GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ AÇISINDAN TAŞIMA KAPASİTESİ VE KAYMA POTANSİYELİNİN YENİ NESİL UYGULAMALARLA DEĞERLENDİRİLMESİ

Doktora Tezi

Burak EVİRGEN

Eskişehir-2017

GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ AÇISINDAN TAŞIMA KAPASİTESİ VE KAYMA POTANSİYELİNİN YENİ NESİL UYGULAMALARLA DEĞERLENDİRİLMESİ

Burak EVİRGEN

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Mustafa TUNCAN

Eskişehir
Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mart, 2017

Bu Tez Çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1403F079 ve 1407F353 no.lu projeler kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Burak EVİRGEN'in ''Geoteknik Mühendisliği Açısından Taşıma Kapasitesi ve Kayma Potansiyelinin Yeni Nesil Uygulamalarla Değerlendirilmesi'' başlıklı tezi 02/03/2017 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı-Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. Mustafa TUNCAN	……...
Üye	: Prof. Dr. Ahmet TUNCAN	……...
Üye	: Prof. Dr. Bekir KARASU	……...
Üye	: Doç. Dr. Nazile URAL	……...
Üye	: Doç. Dr. Volkan OKUR	……...

……

Enstitü Müdürü

ÖZET

GEOTEKNİK MÜHENDİSLİĞİ AÇISINDAN
TAŞIMA KAPASİTESİ VE KAYMA POTANSİYELİNİN YENİ NESİL
UYGULAMALARLA DEĞERLENDİRİLMESİ

Burak EVİRGEN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı
Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mart 2017

Danışman: Prof. Dr. Mustafa TUNCAN

Tezin birinci bölümünde, henüz Türkiye'de uygulaması bulunmayan "Yapay Zemin Dondurma Yöntemi" tüm detayları ile değerlendirilmiştir. Su muhtevası, sıcaklık ve donma süresi parametrelerinin donmuş kil, silt ve kum tipi zeminlerde ani çözülme etkisi altında meydana gelen dayanım ve şekil değiştirme özellikleri incelenmiştir. Bu parametrelere bağlı taşıma kapasitesi denklemleri önerilmiştir. Yapay olarak dondurulmuş kötü derecelendirilmiş çakıllı zeminden alınan karot numuneleri, pratikte en uygun donmanın sağlandığı numuneler ile karşılaştırılmıştır. Laboratuvar ölçeğinde özgün yapay zemin dondurma cihazı tasarımı yapılmıştır. İnce daneli zeminlerde dondurucu boru çapı (veya akışkan hızı), dondurucu boru malzemesi ve dondurucu akışkan gibi değişkenlerin ısı iletimine etkileri incelenip ısıl eğriler çizilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde ise tamamen özgün "Şemsiye Ankraj Yöntemi" için mekanik ve teorik alt yapı önerilmiştir. Ürün tasarımından arazide uygulanmasına kadar tüm aşamaları başarı ile gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak, yöntem laboratuvarda gerçekleştirilen çekme testleri ile değerlendirilmiştir. Olası göçme modları sunulmuştur. Önerilen yöntem alt bileşenleri ile çeşitli kullanım alanları sunmakla birlikte hem taşıma kapasitesinin arttırılması hem de kayma potansiyelinin daha düşük güvenlik sayıları ile giderilmesinde güvenle kullanıma olanak sağlamaktadır.

Sonuç olarak, bu tez tamamen yeni bir tasarım olan ölçekli zemin dondurma cihazını ve iki adet patent başvurusunu içermektedir. Tez sonuçlarının geoteknik mühendisliğindeki inşa süreçlerinde zaman, işçilik ve kaymaya karşı güvenlik gibi ciddi kazançlar sağlaması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yapay zemin dondurma yöntemi, Şemsiye ankraj yöntemi, Zemin taşıma kapasitesi, Kayma potansiyeli, Patent

ABSTRACT

EVALUATION OF BEARING CAPACITY AND SLIDING POTENTIAL WITH NEW GENERATION APPLICATIONS IN SCOPE OF GEOTECHNICAL ENGINEERING

Burak EVİRGEN

Department of Civil Engineering, Geotechnical Division
Anadolu University, Graduate School of Science, March 2017

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa TUNCAN

In the first part of this thesis, the 'Artificial Ground Freezing Method' that has not applied yet in Turkey, evaluated with all details. Strength and displacement properties of frozen clayey, silty and sandy soil specimens were investigated with respect to effects of change in water content, temperature and freezing time parameters under sudden thawing process. Bearing capacity equations were proposed depending on these parameters. Core specimens taken from artificially be frozen poorly graded gravel type of soil, were compared with optimum frozen specimens in practice. The original artificial ground freezing device was designed on the laboratory scale. The effects of variables such as freezing pipe diameter (or fluid velocity), freezing pipe material and fluid used for freezing on the fine grained soils to the heat transfer were investigated and the isotherms were plotted.

In the second part of thesis, mechanical and theoretical background was proposed for completely original 'Umbrella Anchorage Method'. Whole steps were successfully realized from design of product to field application. In addition, method was evaluated with pull out tests in laboratory. The proposed method and subcomponents, besides present miscellaneous usage areas, allow safely use in terms of not only enhancement of bearing capacity but also eliminating of sliding potential with lesser safety factors.

As a result, this thesis includes new designs with scaled original soil-freezing device and two patent appeals. It is expected that the result of thesis will be able to achieve serious acquisitions during construction processes in the geotechnical engineering such as time, workmanship and safety against sliding.

Keywords: Artificial ground freezing method, Umbrella anchorage method, Soil bearing capacity, Sliding potential, Patent

ÖNSÖZ

Kendilerinden teori, pratik ve uygulamada mühendisliğin ne anlama geldiğini öğrendiğim ve her geçen gün öğrenmeye devam ettiğim; derin bilgi ve tecrübelerini hiçbir zaman esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Sn. Prof. Dr. Mustafa TUNCAN ve Sn. Prof. Dr. Ahmet TUNCAN'a teşekkür ediyorum.

Çalışmalarım ve tez sürecinde bana uygun ortamı sağlayan, hayatıma mutluluk katan, şükrettiğim hazinelerim sevgili eşim Özlem EVİRGEN, gülen yüzüm canım oğlum Mehmet EVİRGEN ve biricik aileme teşekkür ediyorum.

1403F079 ve 1407F353 no.lu Bilimsel Araştırma Projeleri ile desteklerini esirgemeyen Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu ve üniversitemiz yönetimine saygı ve minnetlerimi sunuyorum. Tez sürecinde; patent başvurusu, malzeme alımı ile proje adımlarında yardımcı olan proje birimi çalışanlarına ve özellikle arazi uygulamalarında destek olan Mühendislik Fakültesi Atölyesi personeline şükranlarımı sunuyorum.

İyi günde, kötü günde; sevinçlerimi ve dertlerimi paylaştığım arkadaşlarım Onur TUNABOYU ve Mustafa Cansaran ERTAŞ'a teşekkür ediyorum. Bu güne kadar hayatımda iyi veya kötü iz bırakarak tecrübelerime katkı sağlayan tüm kişilere ve tüm hocalarıma minnetlerimi sunuyorum.

Çalışma kapsamında sunulan patentler ve sonuçların, onlarca sektöre lokomotif teşkil eden İnşaat Mühendisliği alanında katkılar sağlamasını umuyorum. Yalnız ve güzel, bir o kadar da köklü geçmişe sahip kadim ülkeme bu tez ile bir nebze de olsa katkım olacaksa ne mutlu. Son olarak, gelecek çalışmalarımda da bu doğrultuda hareket edeceğimi belirterek sözlerimi noktalıyorum.

Burak EVİRGEN

Mart 2017

02/03/2017

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan ‘‘bilimsel intihal tespit programı’’yla tarandığını ve hiçbir şekilde ‘‘intihal içermediğini’’ beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saplanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Burak EVİRGEN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI ..... **i**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI ..... **ii**

ÖZET ..... **iii**

ABSTRACT ..... **iv**

ÖNSÖZ ..... **v**

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

TABLOLAR DİZİNİ ..... **xii**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xiii**

GÖRSELLER DİZİNİ ..... **xx**

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xxvi**

BİRİNCİ BÖLÜM

1. GİRİŞ: YAPAY ZEMİN DONDURMA YÖNTEMİ **1**

1.1. Yapay Zemin Dondurma Yönteminin Avantajları **5**

1.2. Yapay Zemin Dondurma Yönteminin Dezavantajları **8**

2. LİTERATÜR TARAMASI: YAPAY ZEMİN DONDURMA YÖNTEMİ **10**

2.1. Teorik Çalışmalar **10**

2.2. Deneysel Çalışmalar **16**

2.3. Arazi Uygulamaları **30**

3. YÖNTEM **45**

3.1. Yapay Zemin Dondurma Yönteminde Kullanılan Isıl Parametreler **45**

3.1.1. Isıl iletkenlik **47**

3.1.2. Isı iletim katsayısı **49**

3.1.3. Öz ısı - Isı kapasitesi **51**

3.1.4. Donmuş silindirde ısı iletimi **52**

3.2. Yapısal Tasarım 53

3.2.1. Zamana bağlı dayanım esaslı tasarım 53

3.2.2. Sünme esaslı tasarım 57

3.2.3. Donmuş duvar kalınlığı 57

3.2.4. Donma kabarması 59

3.3. Tez Kapsamındaki Yöntem 60

4. KULLANILAN EKİPMANLAR 63

4.1. Scheleibinger CDF/CIF Donma - Çözülme Cihazı 63

4.2. Dijital Mikroskop 65

4.3. Yapay Zemin Dondurma Cihazı 65

4.4. Sıvı Azot Tankları 66

4.5. Borulama Sistemi (Dolaşım Boruları - Sirkülasyon Boruları) 67

4.6. Isıölçerler 74

5. DENEYLER 75

5.1. Geoteknik Deneyler 75

5.2. Deneme Numunelerinin Üretimi ve Ön Deneylerin Gerçekleştirilmesi 77

6. DENEY SONUÇLARI 82

6.1. Aşama 1 (Kil, Silt ve Kum Ağırlıklı Zeminlerin Donma Sonrası Serbest Basınç Dayanımı ve Şekil Değiştirme Davranışları) 82

6.1.1. Su muhtevası değişiminin etkisi 83

6.1.2. Sıcaklık değişiminin etkisi 90

6.1.3. Donma süresi değişiminin etkisi 95

6.1.4. Mikro yapı 100

6.2. Aşama 2 (Yapay Zemin Dondurma Sistemi İle Çakıl Tipi Zeminden Numune Alma İşlemi) 106

6.2.1. Kalıplanan numunelerin donma sonrası değerlendirme işlemi 106

6.2.2. Yapay donma sonrasında karot ile numune alma işlemi 107

6.3. Aşama 3 (Yapay Zemin Dondurma Sisteminin İksa Modeli Üzerinde Değerlendirilmesi).....110

6.3.1. Örnek derin kazı modeli 110

6.3.2. Sistem kurulumu 113

6.3.3. Paslanmaz çelik borulama sistemi sonuçları (Seri 1).....116

6.3.4. Alüminyum borulama sistemi sonuçları (Seri 2).....117

6.3.5. Yüksek yoğunluklu polietilen (hdpe) borulama sistemi sonuçları (Seri 3) 117

6.3.6. Isıl eğriler.....118

7. PATENT BAŞVURUSU - 1: "GRANÜLER ZEMİNLERDE ÖRSELENMEMİŞ NUMUNE ALICI".....124

7.1. Detaylar 125

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER: YAPAY ZEMİN DONDURMA YÖNTEMİ.130

8.1. Laboratuvar İçin Yapay Zemin Dondurma Cihazı Tasarımı 130

8.2. Laboratuvar Sonuçları (1. Aşama) 130

8.2.1. Taşıma kapasitesi denklemleri.....133

8.3. Donmuş Granüler Zeminden Karot Alma İşlemi (2. Aşama) 134

8.4. İksa Modeli Sonuçları (3. Aşama) 135

8.4.1. Mesafeye bağlı sıcaklık denklemleri 136

8.5. Öneriler 138

İKİNCİ BÖLÜM

9. GİRİŞ: ŞEMSİYE ANKRAJ YÖNTEMİ.....140

9.1. Standart Ankraj Uygulama Metodu 146

10. LİTERATÜR TARAMASI: ŞEMSİYE ANKRAJ YÖNTEMİ 147

11. YÖNTEM VE AŞAMALAR.....165

11.1. İstinat Yapılarında Kullanılan Ankraj Çeşitleri 165

11.2. Ankraj Tasarım Kriterleri 170

11.3. Tez Kapsamındaki Yöntem 176

11.4. Kullanılan Ekipmanlar 180

11.4.1. Enjeksiyon makinesi.....180

11.4.2. Enjeksiyon hortumları 181

11.4.3. Ankraj halatı 181

11.4.4. Ankraj kaması 182

11.4.5. Ankraj başlığı 182

11.4.6. Yük hücresi 183

12. LABORATUVAR ÇEKME DENEYLERİ 184

12.1. Teorik Yaklaşım 184

12.2. Zemin Özelikleri 189

12.3. Deney Düzeneği 192

13. ŞEMSİYE ANKRAJ 194

13.1. Ankraj Tasarımı ve Üretimi 194

13.1.1. Ön tasarımlar 194

13.1.2. Düz şemsiye ankraj 201

13.1.3. Destekli şemsiye ankraj 210

14. ARAZİ UYGULAMASI 212

14.1. Sondaj Logu.....212

14.2. Halat Çekme Deneyi.....214

14.3. Enjeksiyon Basınç Deneyi 215

14.4. Uygulama Aşamaları 216

14.4.1. Delgi işlemi.....217

14.4.2. Şemsiye ankrajın hazırlanması 219

14.4.3. Ankrajın kuyuya yerleştirilmesi 221

14.4.4. Kanatların açılması 222

14.4.5. Zeminin boşaltılması 223

14.4.6. Enjeksiyon işlemi 225

14.5. Deney Düzeneği 227

15. DENEY SONUÇLARI 228

15.1. Laboratuvar Çekme Deneyleri 228

15.2. Arazi Çekme Deneyleri 231

15.3. Göçme Modları 237

16. PATENT BAŞVURUSU - 2: "ŞEMSİYE ANKRAJ" 243

16.1. Detaylar 244

16.2. Uygulama Aşamaları 248

17. SONUÇLAR VE ÖNERİLER: ŞEMSİYE ANKRAJ YÖNTEMİ 249

17.1. Nihai Ankraj Çekme Kuvveti Hesabı 249

17.2. Laboratuvar Uygulaması Sonuçları 250

17.3. Arazi Uygulaması Sonuçları 250

17.4. Öneriler 252

KAYNAKÇA 253

EKLER

ÖZGEÇMİŞ

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Porozite Değeri 0.36 olan C-109 tipi Ottowa Kumunun Isıl Özellikleri 19

Tablo 2.2. Proje ve Modeldeki Donmaya İlişkin Parametreler 36

Tablo 4.1. Sabit Paslanmaz Çelik Dolaşım Borularının Çapları 73

Tablo 4.2. Alüminyum ve HDPE Boru Detayları 73

Tablo 5.1. Kullanılan Zeminlerin Özellikleri 76

Tablo 6.1. Aşama 1 İçin Deney Verileri 82

Tablo 6.2. Aşama 2 İçin Deney Verileri 106

Tablo 6.3. Aşama 3 İçin Deney Verileri 110

Tablo 6.4. Aşama 3'te Elde Edilen En Düşük Ortalama Sıcaklık Değerleri (ºC) 117

Tablo 10.1. f2 Tipi Elemanlarla Geomekanik Birimlerde (G3a) Tünel Yüzeyi ve Sınırlarında Oluşturulan Sargı Basıncı $\Delta\sigma_3$ ve Gözlenen Kohezyon c^a Sonuçları 157

Tablo 12.1. Kullanılan Zeminlerin Özellikleri 190

Tablo 14.1. Sondaj Kuyularına Ait Bilgiler 218

Tablo 14.2. Kuyulara Basılan Yaklaşık Enjeksiyon Miktarları (litre) 226

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Yapay Zemin Dondurma Sistemine İlişkin İlk Patent 3

Şekil 2.1. a. Buz ve b. Su İçin Farklı Sıcaklık ve Basınçlardaki Faz Diyagramları 11

Şekil 2.2. Doygun Olmayan Donmuş Zemin Numunesinin Temsili Birim Kesiti 12

Şekil 2.3. Birim Hacimdeki Zemin Tanımı 13

Şekil 2.4. Tünel İnşaatında Kullanılan Yapay Zemin Dondurmanın Sayısal Modellemesi, Sızıntı Akışının Donmuş Kemer Üzerindeki Etkisi 14

Şekil 2.5. Farklı Sızıntı Akış Hızlarında Eşit Aralıklı ve Optimum Dizilimlerde, Tamamen Donmuş Kemer Elde Etmek İçin Gereken Süreler 15

Şekil 2.6. 70 Günlük Dondurma İşleminden Sonra Su Akışı Üzerinde Faz Değişimi ve Sıcaklık Dağılımının Etkileri; a. Zemin Sıcaklığı, b. Akışkan Su Basıncı ve c. Darcy Hızı 16

Şekil 2.7. Basitleştirilmiş Kule Temelin Yüzey Yalıtımı ile Şematik Gösterimi 17

Şekil 2.8. Deney Düzeneği; 1. Hazne, 2. Isıl Bariyer (Yalıtım), 3. Plaka Isı Dönüştürücüsü, 4. Dairesel Isı Dönüştürücüsü ve Metal Çubuk, 5. Isı Kontrollü Banyo, 6. Akış Algılayıcıları, 7. Analog Isı Ölçer Giriş Modülü, 8. Usb Çerçevesi, 9. Bilgisayar ve Veri Toplama Programı (* İşareti Isı Ölçer Konumlarını Belirtmektedir) 18

Şekil 2.9. Önerilen Modelin Sistem Kurulumu 19

Şekil 2.10. Deney Düzeneği 20

Şekil 2.11. İkinci Deneyde (Kuru Kum) ve Üçüncü Deneyde (Donmuş Doygun Kum) Elde Edilen Sıcaklık Profilleri; a. Kuru Kum ve b. Donmuş Doygun Kum 21

Şekil 2.12. Zemin Su Sistemi İçin Soğutma Eğrisi 22

Şekil 2.13. Deney Düzeneğinin Şematik Gösterimi 23

Şekil 2.14. Farklı İvmelerdeki Modellerde Çözülme Süreçleri Boyunca Gözlenen Sıcaklık Değişim Eğrileri, a. Dondurucu Boru Yüzeyinin 5.0 cm Üstü ve b. 0 cm, 2 cm ve 5 cm Derinliklerdeki Düşey Sıcaklıklar 24
Şekil 2.15. Deney Sürecinde Sıcaklık Değişimi 24
Şekil 2.16. Dondurma Sırasında Yanal Deformasyon Ölçümü İçin Geliştirilmiş Üç Eksenli Deney Düzeneği 25
Şekil 2.17. Su Beslemeli ve Suya Kapalı Durumlar İçin Dondurmadan Sonraki Yatay Yer Değiştirme Oranları 26
Şekil 2.18. Zeminde Isı Yüklemesinde Kullanılan Tek Doğrultulu Yatay Isı ve Su İletimi Deney Düzeneği 27
Şekil 2.19. Donmuş Zemin için Dinamik Direkt Kesme Kutusu Cihaz Şeması 28
Şekil 2.20. Donmuş Granüler Numunelerdeki Gerilme – Birim Şekil Değiştirme Eğrileri, a. Kötü Derecelenmiş Çakıl ve b. Kötü Derecelenmiş Kum 29
Şekil 2.21. Donmuş Granüler Numunelerdeki Permeabilite Katsayısı Değişimi, a. Kötü Derecelenmiş Çakıl ve b. Kötü Derecelenmiş Kum 29
Şekil 2.22. a. Tünel Zemininde Zamana Bağlı Mukavemet Değişimi ve b. Minimum Zemin Ön Dondurma Süresi Grafiği 32
Şekil 2.23. a. Sayısal Model, b. Tünel Detayı 33
Şekil 2.24. a. Kazıdan Önce Aktif Dondurma Süresinde ve İkinci Kaplamadan Sonra Isıl Eğrilerin Değişimi ve b. İlk Kazı Aşaması ve İkinci Kaplama Tamamlandıktan Sonra kPa cinsinden Maksimum Asal Gerilme Değerleri 34
Şekil 2.25. Zemin Dondurma İçin Kavramsal Model 35
Şekil 2.26. Nanjing 1 Nolu Tünel Hattı Projesi San-Zhang Koridoru İçin Önerilen Sayısal Model 35
Şekil 2.27. Değerlendirilen Değişkenlerin Deformasyona Etkisi; a. Örtü Zemini Kalınlığı, b. Kazı Yarıçapı, c. Donmuş Duvar Kalınlığı ve d. Çözelti Sıcaklığı 37
Şekil 2.28. Deneysel Platform Şeması 38
Şekil 2.29. Dondurucu Borulardaki Isıl Sınır Koşulları 39

Şekil 2.30. Servis Tünelinin En Kesiti ve Kazı Koruması İçin Uygulanan Zemin İşlemleri 40
Şekil 2.31. 1987-2005 Yılları Arasında; a. Yüzeydeki Donma ve b. Yüzeydeki Çözülme Katsayısı Değerleri Değişimi 42
Şekil 2.32. Hua Shixia Otoyol Profili Merkezinden Alınan Veriler ve Hesaplanan Verilerin Değişimi 43
Şekil 2.33. Madenin; 4 Dondurucu Boru, 1 Tünel ve 6 Tabaka İçeren Modeli 44
Şekil 3.1. Zemin Elemanı İçerisinden Isı Akışı 48
Şekil 3.2. Donmuş Duvarda Kazı Sonrası Zamana Bağlı Basınç Değişimi 54
Şekil 3.3. a. Kalın Silindir Duvar Kesiti (p = dış basınç) ve b. Gerilme İlişkilerini Gösteren Mohr-Coulomb Diyagramı 55
Şekil 3.4. a. Dairesel Donmuş Duvarlar için Tasarım Eğrileri ve b. İlgili Tanımlar 56
Şekil 3.5. Buz-Zemin İstinat Yapısının Şeması; 1. Donmuş Zemin, 2. Çevre Zemini, 3. Kaplama, 4. Soğutucu Borular, 5. Şaftın Desteklenmemiş İşlevsel Kısmı, 6. Yanal Zemin Basınç Diyagramı 58
Şekil 4.1. CDF / CIF (Donma Çözülme Cihazı) Çalışma Mekanizması 64
Şekil 4.2. Dolaşım Borusu Kesitleri; a. İç İçe Geçmiş İki Boru, b. Tek Boru İçerisine Yerleştirilmiş "U" Boru ve c. "U" Boru Detayı 68
Şekil 4.3. Borulama Sistemi Detayları "Alternatif 1" 70
Şekil 4.4. Borulama Sistemi Detayları "Alternatif 2" 70
Şekil 4.5. Borulama Sistemi Detayları "Alternatif 3" 71
Şekil 4.6. Dolaşım Borularının Konumları 72
Şekil 4.7. Donmuş Duvarın Şematik Gösterimi 72
Şekil 5.1. Kullanılan Zeminlerin Dane - Boyut Dağılımı 75
Şekil 5.2. a. Beyaz Zeolit ve b. Sarı Kaolin Numunelerinin Likit Limit Grafikleri 75
Şekil 5.3. a. Beyaz Zeolit ve b. Sarı Kaolin Numunelerinin Standart Proktor Deneyi Sonuçları 77
Şekil 5.4. Deneme Numunelerinden Elde Edilen Gerilme - Birim Şekil Değiştirme Grafikleri 80

Şekil 6.1. Su Muhtevası Değişimine Bağlı Gerilme - Birim Şekil Değiştirme Grafikleri; a. -20 ºC, CL, b. -200 ºC, CL, c. -20 ºC, ML, d. -200 ºC, ML, e. -20 ºC, SP ve f. -200 ºC, SP 85
Şekil 6.2. Su Muhtevası Değişimine Bağlı Serbest Basınç Direnci Değerleri; a. -20 ºC Düşük Donma Seviyesi ve b. -200 ºC Yüksek Donma Seviyesi 89
Şekil 6.3. Sıcaklık Değişimine Bağlı Gerilme - Birim Şekil Değiştirme Grafikleri; a. CL, b. ML ve c. SP 92
Şekil 6.4. Sıcaklık Değişimine Bağlı Serbest Basınç Direnci Değerleri..... 94
Şekil 6.5. Donma Süresine Bağlı Gerilme - Birim Şekil Değiştirme Grafikleri; a. -20 ºC, CL, b. -200 ºC, CL, c. -20 ºC, ML, d. -200 ºC, ML, e. -20 ºC, SP ve f. -200 ºC, SP 96
Şekil 6.6. Donma Süresine Bağlı Serbest Basınç Direnci Değerleri; a. -20 ºC Düşük Donma Seviyesi ve b. -200 ºC Yüksek Donma Seviyesi..... 99
Şekil 6.7. Gözenekli Ortamın Farklı Ölçeklerdeki Nitelikleri..... 101
Şekil 6.8. Gözenekli Ortamda Buz Kristallenmesi ve Su Göçü 101
Şekil 6.9. Şematik Resimler; a. Mikro-Dondurucu-Emme Mekanizması ve b. Yeniden Donma..... 102
Şekil 6.10. Serbest Basınç Deneyi Sonuçları, a. Karot Numuneleri ve b. CDF/CIF Numuneleri 109
Şekil 6.11. Örnek Derin Kazı Modeli Yerleşim Planı 111
Şekil 6.12. Örnek Modellemede Elde Edilen Donma - Çözülme Grafikleri; a. CL Tipi Zemin Numunesi, b. ML Tipi Zemin Numunesi 112
Şekil 6.13. Örnek Modeldeki Ortalama Sıcaklıklar..... 113
Şekil 6.14. Dolaşım Boruları ve Isıölçerlerin Yerleşim Planı 115
Şekil 6.15. Antifriz Dolaşımı Sonucunda Elde Edilen Merkez Eksenden Uzaklığa Bağlı Sıcaklık Değişimi; a. CL Tipi Zemin ve b. ML Tipi Zemin..... 119
Şekil 6.16. Sıvı Azot Dolaşımı Sonucunda Elde Edilen Merkez Eksenden Uzaklığa Bağlı Sıcaklık Değişimi; a. CL Tipi Zemin ve b. ML Tipi Zemin..... 120
Şekil 7.1. Buluş Konusu Sistemin Genel Görüntüsü 128
Şekil 7.2. Buluş Konusu Sistemin Gaz Dağılım Mekanizması 129

