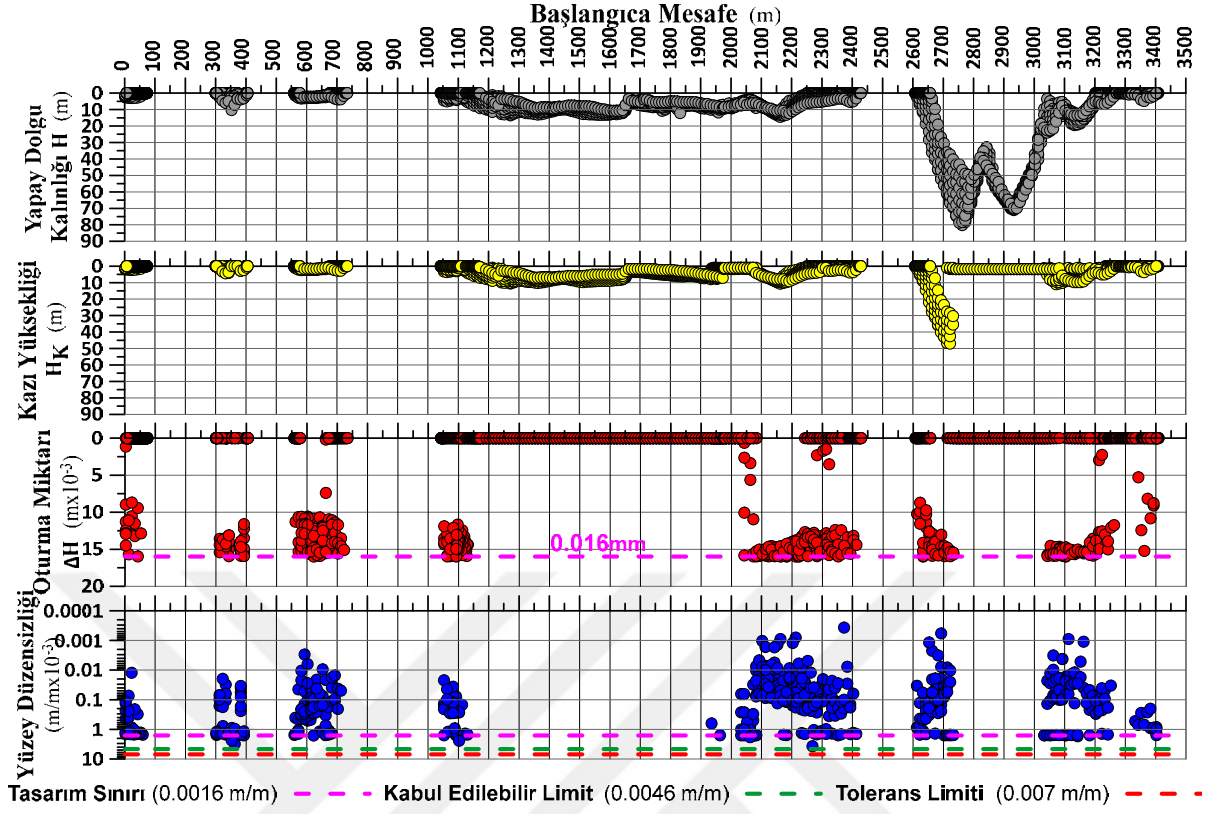
Şekil 4.91: İyileştirme sonrasında yapay dolguda hesaplanan konsolidasyon miktarının alansal değişimi.



Şekil 4.92: Pist alanında, yapay dolgu ve iyileştirme kazısı yüksekliği ile hesaplanan oturma miktarı ve yüzey düzensizliğinin değişimi.

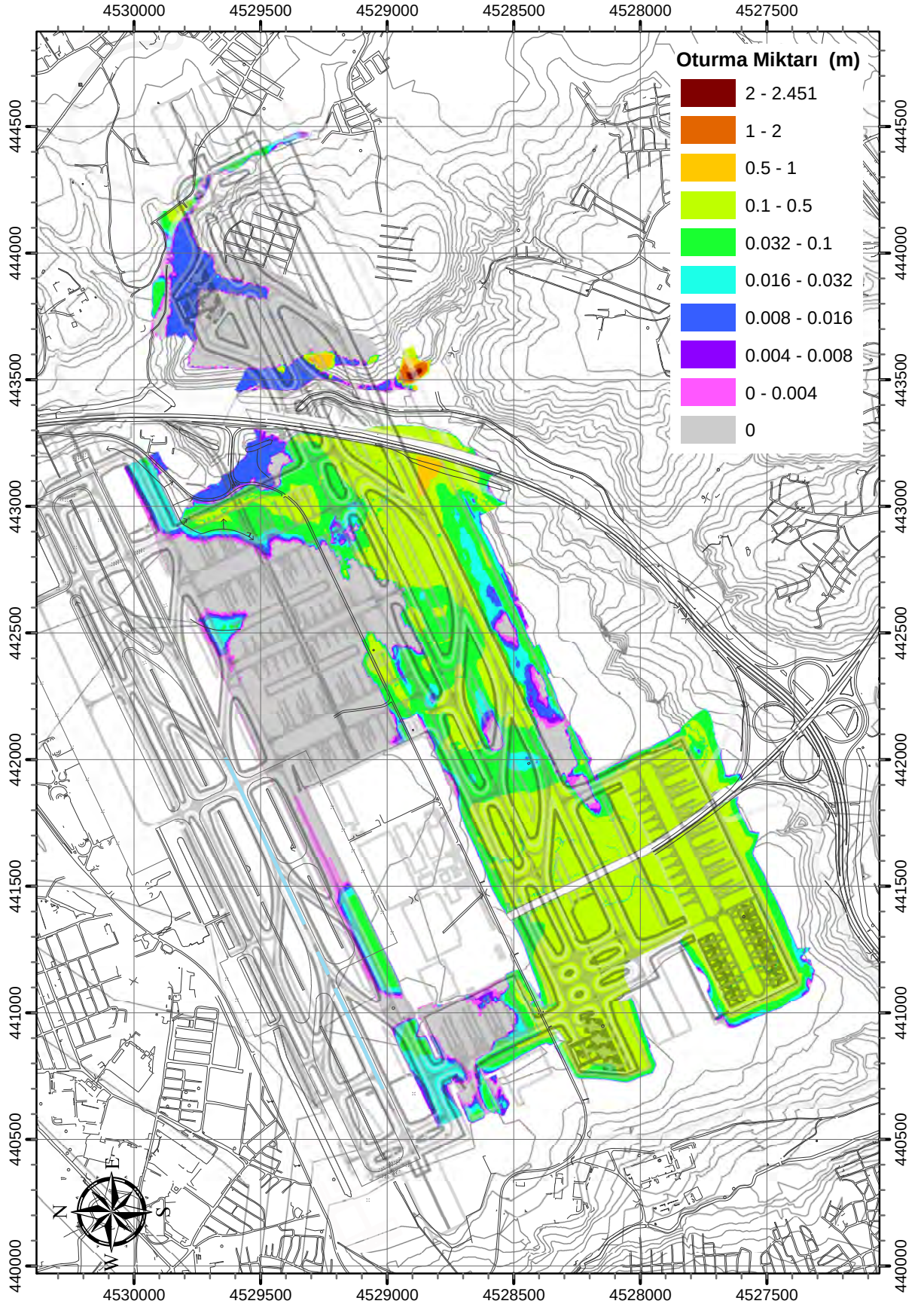


Şekil 4.93: Yardımcı Pist alanında, yapay dolgu ve iyileştirme kazısı yüksekliği ile hesaplanan oturma miktarı ve yüzey düzensizliğinin değişimi.



**Şekil 4.94:** Paralel Taksi Yolu alanında, yapay dolgu ve iyileştirme kazısı yüksekliği ile hesaplanan oturma miktarı ve yüzey düzensizliğinin değişimi.





**Şekil 4.95:** İyileştirme sonrasında çalışma alanında hesaplanan konsolidasyon oturması miktarının alansal değişimi.

#### 4.5.3. Performans Kontrol Ölçümleri

Çalışma alanında, iyileştirme yöntemi analizi sonuçlarına göre yapılan iyileştirme kazısı sonrası, tip kesitlerle belirlenmiş dolgu çalışmaları yapılmıştır. Kazı çalışmaları, tüm çalışma alanında yapılmasına karşın, TEM Bağlantı Tüneli inşaatı nedeniyle, dolgu çalışmaları yalnızca tünelin batı kesimindeki ve Kemiklidere üstündeki alanda yapılabilmektedir. Bu dolgu çalışmalarında en alt tabakayı değişken kalınlıklarda kaya dolgu oluşturmaktadır (Şekil 4.96 ve Şekil 4.97). Bu tabaka üzerine 0.45 m kalınlığında kırmataş alt temel ve 0.40 m kalınlığında kırmataş temel tabakası oluşturulmuştur (Şekil 4.98). Dolgu yükü altında, zamana bağlı oturma miktarının yerinde ölçümü için, Al-Shamrani ve Dhowian (1997) ile Dalgıç ve Simşek (2002) benzer özellikler içeren vakaları değerlendiren çalışmalarda olduğu gibi, oturma kolonu ve oturma plakaları kullanılmıştır. Oluşturulan ölçüm sistemi, 82 adet oturma kolonu ve 362 adet oturma plakasından oluşmaktadır. Oturma kolonları iyileştirme kazısı yapılan yapay dolgu veya Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı kil üyesi zemini üzerine yerleştirilmiş ve proje dolgusu yüksekliğinin artışıyla paralel olarak kolon boyları uzatılmıştır (Şekil 4.99). Kaya ve kırmataş dolgu tabakaları, zeminde oluşacak oturmaları, üstüne gelecek olan zayıf beton ve beton kaplama tabakalarına göre, hasar görmeden, çok daha yüksek performansta karşılamaktadır. Bunun yanında, konsolidasyon oturmalarından kaynaklı kot değişimleri nedeniyle, beton imalatları öncesinde gerekli kot düzenlemeleri de kırmataş temel dolgusu ilavesi ile yapılabilmektedir. Bu nedenle, oturma plakaları, tip kesitlerde tanımlanan kırmataş dolgunun tamamlanmasını takiben, bu dolguda oluşturulan 1.5 m x 1.5 m x 1.5 m ölçülerinde küp şekilli boşluğa, beton doldurulması ve bu betonun üst yüzeyine topoğrafik ölçümlere imkân tanıyacak çelik plaka yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur (Şekil 4.100).





Şekil 4.96: Çalışma alanında kaya dolgu çalışmalarından bir görünüm.



Şekil 4.97: Çalışma alanı batı kesiminde kaya dolgu çalışmalarından bir görünüm (Bakış yönü batı).





**Şekil 4.98:** Çalışma alanında kırmataş temel tabakasından bir görünüm.



**Şekil 4.99:** Çalışma alanında oluşturulan oturma kolonundan bir görünüm.





**Şekil 4.100:** Çalışma alanında oluşturulan oturma plakasından bir görünüm.

Oturma miktarı ölçümleri için oluşturulan oturma plakaları 19, oturma kolonları ise 20 farklı proje bileşeni alanında konumlandırılmıştır (Şekil 4.101). Oluşturulan bu ölçüm lokasyonlarında 24.10.2016 ile 06.01.2020 tarih aralığını kapsayan, 5658 ölçüm verisi çalışma kapsamında değerlendirilmiştir (Şekil 4.102 ve Tablo 4.21). Ölçüm verileri, Leica NAK2 model dijital nivo kullanılarak  $\pm 0.3$  mm hassasiyette elde edilmiştir. Oturma kolonu ölçümleri, iyileştirme kazısı sonrası zemin yüzüne yerleştirilmesi nedeniyle, bu yöntemde ölçümler oturma plakası ölçümlerine göre daha önce başlamıştır. Uygulama alanında konumlarının verdiği avantaj nedeniyle ise yine oturma kolonlarında ölçümler genel olarak daha sonra sonlandırılmıştır. Oturma plakası ölçüm noktalarında en fazla ölçüm 27 adet ile Pist alanında yapılmıştır. Proje alanında, oturma plakası ortalama ölçüm sayısı 10.34 adettir. Yapılan ölçümlerin temsil ettiği gün aralığı içinde, ölçümlerin sıklığı hesaplandığında oturma plakalarında ayda ortalama 3.09 ölçüm yapıldığı belirlenmiştir. Oturma kolonu ölçüm noktalarında, lokasyon bazında en fazla ölçüm 58 adet ile Apron – 1 alanında yapılmıştır. Proje alanında, oturma kolonu ortalama ölçüm sayısı 22.25 adettir. Yapılan ölçümlerin temsil ettiği gün aralığı içindeki sıklığı hesaplandığında, oturma kolonlarında ayda ortalama 1.72 ölçüm yapıldığı hesaplanmıştır.