Şekil 7.3. Yerleştirme Aparatı Detayı 129
Şekil 10.1. Stabil Olmayan Düzlemsel ACHD Bloğuna x' ve y' Eksenlerine Göre Etkiyen Yük Dağılımı 149
Şekil 10.2. Ankraj Yerleştirme Açısı (θ) ve Rezervuar Su Durumunun Fonksiyonu Olarak Gerekli Ankraj Kuvveti (T). (Güvenlik Sayısı 1,2 ve Depremde Oluşan Pik Yatay İvme Katsayısı 0,4 Alınmıştır)..... 150
Şekil 10.3. a. Önerilen EBAS Modelinin Şematik Gösterimi ve b. Standart Doğrusal Katı Modelin Şematik Gösterimi 151
Şekil 10.4. Farklı Basınç Değerleri İçin Rijit Zeminde Çekip Çıkarma Deneyi (Pull-out test) Modellemesine Göre Kuvvet - Yer Değiştirme Sonuçları a. K_1 Ara Yüzey Bağ Rijitliği ve b. Bağ Dayanımı τ_m..... 154
Şekil 10.5. Sonlu Elemanlar Modeline Göre Elde Edilen Dağılımlar; a. Bulon Yer Değiştirmesi, b. Birim Uzunlukta Bağ Kayma Kuvveti ve c. Bulon Boyunca Eksenel Yük (Kesikli Çizgi 2 mm Bulon Kafa Yer Değiştirmesi ve Elastik Ara Yüz Modeli; Düz Çizgi 8 mm Bulon Kafa Yer Değiştirmesi ve Elasto-Plastik Ara Yüz Modeli)..... 155
Şekil 10.6. Yenilikçi Zemin Çivisi Sistemleri; a. f2 Tipi Donatı Sistemi ve b. f1 Tipi Hem Donatı Hem de Drenaj Sistemi..... 156
Şekil 10.7. Fiberglas ile f2 Tipi Donatıların Arazide Çekme Deneyi Sonuçları..... 156
Şekil 10.8. Bulonun Çevre Kayası Üzerinde Etkisi İçin Geliştirilen Mekanik Model..... 159
Şekil 10.9. Bulonun Radyal Uzaklığının İşlevi Olarak Eksenel Basınç Gerilmesi Değişimi; a. 0.5, 0.8, 1.0 m Mesafe ve b. 1.0, 1.2, 1.5 m Mesafe..... 160
Şekil 10.10. a. Ankraj Yapısının Dikey İzdüşümü İle Ankraj Aralıkları ve b. Önerilen Quincunx Diziliminde Alternatif Kısa Kabloların Uzun Kablolarla Kullanımı İle Ankraj Dizilimi..... 161
Şekil 10.11. Enjeksiyonlu Kısımda Ankraj Kuvveti Dağılımının Karşılaştırılması; a. Kablo Uzunluğu Değiştiğinde Oluşan Kayma Gerilmesi, b. Kablo Uzunluğu Sabit Kaldığında Oluşan Kayma Gerilmesi..... 162
Şekil 10.12. Enjeksiyon ve Ankraj Uygulanan Çatlaklı Kumtaşı Numunesi..... 163

Şekil 10.13. Farklı Ankraj Koşullarında Çatlaklı Numunelerin Gerilme - Birim Şekil Değiştirme Grafikleri; a. 30º, b. 45º ve c. 60º 163
Şekil 11.1. Genel Çalışma Prensibine Göre Ankraj Çeşitleri; a. Çekme Ankrajı ve b. Basınç Ankrajı (Hanna 1977'den sonra) 166
Şekil 11.2. Palplanş Duvarlarda Kullanılan Çeşitli Tiplerde Ankraj Uygulamaları; a. Ankraj Plakası veya Kirişi, b. Ankraj Çubuğu Bağlama, c. Düşey Ankraj Kazıkları ve d. Eğimli Kazıklar İle Desteklenen Ankraj Kirişleri..... 167
Şekil 11.3. Yakın Arazilerde Ankraj Uygulama Yöntemleri; a. İki Şev Yüzeyinin Birbirine Sabitlenmesi ve b. Açık Kazı Yapılarak Sabitleme..... 170
Şekil 11.4. Bir Ankrajlı Kaplama 172
Şekil 11.5. Ankraj Bulonu Çeşitleri 173
Şekil 11.6. A36 ve A307 Ankraj Bulonlarının AISC Çekme ve Kesme Kapasiteleri 174
Şekil 11.7. Çekip - Çıkarma Deneyinde Aderans Gerilmelerinin Değişimi 175
Şekil 11.8. Donatı Üzerinde Kabul Edilen Aderans Gerilmesi Değişimi 176
Şekil 12.1. Ankraj Plaka ve Kirişlerinin Kum Zeminde Nihai Dayanımı..... 184
Şekil 12.2. Kumlardaki Ankraj Plakaları ve Kirişleri için Kuvvet Katsayısı Değişimi, $M_{\gamma q}$ (Neeley vd., 1973'ten Sonra Tekrar Çizim)..... 185
Şekil 12.3. Düşey Ankraj Plakaları veya Kirişlerinde Şekil Faktörü (Neeley vd., 1973'ten Sonra Tekrar Çizim)..... 186
Şekil 12.4. Ankraj Çekme Dayanımı İçin Killerde Mackenzie'nin Deneysel Sonuçları 186
Şekil 12.5. Kullanılan Zemin Numunelerine Ait Dane - Boyut Dağılımı Eğrileri 190
Şekil 13.1. Arazideki Deneme Ankrajlarının Çekme Deneyi Sonuçları..... 200
Şekil 14.1. Ankraj Halatı Çekme Deneyi Sonuçları 215
Şekil 15.1. Laboratuvar Çekme Deneylerinden Elde Edilen Derinlik / Çap Oranına Bağlı Eksenel Gerilme Değerleri; a. Gevşek Kum, b. Sıkı Kum ve c. Silt ile Kil 229
Şekil 15.2. Karşılaştırmalı Teorik (T) ve Deneysel (D) Çekme Kuvveti Değerleri; a. Gevşek Kum, b. Sıkı Kum ve c. Silt ile Kil..... 230

Şekil 15.3. Arazi Deneylerinden Elde Edilen Düz Şemsiye Ankrajlar (A) ve Destekli Şemsiye Ankrajlara (DA)Yük - Yer Değiştirme Grafikleri; a. 2 m Derinlik, b. 4 m Derinlik, c. 6 m Derinlik ve d. 8 m Derinlik 232
Şekil 15.4. Arazi Deneylerinde Şemsiye Ankraj Uç Bölgesine Etkiyen Gerilme Değerleri ve Derinliğe Bağlı Yer Değiştirmeler 234
Şekil 15.5. Arazi Deneyleri İçin Yapılan Teorik Hesap Göre Derinliğe Bağlı Çekme Kuvveti Değerleri 235
Şekil 15.6. Arazi Deneylerinden Elde Edilen Yük – Yüzey Oturması Grafikleri; a. 2 m Derinlik, b. 4 m Derinlik, c. 6 m Derinlik ve d. 8 m Derinlik 236
Şekil 16.1. Buluş Konusu Sistemin Çalışma Mekanizması 244
Şekil 16.2. Şemsiye Ankraj Kapalı Konum Detayı 247
Şekil 16.3. Şemsiye Ankraj Açık Konum Detayı 247

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 2.1. Üçüncü Deneyde Oluşan Donmuş Silindir 21
Görsel 2.2. Dondurma İşlemi ve Dondurucu Boru Fotoğrafları 31
Görsel 2.3. a. Kaplama Çizimi ve b. Dondurucu Boru Fotoğrafı 41
Görsel 2.4. P100 Tipi Sıcaklıkölçerlerin Yerleşimi 42
Görsel 3.1. Birinci Bölüm: Yapay Zemin Dondurma Aşamaları 62
Görsel 4.1. CDF / CIF (Donma Çözülme Cihazı) ve Soğutma - Isıtma Bölümleri 64
Görsel 4.2. 2400 Kat Büyütme Kapasiteli Dijital Mikroskop 65
Görsel 4.3. Mikroskoptan Elde Edilen Örnek Görüntüler 65
Görsel 4.4. Tez Kapsamında Üretilen Yapay Zemin Dondurma Cihazı 66
Görsel 4.5. Sıvı Nitrojen İçin Alınan Saklama, Taşıma ve Kanister Sistemli Tanklar 67
Görsel 4.6. T Tipi Isıölçerler ve Veri Toplama Cihazı 74
Görsel 5.1. a. Farklı Su İçeriğindeki Deneme Numuneleri ve b. Ön Dondurma İşlemi 78
Görsel 5.2. Ön Dondurma İşlemi Sonrası Deneme Numuneleri a. %35 Su Muhtevasında ML, b. Optimum Su Muhtevasında ML, c. %55 Su Muhtevasında ML, d. %8,8 Su Muhtevasında CL, e. Optimum Su Muhtevasında CL ve f. %28,8 Su Muhtevasında CL 78
Görsel 5.3. a. Kanisterli Sıvı Azot Tankında Bekletilmek Üzere Hazırlanan Numuneler ve b. Numunelerin Yerleştirilmesi 79
Görsel 5.4. a. Yüksek Su Muhtevasındaki Numunelerde Gözlenen Erime Sorunu, b. Azot Tankındaki Numunelerde Ani Sıcaklık Değişimine Bağlı Olarak Alt Kısımda Meydana Gelen Beklenmedik Kırılma Sorunu ve c. Alt - Üst Başlıkların Azot ile Soğutulması 79
Görsel 5.5. Eksenel Basınç Deneyi Sonrası Numunelerde Meydana Gelen Kırılma Biçimleri, a. Azot Tankında Bekletilen -%10 Su Muhtevasındaki ML Numunesi, b. Azot Tankında Bekletilen Optimum Su Muhtevasındaki CL Numunesi ve c. CDF Cihazında Bekletilen -%10 Su Muhtevasındaki CL Numunesi 81

Görsel 6.1. Donma Öncesi Numuneler 83
Görsel 6.2. Su Muhtevası Değişimine Bağlı Göçme Modları; a. -20 ºC, CL, b. -200 ºC, CL, c. -20 ºC, ML, d. -200 ºC, ML, e. -20 ºC, SP ve f. -200 ºC, SP (Her Değişken Kendi İçerisinde Sırasıyla -%10, Optimum ve +%10 Su Muhtevası Değerlerini İçermektedir) 87
Görsel 6.3. Donma İşleminin Uygulanması, a. CDF/CIF Cihazı ve b-c. Kanisterli Sıvı Azot Tankı 91
Görsel 6.4. Donmuş Zeminlerde 0, -5, -10, -15, -20 ile -200 ºC'de Göçme Durumları; Sırasıyla a. Kil (CL), b. Silt (ML) ve c. Kum (SP) 93
Görsel 6.5. Sırasıyla; -20 ºC, 7 Gün; -20 ºC, 14 Gün; -20 ºC, 28 Gün; -200 ºC, 7 Gün; -200 ºC, 14 Gün ve -200 ºC, 28 Gün Şartlarında Bekletilen a. CL, b. ML ve c. SP Numuneleri İçin Göçme Modları 98
Görsel 6.6. Donmamış Zemin Numuneleri; a. CL (20x), b. ML (4x) ve c. SP (20x) 103
Görsel 6.7. Donmuş Zemin Numuneleri; a. CL (20x), b. ML (60x) ve c. SP (10x) 103
Görsel 6.8. Donmuş Zemin Numuneleri; a. CL (20x), b. ML (20x) ve c. SP (10x) 104
Görsel 6.9. 0 ºC'de Buz - Su Karışımları 105
Görsel 6.10. Gözlenen Oluşumlar; a. Boşluk Buzu, b. Kısmen Dolu Boşluk, c. Dane Yüzeyindeki Buz Tabakası, d. Bağlantısız Boşluktaki Buz, e. Topaklaşma ve f. Buz Lensi 105
Görsel 6.11. Doğal Koşullarda Numune Hazırlama İşlemi 107
Görsel 6.12. Donmuş Numunelerin Göçme Sonrası Durumları 107
Görsel 6.13. Donma Sonrası Karot Alma İşlemi ve Serbest Basınç Deneyi 108
Görsel 6.14. a. Donma Süreci (16 saat); b. Donma-Kazı Sonu (20 saat); c. Çözülme Sonu (135 saat) 111
Görsel 6.15. Zemin Hücresinin Hazırlanması 114
Görsel 6.16. Sabit Paslanmaz Çelik Dolaşım Boruları 114
Görsel 6.17. a. Zemin Dondurma Cihazı ve b. Sıvı Azot Tankı 116
Görsel 9.1. İstinat Duvarı Göçmeleri; a. Şırnak 2013, b. Gaziantep 2014, c-d. Bursa 2006, e. Bursa 2013, f. Ordu 2013, g. İstanbul 2014 ve h-ı. İstanbul 2016 142

Görsel 9.2. Bazı Tünel ve Maden Göçmeleri; a. Ankara İstanbul YHT İnşaatı - Bilecik - 2009, 33 Milyon Avro Maddi Hasar; b. Karadon Kömür Ocağı - Zonguldak 2010 - 30 ölü, c. Soma Maden Ocağı - Manisa 2014 - 301 Ölü, d. Ermenek Maden Ocağı - Karaman 2014 - 18 Ölü 144
Görsel 9.3. a. Kayma Öncesi Şevde Öngörülen Kayma Yüzeyi ve b. Kayma Sonrası Gözlenen Kayma Açıları 145
Görsel 10.1. a. Malatya Demiryolu Tünelinde Sıkıştırılmış Zeminde Meydana Gelen Göçme Durumu ve b. Tünelde Uygulanan Bulon Diziliminin Şematik Gösterimi 148
Görsel 10.2. a. Öngerme İşleminin Şematik Gösterimi, b. Başlık Boyunca Dalga İletimi, c. Deney Fotoğrafı ve d. Ankraj Başlığında Kullanılan Cıvata Detayı 152
Görsel 10.3. a. 1 MHz Frekansta Farklı Ön Germe Kuvvetleri İçin Deneysel Ultrasonik Dalga Formları ve b. Çelik Ara Fazı İçin Uyarımdan Yaklaşık 31 μs Sonra Oluşan Yer Değiştirme Alanları. İlk dalga halen gözlenebilmektedir (oka bakınız) 153
Görsel 10.4. Zemin Çivisi Uygulaması İle İyileştirilen Timpa Delle Vigne Tünel Yüzeyi 157
Görsel 10.5. Farklı Destek Durumlarında Çevre Kaya Kütlesinde Meydana Gelen Kayma Gerilmesi Dağılımı; a. Ankrajsız Destek ve b. Ankrajlı Destek Sistemi 158
Görsel 10.6. Derin Tünellerde Bulon - Hasır - Tabla Sistemi; a. Düşük Rijitliğe Sahip Çelik Hasır Yerine Yüksek Rijitlikte Hasır Kullanımı ve b. Tekil Demir Tabla Yerine Kompozit Tabla Kullanımı 158
Görsel 11.1. Derin Temel Kazısında Ankrajsız Kazık-Kiriş Duvar Sistemi 169
Görsel 11.2. Ankraj İçeren Duvarlar, a. Kazık-Kiriş Tipi ve b. Arazideki Deliklere Sonradan Yerleştirilen Tip 169
Görsel 11.3. Şemsiye Ankrajın Enjeksiyon Sonrası Durumu 177
Görsel 11.4. Arazide Standart Ankraj (Üst Sıra) ve Şemsiye Ankraj (Alt Sıra) Kullanımı Arasındaki Fark 178
Görsel 11.5. İkinci Bölüm: Şemsiye Ankraj Yönteminin Uygulama Aşamaları 179

Görsel 11.6. Enjeksiyon Makinesi 180
Görsel 11.7. Basınçlı Enjeksiyon Hortumları 181
Görsel 11.8. Ankraj Halatı 182
Görsel 11.9. a. Ankraj Kaması ve b. Ankraj Başlığı 182
Görsel 12.1. Şemsiye Ankraj Yönteminde Teorik Kayma Dayanımına Bağlı Çekme Kuvveti Kabulü 188
Görsel 12.2. Kesme Kutusu Cihazı 191
Görsel 12.3. Boşluk Oranı Hesabında Kullanılan Kalıp ve Numuneler; a. Gevşek Kum ve b. Sıkı Kum 191
Görsel 12.4. Laboratuvarda Ankraj Çekme Sistemi İçin Ön Tasarım 192
Görsel 12.5. Laboratuvarda Ankraj Çekme Sistemi 193
Görsel 13.1. Birinci Tasarım - Makaralı Ankraj Sistemi, a. Makaralı Sistem, b. Tekil Makara Uç Detayı ve c. Küresel Makara Uç Detayı 195
Görsel 13.2. Ankraj Kanat Detayları 196
Görsel 13.3. Genel Şemsiye Ankraj Detayı - Açık Konum 196
Görsel 13.4. İkinci Tasarım Şemsiye Ankraj Üretim Aşamaları, a. Kanatların Pimler Yardımıyla Yuvalara Sabitlenmesi, b. Ankraj Halatının Sabitlenmesi, c. Çelik Elek Elemanının Sabitlenmesi ve d. Ankraj Üst Görünüş 197
Görsel 13.5. Üçüncü Tasarım Şemsiye Ankraj, a-b. Kapalı Konum ve c-d. Açık Konum 198
Görsel 13.6. Üç Boyutlu Şemsiye Ankraj Çıktısı (Ölçek 1/3) 199
Görsel 13.7. Ön Tasarım Şemsiye Ankraj İskeleti 199
Görsel 13.8. Deneme Ankrajları; a. Branda Gergili - Destekli Şemsiye Ankraj, b. CFRP Gergili - Desteksiz Şemsiye Ankraj ve c-d. Zincirli - Desteksiz Şemsiye Ankraj 201
Görsel 13.9. Düz Şemsiye Ankraj; a. Kapalı Konum ve b. Açık Konum 202
Görsel 13.10. Şemsiye Ankraj Gövde Elemanı 203
Görsel 13.11. a. Kesici Kanat Detayı, b. Dairesel Uç Detayı, c. Kulak Detayı, d. Kanat Montajı ve e. Simetrik Kanat Yerleşimi 204
Görsel 13.12. a. Açma - Kapama Plakası ve b. Açma - Kapama Plakası İç Kılavuz Borusu 205

Görsel 13.13. a. Enjeksiyon Yüzüğü Üretimi, b. Enjeksiyon Yüzüğü Montajı ile Devamında Enjeksiyon Borusu ve c. Püskürtme Deliği.....206
Görsel 13.14. Deneme Uygulamalarında Kullanılan Gergi Elemanları; a. Branda, b. Karbon Lifli Polimer (CFRP), c. Metal Elek, d. Zincir, e. Aramid Kumaş ve f. Aramid Kumaşın Perçin ile Sabitlenmesi 207
Görsel 13.15. Kılavuz Boru 209
Görsel 13.16. Halat Germe Aparatı.....209
Görsel 13.17. Destekli Şemsiye Ankraj; a. Kapalı Konum ve b. Açık Konum.....210
Görsel 13.18. Açma - Kapama Yüzüğü Detayı 211
Görsel 13.19. Kanat Destek Detayı.....211
Görsel 14.1. Sondaj Logu 213
Görsel 14.2. Halat Çekme Deneyleri; a. MTS ve b. Harici Düzenek.....214
Görsel 14.3. a. Su Kullanımı ile Enjeksiyon Basıncının Değerlendirilmesi, b. 4 Adet 3.5 mm'lik Püskürtme Deliği Bağlantısı ve c. 4 Adet Püskürtme Deliği Kullanımında Gözlenen Çıkış Basıncı.....215
Görsel 14.4. Arazi Uygulamasına Hazır Şemsiye Ankrajlar 216
Görsel 14.5. Sondaj Makinesi ile Kuyuların Açılması; a. Şematik Gösterim ve b-c. Arazi Uygulaması 217
Görsel 14.6. Sondaj Noktaları.....219
Görsel 14.7. Ankrajın Hazırlanması, a. Kapalı Konum Şematik Gösterim, b. Açık Konum Şematik Gösterim, c. Halatların Sabitlenmesi, d. Ayırıcının Sabitlenmesi ve e. Enjeksiyon Rekorunun Kapatılması 220
Görsel 14.8. Ankrajın Kuyuya Yerleştirilmesi; a. Şematik Gösterim, b. Vinç ile Kaldırma İşlemi ve c. Kapalı Konumda Kuyuya Sürme İşlemi.....222
Görsel 14.9. Kesici Kanatların Açılması; a. Şematik Gösterim, b. Halat Payının Ölçümü, c. Açma Sonrası Halat Payı Ölçümü ve d. Kuyu İçerisinde Açılmış Şemsiye Ankraj 223
Görsel 14.10. Zeminin Boşaltılması İşlemi; a. Şematik Gösterim ve b. Arazi Uygulaması 224
Görsel 14.11. Enjeksiyon İşlemi, a. Şematik Gösterim, b. Enjeksiyon Makinesinde Çimento - Su Karışımının Hazırlanması, c. Enjeksiyon Deliklerinden Püskürtme İşlemi ve d. Enjeksiyon İşlemi Bitmiş Kuyu.....225

Görsel 14.12. Arazide Ankraj Çekme Deneyi Düzeneği.....227
Görsel 15.1. Kanatların Burkulması ve Gergi Elemanın Yırtılması Durumu 240
Görsel 15.2. Kanatların Kopması Durumu 241
Görsel 15.3. Ankraj Halatının Sıyrılması Durumu 241
Görsel 15.4. Ankraj Halatının Kopması Durumu 242

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\boldsymbol{a}$: Donmuş silindir iç yarıçapı veya iç dondurucu borunun iç çapı veya oluşan kayma konisinin taban yarıçapı

$\boldsymbol{A}$: Kesit alanı

$\boldsymbol{A_a}$: Hava temas alanı

$\boldsymbol{A_i}$: Buz parçaları temas alanı

$\boldsymbol{A_s}$: Zemin daneleri temas alanı

$\boldsymbol{A_w}$: Donmamış su temas alanı

$\boldsymbol{A_1}$: Zemin deney silindirinin iç yüzey alanı

$\boldsymbol{A_2}$: Zemin deney silindirinin dış yüzey alanı

$\boldsymbol{b}$: Donmuş silindir dış yarıçapı veya iç dondurucu borunun dış çapı veya oluşan kayma konisinin tavan yarıçapı

$\boldsymbol{B}$: Deneysel zemin parametresi veya ankraj kesitinde doğru açı ile teşkil edilmiş ankraj uzunluğu

$\boldsymbol{c}$: Kohezyon veya öz ısı veya dış dondurucu borunun iç çapı

$\boldsymbol{c_a}$: Adezyon

$\boldsymbol{c^a}$: Gözlenen Kohezyon

$\boldsymbol{c_{f'}}$: Kayan kaya kütlesi boyunca geçerli olan kohezyon

$\boldsymbol{c_{p_{f'}}}$: Akışkanın ısı kapasitesi

$\boldsymbol{c_{p_{m'}}}$: Akışkan dolu gözenekli malzemenin ısı kapasitesi

$\boldsymbol{C}$: Hacimsel ısı kapasitesi

$\boldsymbol{C_c}$: Gradasyon katsayısı

$\boldsymbol{C_s}$: Düşeyden yatay yöne gerilme düzeltim faktörü

$\boldsymbol{C_u}$: Homojenlik katsayısı

$\boldsymbol{d}$: Dış dondurucu borunun dış çapı

$\boldsymbol{D}$: Örselenme faktörü

$\boldsymbol{D_e}$: Eşdeğer tünel kazı çapıdır

$\boldsymbol{D_r}$: Rölatif (göreceli) sıkılık

$\boldsymbol{D_{10}}$: Gradasyonda % 10 zeminin geçtiği çap

$\boldsymbol{D_{30}}$: Gradasyonda % 30 zeminin geçtiği çap

$\boldsymbol{D_{60}}$: Gradasyonda % 60 zeminin geçtiği çap

e : Anlık boşluk oranı veya iç içe geçmiş iki dondurucu boru arası mesafe

e_{mak} : En yüksek boşluk oranı

e_{min} : En düşük boşluk oranı

E_s : Sekant ile hesaplanan elastisite modülü

f_m : Danenin hacimsel kısmı

f_{OM} : Zemindeki organik maddenin hacimsel kısmı

F_{so} : Çubuk parçasına uygulanan çekme kuvveti

GSI : Jeolojik dayanım indeksi

h : Donmuş duvarın desteklenmemiş kısmının yüksekliği veya kayma konisinin yüksekliği

H : Donma kabarması miktarı

i : Isıl eğim

k : Isı iletim katsayısı veya ara yüzey kayma modülü

k_u : Donmamış zeminin ısıl iletim katsayısı

K : Zemin basınç katsayısı

K_a : Aktif zemin basıncı katsayısı

K_p : Pasif zemin basıncı katsayısı

K_0 : Sükunetteki zemin basıncı katsayısı

$\bar{K}$: Mesnetlenme derecesini tanımlayan katsayı

l : Kayma konisinin uygun açıdaki yüzey uzunluğu değeri

m : Kütle veya kayma gerilmesi oluşturma faktörü

$M_{\gamma q}$: Kuvvet katsayısı değişimi

n : Sünme parametresi

n_a : Hacimsel hava muhtevası

$N_{\emptyset}$: Akış değeri

OM : Zemindeki organik madde miktarı

p : Zemin basıncı

p_a : Boşluklardaki hava basıncı

p_c : Kristal buza uygulanan dış basınç

p_e : Donmuş silindire etkiyen dış basınç

p_i : Donmuş silindire etkiyen iç basınç

p_L : Hidrodinamik basınç

p_S : Zemin danesine uygulanan basınç

p_T : Isıl-moleküler basınç

p_w : Boşluk suyu basıncı

P_a : Birim ankraj uzunluğu için Rankine aktif kuvveti

P_{all} : İzin verilebilir kuvvet

$P_{h'}$: Yatay efektif basınç

P_{hp} : Donma işlemindeki ön gerilme basıncı

P_n : Geçerli çekme kapasitesi

P_p : Birim ankraj uzunluğu için Rankine pasif kuvveti

P_u : Nihai çekme kuvveti

r : Donmuş silindir yarıçapı

RMR : Kaya kütle indeksi

R^2 : Korelasyon katsayısı

s_o : Göçme anındaki kayma gerilmesi

S' : Şekil faktörüdür

S_q : Sıkıştırılmış zemin için düzeltme faktörü

S_r : Doygunluk derecesi

t : Süre

T : Sıcaklık

u_i : Radyal yer değiştirme

$USCS$: Birleşik zemin sınıflandırma sistemi

u_w : Hidrostatik basınç

V : Akışkanın akış hızı değeri

V_n : Geçerli kesme kapasitesi

V_u : Nihai kesme kuvveti

z : Derinlik

İngiliz Alfabesi

$\boldsymbol{q}$: Birim alandan geçen ısı akış oranı

$\boldsymbol{q_u}$: Serbest basınç dayanımı

$\boldsymbol{Q}$: Isı miktarı

$\boldsymbol{x}$: Merkez eksene olan mesafe

$\boldsymbol{X}$: Kütle bölüntüsü

Yunan Alfabesi

$\boldsymbol{\alpha}$: Isıl yayılma katsayısı veya ankrajın yatay ile yaptığı açı

$\boldsymbol{\gamma}$: Birim hacim ağırlık

$\boldsymbol{\gamma_d}$: Kuru birim hacim ağırlık

$\boldsymbol{\delta}$: Adezyon veya sıyrılmaya bağlı kayma değeri

$\boldsymbol{\Delta}$: Desteksiz duvar kesit yüksekliğin ortasındaki izin verilebilir sehim miktarı

$\boldsymbol{\Delta T}$: Sıcaklık değişimi

$\boldsymbol{\Delta\sigma_3}$: Sargı Basıncı

$\boldsymbol{\varepsilon}$: Birim şekil değiştirme

$\boldsymbol{\dot{\varepsilon}_c}$: Referans birim şekil değiştirme değeri

$\boldsymbol{\Theta}$: Zemin numunesinin hacmi

$\boldsymbol{\lambda}$: Isı iletim katsayısı veya görünür ısıl iletkenlik

$\boldsymbol{\lambda'_e}$: Gözenekli malzeme için efektif iletkenlik

$\boldsymbol{\lambda_{tot}}$: Genel ısıl iletkenlik

$\boldsymbol{\lambda^0}$: Kuru zemin iletkenliği

$\boldsymbol{\lambda^1}$: Doygun zemin iletkenliği

$\boldsymbol{\rho}$: Yoğunluk

$\boldsymbol{\rho_b}$: Hacimsel yoğunluk

$\boldsymbol{\rho_{OM}}$: Hacimsel organik madde yoğunluğu

$\boldsymbol{\rho_s}$: Hacimsel dane yoğunluğu

$\boldsymbol{\sigma}$: Eksenel gerilme

$\boldsymbol{\sigma_{cr}}$: Tünel etrafındaki yenilmiş bölgede ayrışmış kayaçların basınç dayanımı

$\boldsymbol{\sigma_{c\theta}}$: Referans gerilmesi

$\boldsymbol{\sigma_{fu}}$: Serbest basınçtaki sünme dayanımı

$\boldsymbol{\sigma_{ij}'}$: Zemin iskeletindeki efektif gerilme

$\sigma_{ij}{}^{i}$: Buz parçaları arasındaki gerilme

$\sigma_{ij}{}^{s}$: Zemin parçaları arasındaki temas gerilmesi

σ_o : Göçme anındaki normal gerilme

σ_r : Yatay radyal gerilme

σ_{so} : Çekme gerilmesi

σ_z : Düşey gerilme

σ_θ : Asal gerilme veya yatay çevresel gerilme

$\bar{\sigma}_v{}'$: Ortalama düşey efektif gerilme

τ : Kayma gerilmesi

τ_b : Aderans gerilmesi

τ_f : Göçme anındaki kayma gerilmesi

τ_r : Kalıcı kayma gerilmesi

$\bar{v}$: Hız vektörü

$\emptyset$: İçsel sürtünme açısı veya direnç faktörü veya zemin gözenekliliği

$\emptyset'$: Efektif içsel sürtünme açısı

$\emptyset_f{}'$: Kayan kaya kütlesi boyunca geçerli olan içsel sürtünme açısı

χ_1 : Donmamış suyun boşluk suyu basıncı katsayısı

χ_2 : Havanın boşluk basıncı katsayısı

ψ : Zemin numunesinin kesit alanını

$\vec{\Psi}$: Isı akış yoğunluğu

ω : Su muhtevası

$\vec{\nabla}$: Gradyan

∇T : Sıcaklığın skaler yön türevi

BİRİNCİ BÖLÜM

1. GİRİŞ: YAPAY ZEMİN DONDURMA YÖNTEMİ

Dünya çapında hızla gelişen yapı sektörü, eski nesil yapıların yerine modern ve büyük ölçekli yapılara olan ihtiyacı arttırmıştır. Bu durumda ortaya çıkan sınırlı alanların daha verimli biçimde değerlendirme gerekliliği, yapı yüklerini arttırmakta ve derin kazı zorunluluğunu doğurmaktadır. Özellikle şehir merkezlerinde yapılan derin kazılar gerekli önlemler alınmadığı takdirde insan yaşamını ve yapı konforunu etkileyebilmektedir. Derin kazılarda şevlerin karalılığını sağlamak amacıyla kullanılan yanal kazık ve perde duvarlar gibi destekli kazıların inşa süreci, yoğun emek ve zaman gerektirmektedir. Yeraltı suyunun olması durumunda su ortamdan uzaklaştırıldıktan sonra, palplanş veya enjeksiyon gibi yöntemlerle su geçişi engellenmektedir. Bitişik nizam yapıların temel kazısı esnasında kazık veya jet enjeksiyonu yöntemlerinde makine boyutlarından dolayı sınır akslara ulaşılamamaktadır. Tünel inşaatlarında suyun giderilememesi göçme riski oluşturmakla beraber; kimi zaman içerideki işçilerin hayatını tehlikeye atmakta kimi zaman ise maliyeti oldukça yüksek tünel delme makinesi (TBM) gibi cihazların göçük altında kalarak çalışamaz hale gelmesine yol açmaktadır. Geçirimli zemin ve yeraltı suyunun olduğu durumlarda kuru ortamda çalışabilmek için gerekli su uzaklaştırma yöntemleri arazi gözlemlerini içermekte ve özel tasarımlar gerektirmektedir. Mevcut yöntemlerle granüler zeminlerden doğal şartları muhteva eden örselenmemiş numuneler alınamamaktadır. Örselenmemiş zemin numuneleri doğal durumu belirttiğinden, parametrelerin belirlenmesi sürecinde birincil derecede önem arz etmektedir. "Yapay Zemin Dondurma" (YZD) yöntemi arazi çalışmalarında karşılaştığımız bu tip sorunların giderilmesinde uygun çözüm sağlayabilir. Böylece, zemin dondurma ile pompa çukurlarına olan ihtiyaç kalkıp akarsu kenarlarında da sistem kullanılabilir.

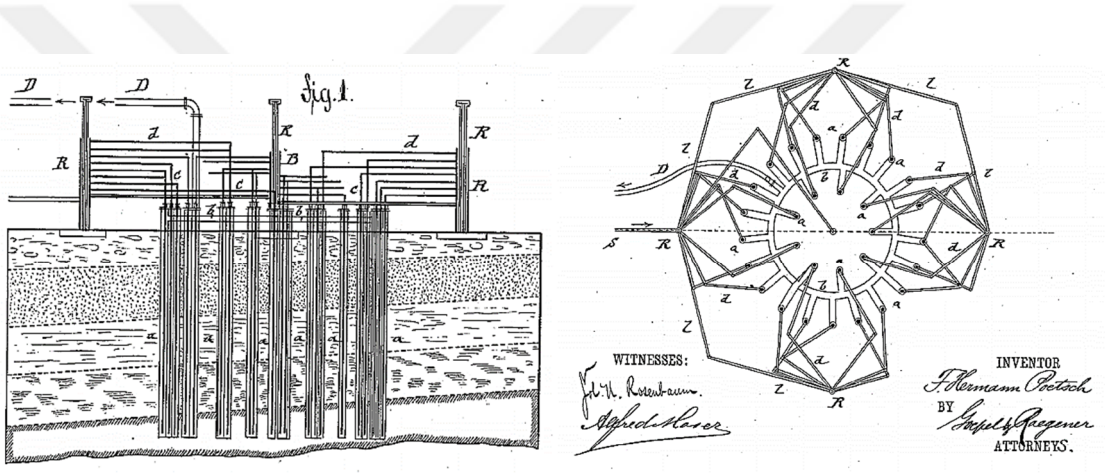
Özellikleri birçok parametreye göre değişiklik gösteren ve heterojen yapıya sahip "zemin" temel olarak hava, su ve danelerden oluşmaktadır. Bu fazların etkileşimi zeminin özelliklerini meydana getirmektedir. Aşırı yük veya dinamik etki altında danelerin yapısı ve diziliminde değişiklikler görülmektedir. Aynı zamanda zemin yapısı içerisinde mevcut olan su, zemin danelerinin birbirleri ile olan etkileşimini azaltarak taşıma kapasitesi bakımından olumsuz rol oynamaktadır. Zemin içerisindeki su fazının dondurularak ilk duruma göre oldukça homojen ve stabil, beton benzeri bir yapı elde edilmesi zemin dondurma felsefesinin temelini oluşturmaktadır. Donma işleminden sonra buz, çimento gibi bağlayıcı rol oynamaktadır. Fakat dane mukavemeti ve dizilimi, su miktarı, çatlaklar gibi fiziksel etkiler mühendislik parametrelerini değiştirmektedir (Evirgen vd., 2015, s. 75).

Normal şartlar altında zeminde su bulunması, zeminin hem mukavemeti hem de fiziksel özellikleri açısından sorun teşkil etmektedir. Yapay zemin dondurma (YZD) yönteminde ise verimli sonucun alınabilmesi için zeminin suya doygun olması gerekmektedir. Zemin yapısı içerisindeki boşluklarda bulunan yeraltı suyunun, harici bir düzenekle soğutularak donması sağlanır. Bu sayede zemin yapısı içerisinde bağlayıcı malzemeye dönüşen su sayesinde buz-dane oluşumu ile donmuş duvar elde edilir ve geçici stabilite sağlanarak kazı işlemine izin verilmiş olunur. Sürekli don olayına maruz kalan bölgelerde ise bu süreç doğal biçimde meydana gelmektedir (Evirgen vd., 2016, s. 1046). Doğal şartlar altında yılın büyük çoğunluğunda sıfırın altında sıcaklığa maruz kalan bu bölgeler ve dondurucu iklimlerin görüldüğü bu alanlar permafrost bölgeler olarak adlandırılmaktadır. Rusya, Moğolistan, Kanada, Alaska bunlara örmektir. Türkiye'de de Erzurum, Kars ve Ağrı illerimiz permafrost alanlara sahiptir. Bu bölgelerde esas sorun yapıların don olayına karşı korunmasıdır. Aynı zamanda yollar ve geoteknik yapılarının, meydana gelen donma kabarması ve çözülme oturmalarından ciddi oranda zarar gördüğü bilinmektedir. Kısacası don olayı betonarme yapılarda direkt, zemin ile alakalı diğer mühendislik yapılarında ise dolaylı hasarlara yol açmaktadır. Fakat ortam sıcaklığı ciddi miktarda düşük olduğundan yapay zemin dondurma yönteminin buralarda kullanımının hem zaman hem de maliyet açısından avantajlı olacağı belirtilebilir.

Bu sistemde; ilk olarak projeye uygun zeminde açılan yatay, düşey ya da açılı deliklere yeterli dayanıma sahip borular yerleştirilir. Soğutma haznesine konulan kalsiyum klorür (CaCl), magnezyum klorür (MgCl) gibi tuz çözeltileri istenilen sıcaklığa kadar soğutulur veya zaten sıvı halde -198 ºC sıcaklıkta bulunan sıvı azot akışkan olarak kullanılır. Çalışılan sıcaklığa uygun bir pompa vasıtasıyla borulara iletilen akışkan, çevresinde bulunan zemini dondurarak donmuş duvar elde edilmesini sağlar. Böylece geçici kazı destek yapısı elde edilmiş olur.

Yapay dondurulmuş zemin, inşaat mühendisleri ve maden mühendisleri tarafından zemin stabilizasyonu için destek sağlamak ve yer altı suyunu engellemek amacı ile kullanılmaktadır. 1862'de South Wales'ta ilk kullanımından itibaren, yöntem dünya çapında olumsuz zemin koşullarına karşı hem geçici hem de kalıcı çözüm sunan güvenilir bir metot olarak kabul görmüştür (Harris, 1993, s. 220). Yapay zemin dondurmaya ilişkin ilk patentin Poetsch (1884, Amerika Birleşik Devletleri, US300891 A) tarafından alınmasının ardından yöntem literatüre girmiştir (Şekil 1.1). Patent açıklamasında, zeminin yapay yolla dondurulmasının amacı donmuş zemin formuna dönüştürülecek

bataklıklarda maden çalışmalarının gerçekleştirilebilmesi olarak belirtilmiştir. Zemin dondurma için kullanılan çift cidarlı iç ve dış boru tanımı ilk bu çalışmada yapılmıştır. Zamanla yapay zemin dondurma ve doğal yol ile don olayına maruz kalan bölgelerde gerçekleşen donma olaylarını içeren çalışmalar sistemin gelişmesine katkıda bulunmuştur. Günümüzde ise Avrupa, Amerika, Japonya ve Çin'de özellikle kıyı kesimlerde soğutucu akışkanlar kullanılarak zemin dondurma metodu uygulanmaktadır. Fakat kullanılan sistemler son derece yüksek üretim ve işletim giderlerine sahip olmakla birlikte taşınması da kolay değildir. Arazide sıvı azot kullanılarak zemin dondurma işlemi literatürde bulunsa bile uygulamada pek tercih edilmemektedir. Sistemin verimliliğinin arttırılması ve maliyetlerin düşürülmesi için çalışmalar yapılmaktadır.



Şekil 1.1. *Yapay Zemin Dondurma Sistemine İlişkin İlk Patent*
Kaynak: *Poetsch, 1884, Amerika Birleşik Devletleri, US300891 A*

Türkiye'de aktif olarak kullanımı bulunmayan zemin dondurma sistemi derin kazılarda, tünellerde, suyun uzaklaştırılmasında ve numune alma işlemlerinde efektif çözümler sunmaktadır. Ancak sistemin ekonomik, hızlı ve çevreci bir şekilde kullanımına olanak sağlamak amacıyla geliştirilmesi gerekmektedir. Tez kapsamında mono etilen glikol (antifriz) ve sıvı azot (nitrojen) dolaşımına olanak sağlayan iki farklı zemin dondurma sistemi ile dondurma işlemi gerçekleştirilmiştir. Soğutucu akışkan olarak antifriz veya sıvı azot kullanımı karşılaştırılarak sistemlerin avantajları ve dezavantajları değerlendirilmiştir. Bu sayede gelecek çalışmalarda laboratuvarda elde edilen veriler ile arazi uygulaması için gerekli olan makinenin boyut, kapasite, akışkan türü gibi özellikleri belirlenebilecektir. Ayrıca, Türkiye'de bu konu ile ilgili herhangi bir uygulama, yönetmelik veya standart bulunmamaktadır. Çıktıların bu hususlarda da faydalı

olabileceği düşünülmektedir. Türkiye'nin lokomotif sektörü olarak kabul edilen inşaat sektörü zemin dondurma sistemi hakkında yeterince tecrübeye sahip değildir. Bu anlamda hem zemin dondurma sistemi hakkında ihtiyaç olan yönetmelik ve standardın geliştirilmesi hem de sistemin aktif kullanımına olanak sağlamak, tezin birinci bölümünün ana temasını oluşturmaktadır. Günümüzde özellikle Ankara, İstanbul ve İzmir gibi büyükşehirlerde yeraltı hafif raylı sistemler (metro) ve şehirlerarası raylı sistemlerin (Yüksek Hızlı Tren) inşası hat safhadadır. Yakın gelecekte şehir merkezlerinde inşa edilecek ve geneli delme tüneller şeklinde tasarlanan bu güzergahlardaki tünellerde yeraltı suyu önlemleri ile kazı destekleme çalışmaları ciddi maliyetlere neden olmaktadır. Ülkemizde zemin dondurma sistemi aktif olarak kullanılmamaktadır. Fakat zemin tipine göre uygun dondurma sistemleri tasarlandığı takdirde ekonomi, zaman ve verimlilik açısından gerek kamu kuruluşları gerekse özel şirketlerin sistemi kullanımına olanak sağlanacak olup Çin ve Japonya'daki uygulamaya dayalı çalışmalardaki gibi arazideki projelerden bilimsel çalışmalar için de veri toplanabilecektir. Tez kapsamında laboratuvarda ölçekli numuneler üzerinde sistem değerlendirildikten sonra gelecek projelerde her türlü ortamda arazi çalışmalarını gerçekleştirmek adına güneş enerjisi ve / veya rüzgar enerjisi entegre edilerek gerçek ölçekli sistem tasarlanması düşünülmektedir.

Diğer taraftan arazide kohezyonsuz zeminlerde örselenmemiş numune alınmasına yönelik kullanışlı bir yöntem bulunmamaktadır. Zemin dondurularak karot numuneleri alındığında daha gerçekçi değerler elde edilecektir. Bu güvenilir sonuçlara bağlı kalarak tasarım aşamasında güvenlik faktörü değeri düşürülüp daha ekonomik inşaatlar yapılabilecektir.

Kazı destekleme çalışmaları sırasında yapılan yanal kazık, betonarme perde duvar ve ankrajlı iksa sistemleri gibi büyük kesitli inşaatlar yapı oturum alanında yer kayıplarına yol açmaktadır. Yüzey alanı detaylandırılmış borulama sistemleri ve açılı dondurma imkanı ile yer kaybını en aza indirgeyen zemin dondurma sistemleri, işveren ve yüklenici firma açısından tercih sebebi olacaktır.

"Zemin dondurma madencilik ve inşaat mühendisliğinde kuşkusuz en ekonomik ve güvenilir yöntem olarak derin kazılarda geçici destek ve yeraltı suyunu kesmek için tercih edilmektedir. Yeraltı su rejiminde kirlilik ve değişime yol açmadan akifer kaynaklarında sürekli pompalama ihtiyacını gidermektedir" (Akyurt vd., 2002, s. 1773-1789).

Tez kapsamında; geoteknik parametrelerin belirlenmesi, donma sonrası mekanik parametrelerde meydana gelen değişiklikler ve sıvı azot ile antifriz akışkanları kullanılarak yapay zemin dondurma sisteminin modellenmesi üç temel iş planı olarak tanımlanmıştır. Söz konusu çalışmalar ilgili başlıklar altında detaylandırılmıştır.

1.1. Yapay Zemin Dondurma Yönteminin Avantajları

- *Her tip zeminde uygulanabilir*. Arazi yapısının iyileştirme yöntemlerinin uygulanmasına olanak tanımaması durumunda da yapay zemin dondurma yöntemi güvenle kullanılabilir. Çünkü zemin iyileştirme yöntemlerinin uygulama sınırları zeminden zemine farklılık arz etmektedir. Mevcut zemin iyileştirme tekniklerinin her biri farklı zemin koşulları için önerilmektedir. Örneğin vibrokompaksiyon, patlatma ve partikül enjeksiyonu gibi teknikler çakıl ve kum ağırlıklı zeminlerde önerilirken; sürşarj uygulanması, elektroosmos, ısıl işlem gibi teknikler ince daneli zeminlerde uygulanmaktadır. Dinamik kompaksiyon ve mekanik stabilizasyon ise kum ile kil arasında geniş bir yelpazede tercih edilmektedir. Zeminde yeraltı suyu bulunması durumunda ise bu işlemlerin birçoğu verimliliğini yitirmektedir. Fakat yapay zemin dondurma yöntemi çakıl, kum, silt ve kil tipi zeminlerde uygulanabilmesinin yanı sıra balçık gibi zemin bile kabul edilmeye değer görmeye aşırı derecede düşük taşıma kapasitesine sahip alanlarda bile kullanılabilmektedir. Ortamda su bulunması sistem açısından sorun teşkil etmemekle birlikte, zemin içerisinde yeterli seviyede nem varlığı yöntemin olmazsa olmazı olarak karşımıza çıkmaktadır.

  Diğer taraftan granüler zeminlerde sıcaklık yaklaşık -5 ºC'nin altına düştüğünde boşluk suyu ve dolayısıyla zemin donmaktadır. Kohezyonlu zeminlerde ise dane ve su arasındaki kimyasal bağlar ve düşük permeabilite sebebi ile yaklaşık -15 ºC'nin altında zemin donmaya başlar. Zemin yapısındaki su fazı ne kadar fazla oranda buz lensi veya buz formuna dönüştürülürse dayanım o derecede artmaktadır. Bu yüzden efektif sonuçlar için daha düşük sıcaklıklar öngörülmektedir (Evirgen vd., 2016, s. 1046).
- *Çeşitli kullanım alanları mevcuttur*. En sık kullanım alanı kazı destekleme ve iksa tasarımlarında yanal destek yapısı oluşturma amaçlı düşey borulama ile kullanımdır. Yine tünel inşaatlarında hem yeraltı suyunun kesilmesi hem de güvenli kazı yapılabilmesi amacı ile yatay borulama ile kullanılır. Bunların yanı

sıra zemin stabilizasyonu, şaft açılması, sıvılaşma potansiyelinin geçici olarak engellenmesi gibi kullanım alanları da bulunmaktadır.

- *Yeraltı suyunu keser*. Yöntemin temeli zemin boşlukları içerisindeki suyun dondurulmasına dayandığından, ortamdaki su fazının buz hale dönüştürülmesi ana amaç olacağı için yeraltı suyu efektif biçimde kesilecektir. Ayrıca yer altı su seviyesinin pompa vs. kullanılarak düşürülmesinin çevredeki yapılara zarar verme olasılığı varsa veya kazı sırasında akifer kaynaklı ani su patlaması olasılığı varsa yapay zemin dondurma bu durumlar da çözüm sunan bir uygulamadır. Yeraltı suyunda bulanan tuz ve kimyasalların proje öncesinde analiz edilerek uygun çözüm sunulması, gerekiyorsa daha düşük sıcaklıklar kullanılarak veya bu kirletici maddelerin ortamdan uzaklaştırılması şarttır.
- *Kurulum kolaylığı*. Sistem portatif ve kolayca taşınabilir olduğundan tekrar tekrar kullanılabilme imkanı sunar.
- *Minimum harici ekipman gerekliliği*. Yapay zemin dondurma yönteminin arazi uygulama ekipmanları; soğutucu ünite, depo, pompa, borular ve bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Diğer zemin iyileştirme metotları veya temel sistemleri ile kıyaslanırsa harici makine (kazık delme makinesi, enjeksiyon ünitesi vs.) ve malzeme (beton, donatı, mekanik stabilize dolgu, bentonit vs.) gerektirmemektedir. Sadece boruların yerleştirilebilmesi için delgi işlemini sağlayacak delgi makinesi ihtiyacı bulunmaktadır. Bu makine de halihazırda her zemin firmasının makine parkında bulunan; numune alımı ve SPT için kullanılan bir ekipmandır.
- *Diğer geoteknik makinelerine oranla daha düşük bakım masrafı*. Kazık makinesi ve jet enjeksiyonu ekipmanları gibi devasa makinelerle kıyaslandığında, yapay zemin dondurma yönteminin uygulama ekipmanlarında; hidrolik üniteler ve bunlar için gerekli olan basınç unsurları bulunmadığından; piston, keçe, yağ deposu, iletim hatları, hortumlar gibi elemanlara da ihtiyaç yoktur. Dolayısıyla uzun vadede ciddi bakım ve onarım giderleri oluşturan bu ekipmanların yapay zemin dondurma yönteminde bulunmaması bir diğer ekonomik kazanç unsurudur. Zaten soğutucu ünitelerin tasarımı sırasında maksimum kapasitede düşülebilecek sıcaklık ve basılacak akışkan debisi öngörüldüğünden ve tüm ekipmanlar soğuğa - korozyona karşı dirençli seçileceğinden bakım hususunda alt bileşenlerde herhangi bir ihtiyaç arz etmemektedir. Sadece dondurma ekipmanlarından en

önemlisi olan soğutucu motor belirli aralıklarla gözlem altında tutulup gerektiğinde bakımları yapılmaktadır.