Dolgu yükü altındaki zeminlerde toplam oturma miktarı, ani oturma ve konsolidasyon oturmasının toplamından oluşmaktadır. Bu nedenle, oturma kolonu ölçümlerinde ilk okuma,



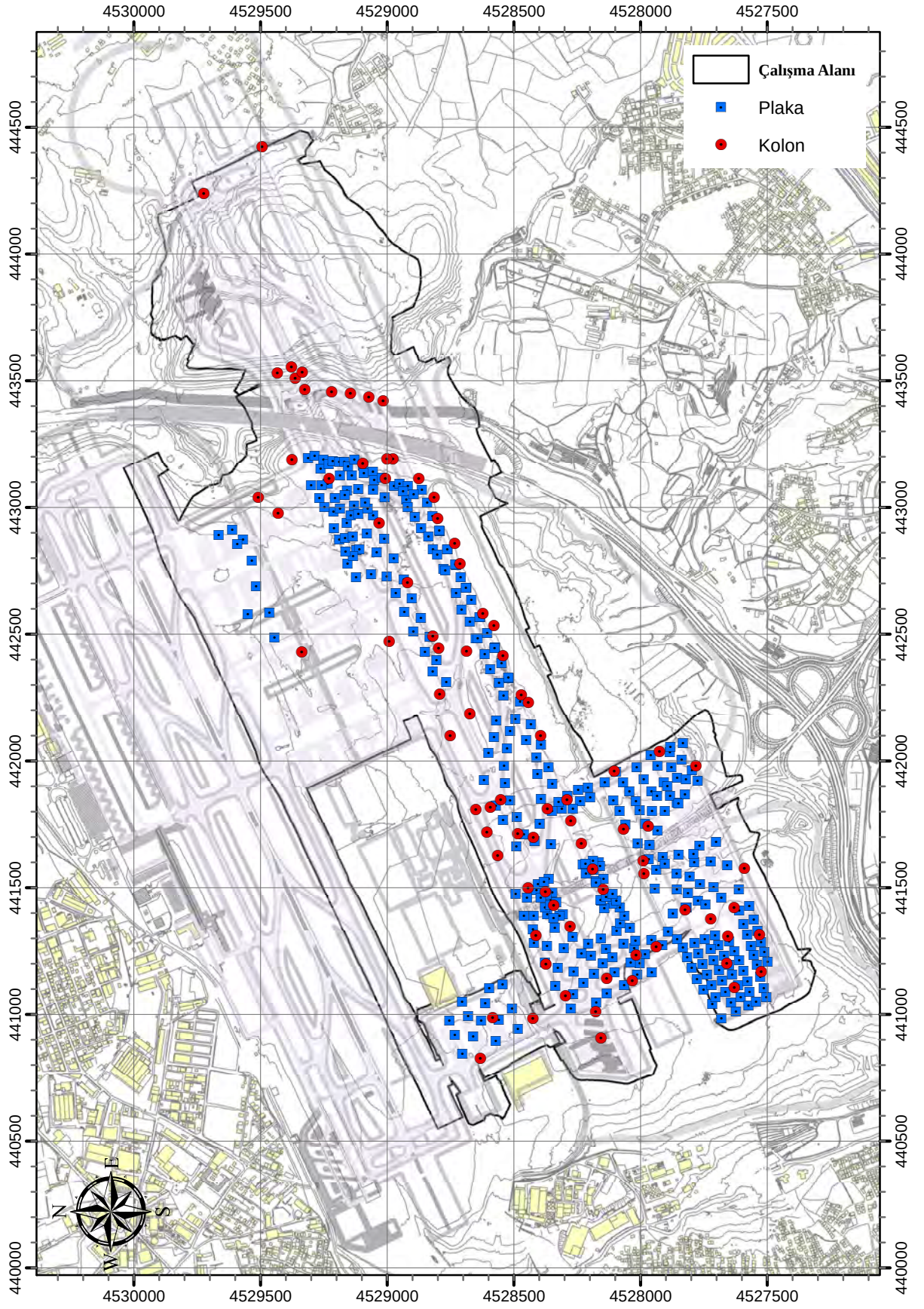
yaklaşık 3 m yüksekliğe tekabül eden mühendislik dolgusu imalatının sonlanmasıyla, 1 hafta sonra yapılmıştır. Böylelikle ilk ani oturmalar ölçüm dışı bırakılmıştır. Süreç içerisinde devam eden okumalarda ise, yüklemeler sonrası genel oturma hızından daha hızlı meydana gelen, bir önceki okuma değerine göre yüksek ivme ile arttığı belirlenen, oturma miktarı değerleri elimine edilerek, kümülatif oturma miktarları hesaplanmıştır. Böylelikle tüm oturma kolonu ölçümlerinde, ani oturmadan kaynaklı oturma miktarı, toplam oturma miktarından ayrılarak, konsolidasyon oturması miktarı belirlenmiştir. Oturma kolonu ölçümlerinde, en büyük ani oturma miktarı, TEM Bağlantı Yolu batı kesiminde, 28 m yüksekliğe varan mühendislik dolgusu altında Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı kil üyesi üzerinde konumlandırılmış oturma kolonlarında, 210 mm olarak belirlenmiştir.

Oturma kolonu ölçümlerde, en büyük konsolidasyon oturması miktarı 520 mm ile Apron – 1 alanında belirlenmiştir. Pist alanında en büyük oturma miktarı 280 mm, Yardımcı Pist alanında 110 mm, Paralel Taksi Yolu – 1 alanında ise 146 mm seviyesindedir (Şekil 4.103). Oturma plakası ölçümleri ile tespit edilen en küçük oturma miktarı Paralel Taksi Yolu – 22 ve Hızlı Çıkış Taksiyolu – 10 alanlarında 2 mm, en büyük oturma miktarı ise Apron – 1 alanında 236 mm'dir (Şekil 4.104). Oturma kolonu ölçümlerinde, oturma plakası ölçümlerine göre daha büyük değerler tespit edilmiştir.

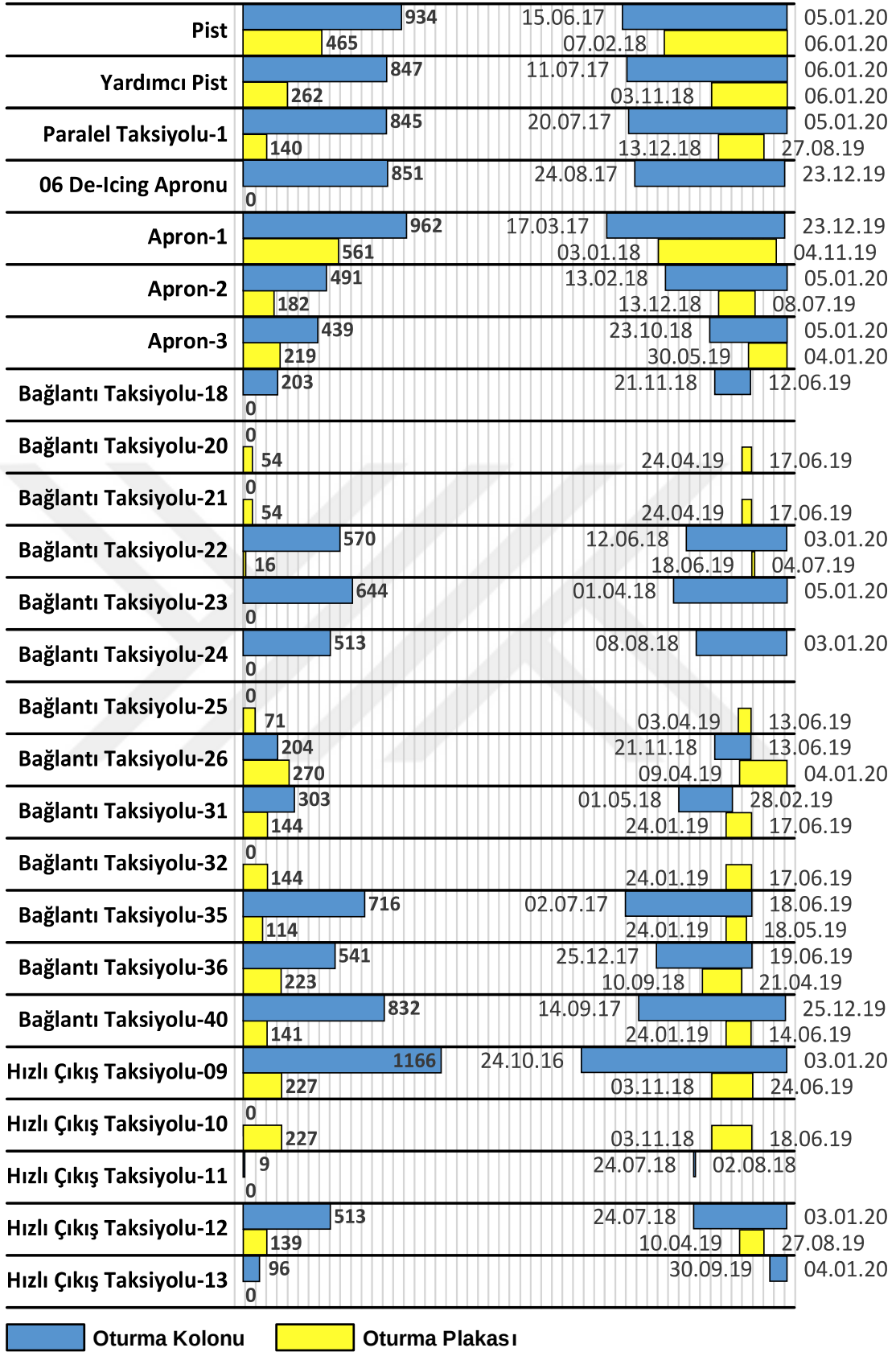
Proje dolgusu altında bulunan zemine yerleştirilen ve oturma plakası ölçümlerini kapsayacak şekilde tarih aralığında ölçümler yapılan oturma kolonları, hesaplanan konsolidasyon oturması miktarının, gerçekleşen oturma miktarıyla karşılaştırılmasında kullanılmıştır. İyileştirme yöntemi sonuçlarına göre hesaplanan, alanda beklenen toplam konsolidasyon oturması miktarını gösteren harita üzerine, oturma kolonu ölçüm sonuçları aynı aralık değerlerinde sınıflandırılarak işlenmiştir (Şekil 4.105). Hazırlanan haritadan da görüleceği üzere, hesaplanan değerler ile gerçekleşen değerler büyük çoğunlukla uyum göstermektedir. Oluşturulan haritanın 4 mm ila 1000 mm arasında değişen aralıklarla sınıflanması nedeniyle, belirlenen uyumun daha net ortaya konabilmesi amacıyla, hesaplanan değerler, ölçüm değerleriyle Şekil 4.106'da sunulan grafik aracılığıyla karşılaştırılmıştır. Grafiğin oluşturulmasında, oturma kolonu koordinatlarındaki hesaplanan değerler, hesaplanmış toplam konsolidasyon oturması miktarını gösterir harita üzerinden ArcMap yazılımı ile belirlenmiştir. Hesaplanan konsolidasyon oturması miktarları, 84 adet oturma kolunun bulunduğu lokasyonların, 5 adedi hariç tümünde, gerçekleşen oturma miktarlarından daha fazladır. Bu 5 lokasyonda, ölçülen oturma miktarları

hesaplanandan 1.01 ila 2 katı fazladır. Tüm ölçüm sonuçlarına göre, iki veri arası determinasyon katsayısı  $R^2=0.657$  hesaplanmıştır (Şekil 4.106). İlişki zayıf ( $R^2<0.5$ ) olmasa da düşük düzeydedir. PLK – 37 ve PLK – 11 oturma kolonlarına ait ilişkiler genel yayılımdan aşırı derecede sapmaktadır (Şekil 4.106). PLK – 37 ve PLK – 11 verileri sırasıyla toplam veri içinden çıkartılarak determinasyon katsayısı hesaplandığında, sırasıyla  $R^2=0.879$  ve  $R^2=0.918$  değerleri belirlenmiştir. Bu iki durumda da, hesaplanan konsolidasyon oturma miktarı değerleri her ne kadar gerçekleşenden büyük olsa da, oturma miktarının iyi düzeyde ilişkiliyle hesaplandığı sonucuna varılmıştır.

Oturma kolonları ile oluşturulan haritaya benzer şekilde, oturma miktarı hesapları ile oturma plakası ölçüm sonuçlarının karşılaştırıldığı harita düzenlenmiştir (Şekil 4.107). Hesaplanan oturma miktarı değerlerinden az olmakla birlikte, diğer oturma plakası ölçümlerine göre, TEM Bağlantı Tüneli batı kesiminde şev başlangıcına yakın ve şeve paralel bir hat boyunca konumlandırılmış oturma plakalarına ait ölçüm sonuçlarının, diğer ölçüm sonuçlarından daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.107). Bu alanda, oturma kolonu ölçümlerinde gözlenmeyen bu durumun, oturma plakası ölçümlerinde gözlenmesi, şevi oluşturan dolgunun yanal yayıldığı şeklinde yorumlanabileceği gibi drenaj boyunun kısalması sonucu oturma hızındaki farklılıktan kaynaklandığı şeklinde de yorumlanabilmektedir. Ancak, yanal yayılma doğrultusunda yapılan yaklaşımın denetlenmesi için, alanda inklinometre gibi yanal yer değiştirmenin kontrol edilebileceği bir ölçüm sistemi bulunmamaktadır.



Şekil 4.101: Oturma plakası ve kolonlarının konumu.