- *Bitişik yapıya "0" inşa imkanı*. Günümüzde derin temellerin veya iksa sistemlerinin inşasında aktif biçimde kullanılan geoteknik mühendisliği uygulamalarında, şantiyeye bitişik nizam yapı veya yol gibi müdahale edilemeyecek alanların olması durumunda, makinelerin kule mesafeleri sınıra tamamen yaklaşmaya müsaade etmemektedir. Bu yüzden inşa edilen yapının dış sınırlarından aksları geri çekme durumları gözlenmektedir. Böylece yapının oturum alanında meydana gelen kayıplar hem müteahhit hem de alıcı açısından maliyeti yükselmesi anlamına gelmektedir. Yapay zemin dondurma yönteminde ise açılı veya düşey uygulamalar ile alan kaybı olmaksızın inşa mümkündür.
- *Çevre dostudur*. Doğal yapıyı bozmaz. Diğer geoteknik sistemlerde olduğu gibi beton veya betonarme gibi herhangi harici bir malzemenin zemine enjeksiyonu söz konusu değildir.
- *Gürültü ve sarsıntı oluşturmaz*. Gerek kurulum gerekse uygulama sürecinde herhangi bir dinamik etki veya yüksek kapasiteli makine gerektirmediğinden, gürültü ve sarsıntı oluşturmaz. Bu yüzden şehir merkezlerinde de rahatsızlık vermeden güvenle kullanılabilir.
- *İşçi sağlığı ve iş güvenliği açısından daha güvenilirdir*. Hem ekipman hem de ham madde açısından gereklilikleri minimum seviyede olduğu için diğer uygulamalarda karşılaşılabilecek kazaların birçoğu yapay zemin dondurma yönteminde bulunmamaktadır. Yöntemde ön plana çıkan en büyük sorun, sisteminin hata vermesi durumunda donmuş duvarın çözülmeye başlaması olarak belirtilebilir. Fakat bu çözülme betonarme yapılarda olduğu gibi ani göçme oluşturmaz. Zeminin çözülmesi dış faktörlere göre günleri belki de ayları alabilir. Bu yüzden sorun çıkabilecek motor, pompa ve dolaşım boruları gibi ekipmanların yedeklerinin bulunması ve olası acil durumlarda devreye sokulması işçi sağlığı ve iş güvenliği açısından önem arz etmektedir. Ayrıca soğutucu akışkanların basınç altındaki davranışı, yanma, parlama ve patlamaya karşı reaksiyonları iyi bilinmelidir. Olası tehlike durumlarında alınabilecek önlemler ile acil müdahale şartları önceden kararlaştırılmalıdır. Soğutucu akışkanlar yüzünden veya dışarıdan herhangi bir etki ile borulama sisteminde meydana gelebilecek herhangi bir kaçak; işçi sağlığını tehlikeye atabilir. Diğer taraftan donmuş duvarda ani

çözülme başlatır ve şantiye ortamını tehlikeye sokabilir. Bu yüzden sistemdeki akışkan basıncı ve miktarının sürekli kontrolü şarttır.

1.2. Yapay Zemin Dondurma Yönteminin Dezavantajları

- *Donma kabarması*. Zeminin sonsuz bir ortam olduğu göz önünde bulundurulursa, donma sınırları çevresinde herhangi bir sınırlayıcı engel olmadığında su donduktan sonra meydana gelecek %9'luk hacim artışı zeminde ciddi gerilmeler oluşturmamaktadır. Fakat çalışma alanına komşu sınırlarda bulunan yapılar veya tabakalaşma zemin hacminin artışını kısıtladığında zayıf yönde hacim artışı meydana gelecektir. Donma kabarmasının önemli olduğu bir diğer yer ulaştırma yapıları ve yollardır. Özellikle hassas yapılarda önlem alınmazsa ciddi hasarlar meydana gelebilir. Planlama sürecinde göz önünde bulundurulması gerekir. Donma kabarması tamamen suya doygun zeminlerde ön plana çıkmaktadır. Kısmı doygunluk seviyelerinde suyun donma sonrasındaki hareketi zemin içerisindeki boşluklara doğru yönleneceğinden, hacim artışı tabakadaki içsel boşluklar tarafından sönümlenecektir. Tasarım sürecinde, donma kabarması dondurma işlemi sırasında önlem alınması gereken sorunların başında gelmektedir.
- *Çözülme oturması*. Donma uygulamasının akabinde sistemde kademeli sıcaklık artışı uygulanarak veya sistem kapatılarak zemin çözülmeye bırakılır. Donma sırasında meydana gelen hacim artışı çözülme ile eski haline dönmeye çalışacaktır. Üzerinde durulması gereken bir diğer nokta ise sıcaklık düştükçe oluşan buz duvar emme davranışı (suction behavior) oluşturacağından buz oluşan bölgeye doğru su hareketi görülmektedir. Bu durum çözülme sonrasında suyun bazı bölgelerde yoğunlaşmasına sebebiyet vermektedir. Çözülme sonrasında meydana gelen çatlaklar da zemindeki geçirgenliği arttıracaktır. Tasarım sürecinde çözülme oturması işlem sonrası önlem alınması gereken sorunların başında gelmektedir.
- *Betonarme yapılara zarar verme olasılığı*. Yapay zemin dondurmanın uygulanacağı bölgede beton veya betonarme yapı olması durumunda, donma sürecinde veya donma-çözülme çevrimlerinde bu yapıların zarar görmemesi için gerekli yalıtımların yapılması önem arz etmektedir.

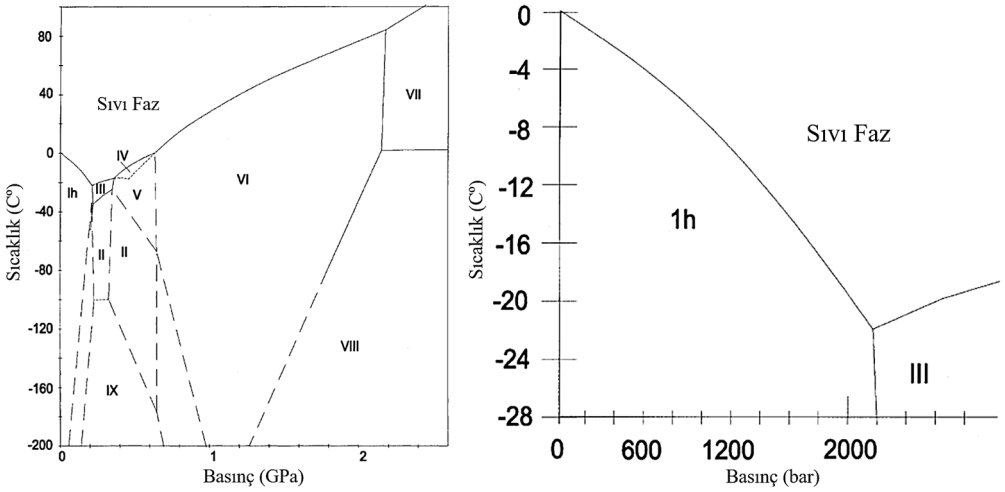
- *Geçici destek çalışmasıdır*. Yöntem geçici bir destek çalışmasıdır. Kalıcı biçimde kullanılması sürekli soğutma gerektireceğinden ekonomik bir mühendislik yaklaşımı olarak değerlendirilemez.
- *Ön dondurma süresi gerekliliği*. Birçok geoteknik yöntem zeminde direkt uygulanırken, kimi projelerde oturmanın tamamlanabilmesi için birkaç yıl zemin üzerinde bırakılan sürşarj yükleri veya fitil drenler (wick drain) ile kum drenler gibi uygulamalarda ön uygulama süreleri gerekebilmektedir. Halihazırda enjeksiyon veya beton ile gerçekleştirilen uygulamalarda yükleme, art germe gibi işlemlerde de minimum 28 beton dayanımı için beklenmektedir. Bu açıdan gereken ön dondurma süresinin diğer uygulamalarda da ön uygulama süresi biçiminde zorunlu olduğu belirtilebilir.
- *İşlem süresi*: Yöntem her çeşit zeminde kullanılmakla beraber donma süresi, dondurucu akışkan hızı, ortam sıcaklığı, zeminin dane – boyut dağılımı, doygunluk derecesi, yeraltı suyunda bulunan kimyasal ile tuzlar gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Bu değişkenler ısı iletimini güçleştireceğinden, dondurucu makinenin ve diğer ekipmanların kapasitelerinin arttırılması gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Böylece proje gereksinimlerine göre işlem süresi uzayabilir. Toplam donma süresi belirlenirken donma öncesi kurulum süresi, ön dondurma süresi, donma esnasındaki süre ve çözülme süresi aşamalarının hepsinin hesaba katılması gerekmektedir.
- *Ekipman maliyeti*: Yapay zemin dondurma yönteminde belirtilen bir diğer dezavantaj başlangıç maliyetidir. İlk kurulum aşamasında gereken akışkan deposu, soğutucu motorlar, özel pompalar, borular ve bağlantı elemanları özel tasarım gerektirdiğinden normal soğutma sistemlerine oranla daha pahalıdır. Fakat geoteknik mühendisliğinde kullanılagelen fore kazık makinesi, jet enjeksiyon delgisi ve enjeksiyon sistemi veya diyafram duvar için gerekli olan hidrolik freze gibi ekipmanların maliyetleri ile kıyaslandığında ve sonrasında gereken bakım masraflarının düşük seviyede kalması sebebi ile yapay zemin dondurma arazi ekipmanlarının uzun vadede çok daha ucuz olduğu belirtilebilir.

2. LİTERATÜR TARAMASI: YAPAY ZEMİN DONDURMA YÖNTEMİ

Literatürde; yapay zemin dondurma yöntemi ile ilgili yapılan çalışmalar teorik çalışmalar, deneysel çalışmalar ve arazi uygulamaları başlıkları altında ön plana çıkmaktadır. Dondurma sırasındaki ısıl parametreler, geoteknik parametrelerin değişimi, modelleme ile gerçek şartların kıyaslanması, geliştirilen yeni ekipmanlar, yük ve şekil değiştirmede meydana gelen değişimlerin incelenmesi hususlarında yapılan çalışmalar tez kapsamında geliştirilen yöntemlere katkılar sunmuştur. Literatürdeki çalışmaların anlatımı sırasında tez kapsamında katkı sağlayan bu çalışmaların içerikleri özellikle uzun tutularak ayrıntılı biçimde açıklanmıştır.

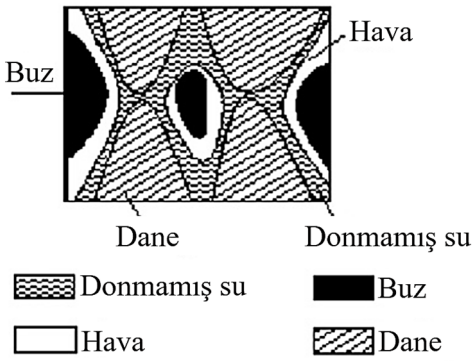
2.1. Teorik Çalışmalar

Buz - su sistemlerindeki donma felsefesinin araştırıldığı çalışmada Akyurt vd. (2002, s. 1773-1789) tarafından katılaşma ve erime karakteristikleri incelenmiştir. Buz yoğunluğuna bağlı olarak su ve buz özellikleri ile faz diyagramları değişimi değerlendirilmiştir. Şekil 2.1'de su ve buz için faz diyagramları verilmiştir. Diyagramda "1h" buzun doğada bulunan altıgen formunu belirtmektedir. Şekil 2.1b'de görüldüğü gibi su doğada ölçüm basıncının sıfır olduğu durumda 0 ºC civarında buza dönüşmektedir. Fakat basınç 600 bar civarına çıkarsa normal duruma göre yüksek basınç olarak adlandırılabilecek bu değerde yaklaşık -4 ºC'de donmanın gerçekleştiği görülebilir. Bir fazdan diğerine geçiş bazı sıcaklıklarda durağan ısının emilimi veya çıkışı ile gerçekleşmektedir. Bir fazdaki dengenin bozulması ile madde sahip olduğu enerjiye göre diğer faza geçer. Çalışmalar sonucunda çatlak oluşması istenen hatlarda delikler açılıp suyla doldurularak, dondurucu havalarda buz oluşumu sırasındaki genişleme sayesinde dinamite ihtiyaç duymaksızın kayada parçalanmaya sebep olacağı belirtilmiştir. Çalışmada dondurucu akışkan olarak sıvı nitrojen ve CO_2 kullanılabileceği üzerinde durulmuştur. Sıvı azot için 12″, küçük boyutlu statik su sistemlerinde ise 3/8″ ve 2 1/8″ boru çapları önerilmektedir.



Şekil 2.1. *a. Buz ve b. Su İçin Farklı Sıcaklık ve Basınçlardaki Faz Diyagramla*rı
Kaynak: *Akyurt vd., 2002, s. 1774*

Teorik model geliştirilen çalışmada; çok fazlı gözenekli zemin ile su, ısı ve deformasyon etkileşimleri incelenmiştir (Li vd., 2008, s. 19-35). Doygun olmayan donmuş zeminde hava fazı; atmosfere açık (açık gözenekli numune) ve atmosfere kapalı izole edilmiş (kapalı gözenekli numune) olmak üzere iki farklı ideal durum için değerlendirilmiştir. Doygun olmayan donmuş zeminlerde ısı, nem ve yer değiştirme bileşim özellikleri için yazılım geliştirilmiştir. Sayısal sonuçlar Hua Shixia otoyolu temeli değerleri ile karşılaştırılmıştır. Arazi ölçümleri ve sayısal karşılaştırmada sıcaklık ve deformasyon sonuçlarında sırasıyla % 10 ve % 20 mertebelerinde farklar gözlenmiştir. Zeminde oluşan buz lenslerinin kalınlığı -1.0 ºC ile -30.0 ºC arasındaki sıcaklık değişimlerine bağlı olarak birkaç milimetre ile metre boyutları arasında değişmektedir. Buz lensleri çok kalın ise bunlar içerisinde hava atmosferden izole edilmektedir (Şekil 2.2). Eriyen sığ kumlarda ise hava atmosfere açılmaktadır. Fakat derin killerde hava yaklaşık olarak atmosfere kapalı olarak kabul edilebilir. Bu durumlarda yarı açık ve yarı kapalı gözenekli zemin tipleri oluşabilmektedir.



Şekil 2.2. *Doygun Olmayan Donmuş Zemin Numunesinin Temsili Birim Kesiti*
Kaynak: *Li vd., 2008, s. 20*

Çalışmada doygun olmayan donmuş zeminlerde efektif gerilme tanımı yapılmış olup aşağıda sıralanan eşitlikler verilmiştir (Li vd., 2008, s. 19-35).

$$A = A_s + A_w + A_i + A_a \tag{2.1}$$

Burada; A toplam zemin kesit alanı, A_s zemin daneleri temas alanı, A_w donmamış su temas alanı, A_i buz parçaları temas alanı ve A_a ve hava temas alanıdır.

Toplam gerilme ise her bileşenin içsel gerilmelerinin toplamı olarak tanımlanmıştır.

$$\sigma_{ij} = \frac{A_s}{A}\sigma_{ij}{}^{s} + \frac{A_i}{A}\sigma_{ij}{}^{i} + \frac{A_w}{A}p_w\sigma_{ij} + \frac{A_a}{A}p_a\sigma_{ij} \tag{2.2}$$

Burada; σ_{ij}^{s} zemin parçaları arasındaki temas gerilmesi, σ_{ij}^{i} buz parçaları arasındaki gerilme, p_w boşluk suyu basıncı ve p_a boşluklardaki hava basıncıdır.

$$\sigma_{ij}{}' = \frac{A_s}{A}\sigma_{ij}{}^{s} \tag{2.3}$$

Burada; σ_{ij}' ise zemin iskeletindeki efektif gerilmedir.

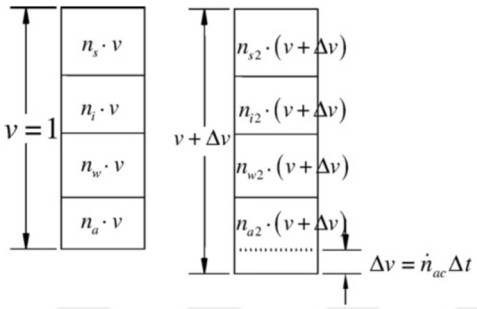
Zemin daneleri temas alanı ile zemin kesit alanı arasındaki gerçek oran ile diğer üç veri karşılaştırıldığında, bu değerler genellikle ihmal edilebilir. Bu durumda oran aşağıdaki gibi alınabilir.

$$\frac{A_i}{A} + \frac{A_w}{A} + \frac{A_a}{A} = 1 \tag{2.4}$$

Burada; A_w/A donmamış suyun boşluk suyu basıncı katsayısı χ_1 ve $A_a/A = \chi_2$ olarak alınırsa doygun olmayan zemin için geliştirilen efektif gerilmenin son hali aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

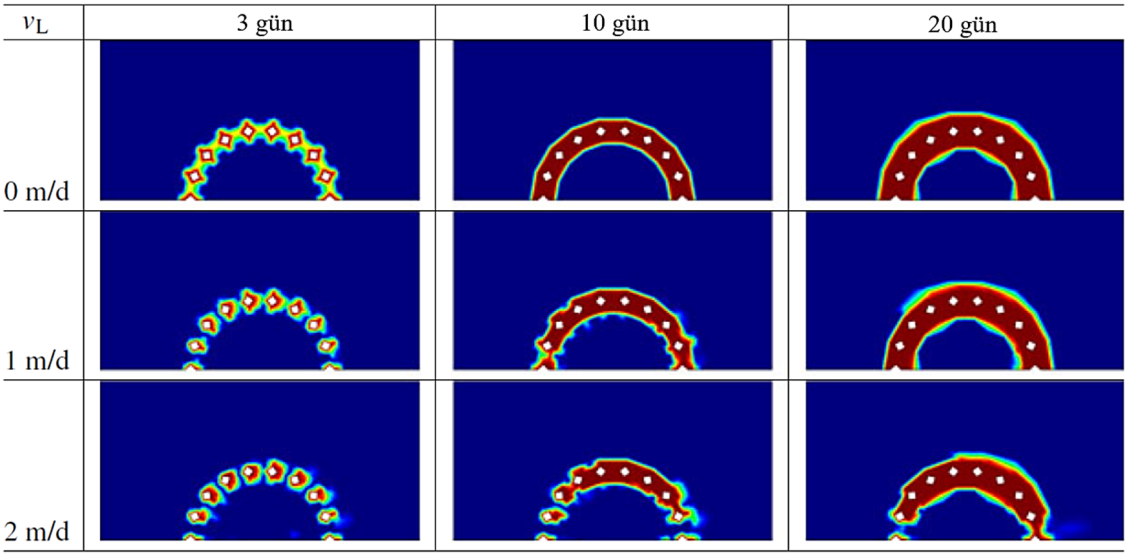
$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}{}' + (1 - \chi_1 - \chi_2)\sigma_{ij}' + \chi_1\sigma_{ij}p_w + \chi_2\sigma_{ij}p_a \tag{2.5}$$

Öngörülen eşitlikler, hacimsel hava muhtevası (n_a) değerinin 0'dan büyük, yani zeminde hava bulunması durumu için geliştirilmiştir. Su veya buz muhtevasının kritik değere (%85) kadar çıkması ihtimalinde efektif gerilme prensibi doygun zeminler için de kullanılabilir. Çalışmada süreklilik denklemleri zemin, hava, buz ve doygunluk durumları için Şekil 2.3'te verilmiştir (Li vd., 2008, s. 19-35).



Şekil 2.3. *Birim Hacimdeki Zemin Tanımı*
Kaynak: *Li vd., 2008, s. 24*

Zhou ve Meschke'nin (2013, s. 3173-3193) çalışmasında, donmaya maruz kalan yumuşak zeminin davranışını tanımlayabilmek için; katı iskelet, akışkan su ve buz kristallerini içeren ısıl - gözenekli - elastik teorisinin ön erime teorisi ile uyarlanması sonucunda, gözenekli malzemelerde kullanılan üç fazlı sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Modelde su ve buz arasındaki faz geçişleri, boşluk boyut dağılımı tarafından nitelenen sıcaklığa bağlı akışkan doygunluk işlevi ile birleştirilmiştir. Yatay sızıntı akışının bulunması durumunda modelde farklı sürelerde farklı akış hızlarının uygulanması ile tünelde elde edilen donmuş duvar yapısı ve kesit deformasyonlarını gösteren sonuçlar Şekil 2.4'te verilmiştir. Önerilen modelin; tünel arazisindeki gerçek yeraltı suyu koşullarına odaklanılarak dondurucu boruların konumu ve sayısı gibi değişkenlerin donma uygulamasının iyileştirilmesinde kullanılabileceği belirtilmiştir.



Şekil 2.4. *Tünel İnşaatında Kullanılan Yapay Zemin Dondurmanın Sayısal Modellemesi, Sızıntı Akışının Donmuş Kemer Üzerindeki Etkisi*
Kaynak: *Zhou ve Meschke, 2013, s. 3191*

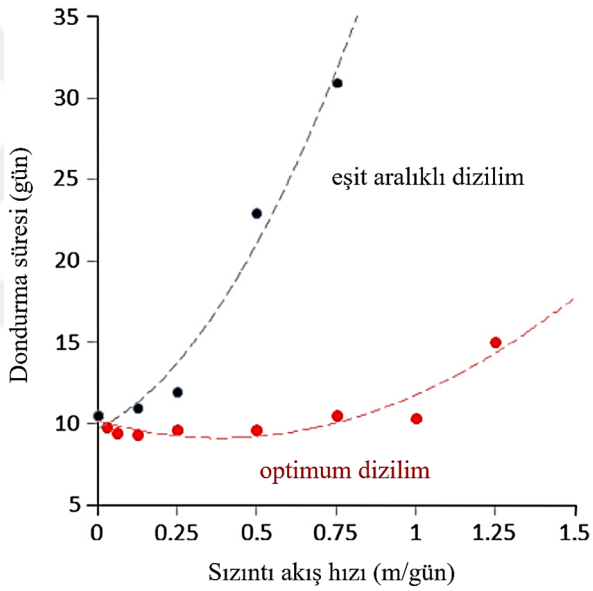
Zemin yüzeyine yakın yerlerde konumlandırılan ısı dönüştürücülerin çevresindeki zemin için geliştirilen sayısal modelde zemin su içeriği ve ısı transferine odaklanılmıştır (Chalhoub vd., 2017, s. 295-307). Önerilen modelde zemin - atmosfer sınırındaki ısı iletimi baskın fiziksel süreç ile minimum değişkene göre çözülmüş olup; net zemin yüzeyi ışınımı, zemin yüzeyi ile atmosfer arasındaki dalgalı ısı iletimi, buharlaşmaya bağlı durağan ısı ve yüzey boyunca gerçekleşen ısı iletimi ile açıklanmıştır.

Soğuğa maruz kalan bölgelerde düzenli olarak donma çözülmeye maruz kalan ve ham petrol ileten gömülü boru hatlarında boru çevresi zeminin sayısal benzeşimi gerçekleştirilmiştir (Zhao vd., 2014, s. 1477-1488). Hat boyunca; donmuş zeminlerdeki sıcaklık alanı, su muhtevası alanı ve donmamış su göçü farklı boru hattı işlem periyotlarında kuramsal ısı iletim modeli ve su - ısı çifti modeli ile değerlendirilmiştir. Buzun suya dönüşmesi sonucunda faz değişiminin durağan ısısının, ısı iletim işlemini yavaşlattığı vurgulanmıştır. Sıcaklık eğimi altında donmamış suyun zemin boşluklarına göç ettiği ve göç akış çizgisi dağılımının boru hattı yakınında yoğunlaştığı belirtilmiştir. Dolayısıyla bu bölge ısıl eğimin en geniş olduğu alandır.