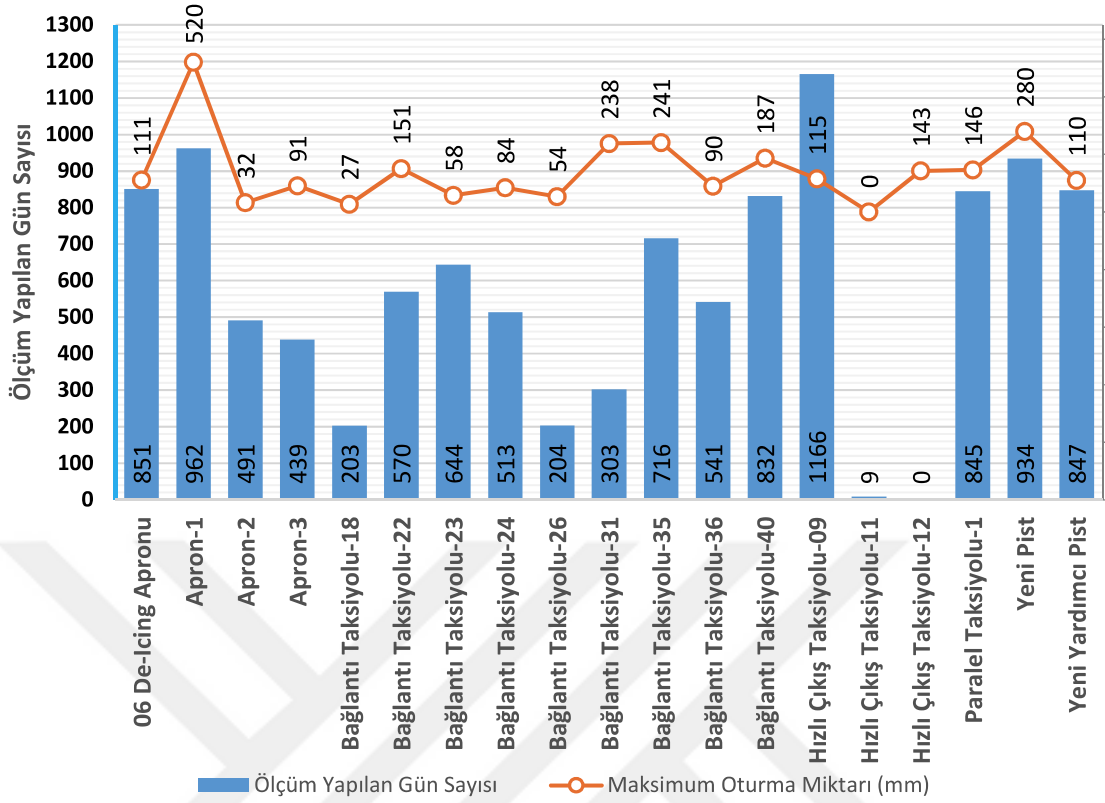


**Şekil 4.102:** Oturma kolonu ve oturma plakalarında ölçüm yapılan tarih aralıkları ve toplam sürenin (gün) proje bileşenlerine göre dağılımı.

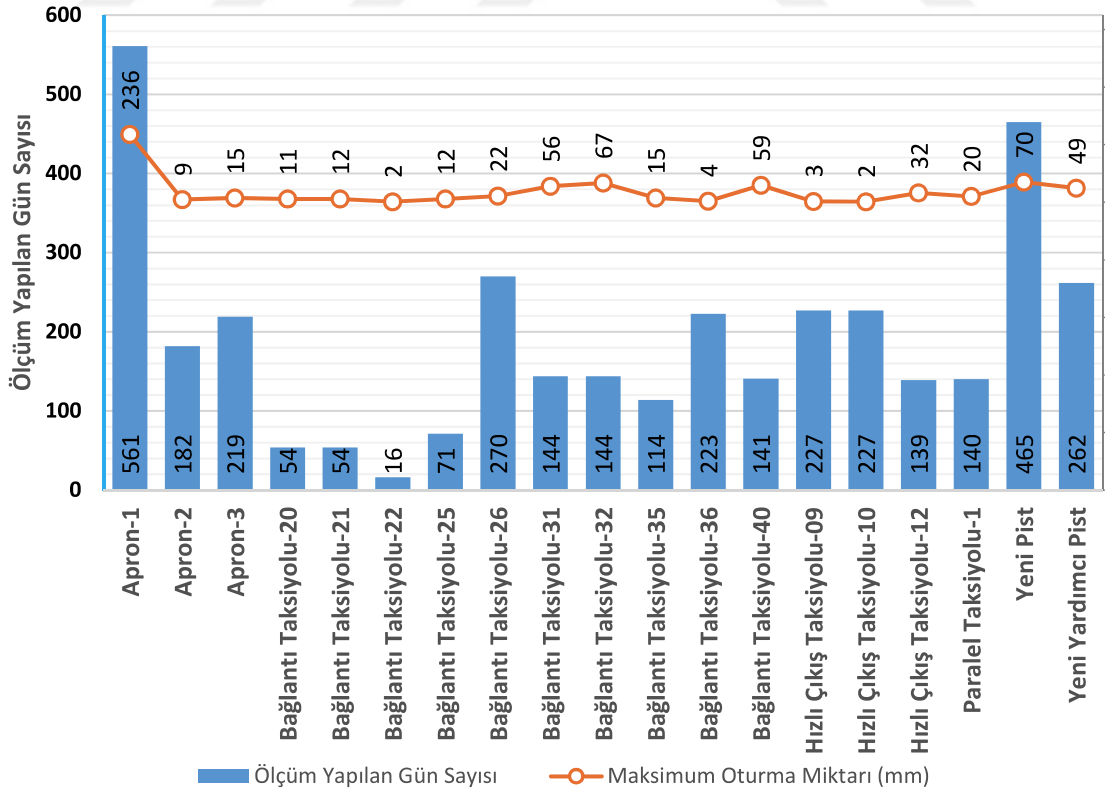
**Tablo 4.21:** Oturma kolonu ve oturma plakalarında ölçüm yapılan toplam süre, toplam veri sayısı ve en büyük oturma miktarının bölgelere göre dağılımı.

|                                       | Oturma Kolonu      |                          |                      | Oturma Plakası     |                          |                      | Plaka+Kolon        |                 |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------------|----------------------|--------------------|--------------------------|----------------------|--------------------|-----------------|
|                                       | Toplam Veri Sayısı | Ölçüm Yapılan Süre (gün) | Maksimum Oturma (mm) | Toplam Veri Sayısı | Ölçüm Yapılan Süre (gün) | Maksimum Oturma (mm) | Toplam Veri Sayısı | Maksimum Oturma |
| <b>Pist</b>                           | 414                | 934                      | 280                  | 991                | 465                      | 70                   | 1405               | 280             |
| <b>Yardımcı Pist</b>                  | 295                | 847                      | 110                  | 666                | 262                      | 49                   | 961                | 110             |
| <b>Paralel Taksiyolu-1</b>            | 246                | 845                      | 146                  | 135                | 140                      | 20                   | 381                | 146             |
| <b>06 De-Icing (buz çözme) Apronu</b> | 84                 | 851                      | 111                  | –                  | –                        | –                    | 84                 | 111             |
| <b>Apron-1</b>                        | 504                | 962                      | 520                  | 1179               | 561                      | 236                  | 1683               | 520             |
| <b>Apron-2</b>                        | 40                 | 491                      | 32                   | 145                | 182                      | 9                    | 185                | 32              |
| <b>Apron-3</b>                        | 43                 | 439                      | 91                   | 142                | 219                      | 15                   | 185                | 91              |
| <b>Bağlantı Taksiyolu-18</b>          | 19                 | 203                      | 27                   | –                  | –                        | –                    | 19                 | 27              |
| <b>Bağlantı Taksiyolu-20</b>          | –                  | –                        | –                    | 12                 | 54                       | 11                   | 12                 | 11              |
| <b>Bağlantı Taksiyolu-21</b>          | –                  | –                        | –                    | 13                 | 54                       | 12                   | 13                 | 12              |
| <b>Bağlantı Taksiyolu-22</b>          | 11                 | 570                      | 151                  | 7                  | 16                       | 2                    | 18                 | 151             |
| <b>Bağlantı Taksiyolu-23</b>          | 23                 | 644                      | 58                   | –                  | –                        | –                    | 23                 | 58              |
| <b>Bağlantı Taksiyolu-24</b>          | 24                 | 513                      | 84                   | –                  | –                        | –                    | 24                 | 84              |
| <b>Bağlantı Taksiyolu-25</b>          | –                  | –                        | –                    | 32                 | 71                       | 12                   | 32                 | 12              |
| <b>Bağlantı Taksiyolu-26</b>          | 10                 | 204                      | 54                   | 52                 | 270                      | 22                   | 62                 | 54              |
| <b>Bağlantı Taksiyolu-31</b>          | 30                 | 303                      | 238                  | 45                 | 144                      | 56                   | 75                 | 238             |
| <b>Bağlantı Taksiyolu-32</b>          | –                  | –                        | –                    | 83                 | 144                      | 67                   | 83                 | 67              |
| <b>Bağlantı Taksiyolu-35</b>          | 49                 | 716                      | 241                  | 41                 | 114                      | 15                   | 90                 | 241             |
| <b>Bağlantı Taksiyolu-36</b>          | 22                 | 541                      | 90                   | 32                 | 223                      | 4                    | 54                 | 90              |
| <b>Bağlantı Taksiyolu-40</b>          | 38                 | 832                      | 187                  | 29                 | 141                      | 59                   | 67                 | 187             |
| <b>Hızlı Çıkış Taksiyolu-09</b>       | 19                 | 1166                     | 115                  | 32                 | 227                      | 3                    | 51                 | 115             |
| <b>Hızlı Çıkış Taksiyolu-10</b>       | –                  | –                        | –                    | 36                 | 227                      | 2                    | 36                 | 2               |
| <b>Hızlı Çıkış Taksiyolu-11</b>       | 1                  | 9                        | 0                    | –                  | –                        | –                    | 1                  | 0               |
| <b>Hızlı Çıkış Taksiyolu-12</b>       | 21                 | 0                        | 143                  | 72                 | 139                      | 32                   | 93                 | 143             |
| <b>Hızlı Çıkış Taksiyolu-13</b>       | 21                 | 96                       | 4                    | –                  | –                        | –                    | 21                 | 4               |
| <b>Genel Toplam</b>                   | <b>1914</b>        | –                        | –                    | <b>3744</b>        | –                        | –                    | <b>5658</b>        | –               |

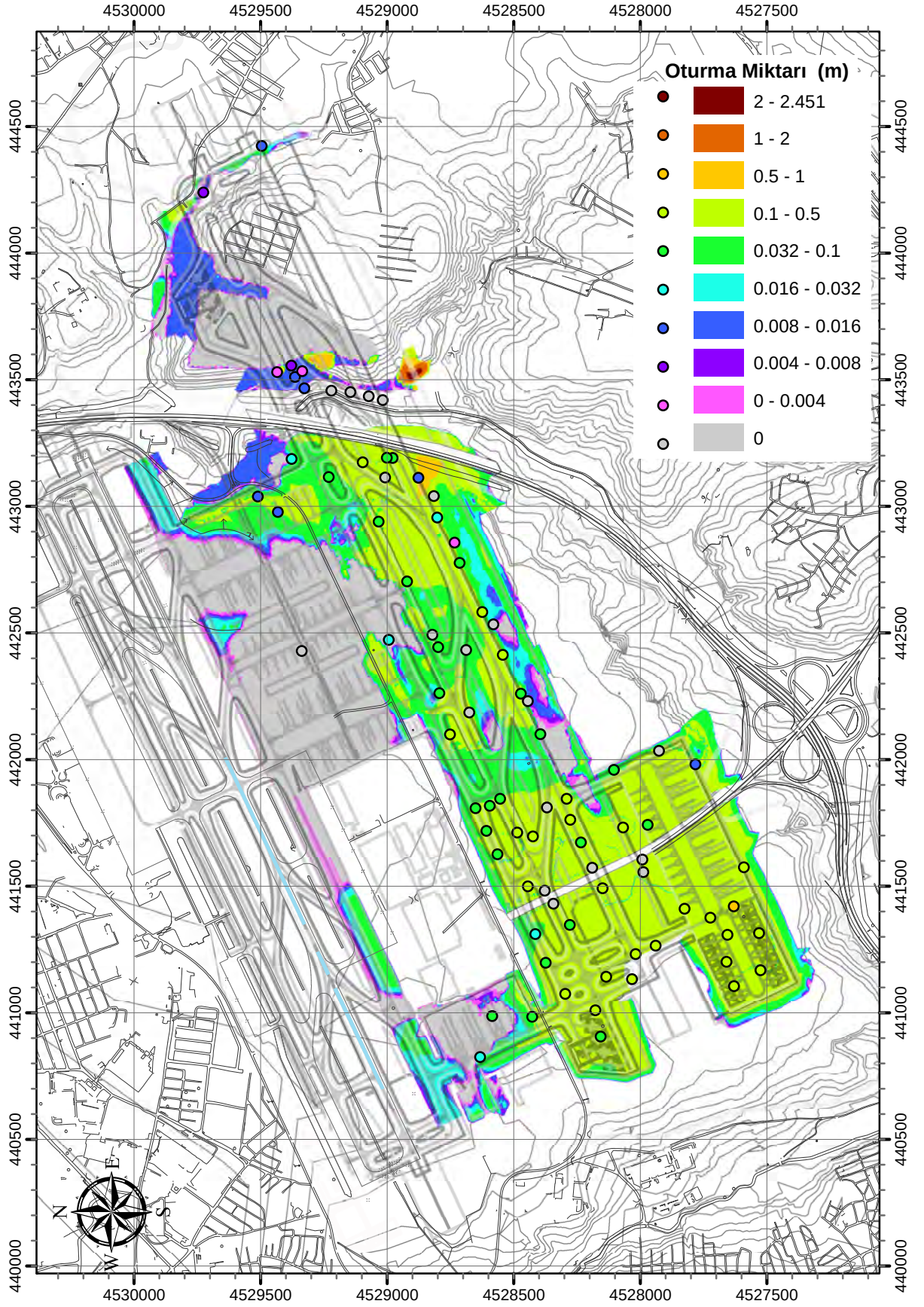




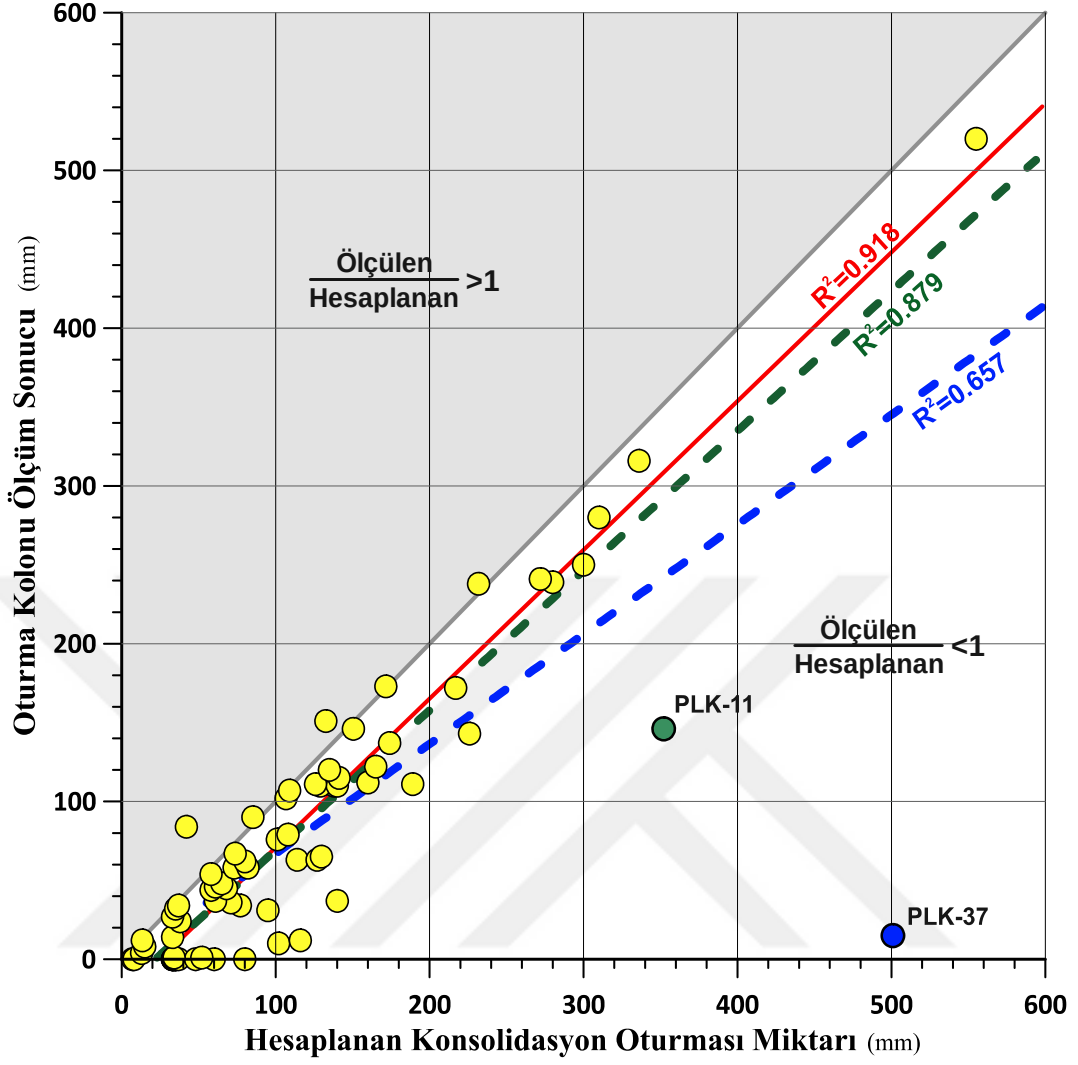
Şekil 4.103: Oturma kolunu ölçümlerinin bölgelere göre dağılımı, ölçüm yapılan gün sayısı ve en büyük oturma miktarı.



Şekil 4.104: Oturma plakası ölçümlerinin bölgelere göre dağılımı, ölçüm yapılan gün sayısı ve en büyük oturma miktarı.

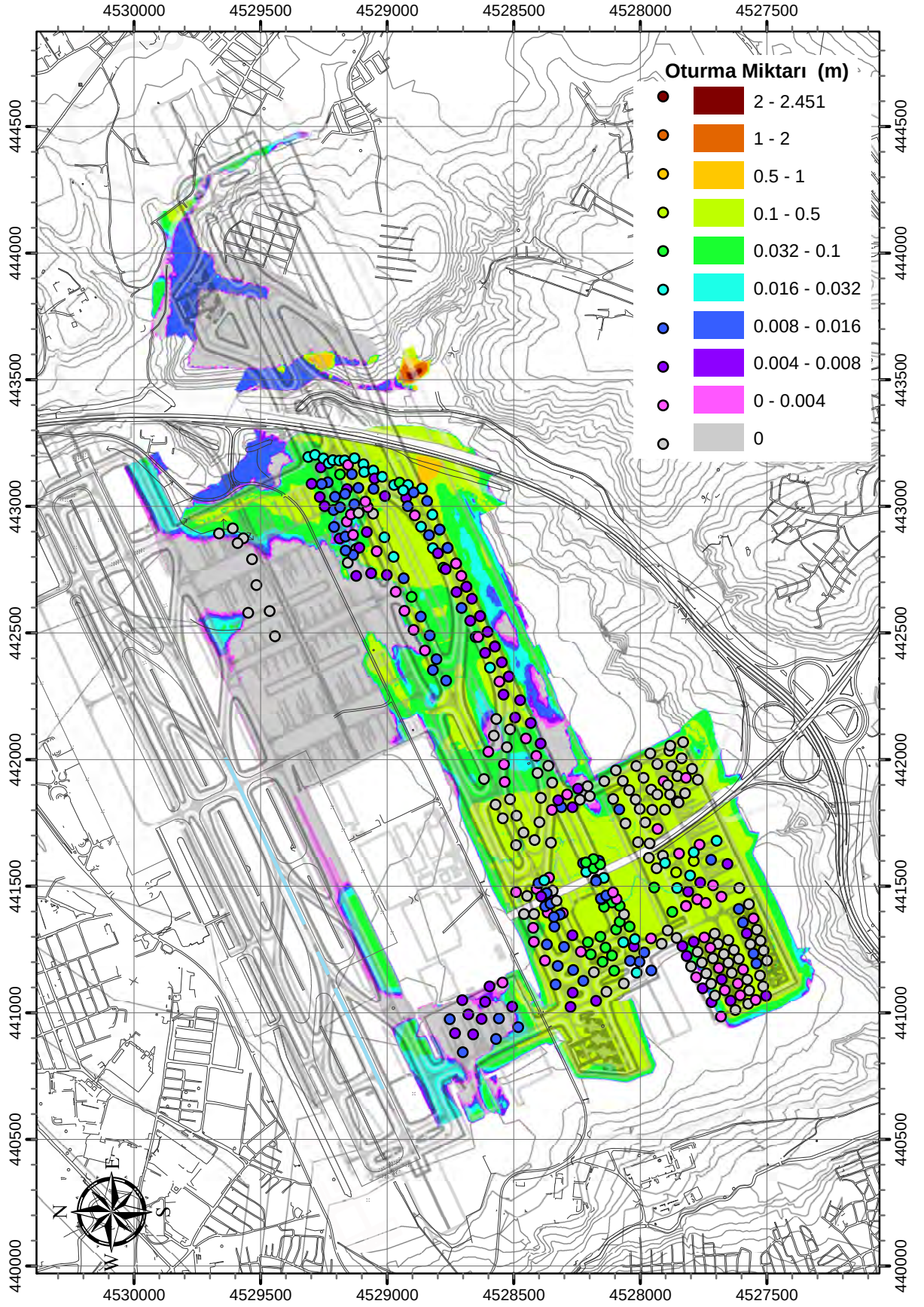


**Şekil 4.105:** Oturma kolonu ölçüm sonuçları ile iyileştirme sonrası durum için hesaplanan toplam oturma miktarı değerlerinin karşılaştırması.



**Şekil 4.106:** Oturma kolonu ölçümleri ile aynı lokasyonlarda iyileştirme sonrası durum için hesaplanan oturma miktarlarının ilişkisi.





**Şekil 4.107:** Oturma plakası ölçüm sonuçları ile iyileştirme sonrası durum için hesaplanan toplam oturma miktarı değerlerinin karşılaştırması.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Konsolidasyon kontrolüne yönelik hemen hemen tüm zemin iyileştirme çalışmaları, iyileştirilmesi gerekli olan zemin kesitinin, ya teknik olarak müdahale edilebilir kesiminde, ya da tümünde yürütülmektedir. Oysaki; konsolidasyon açısından proje kriterlerini gözeterek, yalnızca gerekli olan derinlikte çalışmaları yürütmek, diğer zemin kesiminde ise konsolidasyona izin vermek, özellikle büyük ölçekli projelerde ekonomik açıdan tasarruf sağlayabilecektir. Günümüze kadar yapılmış olan çalışmalarda, konsolidasyonun miktarı ile süresini belirleme ve bu özelliklerin kontrolü ve iyileştirilmesine yönelik değerlendirmeler yapılmış olmasına karşın, müdahale etmeye gerek olmayacak zemin kütlelerinin alansal tespitine yönelik doğrudan bir çalışma bulunmamaktadır. Dolgu yükü altında konsolidasyonun sınırlandırılması için yöntem ve eşitliklerin geliştirilmesi amacıyla yapılmış olan bu çalışmayla, bu yönde bir yenilik getirmiş olacaktır.

Günümüze kadar yapılmış olan sayısız çalışmada, konsolidasyon oturması miktarının ve bu oturmanın gerçekleşeceği sürenin belirlenmesinde, zemin içerisinde suyun hareketi, yükleme koşullarının bu su hareketi ve birim şekil değiştirmeye olan etkilerine dikkat çekilmektedir. Bu doğrultuda, çalışma alanı olarak, konsolide olabilir nitelikte litolojilerin geniş yayılım gösterdiği, Sabiha Gökçen Havalimanı ilave pist ve yardımcı alanlarının inşa edileceği proje alanı seçilmiştir. Alanda yapılan jeolojik saha çalışmaları, zemin araştırma sondajları ve araştırma çukurları birlikte değerlendirilerek, yayılım gösteren en yaşlı birimin arkozik kumtaşlarıyla temsil edilen Kurtköy Formasyonu olduğu belirlenmiştir. Bu formasyon uyumlu olarak, alanda açık gri ve bej renkte kuvarsit ile silttaşı – şeyl araldanmasıyla temsil edilen Aydos Formasyonu takip etmektedir. Ordovisiyen yaşlı bu birimler, yine aynı yaşta Yayalar Formasyonu Gözdağ üyesi'ne uyumlu olarak geçmekte ve bu üye ise gri ve açık kahverengi, mikalı, killi kumtaşı litolojisiyle gözlenmektedir. Pelitli Formasyonu Dolayoba üyesi'nin ise bu birimler ile faylı dokanak oluşturduğu belirlenmiş ve Kemiklidere'yi besleyen Kumaşlı Dere'nin bulunduğu vadi tabanında, çok sınırlı bir alanda, açık gri renkli, resifal kireçtaşı ile tespit edilmiştir. Çalışma alanının güney kesiminde ve alanda yüzeylenen Pliyosen – Miyosen çökellerin büyük bir bölümünün tabanında bulunan, Pendik Formasyonu Kartal üyesi ise Dolayoba üyesi ile faylı dokanak oluşturmaktadır. Aynı zamanda çalışma alanında gözlemlenen



Paleozoyik birimlerin en genci niteliğindeki Kartal üyesi grimsi açık kahverengi şeyl litolojisi ile ayırtlanmıştır. Tanımlanan tüm Paleozoyik istifin bir bölümü, Pliyosen – Miyosen yaşlı Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi, Alüvyon ve Yapay Dolguyla uyumsuz olarak üzerlemektedir. Orhanlı üyesi alanda gri – açık kahverengi, yer yer karbonat içerikli, çakıllı, kumlu, orta katı – sert, siltli kil çökelimi ile temsil edilmektedir. Bu üye, alanda benzer yayılımla, Gedik ve diğ. (2005) tarafından, kıltaşı, şeyl, marn, silttaşı ve az oranda kumtaşı ile çakıltaşı litolojisiyle ayırtlanan Meşetepe Formasyonu olarak tanımlanmıştır. Ancak, bu çalışma kapsamında elde edilen litolojik bulgularla, araştırmacılar tarafından tanımlanan litolojik özellikler uyum göstermemektedir.