Song vd. (2016, s. 29-38) tarafından, donmuş zemin için ısı ve su iletimine odaklanılarak sayısal model geliştirilmiştir. Model çok fazlı akışkan akışını içermekle birlikte gözenekli ortamdaki faz değişiminde ısı iletim mekanizmasının çözülmesi için kullanılmaktadır. Sonuçta, mühendislik bakışı açısından genel donma sistematiğinin

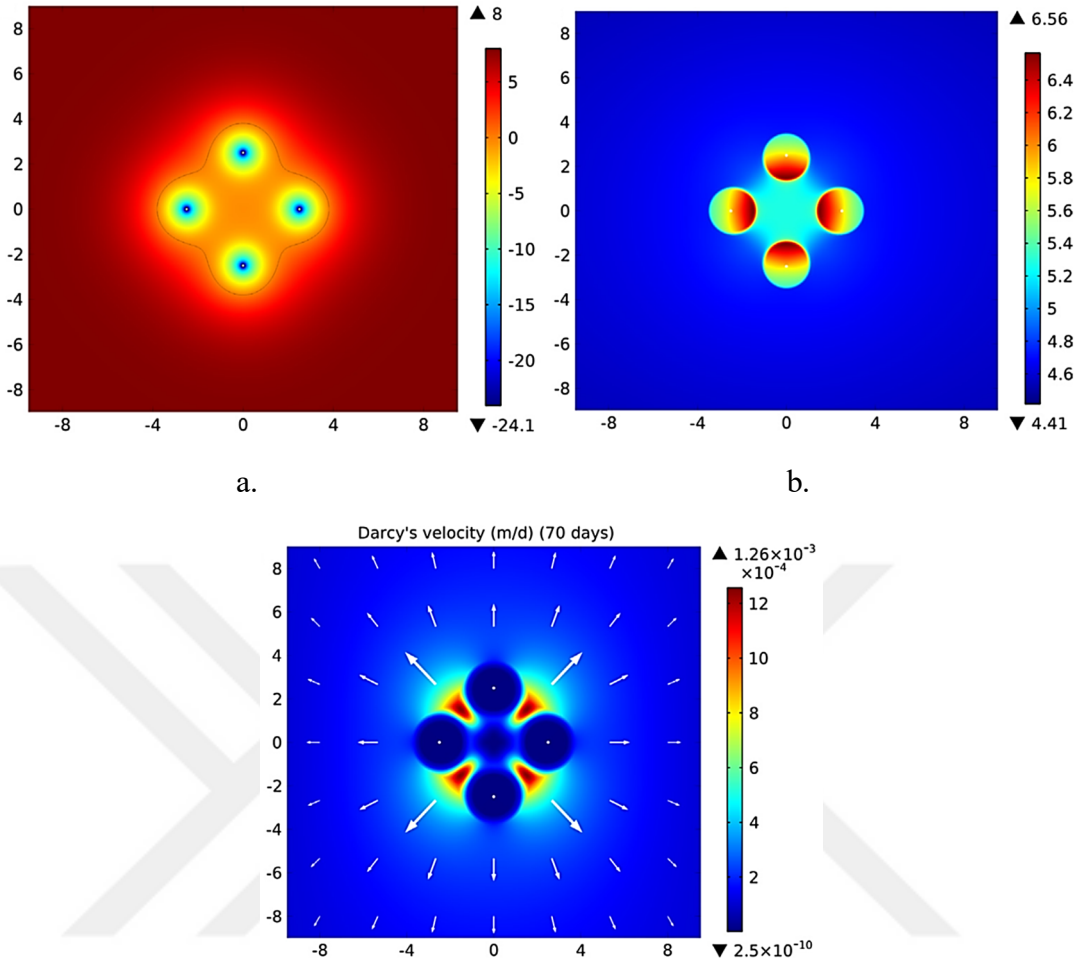
donmuş zemin, donmuş sınır ve donmamış zemin olmak üzere üç gruba ayrılabileceği belirtilmiştir.

Diğer bir çalışmada sızıntı akışına odaklanılarak güvenli ve ekonomik tasarımda en uygun dondurucu boru konumlarının bulunması için ısıl-hidrolik modelde karınca kolonisi optimizasyon algoritması (ACO) kullanılmıştır (Marwan vd., 2016, s. 112-125). Modelleme sonucunda sızıntı akış hızı ve dondurma süresine göre iyileştirilen dondurucu boru dizilimi Şekil 2.5'te verilmiştir. Dondurucu boruların en uygun dizilimi ile yeraltı suyu akışının 1.0 m/gün olması durumunda, 1.5 m kalınlığında kapalı donmuş kemer oluşturmak için gereken süre 50 günden fazla bir zamandan 10 güne kadar düşürülebilmektedir.



Şekil 2.5. *Farklı Sızıntı Akış Hızlarında Eşit Aralıklı ve Optimum Dizilimlerde, Tamamen Donmuş Kemer Elde Etmek İçin Gereken Süreler*
Kaynak. *Marwan vd., 2016, s. 121*

Su akış hızı donma işleminin gelişimini engelleyebileceğinden doğal ya da harekete geçirilmiş yer altı suyu, yapay zemin dondurmayı olumsuz etkileyebilmektedir. Bu yüzden, oluşan hidrolik sürece odaklanılarak zemin dondurma işleminin gelişimini öngörmek amacı ile Vitel vd. (2016, s. 1-15) tarafından geliştirilen tamamen termodinamik içerikli ısıl - hidrolik sayısal model ile gerçekleştirilen analitik çözümler, sızıntının yüksek akış hızına sahip olması durumunda üç eksenli zemin dondurma uygulaması ile doğrulanmıştır. 70 günlük donma sonunda elde edilen zemin davranışı Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. *70 Günlük Dondurma İşleminden Sonra Su Akışı Üzerinde Faz Değişimi ve Sıcaklık Dağılımının Etkileri; a. Zemin Sıcaklığı, b. Akışkan Su Basıncı ve c. Darcy Hızı*

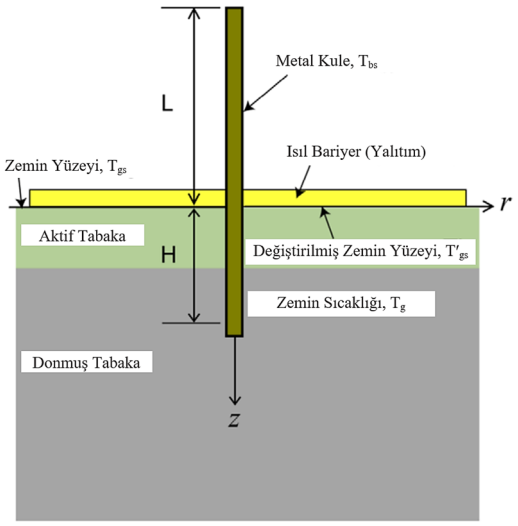
Kaynak. *Vitel vd., 2016, s. 13*

2.2. Deneysel Çalışmalar

Kapsamında birçok bilinmezlik barındıran zeminler hakkında günümüzde halen geliştirilmeye ve değerlendirilmeye açık deneysel çalışmalar yapıldığı düşünülecek olursa, daha dar kapsamda çalışılan ve göreceli olarak daha yeni olan donmuş zeminlerdeki deneysel çalışmaların gerekliliği göz ardı edilmemesi gereken ciddi bir ihtiyaç olarak karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla donmuş zeminler hakkında yapılan deneysel çalışmalar, gelecekte yapılacak çalışmalar için ciddi kazanımlar sağlamaktadır.

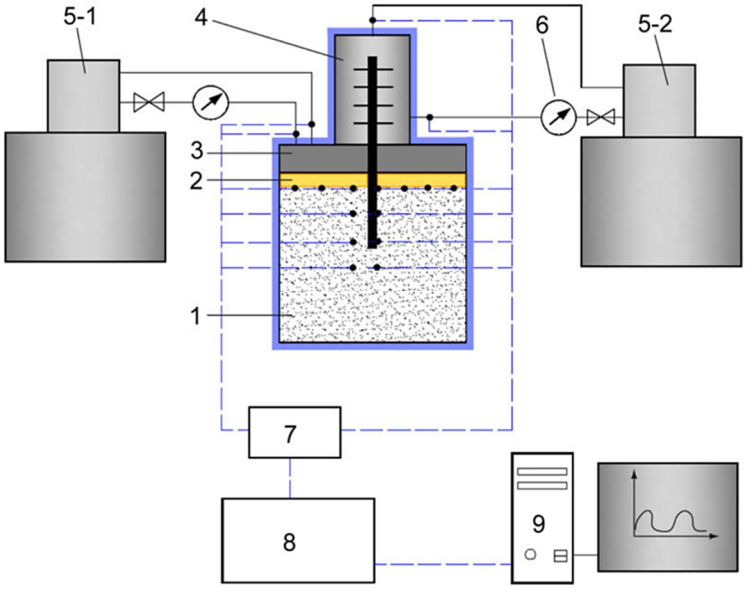
Duan ve Naterer (2010, s. 2369-2376) tarafından yapılan çalışmada kule temellerinde efektif ısıl koruma teknikleri sunulmuştur. Isı farkının zeminde oluşturduğu değişiklikleri göstermek için Şekil 2.7'deki şematik gösterim kullanılmıştır. Zeminde ısı

transferi ölçümü için deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. 200 mm boyutlarında küp fleksiglas kap ısı transfer malzemesi (zemin) ile doldurulmuştur. Yalıtım için kompozit tekstil ürünü ek tabaka olarak kullanılmıştır. Akışkan dolaşımlı ve sıcaklık kontrollü plaka ısıl dönüştürücü ile zemin yüzeyindeki ısı ayarlanmıştır. Kule temel alüminyum çubuk ile modellenmiştir.



Şekil 2.7. *Basitleştirilmiş Kule Temelin Yüzey Yalıtımı ile Şematik Gösterimi*
Kaynak: *Duan ve Naterer, 2010, s. 2370*

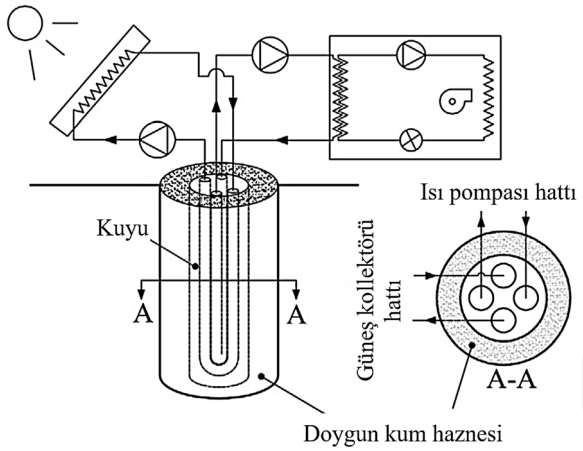
Çalışmada; klasik yalıtım malzemesi, havalı yalıtım örtüsü ve faz değiştiren malzemeden üretilmiş ısıl bariyer olmak üzere üç farklı tipte yalıtım bariyerin etkileri incelenmiştir. 15 adet T tipi ısıölçer alıcı, numune içerisinden veri toplamada, 5 adet de ek olarak zemin yüzeyindeki sıcaklık değişimleri için kullanılmıştır (Şekil 2.8). Çalışmada zemin yüzeyi yalıtımının zemin ve atmosfer arasındaki ısı transferini düşürerek, kule temellerde donma ve çözülme çevrimlerini tersine çevirdiği görülmüştür. Ancak, zemin yüzeyindeki yalıtım metal kuledeki ısıl etkileri engelleyememektedir. Zemin soğutma tekniklerinin ısıl koruma amaçlı kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Duan ve Naterer, 2010, s. 2369-2376).



Şekil 2.8. *Deney Düzeneği; 1. Hazne, 2. Isıl Bariyer (Yalıtım), 3. Plaka Isı Dönüştürücüsü, 4. Dairesel Isı Dönüştürücüsü ve Metal Çubuk, 5. Isı Kontrollü Banyo, 6. Akış Algılayıcıları, 7. Analog Isı Ölçer Giriş Modülü, 8. Usb Çerçevesi, 9. Bilgisayar ve Veri Toplama Programı (* İşareti Isı Ölçer Konumlarını Belirtmektedir)*
Kaynak: *Duan ve Naterer, 2010, s. 2371*

Alternatif güneş enerjili ısıl enjeksiyon metodunun kullanıldığı çalışmada, tek delikte çift U tipi bağımsız borulama sistemi ile dolaşımın sağlanması önerilmiştir (Eslami-nejad ve Bernier, 2012, s. 333-345). Borulama sistemi doygun kum ile çevrelenmiş sondaj kuyusunda yapılmıştır. Dolaşımın bir ucu ısı pompasına diğer ucu ise ısıl güneş paneline bağlanmıştır (Şekil 2.9). Akşamları güneş olmadığında ısı pompası (GCNP Ground coupled heat pump) enerjiyi zeminden almaktadır. Uygulamadaki bazı durumlarda doygun kum donabilmekte ve güneş enerjisi ile bağlantı kurulduğunda ise tekrar erimektedir. Çalışmada bu davranışın boru boyunun kısaltılmasına etkisi araştırılmıştır. Modelleme sırasında yapılan fiziksel kabullerde zeminin homojen gözenekli ortamdan oluştuğu, doygun bölgelerde kumun tamamen suya doygun olduğu, zeminin tek tip başlangıç sıcaklığına sahip olduğu, sıcaklık sondaj deliğinden sonsuz yatay uzaklığa kadar sabit olduğu öngörülmüştür. Ayrıca doygun bölgede donmaya bağlı hacim değişikliği göz ardı edilmiş ve suyun yoğunluğu sabit alınmış, doğal ısı iletimi ve nem transferi etkisi ihmal edilmiş, ısı iletiminin sadece zeminde olduğu kabul edilmiştir. Modelleme sırasında yapılan sayısal kabullerde ise sabit ağ (mesh) kullanıldığı, donma çözülme işleminin küçük sıcaklık aralıklarında yer aldığı, donmuş ve donmamış bölgelere

fiziksel özelliklerin ortalama hacimsel değerlerine odaklanıldığı öngörülmüştür. Tüm bunlar yazarlar tarafından çok sayıda kabul yapılarak geliştirilen bir model olduğunu göstermektedir. Bu durum modelin kullanılabilirliğini ciddi ölçüde kısıtlamaktadır.



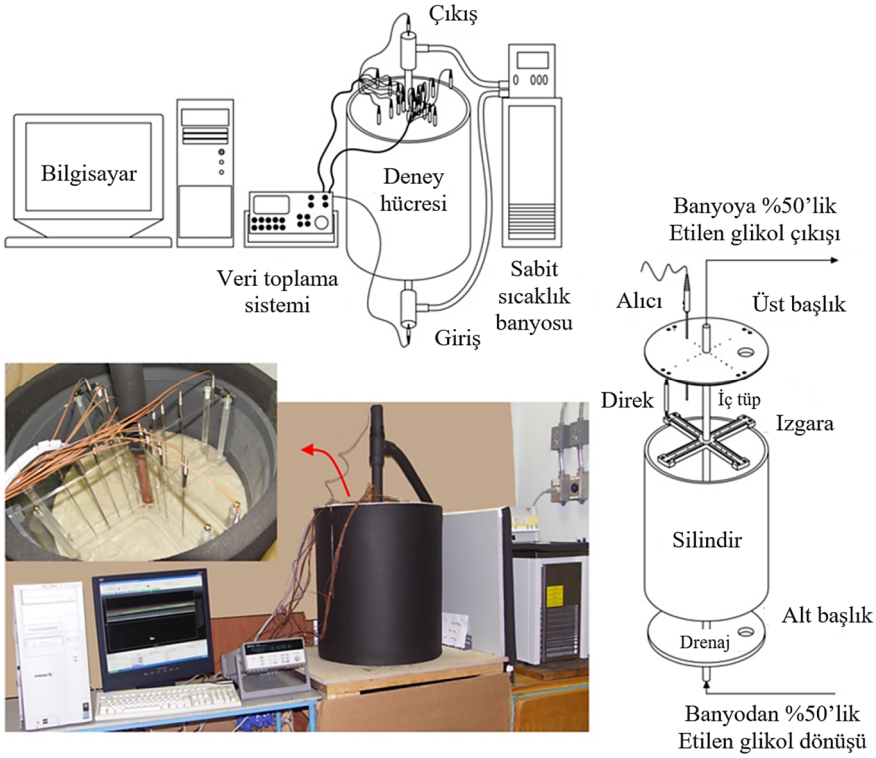
Şekil 2.9. *Önerilen Modelin Sistem Kurulumu*
Kaynak: *Eslami-nejad ve Bernier, 2012, s. 334*

Çalışmada zemin modelini doğrulamak için veri toplama sistemi, sabit sıcaklığa sahip banyo ve kum dolu silindiri içeren deney düzeneği kurulmuştur (Şekil 2.10). Silindir ve boruların bağlantıları 25 mm ve 13 mm kalınlığında köpük ile yalıtılmıştır. İç kısımdaki bakır tüp 22 mm dış çapa sahip olup silindirin merkezindedir. Kapalı borulama sistemi kullanılarak su / etilen glikol (%50) karışımı iç tüpe alt kısımdan basılmıştır. Sıcaklık ölçümlerinin tümü T tipi ısıölçerler ile yapılmıştır. Paslanmaz çelik alıcılar 300 mm uzunluğunda ve 1,6 mm çapındadır. Silindirde Ottowa kumu (Tablo 2.1) kullanılmıştır. İç tüp ısısı -20 ºC ile 50 ºC arasında değişmektedir. Banyo sıcaklığı -20 ºC ile 60 ºC arasındadır. Platinyum dirençli termometreler değerleri doğrulamak için kullanılmıştır (Eslami-nejad ve Bernier, 2012, s. 333-345).

Tablo 2.1. *Porozite Değeri 0.36 olan C-109 tipi Ottowa Kumunun Isıl Özellikleri*

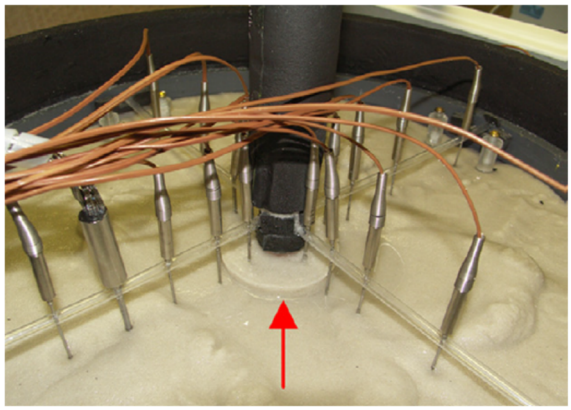
	Isıl iletkenlik ($Wm^{-1}K^{-1}$)	**Isıl Yayılma Gücü ($m^2gün^{-1}$)**
Kuru kum	0,29	0,0198
Tamamen doygun ve donmuş kum	3,00	0,0934

Kaynak: *Eslami-nejad ve Bernier, 2012, s. 338*

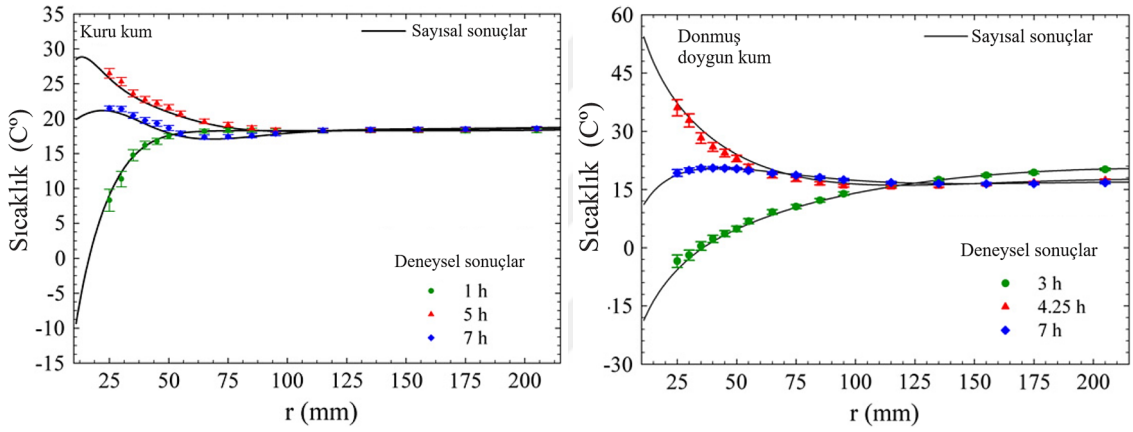


Şekil 2.10. *Deney Düzeneği*
Kaynak: *Eslami-nejad ve Bernier, 2012, s. 338*

Doygun kumda dondurma durumu incelenirken zemin, iç tüp çevresinden itibaren ilk 3,5 saat -20 ºC'ye tabii tutulmuştur. Merkezden 25,0 mm, 35,0 mm ve 75,0 mm uzaklıklarda ölçümler alınmıştır. Üçüncü deneyde elde edilen donmuş silindir Görsel 2.1'de; deneylerde elde edilen sıcaklık profilleri ise Şekil 2.11'de verilmiştir. Sonuçlar doygun kum çevresindeki donmuş silindirin delik çevresi duvar sıcaklığını pik sıcaklık durumlarında birkaç gün 0 ºC çevresinde tutabildiğini göstermektedir. Delik çevresinde özgün donma miktarı 3 - 4 cm kalınlığında görülmüştür. Güneş enerjisine ulaşıldığında buz eriyecek ve sonraki donma çevrimi için doygun kum tekrar oluşacaktır. Bu durum düşük sıcaklık iletkenliğine sahip zeminlerde kuyu boyunun % 38 oranında azaltılabileceğini göstermektedir (Eslami-nejad ve Bernier, 2012, s. 333-345).



Görsel 2.1. *Üçüncü Deneyde Oluşan Donmuş Silindir*
Kaynak: *Eslami-nejad ve Bernier, 2012, s. 340*

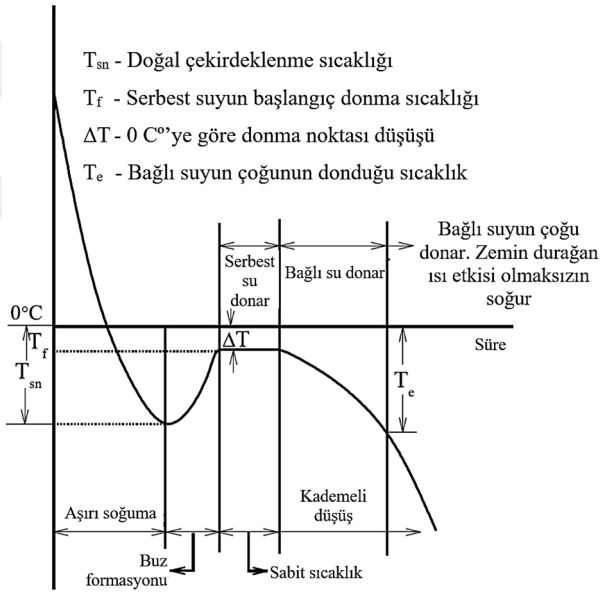


a. b.

Şekil 2.11. *İkinci Deneyde (Kuru Kum) ve Üçüncü Deneyde (Donmuş Doygun Kum) Elde Edilen Sıcaklık Profilleri; a. Kuru Kum ve b. Donmuş Doygun Kum*
Kaynak: *Eslami-nejad ve Bernier, 2012, s. 340*

Tuz çözeltilerinin donma noktasının araştırılmasına yönelik deneysel laboratuvar uygulamaları ve sonuçlarını içeren çalışmada; su ve tuz içeriği ile zeminin iyon değerliğinin donma noktasına etkileri değerlendirilmiştir (Bing ve Ma, 2011, s. 79-88). Zemin - su yapısının donma işlemi 4 aşamadan oluştuğu belirtilmiştir (Şekil 2.12). Bunlar; doğal çekirdeklenme, buz oluşumu başlangıcı ile sıcaklıktaki ani geçişler, sabit sıcaklıkta eşitlik dönemi ve aşamalı sıcaklık düşüşüdür. Çalışmada şu sonuçlara ulaşılmıştır; zemin boşluklarındaki serbest su şekildeki T_f sıcaklığında donmaya başlar. Tüm serbest su ve daneler üzerindeki yüzey suyunun çoğu eşitlik sağlandığında T_e'de (yaklaşık -70 ºC) donar. Bu değerden yüksek sıcaklıklarda ince daneli zeminlerin özgül yüzey alanına bağlı olarak, yapısında ciddi miktarda donmamış su bulunur. Tuz

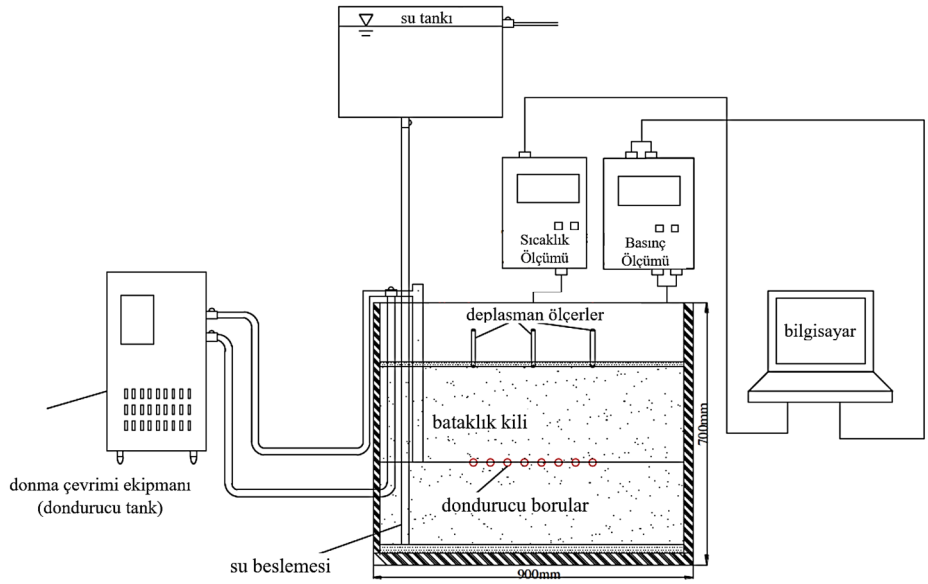
miktarının artmasında bağlı olarak tuz tipi fark etmeden zeminin donma noktası düşmektedir. Su muhtevasının artması ile donma noktası artmaktadır. Kil tipi zeminlerde, donma noktası farkı tuz içeriği artışı ile artmakta ve bu fark su içeriğinin artması ile azalmaktadır. Aynı tuz içeriğine sahip kumlu zemin numunesinde su muhtevası belirli bir seviyeye ulaştığında donma noktası yaklaşık olarak sabittir. Tüm zeminlerde donma noktasını etkileyen en önemli parametre zemindeki çözünebilir tuz miktarıdır. Tuzların göreceli etkisi anyonlarda $Cl^- > CO_3^{2-} > SO_4^{2-}$, katyonlarda $K^+ > Na^+ > Ca^{2+}$ olarak sıralanmaktadır. Klorür iyonu muhtevasına bağlı donma değişimi doğrusal model, diğer iyonlar ise daha çok üstel sönümlenme modeli ile örtüşmektedir. Aynı su ve tuz muhtevasında kil tipi zeminin donma noktası kum tipinden düşüktür ve ince dane daha düşük donma noktasına sahiptir. Zeminin dane boyutunun donma noktasındaki üzerindeki etkisi su muhtevasının artması ile azalmaktadır.