Alan için güncel jeolojik çalışmalar niteliğindeki, Gedik ve diğ. (2005), Özgül (2005) ve OYO International Corporation (2009) tarafından yapılan çalışmalarda belirlenmeyen, çalışma alanı içerisinde, TEM Bağlantı Yolu doğu kesiminde, yaklaşık kuzeybatı ve kuzey – güney doğrultu doğrultu atımlı faylar tespit edilmiştir. Yılmaz ve diğ. (2010), Yılmaz ve diğ. (2018) ve Şengör (2011) tarafından sunulan çalışmalarda, Marmara Bölgesi için Miyosen öncesi dönemde yaklaşık doğu – batı, Miyosen sonrası dönemde ise yaklaşık kuzey – güney sıkışma rejiminin etkin olduğunu belirtmişlerdir. Bu sıkışma rejimi, Miyosen öncesi dönemde, bölgede yaklaşık doğu – batı doğrultulu eğim atımlı bileşenleri de bulunan doğrultu atımlı faylar, Miyosen sonrası dönemde ise yaklaşık kuzey – güney doğrultulu doğrultu atımlı fayların oluşumuna neden olmaktadır. Çalışma alanında belirlenen aktif olmayan fay sistemi de bu çalışmaların sonuçlarıyla uyumludur. Önceki çalışmalarda, belirlenen faylara değinilmemiş olmasına, çalışmaların yapıldığı yıllarda alanın örtülü olması ve fayların kimi alanlarda aynı birim içerisinden geçmesinin neden olduğu düşünülmektedir. Çalışma konusuyla doğrudan bir ilişkisi bulunmaması nedeniyle, tektonik özellikler yönünden ayrıntılı bir inceleme yapılmamış olmasına karşın, fayların tespitinde, arazi çalışmaları sırasında proje kazıları yapılıyor olması, önceki çalışmalara kıyasla büyük kolaylık sağlamıştır.

Arazi çalışmaları yanında, 190 adet zemin araştırma sondajı ve 214 adet araştırma çukuru verisinin değerlendirilmesi sonucu yapılan hesaplamalara göre, alanda Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı kil üyesi düzeylerinin 61 m kalınlığa, yapay dolgu birimin ise 90 m kalınlığa ulaştığı belirlenmiştir. Belirlenen bu kalınlıklar, Gedik ve diğ. (2005), Özgül (2005), OYO International Corporation (2009), ARUP (2009), STFA (2010), ZETAŞ (2011) ve Oakman ve diğ. (2011) tarafından yapılan çalışmalar ile uyumludur.

Çalışma alanında yapılacak olan proje kotlarının alan çevresinde oluşturulacak şev yüzeyleri de dâhil olmak üzere, 38.29 m ile 113.00 m arasında, topoğrafik kotların ise 35.90 m ile 119.49 m arasında değiştiği belirlenmiştir. Proje yüzeyi ve topoğrafik yüzey 3D modelleri kullanılarak yapılan hesaplamalarda, toplam kazı alanının  $1,312,643 \text{ m}^2$ , proje dolgusu alanın ise  $2,817,545 \text{ m}^2$  olduğu hesaplanmıştır. Alanda, en büyük kazı yüksekliği 29.78 m, proje dolgusu yüksekliği ise 44.27 m'dir. Toplam kazı hacmi  $10,046,571 \text{ m}^3$ , toplam dolgu hacmi ise  $29,019,825 \text{ m}^3$  olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, alanda  $39,066,397 \text{ m}^3$  hacminde malzemenin yer değiştirileceği belirlenmiştir. Paleozoik birimler üzerinde  $188,997 \text{ m}^2$  alanda 44.27 m, Sultangazi formasyonu Orhanlı kil üyesi üzerinde  $1,232,832 \text{ m}^2$  alanda 36.51 m ve yapay dolgu birimler üzerinde ise  $1,395,736 \text{ m}^2$  alanda 39.20 m'ye varan yüksekliklerde proje dolgusu yapılacaktır.

Zemin araştırma sondajlarında yeraltı suyu derinliği 0.25 m ile 28.05 m arasında belirlenmiştir. Yeraltı suyunun yüzeye yakın, hatta yüzeyde sayılabilecek kadar sığ derinlikte olduğu birimler çalışma alanının batı kesiminde Neojen birimlerin yüzeylendiği alanlardır. Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı kil üyesi ve yapay dolgu Ameratunga ve diğ. (2016) tarafından sunulan geçirimsizlik sınıflamasına göre çok düşük ve düşük geçirimsizdir. Geçirimsizlik katsayısı değerleri ile derinlik arasında artan veya azalan şekilde bir ilişki belirlenememiştir.

İyileştirme yapılmaması durumunda, Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı kil üyesi'nde en büyük konsolidasyon oturması miktarı 0.57 m, yapay dolgu düzeylerinde ise 2.45 m olarak belirlenmiştir. Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı kil üyesi alanlarında %95 konsolidasyon yüzdesine ulaşması için geçecek olan süre 4 yıldır. Elde edilen bu sonuç, Bowles (1996), Şimşek ve Dalgıç (1997) ile Dalgıç ve Şimşek (2002) tarafından yapılan çalışmalar gibi birçok çalışmada, hesaplanan ve gerçekleşen konsolidasyon sürelerinin değerlendirildiği çalışma sonuçlarıyla uyumludur.

Oakman ve diğ. (2011) tarafından avan proje çalışmaları kapsamında, yapay dolgunun tümüyle kaldırılması önerilmiş, Orhanlı kil üyesine ait düzeylerde ise 90 cm'ye varan konsolidasyon oturmasının zamana bağlı azalma nedeniyle 10 yıllık bir süre içerisinde tamamlanmayacağı öngörülmüştür. Ancak, elde edilen sonuçlar, Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi için önemli farklılıklar sunmaktadır. Elde edilen sonuçların farklılığı, Oakman ve diğ. (2011) tarafından sunulan sonuçların ödometre deneyi ile elde edilen hesap parametrelerine, bu çalışma

sonuçlarının ise ön yükleme ve yapılan oturma ölçümleri ile elde edilen hesap parametrelerine bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Laboratuvar verileri sonucu elde edilen sonuçlarla, saha ölçümlerinin farklılıkları üzerine 33 farklı örnekte Duncan (1993) tarafından yapılan çalışmayla paralel bir şekilde, arazi verilerine dayalı yapılan hesapların daha doğru sonuçlar ortaya çıkartacağı düşünülmektedir.

Çalışmada, hesaplanan uçak yüklerinin etkisinde zeminde oluşacak gerilme değişiminin belirlenmesi ve konsolidasyon sürecine etkilerinin tartışılması amacıyla sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplamalar yapılmıştır. Geçirimliliği yüksek proje dolgusu altındaki, düşük – çok düşük geçirimsizlik sınıfında yapay dolgu ve Orhanlı üyesi kil katmanlarında, hareketli yüklere bağlı önemli miktarda efektif gerilme değişimi oluşmayacağı belirlenmiştir. Efektif gerilme artışının gerçekleşmesi için, toplam gerilmeyi arttıran yükün hareketsiz kalması ve aşırı boşluk suyu basıncının sönmülmesi gerekmektedir. Çalışma alanında bulunan birimlerde belirlenen permeabilite katsayısı ve uçakların alanda kalış süreleri birlikte değerlendirildiğinde, uçakların piste iniş ve kalkışlarının, alanda hareket ve kısa süreli park durumlarının, konsolidasyon sürecine bir etkisi olmayacaktır.

Çalışma alanında yapılan iyileştirme yöntemi analizlerinde, konsolidasyon analizlerinde kullanılan zemin parametrelerine ilave olarak, izin verilen konsolidasyon oturması miktarının ( $\Delta H_L$ ) belirlenmesi gerekmektedir. Çalışmada, birbirini takip eden pist kaplaması anoları sınırında, kabul edilebilir kot farkı olan 0.016 m,  $\Delta H_L$  olarak belirlenmiştir. Böylelikle, farklı oturmaların gerçekleşmesi durumunda havaalanı trafiği etkilenmemiş olacaktır. Sultanbeyli Formasyonu Orhanlı üyesi proje imalat süreci içerisinde %95 konsolidasyon oranına ulaşacağını belirlenmesi nedeniyle iyileştirme çalışmalarına dahil edilmemiştir.

Çalışma alanında yapılan iyileştirme yöntemi analizlerinde ortalama 5.60 m yapay dolgu kalınlığı bulunan proje alanında, ortalama 2.21 m kazı yüksekliği hesaplanmıştır. Yapay dolgu yayılım alanı 2,172,230 m<sup>2</sup>'dir. Toplam yapay dolgu hacmi 17.886.890 m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. Geliştirilen yöntem sonuçlarına kullanılarak yapılacak olan iyileştirme kazılarında ise bu dolgunun 7,345,936 m<sup>3</sup> hacmindeki yalnızca %41'lik bir kısmı alandan uzaklaştırılacaktır. Hesaplanan bu rakamlar, yapay dolgunun kil olduğu durum için belirlenmiştir. Dolgunun heterojen olduğu durumlarda hacimsel sonuçlar değişkenlik gösterecektir. Ayrıca, hacim

hesaplarına, iyileştirme kazısı sırasında oluşturulacak olan şevlerden kaynaklı kazı ve mühendislik dolgusu hacmi dâhil edilmemiştir.

Proje dolgusu imalatları sonrasında, oluşan oturma miktarının ve bununla birlikte geliştirilen iyileştirme yöntemi sonuçlarının arazide kontrolü için 82 adet oturma kolonuna ve 362 adet oturma plakasına ait 5658 adet ölçüm verisinden yararlanılmıştır. Hesaplanan konsolidasyon oturması miktarları, 82 adet oturma kolunu lokasyonun, 5 adedi hariç tümünde, gerçekleşen oturma miktarlarından daha fazladır. Bu 5 lokasyonda, gerçekleşen oturma miktarları hesaplanandan 1.01 ila 2 kat fazladır.

Tüm ölçüm sonuçlarına göre, geliştirilen iyileştirme yöntemiyle hesaplanan ve ölçümlerle tespit edilen konsolidasyon oturmasına ait veriler arasında, determinasyon katsayısı  $R^2=0.657$  hesaplanmıştır. İlişki zayıf ( $R^2<0.5$ ) olmasa da düşük düzeydedir. PLK – 37 ve PLK – 11 oturma kolonlarına ait ilişkiler genel yayılımdan aşırı derecede sapmaktadır. PLK – 37 ve PLK – 11 verileri sırasıyla toplam veri içinden çıkartılarak determinasyon katsayısı hesaplandığında, sırasıyla  $R^2=0.879$  ve  $R^2=0.918$  değerleri belirlenmiştir. Bu iki durumda da, hesaplanan konsolidasyon oturma miktarı değerleri, oturma miktarının iyi düzeyde ilişkiliyle hesaplandığı ve geliştirilen yöntemin konsolidasyonu istenilen düzeyde sınırlandırmada başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Oturma plakası ölçümleri ile yapılan değerlendirmede, hesaplanan oturma miktarı değerlerinden az olmakla birlikte, diğer oturma plakası ölçümlerine göre, TEM Bağlantı Tüneli batı kesiminde şev başlangıcına yakın ve şeve paralel bir hat boyunca konumlandırılmış oturma plakalarına ait ölçüm sonuçlarının, diğer ölçüm sonuçlarından daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durumun nedeni, proje dolgusunda yanal yayılma veya bu dolgu altındaki zeminde konsolidasyon hızının farklılık göstermesi olarak iki farklı şekilde yorumlanabilir. Konsolidasyon hızına, Leroueil ve diğ. (1986), Imai ve Tang (1992), Leroueil (1996), Degago ve diğ. (2011) ve Yin ve diğ. (2017, 2011) gibi birçok çalışmada sunulduğu şekilde, drenaj boyunun önemli etkisi bulunmaktadır. Ancak, aynı lokasyonda bulunan oturma kolonlarında benzer bir farklılık görülmemesi nedeniyle bu yaklaşım benimsenmemiştir. Oturma kolonu ölçümlerinde gözlenmeyen bu durumun, oturma plakası ölçümlerinde tespiti, şevi oluşturan dolgunun yanal yayıldığı şeklinde yorumlanmıştır. Çalışma alanında, benimsenen bu yaklaşımın denetlenmesi için, inklinometre gibi yanal yer değiştirmenin kontrol edilebileceği

bir ölçüm sistemi bulunmamaktadır. Ancak, oluşturulan dolgunun veya zemin katmanının, şev ve/veya yamaca olan mesafesinin konsolidasyon sürecinde etkisi, her zaman için değerlendirmeye alınması gerekmektedir.

Konsolidasyon süreci, zemin katmanında gerçekleşen gerilme artışı ile başlamakta ve bu gerilme artışı ile yükselen boşluk suyu basıncının sönümlenmesiyle sonlanmaktadır. Gerilme değişimi konsolidasyon sonucu ortaya çıkacak oturma miktarını kontrol ederken, bu değişime karşılık gözeneklerdeki suyun hareketi ise oturma miktarı hızının belirlenmesinde etkin rol oynamaktadır. Konsolide olabilir zemin katmanları üzerinde gerçekleştirilecek projelerde, meydana gelecek gerilme artışı, proje özelliklerine bağlı olarak, istenilen düzeye indirilemeyecek veya çoğu zaman değiştirilemeyecek durumdadır. Bu noktadan hareketle, geliştirilen iyileştirme yöntemleri, zemin katmanının özelliklerinin değiştirilmesine odaklanmakta, zemin katmanı kalınlığı elverdiği bazı durumlarda ise bu katman ortamdaki tamamen uzaklaştırılmaktadır. Çalışmada ise, dolgu yükü altında konsolidasyonun sınırlandırılmasına yönelik, konsolide olabilir zeminin ortamdaki uzaklaştırılmasını en aza indirecek, böylelikle proje maliyetlerini önemli ölçüde düşürecek bir yöntem olarak, gerekli ölçüde zemin katmanının ortamdaki uzaklaştırılmasını, yerli yerinde bırakılan zemin katmanında ise proje kriterleri içerisinde belirlenen düzeyde bir oturma sağlanmasını hedefleyen konsolidasyon sınırlandırma yöntemi geliştirilmiştir. Yöntem, avantajları birçok bilimsel çalışmayla kanıtlanmış, doğrusal veya doğrusal olmayan zemin modelleri kullanarak, günümüzde kapsamlı bilgisayar yazılımlarıyla gerçekleştirilebilen analizlere alternatif olarak geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemle, bu yazılımların aksine, belirli bir zemin modelinde konsolidasyon süreçlerinin analizi yerine, kazılarak uzaklaştırılacak zemin katmanı kalınlığı belirlenmektedir. Yayılımı ve kalınlığı tanımlanabilen, istenilen sayıda zemin katmanı ve geometrisi için uygulanabilmektedir. Yazılımlara oranla, yöntem hazırlık aşaması ve analiz tamamlanması süresi çok daha kısadır. Geliştirilen hesap yöntemi doğrusal bir yöntem niteliğindedir. Konsolidasyon sürecinin farklı aşamalarında, etkin parametrelerde değişiklik yapılabilecek doğrusal olmayan hesap yöntemi için çalışmalar ilerleyen dönemlerde gerçekleştirilmelidir.