Şekil 2.12. *Zemin Su Sistemi İçin Soğutma Eğrisi*
Kaynak: *Bing ve Ma, 2011, s. 80*

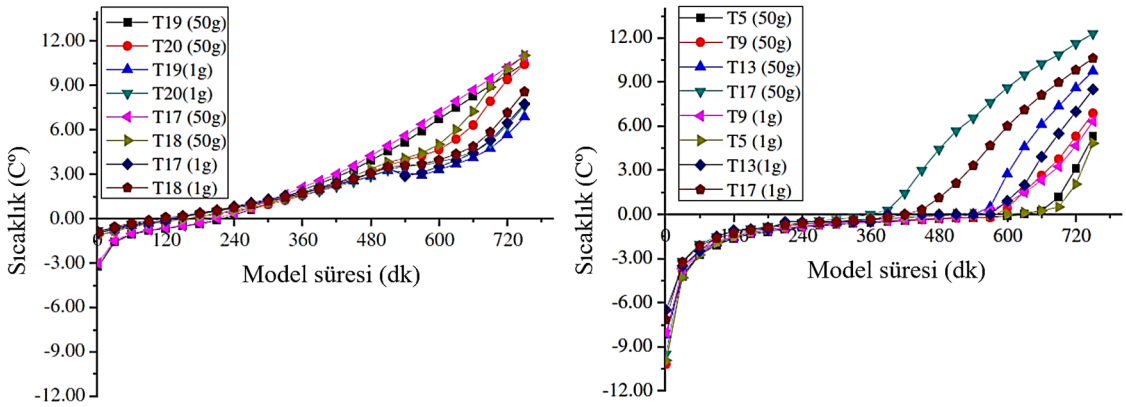
Zhou ve Tang (2015, s. 1-11) tarafından yapılan çalışmada, donma işlemi ile karşılaştırıldığında çözülme davranışının özellikle uzun dönem oturmalarının tahmininde kullanılmasının çok daha karmaşık olduğu belirtilmiştir. Bunun sebebi olarak da çözünen buz kristallerinden salınan suyun tekrar dağılımı ile oluşan çeşitlilik ve donma sırasında meydana gelen tekrar oturma ve aşırı oturma çevrimlerinden kaynaklandığı ileri sürülmüştür. Çalışmada Şangay metro tüneli çevresindeki doygun bataklık kilinin, yapay

zemin dondurma yönteminin uygulanmasının ardından çözülme oturmasına bağlı davranışı incelenmiştir. Yapay zemin dondurma yönteminde; 80 mm'lik dondurucu boru çapı, 1,5 - 2,0 m dondurucu boru uzunluğu, 0,2 - 0,5 m boru aralığı kullanılarak -10 ºC ortalama duvar sıcaklığında 1,7 m kalınlığında donmuş duvar elde edilmesi tasarlanmıştır. Uygulamanın doğrulanması için gerçekleştirilen santrifüj model deneyinde Şekil 2.13'teki düzenek kullanılmıştır.



Şekil 2.13. *Deney Düzeneğinin Şematik Gösterimi*
Kaynak: *Zhou ve Tang, 2015, s. 5*

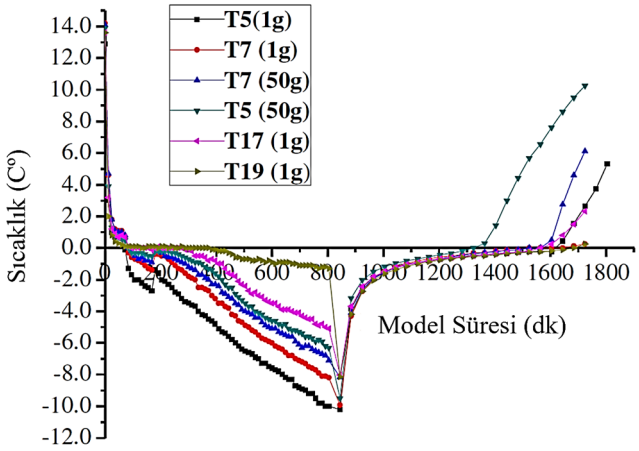
Gerçekleştirilen santrifüj deneyleri sonucunda Şekil 2.14'teki sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Farklı ivme değerleri kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda, yapay zemin dondurma yönteminin uygulanmasından sonra oluşan su muhtevasındaki ciddi oranda meydana gelen yeniden dağılım ve hidrolik iletkenlikteki yüksek artış miktarının esas nedeninin, bataklık kilinin donma çözülme ile değişen zemin yapısı olduğu vurgulanmıştır (Zhou ve Tang, 2015, s. 1-11).



a. b.

Şekil 2.14. *Farklı İvmelerdeki Modellerde Çözülme Süreçleri Boyunca Gözlenen Sıcaklık Değişim Eğrileri, a. Dondurucu Boru Yüzeyinin 5 cm Üstü ve b. 0 cm, 2 cm ve 5 cm Derinliklerdeki Düşey Sıcaklıklar*
Kaynak: *Zhou ve Tang, 2015, s. 7*

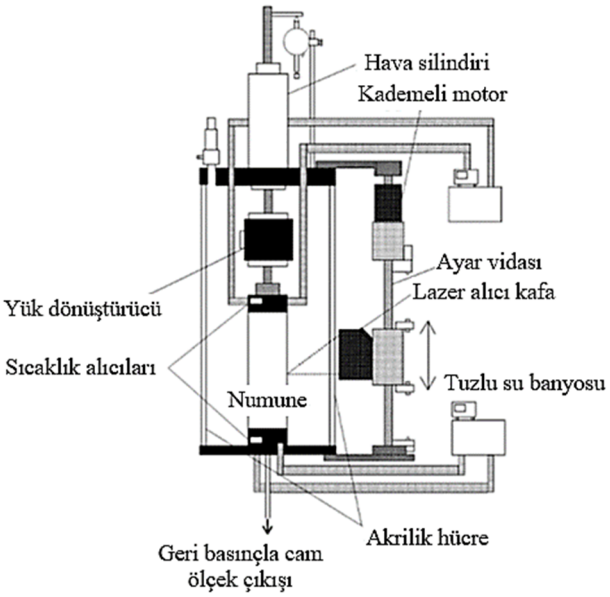
Benzer içerikteki bir diğer çalışmalarında ise Zhou ve Tang (2015, s. 98-108) tarafından santrifüj modelindeki deneysel sonuçlar Şekil 2.15'teki gibi sunulmuştur.



Şekil 2.15. *Deney Sürecinde Sıcaklık Değişimi*
Kaynak. *Zhou ve Tang, 2015, s. 103*

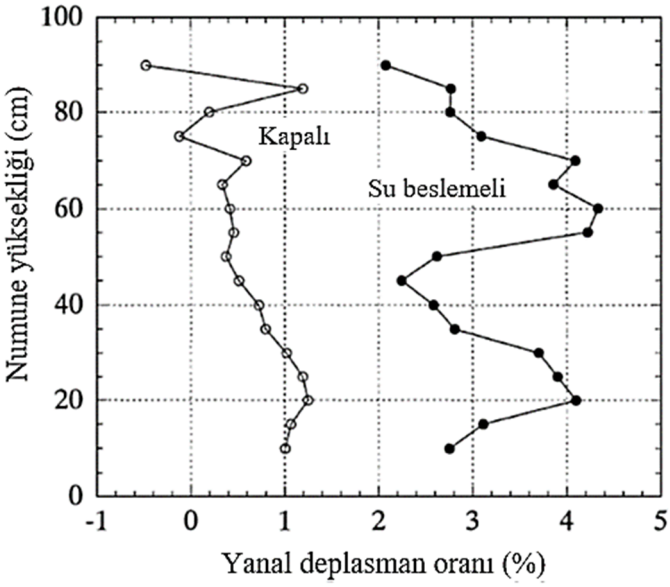
Üç eksenli gerilme durumunda donmuş silindir zemin numunesinin ısı akışına normal doğrultudaki deformasyonlarının incelenebilmesi için üç eksenli deney düzeneği geliştirilen çalışmada; dondurma esnasında düşey ve yanal donma kabarmasına bağlı birim şekil değiştirme tabanlı gerilme oranı uygulanmıştır (Ono, 2002, s. 45-54). Zemindeki hem yapay hem de doğal donma sırasında belirli anizotropik asal gerilme

altında zemin parçasının yanal yer değiştirme göstermeden donması beklenen bir durumdur. Fakat genellikle laboratuvardaki donma deneyleri kalıplar içerisinde yanal şekil değiştirme engellenerek ve bu sargı basıncı bilinmeden yapılmaktadır. Söz konusu çalışmada numune düşey doğrultuda donduktan sonra yatay yer değiştirmelerin başlayacağı belirtilmiştir. Bu yüzden yanal yer değiştirmeler için basınçlı hücreden ve dışarıdan lazerli yer değiştirme ölçer ile veri alınmıştır (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. *Dondurma Sırasında Yanal Deformasyon Ölçümü İçin Geliştirilmiş Üç Eksenli Deney Düzeneği*
Kaynak: *Ono, 2002, s. 46*

Deneylerde % 63 likit limit değerine sahip 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde kil numune kullanılmıştır. 100 kPa basınç ile geri besleme yapılmıştır. Başlıklardaki ısıölçer verilerine göre sıcaklık 1 ºC / mm hızı ile düşürülmeye başlanmıştır. Dondurma oranı sıkı kilde 1 mm/saat, yumuşak kilde 2 mm / saattir. Su beslemeli ve suya kapalı deney durumları için yatay yer değiştirme oranları Şekil 2.17'de verilmiştir. Yanal şekil değiştirme dondurma sırasındaki asal gerilmeler ile alakalıdır ve bu durum uygulanan gerilme arttığında minimum asal şekil değiştirme değerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Yatay zemin yapılarında yanal deformasyonlar oluşmaması için düşey gerilmenin en az 4 katı yatay yönde olmalıdır. Sonuçlar eksenel yönde dondurulan zemin numunesinde yapıya fazladan yanal yer değiştirme veya yanal gerilmeler eklemektedir (Ono, 2002, s. 45-54).

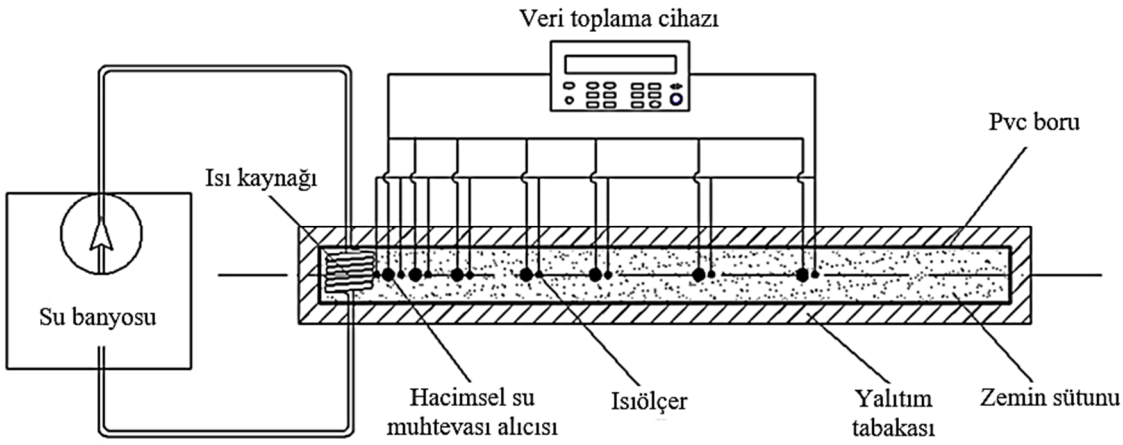


Şekil 2.17. *Su Beslemeli ve Suya Kapalı Durumlar İçin Dondurmadan Sonraki Yatay Yer Değiştirme Oranları*
Kaynak: *Ono, 2002, s. 54*

Bir diğer deneysel çalışmada, maden şaftından temin edilen yüksek plastisiteli kildeki ısıl eğime bağlı deformasyon ve dayanım değerlerinin hesaplanabilmesi için, deney düzeneğinde numuneye temas eden başlıklardan -20 ºC ile -10 ºC arasında değişen farklı sıcaklıklar uygulanarak yarı statik serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir (Zhao vd., 2013, s. 550-558). Isıl eğim ve sıcaklık düşüşü ile zeminde hem sertleşme modülü hem de basınç dayanımının arttığı belirtilmiştir.

Chen vd. (2014, s. 1018-1024) tarafından ısı yüklemesi ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, zeminde tek doğrultulu yatay ısı ve su iletiminin birlikte analizi için geliştirilen basitleştirilmiş deney düzeneği (Şekil 2.18) kullanılmıştır. Pik hacimsel su muhtevası değeri ve bunun için gereken süre; ısı kaynağı sıcaklığının ve başlangıç su muhtevası değerinin artması ile artmaktadır. Hacimsel su muhtevasının ısı iletimini etkileyen önemli parametrelerden olduğu belirtilmiştir.

Yine aynı düzenekle yapılan çalışmanın bir diğer çıktısında, pik hacimsel su muhtevası varlığının, yüksek sıcaklıktaki ısı yüklemesi sonucunda ısı kaynağına yakın bölgedeki zeminde gözlendiği belirtilmiştir (Chen vd., 2015, s. 3148-3153). Sonraki süreçte ısı iletimi ile pik hacimsel su muhtevasının konumu zemin sütununun diğer ucu olan soğuk bölgeye hareket etmektedir.

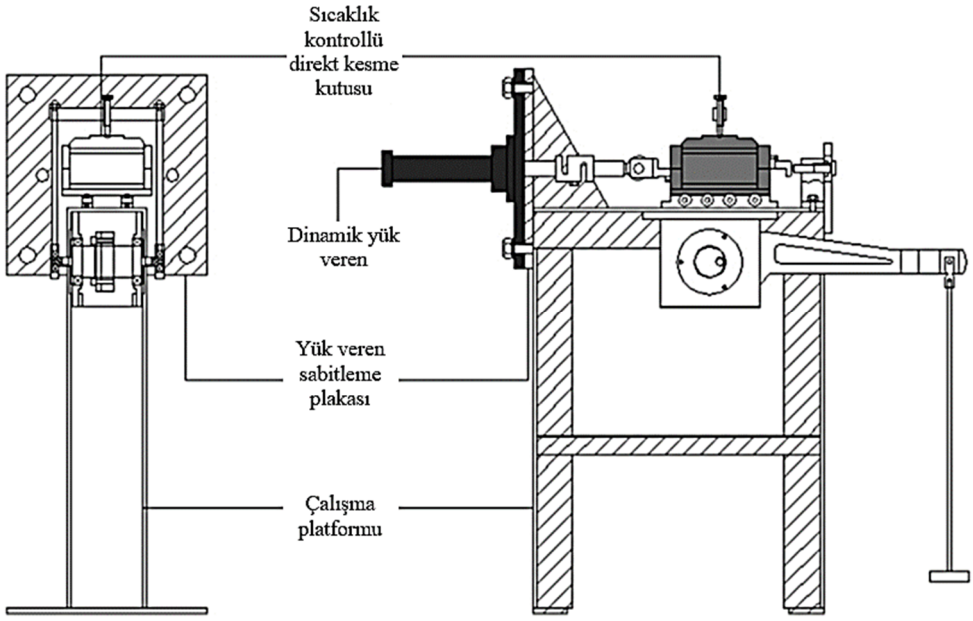


Şekil 2.18. *Zeminde Isı Yüklemesinde Kullanılan Tek Doğrultulu Yatay Isı ve Su İletimi Deney Düzeneği*

Kaynak: *Chen vd., 2014, s. 1019*

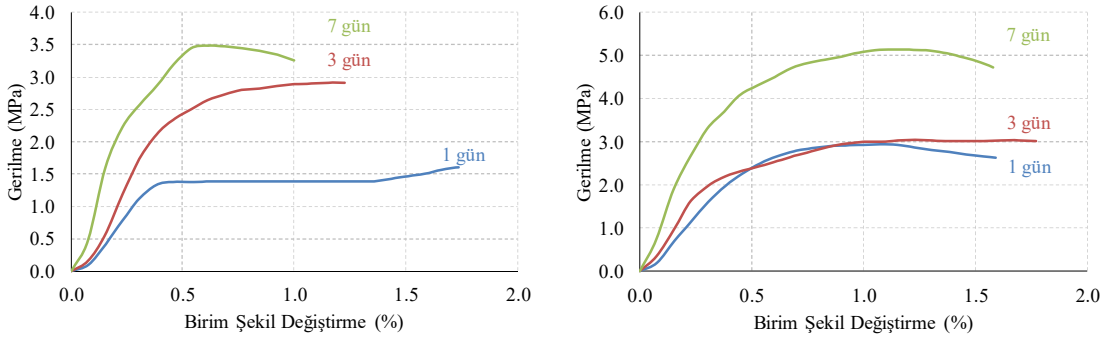
-3,1 ºC ve -0,6 ºC arasında değişen sıcaklıklarda donmuş dikdörtgen numuneler kullanılarak dört noktalı eğilme deneyi ile donmuş zeminlerin çatlak başlangıç direnci incelenmiştir (Yamamoto ve Springman, 2017, s. 20-32). Uygulanan sıcaklık ve düşey deformasyon oranlarına bağlı olarak hem gevrek hem de sünek oluşumlar gözlenmiştir. Düşük sıcaklık ve yüksek deformasyon oranı altında ani dayanım kaybı gösteren gevrek göçme davranışı meydana gelmiştir. Sünek göçme ise donma süreci mikro çatlaklar tarafından baskılandığında oluşmaktadır. Hacimsel buz içeriğinin düşük olması durumunda sünekliğin arttığı belirtilmiştir.

Donmuş zeminlerin dinamik özellikleri ve farklı malzemeler arasındaki temas yüzeyi davranışlarının incelenebilmesi amacı ile yeni dinamik direkt kesme cihazı geliştirilmiştir (Liu vd., 2014, s. 207-215). -28 ºC ile 150 ºC arasında sıcaklıklarda, 20 kN kesme kuvvetine kadar, 4 Hz frekans ile deney yapılmasına olanak sağlayan düzenek Şekil 2.19'da verilmiştir. Dinamik üç eksenli ile sonuçlar karşılaştırılmış olup sistemin doğruluğu kanıtlanmıştır.

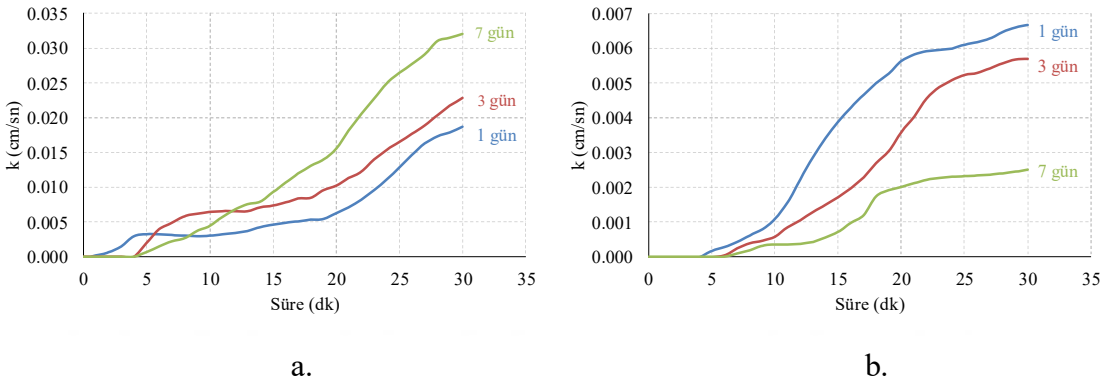


Şekil 2.19. *Donmuş Zemin için Dinamik Direkt Kesme Kutusu Cihaz Şeması*
Kaynak. *Liu vd., 2014, s. 208*

Evirgen vd. (2015, s. 1283-1287) tarafından yapılan çalışmada, donma süresinin granüler zeminlerdeki dayanım (Şekil 2.20) ve permeabilite davranışına etkisi incelenmiştir (Şekil 2.21). Bu amaçla kötü derecelendirilmiş çakıl ve kum tipi zemin numunelerine 24 saat -10 ºC'de ön dondurma uygulanarak, su fazının donması sağlanmıştır. Donmuş numuneler kalıplardan çıkarıldıktan sonra -15 ºC'de 1, 3 ve 7 gün dondurulmuştur. Serbest basınç deney sonuçlarına göre her iki zemin tipinde de donma süresinin artması ile dayanımın arttığı görülmüştür. Göçme anındaki birim şekil değiştirme değerleri kumlu zeminde yaklaşık sabit kalırken, çakıllı zeminde donma süresinin artması ile azalmıştır. İnce malzeme oranı ve boşluklarda bulunan donmuş su miktarına bağlı olarak aynı yükleme koşullarında hem gevrek hem sünek deformasyonlar hem de farklı birim şekil değiştirme değerleri gözlenebilmektedir. Donmuş tüm numuneler 5 dk civarında çözülmeye başlamıştır. Donma süresi arttığında, donmuş kumlu numunelerin geçirgenliği azalmıştır. Ancak, beklenmedik şekilde çakıl ağırlıklı zeminde geçirgenlik katsayısının donma süresi ile ters orantılı olduğu gözlenmiştir. Donmuş çakıllı zeminin permeabilite katsayısı, donmuş kumlu zeminden yaklaşık 5 kat daha fazladır.



Şekil 2.20. *Donmuş Granüler Numunelerdeki Gerilme – Birim Şekil Değiştirme Eğrileri, a. Kötü Derecelenmiş Çakıl ve b. Kötü Derecelenmiş Kum*
Kaynak: *Evirgen vd., 2015, s. 1286*



Şekil 2.21. *Donmuş Granüler Numunelerdeki Permeabilite Katsayısı Değişimi, a. Kötü Derecelenmiş Çakıl ve b. Kötü Derecelenmiş Kum*
Kaynak: *Evirgen vd., 2015, s. 1286*

Evirgen vd. (2015, s. 1798-1802) tarafından yapılan diğer bir çalışmada, her biri 3 adet numune içeren 12 adet ince daneli numune setinin 7, 14 ve 28 gün boyunca -20 ºC ve -200 ºC'de dondurulmasının ardından, yaklaşık 20 ºC oda sıcaklığında serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Çalışmada ani çözülmeye maruz kalan yapay zemin dondurma uygulamalarında donma süresinin donmuş numune dayanımına etkisi araştırılmıştır. Donma süresinin artması tüm numunelerde birim şekil değiştirme değerlerini düşürmektedir. Yani sünek davranış, ciddi ölçüde gevrek hale dönüşmektedir. -20 ºC'de bekletilen numuneler sertleşme davranışı sergilemektedir. Sertleşme kısmından önce birim şekil değiştirme değerleri kaolin ve zeolit numuneler için sırasıyla yaklaşık % 2 ve % 15 oranında sabit devam etmektedir. İnce daneli zeminlerde gözlenen fıçı tipi göçme mekanizması donma işlemi sonrasında tamamen değişmektedir.