## KAYNAKLAR

- Abbott, M.B., 1960, One-Dimensional Consolidation of Multi-Layered Soils, *Géotechnique*, 10(4), 151–165. doi: 10.1680/geot.1960.10.4.151.
- Aboshi, H., Yoshikuni, H. ve Maruyama, S., 1970, Constant Loading Rate Consolidation Test, *Soils and Foundations*, 10(1), 43–56. doi: 10.3208/sandf1960.10.43.
- Airbus, 2005, *Airbus A380, Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning*, Airbus S.A.S., Haute-Garonne - France.
- Al-Shamrani, M.A. ve Dhowian, A.W., 1997, Preloading for reduction of compressibility characteristics of sabkha soil profiles, *Engineering Geology*, Elsevier, 48(1–2), 19–41. doi: 10.1016/s0013-7952(97)81912-6.
- Ameratunga, J., Sivakugan, N. ve Das, B.M., 2016, *Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*, Springer India, New Delhi (Developments in Geotechnical Engineering). doi: 10.1007/978-81-322-2629-1.
- ARUP, 2009, *Sabiha Gökçen Havalimanı 2028 Ana Plan Raporu*, İstanbul.
- ASCE, 1941, *Soil Mechanics Nomenclature: Manual of Engineering Practice No.22*, American Society of Civil Engineers, New York.
- ASCE, 1978, *Soil Improvement: History, Capabilities, and Outlook*, New York: American Society of Civil Engineers.
- ASTM International, 2011, D2435/D2435M-11 Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, *ASTM Volume 04.08 Soil and Rock (I): D420 – D5876* içinde, ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/D2435\_D2435M-11.
- ASTM International, 2012, D4186/D4186M-12e1 Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Saturated Cohesive Soils Using Controlled-Strain Loading, *ASTM Volume 04.08 Soil and Rock (I): D420 – D5876* içinde, ASTM International, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/D4186\_D4186M-12E01.
- Azzouz, A.S., Krizek, R.J. ve Corotis, R.B., 1976, Regression analysis of soil compressibility., *Soils and Foundations*, 16(2), 19–29. doi: 10.3208/sandf1972.16.2\_19.
- Babin, C., 1973, Bivalvia of the Kartal Formation of Devonian age, *Paleozoic of İstanbul* içinde, Kaya, O. (ed.), Ege Üniversitesi Fen Fakültesi, İzmir, 37–89.
- Baykal, M.F., 1962, *İstanbul Boğazı Batısındaki Sahanın Jeolojik Etüdü*, Ankara.
- Becker, D.E., Crooks, J.H.A., Been, K. ve Jefferies, M.G., 1987, Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 24(4), 549–564. doi: 10.1139/t87-070.
- Bieniawski, Z.T., 1989, *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*, John Wiley & Sons. ISBN: 0471601721.
- Biot, M.A., 1941, General Theory of Three-Dimensional Consolidation, *Journal of Applied*

- Physics*, AIP, 12(2), 155–164. doi: 10.1063/1.1712886.
- Bishop, A. ve Gibson, R., 1964, The Influence of the Provisions for Boundary Drainage on Strength and Consolidation Characteristics of Soils Measured in the Triaxial Apparatus, *Laboratory Shear Testing of Soils* içinde, ASTM Committee D-18 (ed.), Bölüm: 1, ASTM International, West Conshohocken, PA, 435–451. doi: 10.1520/STP30020S.
- Boone, S.J., 2010, A critical reappraisal of “preconsolidation pressure” interpretations using the oedometer test, *Canadian Geotechnical Journal*, 47(3), 281–296. doi: 10.1139/T09-093.
- Bowles, J.E., 1987, Elastic Foundation Settlements on Sand Deposits, *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(8), 846–860. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1987)113:8(846).
- Bowles, J.E., 1996, *Foundation analysis and design*. 5. baskı, McGraw-Hill Book Company, New York. ISBN: 0079122477.
- Brand, E.W. ve Premchitt, J., 1989, Comparison of the predicted and observed performance of the Muar test embankment, *Intn. Symp. on Trial Embankments on Malaysian Marine clays* içinde, Kuala Lumpur, 1–28.
- Briaud, J.L., 1993, *The Pressuremeter*, AA Balkema, Rotterdam, Netherlands. ISBN: 9789061911258.
- Brumund, W.F., Jonas, E. ve Ladd, C.C., 1976, Estimating in Situ Maximum Past (Preconsolidation) Pressure of Saturated Clays from Results of Laboratory Consolidometer Tests, *Estimation of Consolidation Settlement: Manual of Practice (Special report:163 - Transportation Research Board)* içinde, National Research Council (U.S.) (ed.), Bölüm: 1, National Academy of Sciences, Washington, D.C., 4–12.
- Burland, J.B., 1970, Discussion, *Proceedings of Conferenve In Situ Invest. Soil Rocks* içinde, British Geotechnical Society, London, 61–62.
- Burland, J.B., 1990, On the compressibility and shear strength of natural clays, *Géotechnique*, 40(3), 329–378. doi: 10.1680/geot.1990.40.3.329.
- Burland, J.B., McKenna, J.M. ve Thomlinson, M.J., 1976, Preface: ground treatment by deep compaction, *Geotechnique*, 25, 1–2.
- Burmister, D.M., 1952, The Application of Controlled Test Methods in Consolidation Testing, *Symposium on Consolidation Testing of Soils* içinde, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 83-83–16. doi: 10.1520/STP48299S.
- Butterfield, R., 1979, A natural compression law for soils (an advance on  $e - \log p'$ ), *Géotechnique*, 29(4), 469–480. doi: 10.1680/geot.1979.29.4.469.
- Carls, P., 1973, Strophomenids of the Lower Devonian Kartal formation, *Paleozoic of İstanbul* içinde, Kaya, O. (ed.), Ege Üniversitesi Fen Fakültesi, İzmir, 89–94.
- Casagrande, A., 1936, The Determination of the Pre-Consolidation Load and Its Practical Significance, *Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* içinde, Casagrande, A., Rutledge, P. C., ve Watson, J. D. (ed.), Graduate School of Engineering, Harvard University, Cambridge, 60–64.
- Casagrande, A. ve Fadum, R.E., 1940, *Notes on Soil Testing for Engineering Purposes*, Harvard University, Graduate School of Engineering, Cambridge, MA.

- CEN/ISO, 2017, CEN/ISO/TS 17892-5:2017- Incremental loading oedometer test, *Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil*, 1. baskı içinde, European Committee for Standardization Technical Committee CEN/TC 182 (ed.), Bölüm: 5, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Chien, S.C., Ou, C.Y. ve Lee, Y.C., 2010, A novel electroosmotic chemical treatment technique for soil improvement, *Applied Clay Science*, 50(4), 481–492. doi: 10.1016/j.clay.2010.09.014.
- Christian, J.T. ve Carrier III, D.W., 1978, Janbu, Bjerrum and Kjaernsli's chart reinterpreted, *Canadian Geotechnical Journal*, 15(1), 123–128. doi: 10.1139/t78-010.
- Clayton, C.R.I., 1993, *The standard penetration test (SPT): methods and use Construction Industry Research and Information Association*, CIRIA, London. ISBN: 9780860174196.
- Conte, E. ve Troncone, A., 2006, One-dimensional consolidation under general time-dependent loading, *Canadian Geotechnical Journal*, 43(11), 1107–1116. doi: 10.1139/t06-064.
- Crawford, C.B., 1964, Interpretation of the consolidation tests, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 90(SM5), 93–108.
- Crooks, J.H.A., Becker, D.E., Jefferies, M.G. ve McKenzie, K., 1984, Yield behaviour and consolidation. I: Pore pressure response, *Sedimentation Consolidation Models—Predictions and Validation* içinde, ASCE, 356–381.
- Dalgıç, S. ve Şimşek, O., 2002, Settlement predictions in the Anatolian motorway, Turkey, *Engineering Geology*, Elsevier, 67(1–2), 185–199. doi: 10.1016/S0013-7952(02)00154-0.
- Darcy, H., 1856, *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon: Distribution d'eau et Filtrage des Eaux*, Editör V. Dalmont, Paris.
- Das, B.M., 2008, *Advanced Soil Mechanics*. 3. baskı, Taylor & Francis Group, New York - USA. ISBN: 0-415-42026-1.
- Das, B.M., 2019, *Advanced Soil Mechanics*. 5. baskı, CRC Press, Boca Raton. doi: 10.1201/9781351215183.
- Das, B.M. ve Sobhan, K., 2014, *Principles of Geotechnical Engineering*. 8. baskı, Cengage Learning, Stamford. ISBN: 1-133-10867-9.
- Das, B.M. ve Sobhan, K., 2018, *Principles of geotechnical engineering*. 9. baskı, Cengage Learning, Boston. ISBN: 978-1-305-97093-9.
- Degago, S.A., Grimstad, G., Jostad, H.P., Nordal, S. ve Olsson, M., 2011, Use and misuse of the isotache concept with respect to creep hypotheses A and B, *Géotechnique*, 61(10), 897–908. doi: 10.1680/geot.9.P.112.
- Drnevich, V., Jose, B., Sridharan, A. ve Abraham, B., 1989, Log-Log Method for Determination of Preconsolidation Pressure, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 12(3), 230. doi: 10.1520/GTJ10974J.
- Duncan, J.M., 1993, Limitations of Conventional Analysis of Consolidation Settlement, *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(9), 1333–1359. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:9(1333).
- Flodin, N. ve Broms, B., 1981, Historical development of civil engineering in soft clay, *Developments in Geotechnical Engineering* içinde, Brand, E. W. ve Brenner, R. P. (ed.), Bölüm: 1, Elsevier, New York, 25–156. doi: 10.1016/B978-0-444-41784-8.50004-6.

- Fox, E.N., 1948, The Mean Elastic Settlement of a Uniformly Loaded Area at a Depth below the Ground Surface, *Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* içinde, The International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Rotterdam, 129–132.
- Frontard, J., 1914, Notice sur l'accident de la digue de Charmes, *Annales des Ponts et Chaussées* içinde, 173–280.
- Gandl, J., 1973, Trilobites from the Devonian of İstanbul, *Paleozoic of İstanbul* içinde, Kaya, O. (ed.), Ege Üniversitesi Fen Fakültesi, İzmir, 95–96.
- Gedik, İ., Duru, M., Pehlivan, Ş. ve Timur, E., 2005, 1:50000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları No:15 Bursa-G22B Paftası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- Germaine, J.T. ve Germaine, A. V., 2009, *Geotechnical Laboratory Measurements for Engineers*, *Geotechnical Laboratory Measurements for Engineers*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9780470548790.
- Gilboy, G., 1936, Improved soil testing methods, *Engineering News Record of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* içinde, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Cambridge, 732–734. Erişim adresi: [https://www.issmge.org/uploads/publications/1/44/1936\\_02\\_0080.pdf](https://www.issmge.org/uploads/publications/1/44/1936_02_0080.pdf).
- Giroud, J.P., 1972, Settlement of Rectangular Foundation on Soil Layer, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98(1), 149–154.
- Gray, H., 1936, Stress distribution in elastic solids, *Proceedings International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* içinde, 157–168.
- Haas, W., 1968, Das Alt-Paläozoikum von Bithynien (Nordwest Türkei), *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, 131, 178–242.
- Hamilton, J.J. ve Crawford, C.B., 1960, Improved Determination of Preconsolidation Pressure of a Sensitive Clay, *Papers on Soils 1959 Meetings* içinde, ASTM Committee D-18 (ed.), ASTM International, West Conshohocken, PA, 254–271. doi: 10.1520/STP44323S.
- Hanna, D., Sivakugan, N. ve Lovisa, J., 2013, Simple Approach to Consolidation Due to Constant Rate Loading in Clays, *International Journal of Geomechanics*, 13(2), 193–196. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000195.
- Hansbo, S., 1957, *New approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test*, *Royal Swedish Geotechnical Institute Proceedings*, No:14, Stockholm. Erişim adresi: <http://swedgeo.diva-portal.org/smash/get/diva2:1300142/FULLTEXT01.pdf>.
- Hight, D.W., Jardine, R.J. ve Gens, A., 1987, The behaviour of soft clays, *Embankments on soft clays* içinde, Bölüm: 2, The Public Works Research Center of Greece, 33–158.
- Holtz, R.D. ve Kovacs, W.D., 1981, *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice Hall, New Jersey. ISBN: 0134843940.
- Hsu, T.-W. ve Lu, S.-C., 2006, Behavior of One-Dimensional Consolidation under Time-Dependent Loading, *Journal of Engineering Mechanics*, 132(4), 457–462. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2006)132:4(457).
- Huerta, A., Kriegsmann, G.A. ve Krizek, R.J., 1988, Permeability and Compressibility of Slurries from Seepage-Induced Consolidation, *Journal of Geotechnical Engineering*,

- 114(5), 614–627. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:5(614).
- ICAO, 2009, Annex 14 - Volume I: Aerodrome Design and Operations, *ICAO Annexes to the Convention on International Civil Aviation*, 5. baskı içinde, International Civil Aviation Organization, Montréal, 328.
- ICAO, 2018, Annex 14 - Volume I: Aerodrome Design and Operations, *ICAO Annexes to the Convention on International Civil Aviation*, 8. baskı içinde, International Civil Aviation Organization, Montréal, 354.
- Imai, G., 1979, Development of a new consolidation test procedure using seepage force., *Soils and Foundations*, 19(3), 45–60. doi: 10.3208/sandf1972.19.3\_45.
- Imai, G. ve Tang, Y., 1992, A constitutive equation of one-dimensional consolidation derived from inter-connected tests., *Soils and Foundations*, 32(2), 83–96. doi: 10.3208/sandf1972.32.2\_83.
- Jacobsen, H.M., 1992, Bestemmelse af forbelastningstryk i laboratoriet, *Proceedings fra 11. Nordiske Geoteknikermøde* içinde, Danish Geotechnical Society, Aalborg, 455–460.
- Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T. ve Lancellotta, R., 1985, New developments in field and laboratory testing of soils, *11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* içinde, San Francisco, 57–153. Erişim adresi: [https://www.issmge.org/uploads/publications/1/34/1985\\_01\\_0002.pdf](https://www.issmge.org/uploads/publications/1/34/1985_01_0002.pdf).
- Janbu, N., 1965, Consolidation of clay layers based on non-linear stress-strain, *Proceedings 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* içinde, Montreal, 83–87.
- Janbu, N., 1967, Settlement Calculations Based on the Tangent Modulus Concept, *Soil Mechanics and Foundation Engineering* içinde, The Technical University of Norway, Trondheim, 32.
- Janbu, N., Bjerrum, L. ve Kjaernsli, B., 1956, *Veiledning ved løsning av fundamenteringsoppgaver*, Publication 16, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.
- Janbu, N., Tokheim, O. ve Senneset, K., 1981, Consolidation tests with continuous loading, *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* içinde, Stockholm, 645–654.
- Kabbaj, M., Tavenas, F. ve Leroueil, S., 1988, In situ and laboratory stress–strain relationships, *Géotechnique*, ICE Publishing, 38(1), 83–100. doi: 10.1680/geot.1988.38.1.83.
- Kaya, O., 1973, The Devonian and Lower Carboniferous Stratigraphy of the İstinye, Bostancı and Büyükkada Subareas, *Palaeozoic of Istanbul* içinde, Kaya, O. (ed.), Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Enstitüsü, İzmir, 1–36.
- Kaya, O., 1978, İstanbul Ordovisyan ve Silüryeni, *Yerbilimleri*, 4(1–2), 1–22.
- Kim, Y.T. ve Leroueil, S., 2001, Modeling the viscoplastic behaviour of clays during consolidation: application to Berthierville clay in both laboratory and field conditions, *Canadian Geotechnical Journal*, NRC Research Press, 38(3), 484–497. doi: 10.1139/t00-108.
- Kootahi, K., 2017, Simple Index Tests for Assessing the Recompression Index of Fine-Grained Soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(4), 06016027–1–6. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001624.



- Kulhawy, F.H. ve Mayne, P.W., 1990, *Manual on estimating soil properties for foundation design*, United States. Erişim adresi: <https://www.osti.gov/servlets/purl/6653074>.
- Kullmann, J., 1973, Goniatite-Coral Associations from the Devonian of Istanbul, *Paleozoic of İstanbul* içinde, Kaya, O. (ed.), Ege Üniversitesi Fen Fakültesi, İzmir, 97–116.
- Ladd, C.C. ve Foote, R., 1974, A new design procedure for stability of soft clays, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 100(GT7), 763–786.
- Ladd, C.C., Foote, R., Ishihara, K., Schlosser, F. ve Poulos, H.G., 1977, Stress-deformation and strength characteristics, *State-of-the-Art Reports in 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* içinde, Tokyo, 421–494.
- Larsson, R., 1980, Undrained shear strength in stability calculation of embankments and foundations on soft clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 17(4), 591–602. doi: 10.1139/t80-066.
- Lee, K., 1981, Consolidation with constant rate of deformation, *Géotechnique*, 31(2), 215–229. doi: 10.1680/geot.1981.31.2.215.
- Leonards, G.A., 1962, Engineering Properties of Soils, *Foundation Engineering* içinde, Leonards, G. A. (ed.), Bölüm: 2, McGraw-Hill Book Company, New-York, 107–139.
- Leonards, G.A. ve Altschaeffl, A.G., 1964, Compressibility of Clay, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 90(5), 133–155.
- Leroueil, S., 1988, Tenth Canadian Geotechnical Colloquium: Recent developments in consolidation of natural clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 25(1), 85–107. doi: 10.1139/t88-010.
- Leroueil, S., 1996, Compressibility of Clays: Fundamental and Practical Aspects, *Journal of Geotechnical Engineering*, American Society of Civil Engineers, 122(7), 534–543. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:7(534).
- Leroueil, S. ve Kabbaj, M., 1985, General Discussion on Consolidation Theory and Testing, *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation* içinde, Yong, R. ve Townsend, F. (ed.), ASTM International, West Conshohocken, PA, 719–723. doi: 10.1520/STP34644S.
- Leroueil, S. ve Kabbaj, M., 1987, Discussion of “ Settlement Analysis of Embankments on Soft Clays ” by G. Mesri and Y. K. Choi (April, 1985, Vol. 111, No. 4), *Journal of Geotechnical Engineering*, 113(9), 1067–1070. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1987)113:9(1067).
- Leroueil, S., Kabbaj, M. ve Tavenas, F., 1988, Study of the validity of a .SIGMA.v-.EPSILON.v-.EPSILON.v model in in situ conditions., *Soil and Foundations*, 28(3), 13–25. doi: 10.3208/sandf1972.28.3\_13.
- Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F. ve Bouchard, R., 1985, Stress–strain–strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays, *Géotechnique*, 35(2), 159–180. doi: 10.1680/geot.1985.35.2.159.
- Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F. ve Bouchard, R., 1986, Discussion: Stress—strain—strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays, *Géotechnique*, 36(2), 283–290. doi: 10.1680/geot.1986.36.2.283.
- Leroueil, S., Samson, L. ve Bozozuk, M., 1983, Laboratory and field determination of preconsolidation pressures at Gloucester., *Canadian Geotechnical Journal*, Departement de Genie Civil, Universite Laval, Quebec, P.Q., Canada G1K 7P4., Canada, 20(3), 477–490. doi: 10.1139/t83-056.

- Lowe, J., Jonas, E. ve Obrican, V., 1969, Controlled Gradient Consolidation Test, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 95(SM1), 77–97.
- Lyell, C., 1871, Consolidation of strata and petrification of fossils, *The student's elements of geology*, 7. baskı içinde, Bölüm: 4, Harper & Brothers, New York, 60–69.
- Mayne, P. ve Kemper, J., 1988, Profiling OCR in Stiff Clays by CPT and SPT, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 11(2), 139–147. doi: 10.1520/GTJ10960J.
- Mayne, P.W. ve Mitchell, J.K., 1988, Profiling of overconsolidation ratio in clays by field vane, *Canadian Geotechnical Journal*, NRC Research Press, 25(1), 150–157. doi: 10.1139/t88-015.
- Mayne, P.W. ve Poulos, H.G., 1999, Approximate Displacement Influence Factors for Elastic Shallow Foundations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(6), 453–460. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1999)125:6(453).
- Mesri, G. ve Choi, Y.K., 1985, The uniqueness of the end-of-primary (EOP): void ratio-effective stress relationship., *11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* içinde, San Francisco, 587–590.
- Mesri, G. ve Godlewski, P.M., 1977, Time- and stress-compressibility interrelationship, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(GT5), 417–430.
- Mesri, G. ve Rokhsar, A., 1974, Theory of consolidation for clays, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 100(GT8), 889–904. Erişim adresi: <http://trid.trb.org/view.aspx?id=24850>.
- Mesri, G. ve Vardhanabhuti, B., 2006, Closure to “Secondary Compression” by G. Mesri and B. Vardhanabhuti, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(6), 817–818. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:6(817).
- Meyerhof, G.G., 1948, An investigation of the bearing capacity of shallow footings on dry sand, *2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* içinde, Rotterdam, 237–243.
- Meyerhof, G.G., 1951, The ultimate bearing capacity of foundations, *Geotechnique*, 2(4), 301–332.
- Nacci, V.A., Wang, M.C. ve Demars, K.R., 1975, Engineering behavior of calcareous soils, *Proceedings of the Civil Engineering in the Oceans III* içinde, American Society of Civil Engineers, New York, 380–400.
- Nagaraj, T.S. ve Srinivasa Murthy, B.R., 1985, Prediction of the Preconsolidation Pressure and Recompression Index of Soils, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 8(4), 199–202. doi: 10.1520/GTJ10538J.
- Nakase, A., Kamei, T. ve Kusakabe, O., 1988, Constitutive Parameters Estimated by Plasticity Index, *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(7), 844–858. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:7(844).
- Nash, D.F.T. ve Ryde, S.J., 2001, Modelling consolidation accelerated by vertical drains in soils subject to creep, *Géotechnique*, 51(3), 257–273. doi: 10.1680/geot.2001.51.3.257.
- Nicholson, P.G., 2014, *Soil Improvement and Ground Modification Methods*. First, *Soil Improvement and Ground Modification Methods*, First, Butterworth-Heinemann, Boston. doi: 10.1016/C2012-0-02804-9.

- Oakman, C., Godden, S., Jarvis, S., Mian, J. ve Collings, A., 2010, *Sabiha Gokcen International Airport 2nd Runway, Feasibility Study Report*, İstanbul: Over Arup and Partners International Ltd.
- Oakman, C., Godden, S., Jarvis, S., Mian, J. ve Collings, A., 2011, *Sabiha Gökçen Uluslararası Havaalanı 2. Pist Avan Projesi Geoteknik ve Toprak İşleri Ana Raporu*, Editör C. Oakman, S. Jarvis, ve A. Phear, İstanbul: Over Arup and Partners International Ltd.
- Ohde, J., 1938, Zur theorie des erddruckes unter besonderer Berücksichtigung der Erddruckverteilung (The theory of earth pressure with special reference to earth pressure distribution), *Bautechnik*, Ernst & Sohn, 16, 150–761.
- Oikawa, H., 1987, Compression curve of soft soils., *Soil and Foundations*, 27(3), 99–104. doi: 10.3208/sandf1972.27.3\_99.
- Olson, R.E., 1977, Consolidation under time-dependent loading, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(GT1), 55–60.
- Olson, R.E., 1998, Settlement of Embankments on Soft Clays (The Thirty-First Terzaghi Lecture), *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(4), 278–288. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:4(278).
- Önal, M., 1980, Kınalıada gel-git düzlüğü çökelleri, *Türkiye Jeoloji Mühendisliği İkinci Bilimsel ve Teknik Kongresi Bildiri Özleri* içinde, Ankara.
- Önal, M., 1981, İstanbul Ordovisiyen ve Silüriyen istifinin çökme ortamları, *İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, 2(3–4), 161–177.
- Önal, M., 1982, *Pendik bölgesi ile adaların jeolojisi ve sedimenter özellikleri*, İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü.
- Önal, M., 1988, İstanbul Devoniyen çökellerinin sedimenter özellikleri, *İstanbul Üniversitesi Yerbilimleri Fakültesi Yerbilimleri Dergisi*, 6(1–2), 93–108.
- Onitsuka, K., Hong, Z., Hara, Y. ve Yoshitake, S., 1995, Interpretation of Oedometer Test Data for Natural Clays, *Soils and Foundations*, 35(3), 61–70. doi: 10.3208/sandf.35.61.
- Osterberg, J.O., 1957, Influence values for vertical stresses in a semi-infinite mass due to an embankment loading, *Proceedings of the 4th International conference on soil mechanics and foundation engineering* içinde, 393–394.
- OYO International Corporation, 2009, *Anadolu Yakası Mikrobölgeleme Rapor ve Haritalarının Yapılması Sonuç Raporu*, Editör T. Tatsukichi, İstanbul: T.C. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü.
- Özgül, N., 2005, *İstanbul Dolayının Temel Jeolojik Özellikleri*, İstanbul.
- Özgül, N. vd., 2005, *İstanbul İl Alanının Genel Jeoloji Özellikleri*, İstanbul: T.C. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem Risk Yönetimi ve Kentsel İyileştirme Daire Başkanlığı Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü.
- Özgül, N., 2011, *İstanbul İl Alanının Jeolojisi*. Yönetici Ö, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Deprem ve Zemin İnceleme Müdürlüğü, İstanbul.
- Öztoprak, S., 2002, *Yüklenmiş Zeminlerde Gerilme-Deformasyon Davranışının Teorik Tanımlaması ve Modellenmesi*, İstanbul Üniversitesi.
- Paackelmann, W., 1938, *Neue Beiträge zur Kenntnis der Geologie, Palaeontologie und*

*Petrographie der Umgegend von Konstantinopel: Geologie Thraziens, Bithyniens und der Prinzeninseln*, Preussischen Geologischen Landesanstalt, Berlin.