Örnek yapay zemin dondurma uygulamasını içeren çalışmada ise, 16 saatlik donma işlemi sonrasında temsili kazı yapılmış ve açık kazı alanına 4 saat daha donma uygulanmıştır (Evirgen vd., 2015, s.75). Sonrasında sistem çözülmeye bırakılmış olup toplamda 135 saat sıcaklık verisi toplanmıştır. Sonuçlar dahilinde killi zeminde daha hızlı donma meydana gelirken, siltli zeminde çözülmenin daha hızlı olduğu belirtilmiştir. Aynı donma süresinde killi zemindeki ortalama sıcaklık düşüşü 18 ºC, siltli zeminde ise 16,5 ºC'dir. Çalışmada zemin dane boyutunun azalması ile bölgesel donma ve çözülme hızının arttığı kanıtlanmıştır.

Gerilme - birim şekil değiştirme davranışları göz önünde bulundurularak, granüler ve kohezyonlu zeminlerde sıcaklık değişimine bağlı dayanım artışının değerlendirilmesi amaçlanan çalışmada; 0, -5, -10, -15, -20 ve -200 ºC'lerde 24 saat donma işlemine maruz bırakılan kum, silt ve kil tipi zemin numuneleri üzerinde tek eksenli basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir (Evirgen vd., 2016, 1045-1054). Özellikle yol altı dolguları için sorun teşkil eden donma olayına karşı hassas olduğu bilinen silt numunelerde, donma gerçekleştikten sonra sıcaklığın daha düşük mertebelere inmesi durumunda birim şekil değiştirme miktarları değişmemekle birlikte yaklaşık %13 seviyelerinde kaldığı belirtilmiştir. -20 ºC'de donma sonrasında donmamış numunelere oranla, kil ve silt numunelerin dayanımı sırasıyla yaklaşık 7 ve 10 kat artmıştır. Sıvı nitrojen tatbik edilmesi durumunda ise kil, silt ve kum tipi numunelerde sırasıyla 21, 31 ve 23 katlık bir artış gözlenmiştir. Sıvı azotta bekletilen kum numunelerin ortalama dayanımı ise 23 MPa civarındadır.

2.3. Arazi Uygulamaları

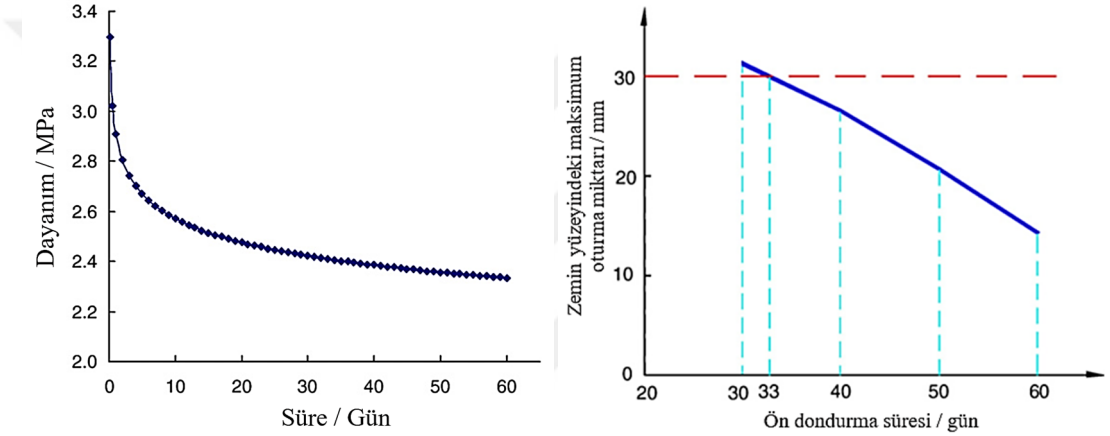
Her ne kadar mühendislikte teorik ve deneysel çalışmalar yapılsa da özellikle inşaat mühendisliğinde uygulamada başarısızlıkla sonuçlanan yaklaşımların toplumsal fayda sağlayamayacağı aşikardır. Yapay zemin dondurmanın sağladığı birçok avantajın arazide perçinlenmesi, yöntemi dünya genelinde bazı bölgelerde vazgeçilmez hale getirmiştir. Gerçek boyutlu arazi uygulamalarında karşılaşılabilecek sorunların önceden öngörülebilmesini sağlamak için yapılan modellemeler de gerek uygulayıcı gerekse müşavir açısından ciddi maddi kazançlar sağlamakla birlikte, literatüre de anlamlı veriler sunmaktadır.

Uygulama projelerinde; dondurma sıcaklığı, dondurucu boruların sayı ve aralıkları sabit tutulsa bile zeminin ön dondurma süresi proje sürecini etkilediği gibi donmuş duvar kalınlığını da etkilemektedir. Li vd. (2006, s. 181-191) tarafından yapılan çalışma baştan sona tam bir yapay zemin dondurma uygulamasını içerdiğinden dolayı bu bölümde uzun bir yer ayrılmıştır. Çalışmada Çin Guangzhou'da yapay zemin dondurma ile inşa edilen metro tüneli örnek alınmıştır. Kemer şeklinde 11,8 m genişliğindeki çift şeritli tünel, 147,8 m uzunluğunda, yüzeyden 9 m aşağıdadır. 1,65 m dolgu, altında değişik miktarlarda silt ve kum içeren kil bulunmaktadır. Yeraltı su seviyesi oldukça yüksek olduğundan inşa sırasında oturmalar önem arz etmektedir. Görsel 2.2'de projedeki zemin dondurma uygulaması görülmektedir. Çalışmada ayrıca ısıl ve mekanik analiz için sayısal model önerilmiştir. Modeldeki analiz aşamaları aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

1- Geçiş sıcaklığı bölgelerinde diferansiyel denklemler baz alınarak faz değişimi ve dondurucu boruların ısı üretimi her kazı aşamasında sonlu elemanlar ile hesaplanmıştır. Donmamış zemin için elastoplastik, donmuş zemin için sünme içeren model kullanılarak gerilme ve yer değiştirmeler hesaplanmıştır.
2- Bu model ile 60, 50, 40 ve 30 günlük zemin ön dondurma süreleri için yüzey oturması hesaplanmış ve en fazla oturma kabul edilebilir sınır olan 30 mm'den az bulunmuştur. Bu yüzden en düşük ön dondurma süresi seçilmiştir.
3- Bu süre için her kazı aşamasında ısı, gerilme ve yer değiştirme bölgeleri değerlendirilmiştir.

Görsel 2.2. *Dondurma İşlemi ve Dondurucu Boru Fotoğrafları*
Kaynak: *Li vd., 2006, s. 182*

Dondurucu akışkan olan "brine" (genellikle sodyum klorür çözeltisi) -24 ºC ile -30 ºC arasında soğularak kullanılmıştır. Tünel kazısından sonra birincil püskürtme beton kaplaması (C25) en kısa sürede yüzeye uygulanmıştır. Son olarak betonarme (C30) perde duvar inşa edilmiştir. Donmuş zeminin çözülmesi ile uzun dönem mukavemeti için gerilme boşalım deneyi uygulanmış ve zamana bağlı mukavemet değerleri değişimi verilmiştir (Şekil 2.22a). Zemin yüzeyinde tünel kazısına bağlı olarak meydana gelen oturma miktarlarına göre ön dondurma süresi değerlendirilmiştir. İzin verilebilir en fazla oturma miktarı olan 30 mm değeri Şekil 2.22b'de görüldüğü üzere 33 günlük ön dondurma süresinde sağlanmıştır (Li vd., 2006, s. 181-191).

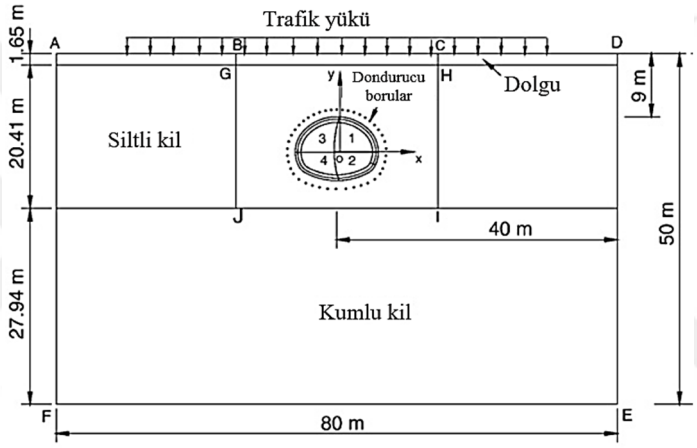


a. b.

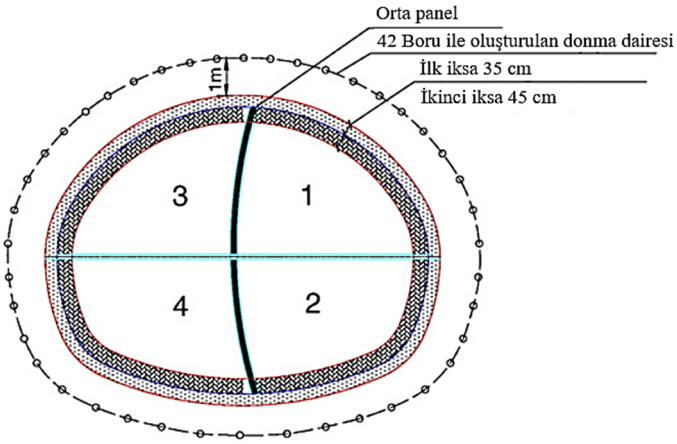
Şekil 2.22. a. *Tünel Zemininde Zamana Bağlı Mukavemet Değişimi ve b. Minimum Zemin Ön Dondurma Süresi Grafiği*
Kaynak: *Li vd., 2006, s. 185 - 186*

Analitik modelde dolgu, siltli kil ve kumlu kil ana tabakalar olarak alınmıştır. Sayısal model ve tünel detayı Şekil 2.23'te verilmiştir. Modelleme esnasında çimentonun hidratasyon ısısı da dikkate alınmıştır (Li vd., 2006, s. 181-191). Kazıdan önce 33 günlük aktif dondurma süresinin devamında dairesel sıcaklık alanları oluşmuş ve Şekil 2.24a'da görüldüğü gibi boruların merkezlerinden itibaren 2,25 m dahilinde 15 ºC/m artış gözlenmiştir. 0 ºC'den düşük zemin kalınlığı ise yaklaşık 2,44 m olarak gözlenmiştir. Kazı sınırındaki sıcaklık 2,0 ºC ile -4,5 ºC arasında bulunmaktadır. Kazı sırasındaki ısı değişimleri ve hidratasyon ısısı da göz önüne alındığında 0 ºC'de kalan dondurucu boruların aralıkları tünel aynasının yüzeyindeki donma dairesi üzerinde yaklaşık 0,43 m olarak seçilmiştir. Böylece zemin kazı esnasında donmuş kalabilmektedir. Tünel

inşaatının tüm kazı aşamaları boyunca zemindeki asal gerilme değerleri değerlendirilmiştir. Şekil 2.24b'de ilk kazı aşaması ve ikinci kaplama tamamlandıktan sonraki maksimum asal gerilme değerleri verilmiştir. Her kazıdan sonra tünel tepe noktasındaki maksimum asal gerilme % 10 - 40 oranında ciddi miktarlarda azalmaktadır. Yine her aşamadaki kazıdan sonra açılan kazı köşelerinde gerilme yığılmaları meydana gelmektedir. Ayrıca her aşamadaki düşey yer değiştirme değerleri eşdeğer eğrilerle verilmiştir. Maksimum gerilme 1,07 MPa olmasına rağmen 30 günlük basınç dayanımı 2,42 MPa olduğundan donmuş duvarda zarar oluşmamıştır. Maksimum yüzey oturması ise 29,6 mm olarak belirtilmiştir.

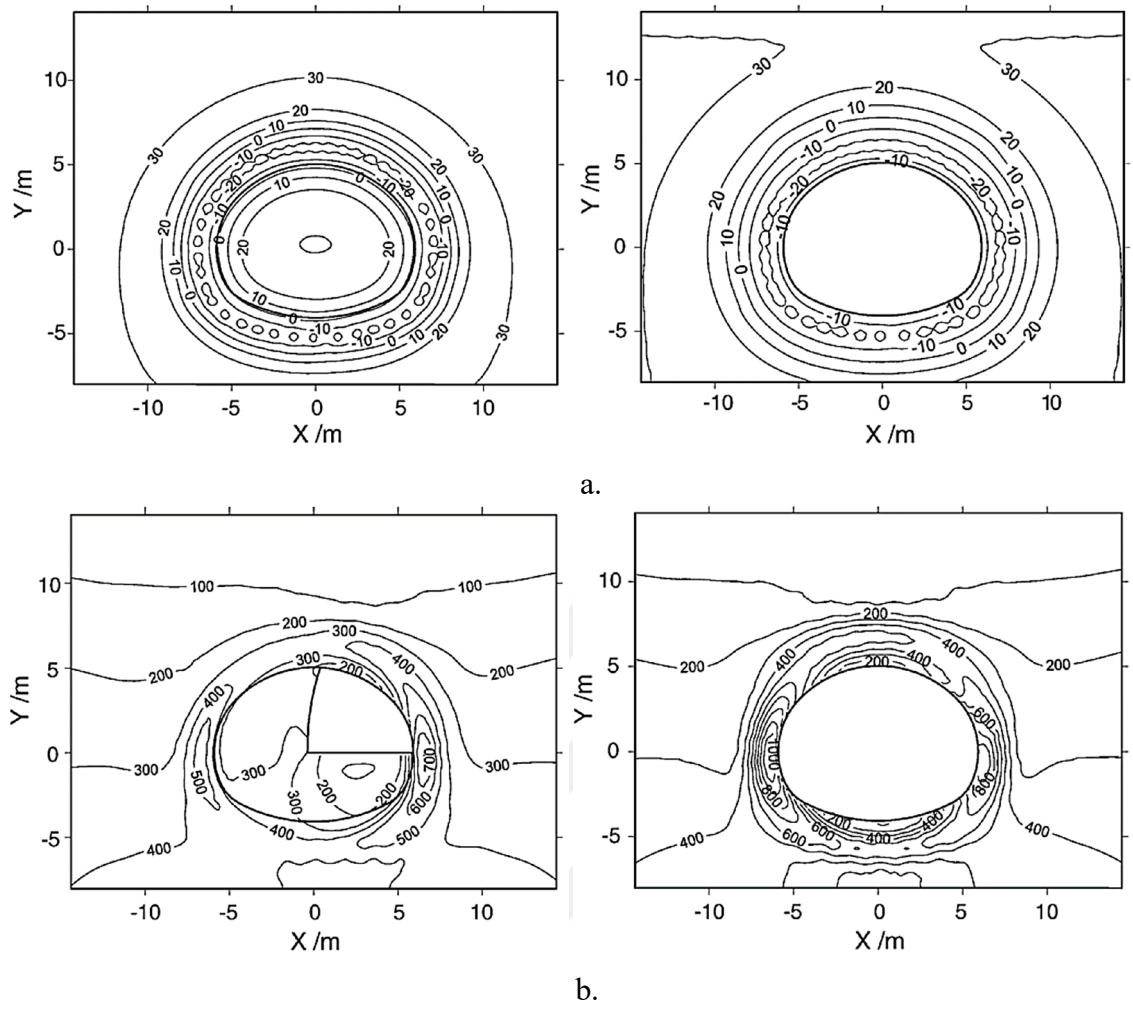


a.



b.

Şekil 2.23. *a. Sayısal Model, b. Tünel Detayı*
Kaynak: *Li vd., 2006, s. 185*

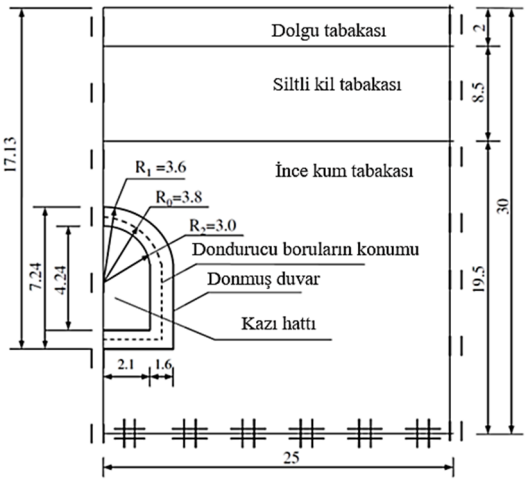


Şekil 2.24. a. *Kazıdan Önce Aktif Dondurma Süresinde ve İkinci Kaplamadan Sonra Isıl Eğrilerin Değişimi ve b. İlk Kazı Aşaması ve İkinci Kaplama Tamamlandıktan Sonra kPa cinsinden Maksimum Asal Gerilme Değerleri*
Kaynak: *Li vd., 2006, s. 187-188*

Arazi uygulamasının modellendiği bir diğer çalışmada, önerilen modelle zemin dondurma kullanılarak yeraltında oluşturulan galerinin kazı problemleri incelenmiş olup, arazi ölçümleriyle sayısal yaklaşımlar karşılaştırılmıştır (Yang vd., 2006, s. 330-340). Tünel üzerindeki zemin kalınlığı, donmuş duvar kalınlığı, kazı yarıçapı ve tuz çözeltisi sıcaklığının donma kabarmasına etkisi incelenmesinin ardından, donma kabarmasının düşey bileşeninin tünel aksında maksimuma, yatay bileşeninin ise tünel aksından uzaklaştıkça maksimuma ulaştığı belirtilmiştir. Bu uzaklığın da üzerindeki zemin kalınlığı ile doğru orantılı olduğu bildirilmiştir. Önerilen model Şekil 2.25'te verilmiştir.

Şekil 2.25. *Zemin Dondurma İçin Kavramsal Model*
Kaynak: *Yang vd., 2006, s. 332*

Çin Nanjing'deki 1 numaralı metro çalışmasının tünel hattı inşaatı sırasındaki dondurma işlemi ile önerilen dondurma metodu karşılaştırılmıştır (Şekil 2.26). İnşaat, yüzeyden 14 m - 17 m aşağıda balçıklı kil, siltli kil ve ince kum tabakalarından oluşan zeminde yapılmaktadır. Projedeki altı koridorun beşinde zemin dondurma teknolojisi kullanılmıştır. Projede tünel merkezinin derinliği 1713 m, tünel altı derinliği 18,75 m ve donmuş duvar derinliği 21,17 m olarak görülmektedir. Proje ve modelde kabul edilen ısıl parametreler Tablo 2.2'de verilmiştir (Yang vd., 2006, s. 330-340).



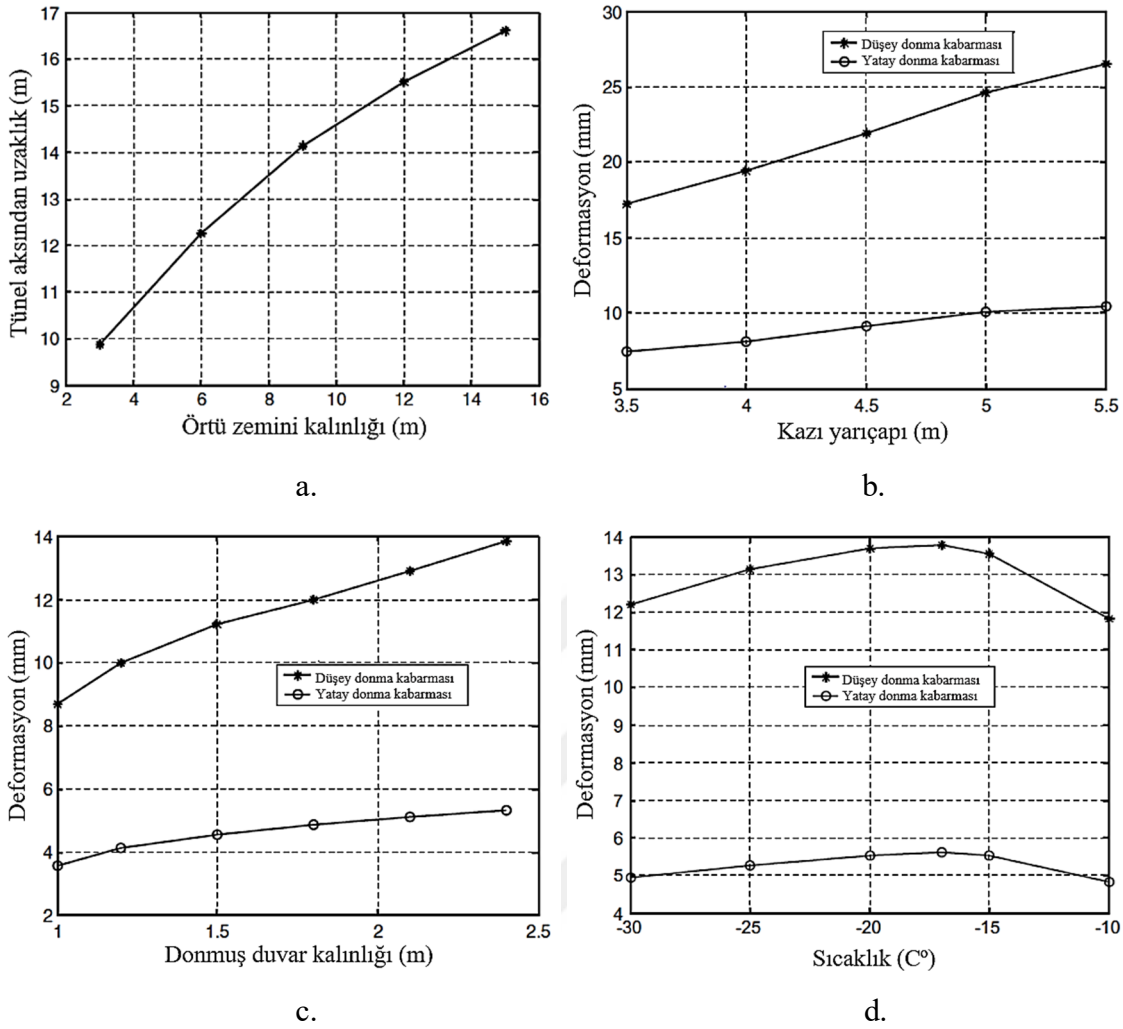
Şekil 2.26. *Nanjing 1 Nolu Tünel Hattı Projesi San-Zhang Koridoru İçin Önerilen Sayısal Model*
Kaynak: *Yang vd., 2006, s. 336*

Tablo 2.2. *Proje ve Modeldeki Donmaya İlişkin Parametreler*

Proje		Model	
Parametre	**Değer**	**Parametre**	**Değer**
Donmuş duvarın tasarım kalınlığı	1.6 m	Dondurucu boru sayısı (N)	55
Çözelti dönüş sıcaklığı	-22 ile -24 ºC arası	Çözelti dönüş sıcaklığı (T_y)	-24ºC
Donmuş duvarın ortalama sıcaklığı	-8 ile -10 ºC arası	Dondurucu boru çapı (d)	0,108m
Sıcaklık ölçüm deliği sayısı	10	Faz değişim sıcaklığı (T_m)	-1 ºC
Dondurucu boru sayısı	55	Faz değişim sıcaklığı aralığı	-1 ile -1,3ºC arasında ΔT=0,3ºC
Yerleştirilmemiş delik sayısı	4		
Dondurucu boruların tasarım aralığı	0,60 ile 0,84m arası	Birim alandaki dondurucu boruların ısıl yayılım katsayısı (k^*)	1047 J/m^2
Dondurucu boruların taban aralığı	1,0m	Isı taşınımı değişim katsayısı (β)	8,5 W/m^2 ºC
Ön dondurma süresi	32 gün	Zeminin başlangıç sıcaklığı (T_0)	18 ºC
Dondurma koruma süresi	35 gün	Atmosfer sıcaklığı (T_a)	10 ºC
Tüm inşaat boyunca süre	92 gün	Zemin yüzeyindeki yük	0

Kaynak: *Yang vd., 2006, s. 336 - 337*

Çalışmada, donma kabarmasındaki en etkili parametre örtü zemin kalınlığı olarak belirtilmiştir. Tünelin üst kısmındaki zemin kalınlığı arttıkça kısıtlamalar artacağından yer değiştirme değerleri ve yüzeydeki donma kabarması miktarları azalmaktadır. Örtü basıncının düşmesi ise donmamış zemin potansiyelini arttırmakta ve donmuş zemine su kaçışlarına sebep olmaktadır. Donmuş duvar kalınlığının artması ile donma kabarması miktarı kalın duvarlarda fazla, ince duvarlarda ise düşük oranda artış meydana getirmektedir. Maksimum donma kabarması kazı çapı değeri ile hemen hemen doğrusaldır. Çalışmada kritik sıcaklık maksimum oturma değerini meydana geldiği yaklaşık -17 ºC'de görülmüştür. Değişkenlerin yüzey yer değiştirme değerlerine etkisi Şekil 2.27'de sıralı olarak verilmiştir (Yang vd., 2006, s. 330-340).