- Pane, V., Croce, P., Znidarcic, D., Ko, H.-Y., Olsen, H.W. ve Schiffman, R.L., 1983, Effects of consolidation on permeability measurements for soft clay, *Géotechnique*, 33(1), 67–72. doi: 10.1680/geot.1983.33.1.67.
- Park, J.H. ve Koumoto, T., 2004, New Compression Index Equation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(2), 223–226. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:2(223).
- Peng, J., Ye, H.M. ve Alshawabkeh, A.N., 2015, Soil improvement by electroosmotic grouting of saline solutions with vacuum drainage at the cathode, *Applied Clay Science*, 114, 53–60. doi: 10.1016/j.clay.2015.05.012.
- Prandtl, L., 1920, Über die härte plastischer körper (On the hardness of plastic bodies), *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1920, 74–85. Erişim adresi: <https://eudml.org/doc/59075>.
- Raju, N., Pandian, N. ve Nagaraj, T., 1995, Analysis and Estimation of the Coefficient of Consolidation, *Geotechnical Testing Journal*, 18(2), 252–258. doi: 10.1520/GTJ10325J.
- Reissner, H., 1924, Zum Erddruckproblem (The earth pressure problem), *First International Congress Applied Mechanics* içinde, 295.
- Rendon-Herrero, O., 1983, Erratum: “Universal Compression Index Equation” by Oswald Rendon-Herrero (May, 1983), *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(10), 1349–1349. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:10(1349).
- Robinson, R.G. ve Allam, M.M., 1996, Determination of Coefficient of Consolidation from Early Stage of Log t Plot, *Geotechnical Testing Journal*, 19(3), 316–320. doi: 10.1520/GTJ10358J.
- Robinson, R.G. ve Allam, M.M., 2003, Compression Index of Clays and Silts, *Journal of Testing and Evaluation*, 31(1), 22–27. doi: 10.1520/JTE12353J.
- Rowe, P.W., 1972, Embankments on soft alluvial ground, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 5(1–2), 127 LP – 141. doi: 10.1144/GSL.QJEG.1972.005.01.13.
- Samarasinghe, A.M., Huang, Y.H. ve Drnevich, V.P., 1982, Permeability and consolidation of normally consolidated soils, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 108(6), 835–850.
- Schiffman, R.L., 1958, Consolidation of soil under time-dependant loading and varying permeability, *Proceedings of the Thirty-Seventh Annual Meeting of the Highway Research Board* içinde, Highway Research Board, Washington, D.C., 584–617. Erişim adresi: <https://trid.trb.org/view/126602>.
- Schmertmann, J.H., 1955, The undisturbed consolidation behavior of clay, *Transactions of ASCE*, 120, 1201–1233.
- Şengör, A.M.C., 2011, İstanbul Boğazı niçin Boğaziçi’nde açılmıştır, *Fiziki Coğrafya Araştırmaları Sistemik ve Bölgesel* içinde, Bölüm: 1, Türkiye Coğrafya Kurumu, İstanbul, 1–51.
- Shankland, E.C., 1897, Steel Skeleton Construction in Chicago, *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 128(1897), 1–27. doi: 10.1680/imotp.1897.19394.

- Silva, P.F., 1970, A new graphical construction for determination of the preconsolidation stress of a soil sample, *Proceedings of the 4th Brazilian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* içinde, Rio de Janeiro, 225–232.
- Şimşek, O. ve Dalgıç, S., 1997, Düzce Ovası killerinin konsolidasyon özellikleri ve jeolojik evrim ile ilişkisi, *Geological Bulletin of Turkey*, 40(2), 29–38.
- Sivakugan, N., Lovisa, J., Ameratunga, J. ve Das, B.M., 2014, Consolidation settlement due to ramp loading, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 8(2), 191–196. doi: 10.1179/1939787913Y.0000000017.
- Sivakugan, N. ve Vigneswaran, B., 1991, A simple analysis of constant rate of loading in clays, *Proc. 13th Canadian Congress of Applied Mechanics, Winnipeg, Manitoba, Canada* içinde, 790–791.
- Sivaram, B. ve Swamee, P., 1977, A computational method for consolidation-coefficient., *Soil and Foundations*, 17(2), 48–52. doi: 10.3208/sandf1972.17.2\_48.
- Skempton, A.W., 1960, Life and Achievements: Significance of Terzaghi's Concept of Effective Stress, *From Theory to Practice in Soil Mechanics* içinde, Bölüm: 1, John Wiley & Sons, Inc., New York, 42–54.
- Smith, R.E., 1967, *A study of consolidation of cohesive soils under constant rates of strain*, Department of Civil Engineering, North Carolina State University.
- Smith, R.E. ve Wahls, H.E., 1969, Consolidation Under Constant Rates of Strain, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 95(SM2), 519–539.
- Smith, W.S., 1892, The building problem in Chicago from an engineering standpoint, *Illinois Technograph*, Illini Publishing Company, Illinois, 6, 9–21.
- Sorby, H.C., 1908, On the Application of Quantitative Methods to the Study of the Structure and History of Rocks, *Quarterly Journal of the Geological Society*, 64(1–4), 171–233. doi: 10.1144/GSL.JGS.1908.064.01-04.12.
- Sridharan, A. ve Prakash, K., 1985, Improved Rectangular Hyperbola Method for the Determination of Coefficient of Consolidation, *Geotechnical Testing Journal*, 8(1), 37–40. doi: 10.1520/GTJ10855J.
- Sridharan, A. ve Prakash, K., 1993,  $\delta$ -t/ $\delta$  Method for the Determination of Coefficient of Consolidation, *Geotechnical Testing Journal*, 16(1), 131–134. doi: 10.1520/GTJ10276J.
- Stas, C. V ve Kulhawy, F.H., 1984, *Critical evaluation of design methods for foundations under axial uplift and compression loading.*, United States. Erişim adresi: <https://www.osti.gov/servlets/purl/6221597>.
- Steinbrenner, W., 1934, Tafeln zur Setzungsberechnung, *Die Strasse*, 1, 121–124.
- STFA, 2007, *HABOM design study continuation geotechnical investigation works*, İstanbul.
- STFA, 2010, *Sabiha Gokcen International Airport 2nd Runway, Feasibility Study Geotechnical Report*, İstanbul.
- Stolle, D., Vermeer, P.A. ve Bonnier, P.G., 1999, A consolidation model for a creeping clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 754–759. doi: 10.1139/t99-034.
- Su, H.-L., 1958, Procedure for Rapid Consolidation Test, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 84(3), 1–13.



- Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P. ve Leroueil, S., 1983, The permeability of natural soft clays. Part II: Permeability characteristics, *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4), 645–660. doi: 10.1139/t83-073.
- Taylor, D.W., 1942, *Research on consolidation of clays*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Taylor, D.W., 1948, *Fundamentals of Soil Mechanics*, John Wiley and Sons. Erişim adresi: [http://www.researchgate.net/publication/31615299\\_Fundamentals\\_of\\_soil\\_mechanics\\_\\_D.W.\\_Taylor](http://www.researchgate.net/publication/31615299_Fundamentals_of_soil_mechanics__D.W._Taylor).
- Terzaghi, K., 1923, Die berechnung der durchlässigkeitsziffer des tones aus dem Verlauf der hydrodynamischen Spannungserscheinungen, *Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse*, Wien, 132(3/4), 125–138.
- Terzaghi, K., 1925, Principles of soil mechanics, IV—Settlement and Consolidation of Clay, *Engineering News-Record*, McGraw-Hill, New York, 95(22), 874–878.
- Terzaghi, K., 1927, Principles of final soil classification, *Public Roads*, Federal Highway Administration, 8(3), 41–53.
- Terzaghi, K., 1943, *Theoretical soil mechanics*, John Wiley and Sons, Inc., New York. ISBN: 9780471853053.
- Terzaghi, K. ve Fröhlich, O.K., 1936, *Theory of settlement of clay layers*, Franz Deuticke, Leipzig.
- Terzaghi, K. ve Peck, R.B., 1967, *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2. baskı, Wiley, New York.
- Umar, M. ve Sadrekarimi, A., 2017, Accuracy of determining pre-consolidation pressure from laboratory tests, *Canadian Geotechnical Journal*, 54(3), 441–450. doi: 10.1139/cgj-2016-0203.
- Umehara, Y. ve Zen, K., 1980, Constant Rate of Strain Consolidation for Very Soft Clayey Soils, *Soil and Foundations*, 20(2), 79–95. doi: 10.3208/sandf1972.20.2\_79.
- Vermeer, P.A. ve Neher, H.P., 2019, A soft soil model that accounts for creep, *Beyond 2000 in Computational Geotechnics* içinde, Routledge, London, 249–261. doi: 10.1201/9781315138206-24.
- Wang, L.B. ve Frost, J.D., 2004, Dissipated strain energy method for determining preconsolidation pressure, *Canadian Geotechnical Journal*, 41(4), 760–768. doi: 10.1139/t04-013.
- Winterkorn, H.F. ve Fang, H.Y. (ed.), 1975, *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand and Reinhold, New York, NY. ISBN: 0442295642.
- Wissa, A.E.Z., Christian, J.T., Davis, E.H. ve Heiberg, S., 1971, Analysis of consolidation at constant strain rate, *Journal of the soil mechanics and foundations division, ASCE*, 97(SM10), 1393–1413.
- Wroth, C.P., 1984, The interpretation of in situ soil tests, *Géotechnique*, 34(4), 449–489. doi: 10.1680/geot.1984.34.4.449.
- Wroth, C.P. ve Wood, D.M., 1978, The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 15(2), 137–145. doi: 10.1139/t78-014.

- Wu, D., Xu, W. ve Tjuar, R., 2015, Improvements of marine clay slurries using chemicalephysical combined method (CPCM), *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(2), 220–225. doi: 10.1016/j.jrmge.2015.02.001.
- Yin, J.-H. ve Graham, J., 1996, Elastic visco-plastic modelling of one-dimensional consolidation, *Géotechnique*, 46(3), 515–527. doi: 10.1680/geot.1996.46.3.515.
- Yin, J.-H. ve Zhu, J.-G., 1999, Elastic viscoplastic consolidation modelling and interpretation of pore-water pressure responses in clay underneath Tarsiut Island, *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 708–717. doi: 10.1139/t99-041.
- Yin, J., Graham, J., Clark, J.I. ve Gao, L., 1994, Modelling unanticipated pore-water pressures in soft clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 31(5), 773–778. doi: 10.1139/t94-088.
- Yin, Z.-Y., Jin, Y.-F., Shen, S.-L. ve Huang, H.-W., 2017, An efficient optimization method for identifying parameters of soft structured clay by an enhanced genetic algorithm and elastic–viscoplastic model, *Acta Geotechnica*, 12(4), 849–867. doi: 10.1007/s11440-016-0486-0.
- Yin, Z.-Y., Karstunen, M., Chang, C.S., Koskinen, M. ve Lojander, M., 2011, Modeling Time-Dependent Behavior of Soft Sensitive Clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(11), 1103–1113. doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000527.
- Yılmaz, İ., Akgündüz, S. ve Dursun, G., 2018, Stratigraphy and tectonic features of the northern Gebze (Kocaeli), *International Congress on Engineering and Technology Management içinde*, İstanbul - Turkey, 564.
- Yılmaz, Y., Gökaşan, E. ve Erbay, A.Y., 2010, Morphotectonic development of the Marmara Region, *Tectonophysics*, 488(1–4), 51–70. doi: 10.1016/j.tecto.2009.05.012.
- Yong, R. ve Townsend, F. (ed.), 1986, *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation*, *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation*, ASTM International, Pensilvanya. doi: 10.1520/STP892-EB.
- Yuan, Y. ve Whittle, A.J., 2018, A novel elasto-viscoplastic formulation for compression behaviour of clays, *Géotechnique*, 68(12), 1044–1055. doi: 10.1680/jgeot.16.P.276.
- ZETAŞ, 2011, *Sabiha Gokcen International Airport 2nd Runway Preliminary Design, Geotechnical Interpretative Report*, İstanbul.
- Zhu, G. ve Yin, J.-H., 1998, Consolidation of soil under depth-dependent ramp load, *Canadian Geotechnical Journal*, 35(2), 344–350. doi: 10.1139/t97-092.
- Znidarcic, D., Croce, P., Pane, V., Ko, H.-Y., Olsen, H. ve Schiffman, R., 1984, The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays: III. Existing Testing Procedures and Analyses, *Geotechnical Testing Journal*, 7(3), 123–133. doi: 10.1520/GTJ10488J.
- Znidarcic, D. ve Liu, J.C., 1989, Consolidation characteristics determination for dredged materials, *Proceedings of 22nd Annu. Dredging Seminear içinde*, Texas A&M Univ., Texas, 45–65.
- Znidarcic, D. ve Schiffman, R.L., 1982, On Terzaghi's concept of consolidation, *Géotechnique*, 32(4), 387–389. doi: 10.1680/geot.1982.32.4.387.