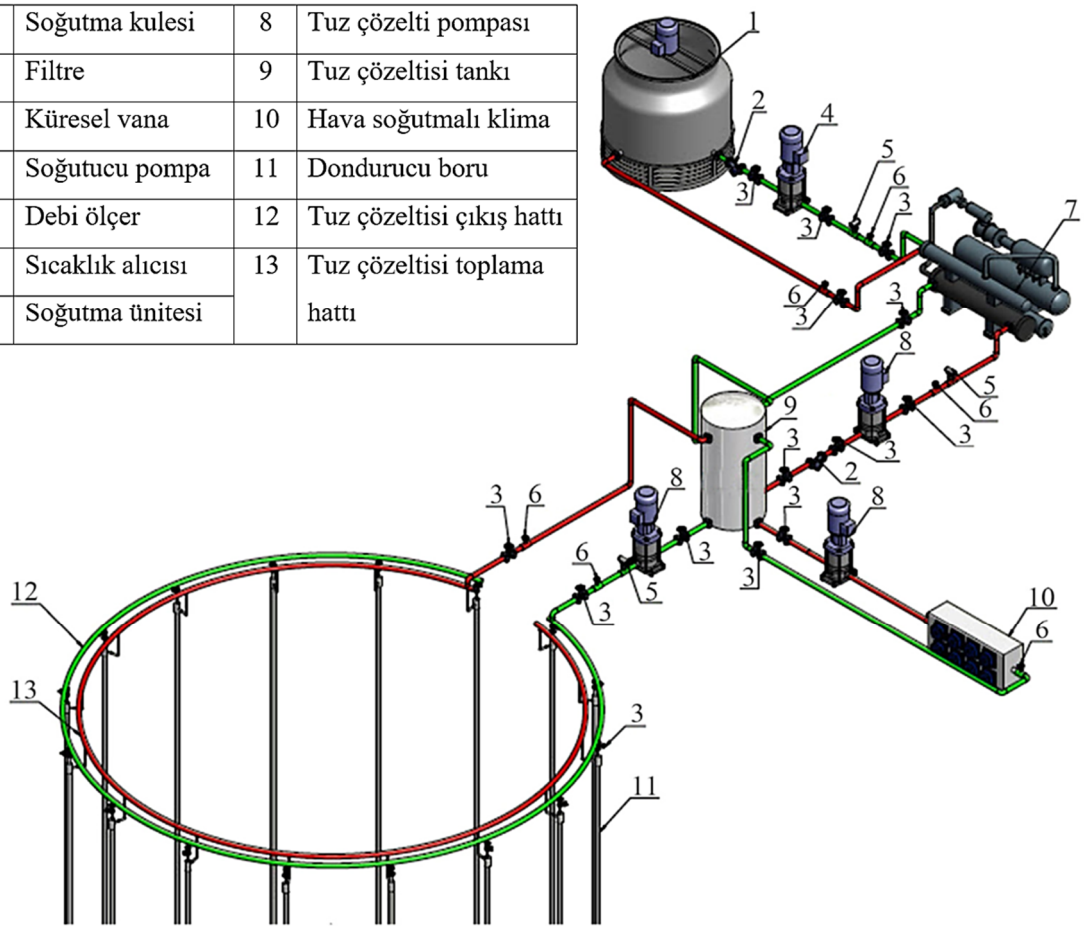


Şekil 2.27. *Değerlendirilen Değişkenlerin Deformasyona Etkisi; a. Örtü Zemini Kalınlığı, b. Kazı Yarıçapı, c. Donmuş Duvar Kalınlığı ve d. Çözelti Sıcaklığı*

Kaynak: *Yang vd., 2006, s. 339*

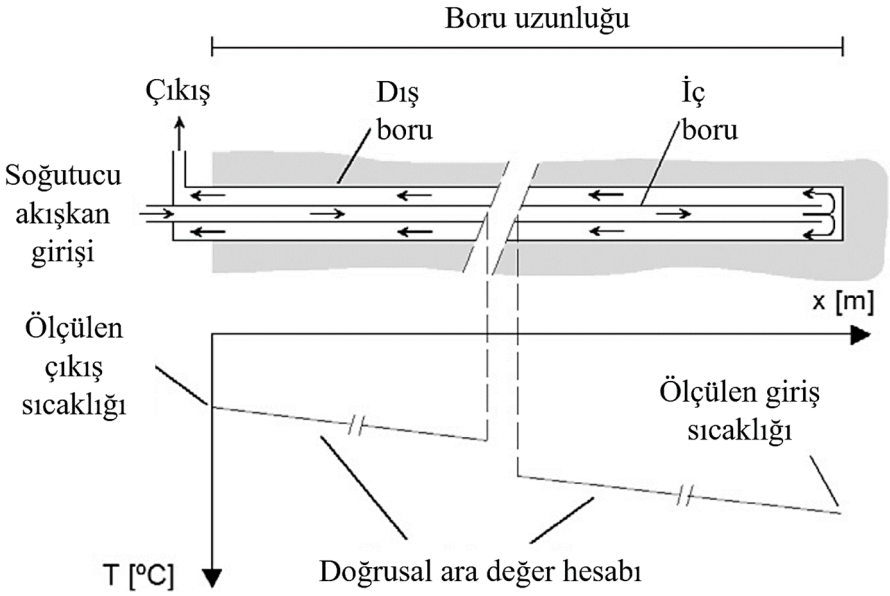
Zhao vd. (2015, s. 224-233) tarafından çapılan çalışmada, hava soğutuculu ve klasik soğutma tekniklerinin birleştirilmesi ile düşük enerji tüketimli yapay zemin dondurma sistemi önerilmiştir. Sistem, tamamen soğuk bölgelerdeki doğal düşük hava sıcaklığından faydalanılarak dondurma maliyetinin düşürülmesi ve doğaya verilen etkinin azaltılmasını içermektedir. Bu doğrultuda geliştirilen ve arazide uygulaması gerçekleştirilen deneysel platform (Şekil 2.28) ayrıca Ansys modeli ile doğrulanmıştır. Klasik teknikle kıyaslandığında işletme maliyeti ve enerji maliyeti sırasıyla % 52,0 ve % 53,4 oranında düşürülmüştür. 68 gün sonunda hava soğutmalı teknik ile tüm dondurucu boruların çevresinde 0,5 m dahilindeki zemin 0 ºC'nin altına düşmekle birlikte bitişik donmuş alanlar kesişmiş ve donmuş duvar elde edilmiştir.

1	Soğutma kulesi	8	Tuz çözelti pompası
2	Filtre	9	Tuz çözeltisi tankı
3	Küresel vana	10	Hava soğutmalı klima
4	Soğutucu pompa	11	Dondurucu boru
5	Debi ölçer	12	Tuz çözeltisi çıkış hattı
6	Sıcaklık alıcısı	13	Tuz çözeltisi toplama hattı
7	Soğutma ünitesi		



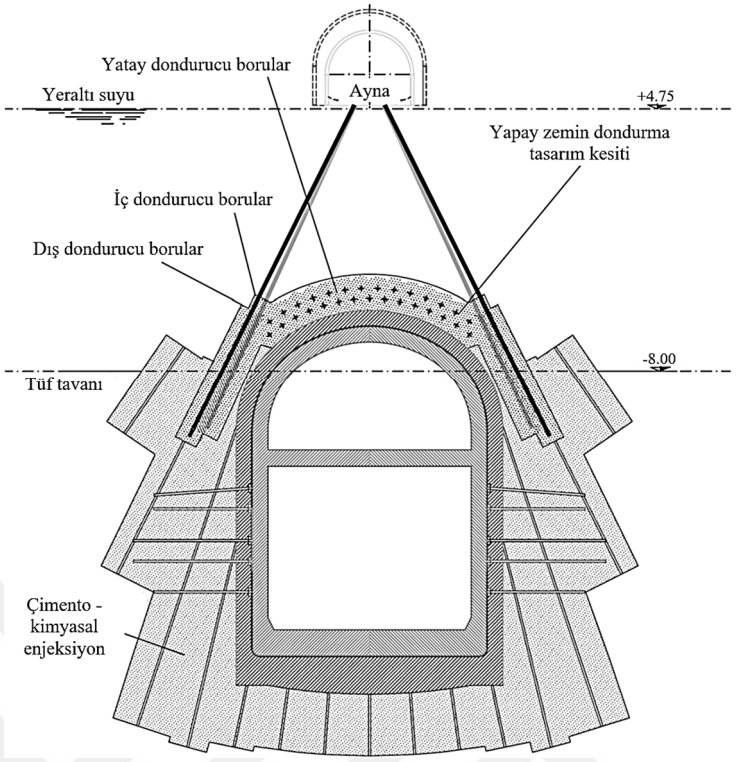
Şekil 2.28. *Deneysel Platform Şeması*
Kaynak. *Zhao vd., 2015, s. 225*

Yapay zemin dondurma yöntemi ile inşa edilen üç farklı tünel, ısıl-hidrolik sayısal simülasyon kullanılarak değerlendirilmiştir (Pimentel vd., 2012, s. 57-69). Yüksek miktarda sızıntı akışına sahip yumuşak zeminde inşa edilen, Almanya'daki ikiz tünelde donmuş yapı gelişimine odaklanılmıştır. Napoli'deki platform tüneli inşaatındaki modelde öngörülen ısıl parametreler ve arazi ölçümlerinde elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Zürih Limmat nehri altında yer alan tünelde ise sızıntı akışı ile birlikte sondaj yerleşiminden kaynaklanan geometrik düzensizliklerin potansiyel sorunları tanımlanmıştır. Tünellerde kullanılan boru kesiti ve ısıl sınır değerleri Şekil 2.29'da verilmiştir.



Şekil 2.29. *Dondurucu Borulardaki Isıl Sınır Koşulları*
Kaynak. *Pimentel vd., 2012, s. 59*

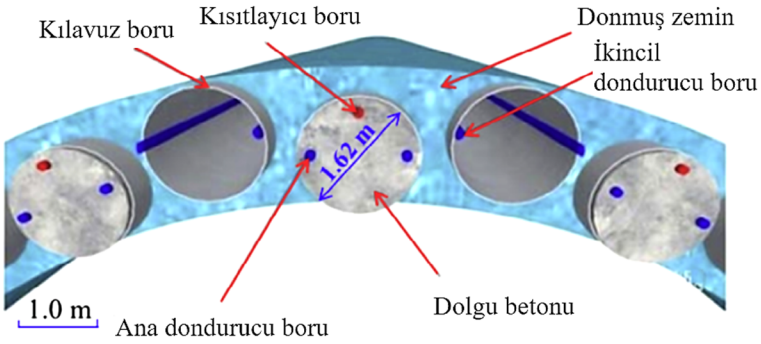
Russo vd. (2015, s. 226-238) tarafından, yeraltı su seviyesinin yaklaşık 10 m altında bulunan ve tamamen suya doygun siltli kum ile sarı tüf birimlerin içerisinde yapay zemin dondurma yöntemi ile inşa edilen Napoli Toledo metro istasyonundaki 40 m uzunluğa sahip servis tüneli incelenmiştir. Yapay zemin dondurma yöntemi ile çimento - kimyasal enjeksiyonun birlikte kullanıldığı tünel kesiti Şekil 2.30'da verilmiştir. Bölgeden farklı derinliklerde alınan numunelerde -5, -10 ve -20 ºC sıcaklıklarda üç eksenli, serbest basınç ve endirekt uzama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Donmuş tüf numunede elastisite modülü değerleri 220 - 420 MPa arasında değişmektedir. İnşaat sürecindeki çözülme aşamasında tünel üstünde bulunan yapılardaki en önemli etkinin oturma olduğu belirtilmiştir. Çözülmeye bağlı oturma miktarının, donma aşamasında gerçekleşen maksimum kabarma değerinden yaklaşık 3 kat daha fazla olduğu vurgulanmıştır.



Şekil 2.30. *Servis Tünelinin En Kesiti ve Kazı Koruması İçin Uygulanan Zemin İşlemleri*

Kaynak. *Russo vd., 2015, s. 229*

Kang vd. (2016, s. 1-10) aç - kapa tünel metoduna uygun olmayan Çin'deki Gongbei tünelinin karakteristik sahil bağlantısındaki inşa metodunu incelemişlerdir. Tünel kesitinde, kılavuz boru olarak adlandırılan düzinelerce ince çelik tüp yumuşak zemin içerisine yerleştirilmiştir (Görsel 2.3). İnce su geçirmez tabaka oluşturmak amacı ile ayrıca dondurucu tıpa metodu kullanılmıştır. Çalışmada ise bu karma uygulama yöntemi, yeni tüp çatı metodu (new tubular roof mothod) ve ısıl-mekanik çifti ile analiz edilmiştir. Analizlerdeki 50 günlük dondurma işlemi sonunda yaklaşık 2 m donmuş duvar elde edilmiştir. Ayrıca, aşırı çözülme oturmalarını önlemek için uygulama sonrası enjeksiyon önerilmektedir.



a.

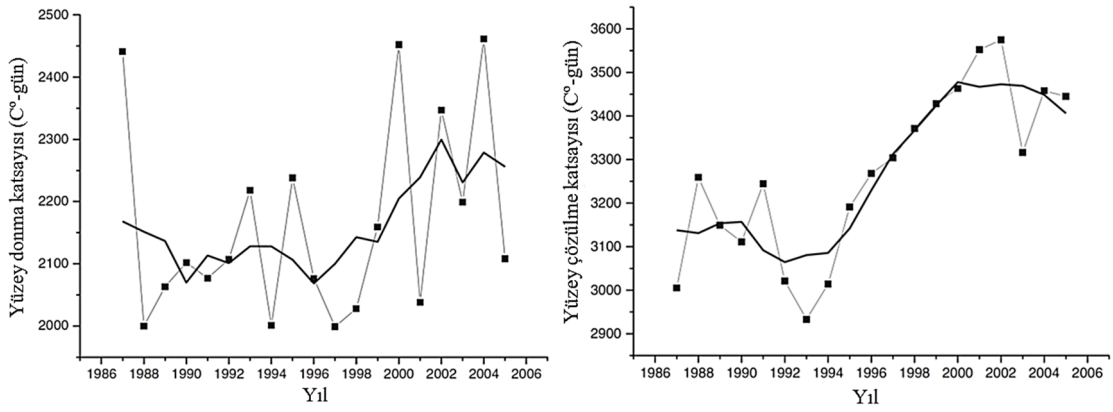
b.

Görsel 2.3. *a. Kaplama Çizimi ve b. Dondurucu Boru Fotoğrafı*
Kaynak. *Kang vd., 2016, s. 5*

1987 ve 2005 yılları arasında Moğolistan'ın Sibirya permafrost bölgesi sınırında yer alan 20 adet meteorolojik istasyondan elde edilen yüzey verilerinin kullanıldığı çalışmada, aylık zemin yüzeyi sıcaklıklarına bağlı olarak yıllık donma çözülme indeksi değerleri hesaplanmıştır (Wu vd., 2011, s. 105-111). İklim bilimi terminolojisinde hava ve yüzey donma çözülme indeksleri olmak üzere iki çeşit donma çözülme indeksi bulunmaktadır. İndeksler 0 ºC'nin altında veya üstünde olan hava sıcaklıklarında verilen zaman aralığına göre derece - gün formatında tanımlanmaktadır. Yüzey donma çözülme indekslerini doğrulamak için zemine -40 ºC ile +70 ºC çalışma aralığındaki ±0.5 ºC hassasiyetli sıcaklık alıcıları ve ısıl dirençler yerleştirilmiştir. 5, 15, 40, 50 ve 65 cm derinliğe yerleştirilen sıcaklık ölçerler (PT100) Görsel 2.4'te görülmektedir.

Görsel 2.4. *P100 Tipi Sıcaklıkölçerlerin Yerleşimi*
Kaynak: *Wu vd., 2011, s. 107*

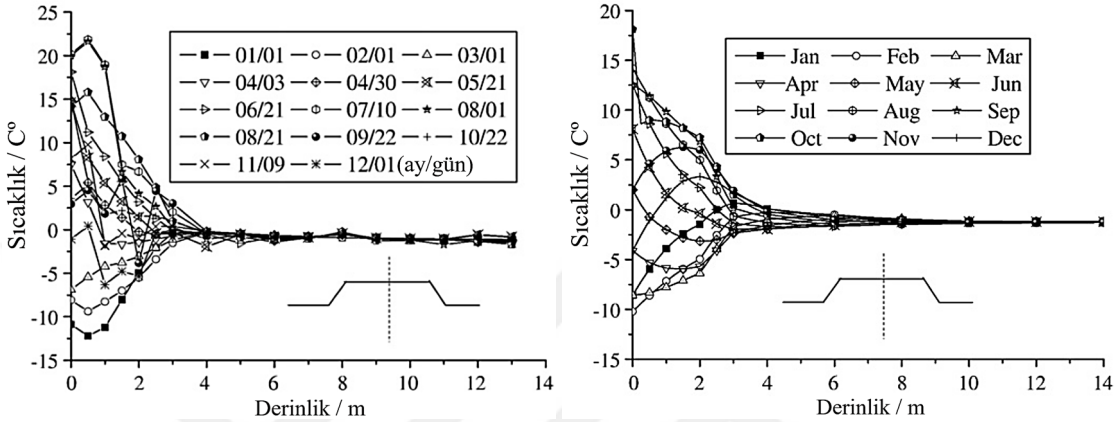
Gözlenen verilerden elde edilen donma ve çözülme indeksi değerleri Şekil 2.31'de verilmiştir. Günlük ve aylık katsayı değerlerinde donma döneminde % 2'den az, çözülme döneminde ise % 3'ten az fark gözlenmiştir. Aylık zemin yüzey sıcaklıklarından elde edilen verilerin yıllık yüzey donma çözülme indeksi hesabında güvenilir sonuçlar verdiği görülmüştür. Son 19 yılda yıllık yüzey çözülme katsayısı ciddi ölçüde artmıştır (29 ºC gün / yıl). Bu artış miktarı aktif tabaka kalınlığının artması ve permafrost dağılımın değişmesi ile görülmektedir. Verilerin ısınan iklimlerde donma çözülme parametreleri açısından fayda sağlayacağı belirtilmiştir (Wu vd., 2011, s. 105-111).



a. b.

Şekil 2.31. *1987-2005 Yılları Arasında; a. Yüzeydeki Donma ve b. Yüzeydeki Çözülme Katsayısı Değerleri Değişimi*
Kaynak: *Wu vd., 2011, s. 109 - 110*

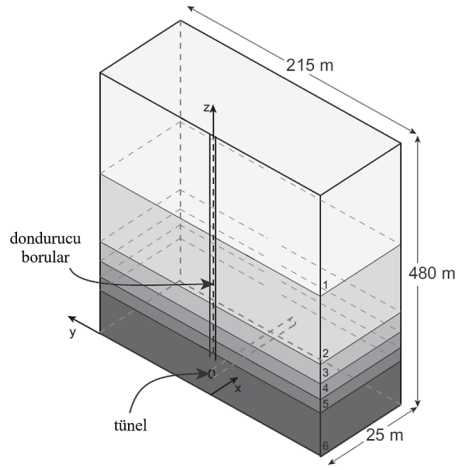
Li vd. (2008, s. 19-35) tarafından önerilen modele göre hesaplanan sıcaklık verilerinin derinliğe bağlı değişimi, Hua Shixia otoyolu profilinin merkezinde farklı zamanlarda ölçülen sıcaklık verileri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 2.32). Arazi gözlemleri ve geliştirilen ısı, nem, deformasyon teorik rejim modeli sonuçlarının uygun ve kabul edilebilir olduğu belirtilmiştir.



Şekil 2.32. *Hua Shixia Otoyol Profili Merkezinden Alınan Veriler ve Hesaplanan Verilerin Değişimi*

Kaynak: *Li vd., 2008, s. 31*

Vitel vd.'nin (2016, s. 80-92) önerdiği ısıl-dinamik model, Kanada'da ayrılmış kumtaşına inşa edilen yeraltı madeni uygulamasında dondurucu borular ile çevre zemini arasındaki ısı transferinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır (Şekil 2.33). Gözenekli ortamın tamamen suya doygun olması durumu ve mekanik bakış açısını içermemesinin, çalışmada sunulan modellerdeki iki temel kısıtlama olduğu belirtilmiştir. Isıl-hidrolik model ve boru-zemin modellerinin birlikte kullanımı sonucunda bazı ciddi olasılıklar öngörülebilmektedir. Bunlar; dondurucu borulardaki sınır koşullarının hesaplanması ile yapay zemin dondurma gelişiminin öngörülmesi; dondurucu boru sisteminin iyileştirilmesi ve donma işleminde özgün hidrojeolojik koşulların potansiyel etkisinin değerlendirilmesi olarak belirtilmiştir.



Şekil 2.33. *Madenin; 4 Dondurucu Boru, 1 Tünel ve 6 Tabaka İçeren Modeli*
Kaynak. *Vitel vd., 2016, s. 86*

3. YÖNTEM

3.1. Yapay Zemin Dondurma Yönteminde Kullanılan Isıl Parametreler

Maddenin fiziksel özeliklerinden kaynaklanan ve moleküler yapısının oluşumuna göre farklılık arz eden ısı aktarımı; aynı maddenin değişik noktalarındaki sıcaklık farkı veya farklı maddelerin teması sırasındaki ısı alış verişinden kaynaklanmaktadır. Isı aktarımı; taşınım (konveksiyon), ışınım (radyasyon) veya iletim (kondüksiyon) yoluyla gerçekleşmektedir. Isı taşınımı kitle halindeki molekül hareketi yoluyla, ısı ışınımı herhangi bir ortam gerektirmeden yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı sayesinde ve ısı iletimi ise temas halindeki moleküllerin titreşimi ile gerçekleşmektedir. Normal şartlarda dane, su ve hava olmak üzere üç fazdan oluşan ve heterojen yapıya sahip zeminde ısı aktarımı iletim yolu ile gerçekleşmektedir. Donmaya başlayan zeminde akışkan halde bulunan su, soğutmaya devam edilirse sırasıyla su - buz karışımı, buz lensi ve buz kristaline dönüşmektedir. Dolayısıyla zemin artık dane, su, hava ve buz olmak üzere dört farklı faza sahip olmaktadır. Bu durumda da moleküller arasında temas olduğundan ısının aktarımı halen iletim (kondüksiyon) yolu ile gerçekleşmektedir. Gözenekli ortam olarak tabir edilen bu karmaşık yapıdaki ısı aktarımı için temelde Fourier ısı iletim yasası kullanılmaktadır. Fakat zemin içerisindeki boşluk veya yabancı madde gibi sürekliliği bozan ortamlar için bazı kabuller gerekmektedir. Bu kabuller hesaplama adımlarını kolaylaştırmakla beraber, zeminin doğal şartlarının göz ardı edilmesine yol açmaktadır. Bazı araştırmacıların önerdikleri ısı iletim modellerinde öngördükleri kabuller aşağıda verilmiştir.

Yang vd. (2006, s. 331) tarafından önerilen matematiksel modelde aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Zemin danelerinin ısıl indirgenmesine bağlı genişleme ve büzülme göz ardı edilmiş ve daneler rijit kabul edilmiştir.
- Donmuş zeminin homojen olmadığı ve doğrusal elastik davranış gösterdiği kabul edilmiştir. Donmamış zemin izotropik ve doğrusal olmayan elastik kabul edilip elastisite modülü, sekant modülü (E_s) ile tanımlanmıştır.
- Gerilme sıcaklığın donma kabarmasına etkisi, mevcut donmamış suyun donması ve su göçünün deneysel ilişkisi ile verilmiştir.
- Faz değişimleri için aynı zemin ve gerilme durumlarında sıcaklık sabit tutulmuştur.

- Dış kaynaktan gelen su, sabit seviyede beslenmiş ve donmuş duvar kalınlığından etkilendirilmemiştir.
- Dondurucu boruların sıcaklığı çözelti sıcaklığından 2 ºC yüksek kabul edilmiş ve homojen soğutucu kaynak sınırı olarak tanımlanmıştır.
- Tünel kesitinde ısıl iletim ve su göçü düzlemsel birim şekil değiştirme modeli ile tanımlanmıştır.

Bir başka çalışmada Wang vd. (2016, s. 144) tarafından ısı değişimlerinin verimliliğinin arttırılması için donmamış zeminde geliştirilen, birçok katsayı ve kabul içeren ısıl iletkenlik modeli bir diğer örnek olarak verilebilir. Bu kabuller aşağıdaki gibidir.

- Zemin homojendir ve boru boyunca zemin tipi değişmemektedir.
- Gözenekli ortamdaki akışkanın doğal iletimi Darcy Kanunu'na göre gerçekleşmektedir.
- Zeminde donma gerçekleşmemektedir ve zemindeki hava fazı ideal gaz kabul edilmektedir.
- Düşey ve çevresel doğrultularda ısı ve nem iletimi ihmal edilmektedir.
- Doygun olmayan zeminde, yer çekiminin zemin nemi iletimine etkisi ihmal edilmektedir.
- Kimyasal etkileşim ve elektrik iletimi bulunmamaktadır.

Yukarıdaki kabullerde de görüldüğü üzere, donmamış zeminde bile birçok katsayı ve kabule göre yapılmış bu ve bunun gibi modeller; gözenekli, su içeren, yatay ve düşey doğrultuda akışın olduğu, farklı tabakalardan oluşan ve içeriğinde çok sayıda bilinmeyen barındıran gerçek zemindeki ısı iletiminin açıklanmasının ne kadar karmaşık bir süreç gerektirdiğini kanıtlamaktadır. Bu yüzden daha karmaşık yapıya sahip, donma ve çözülme işlemlerine maruz kalan zeminlerde süregelen uygulamalarda deneysel sonuçlara göre önerilen ampirik formüller ön plana çıkmaktadır. Ya da zemin kütlesinin tamamen homojen özelliklerde olduğu kabul edilerek genel kabul görmüş iletim yasaları çerçevesinde hesaplamalar yapılmaktadır. Zemindeki ısı iletiminin, yine zemin ortamındaki su iletimine benzeştirilerek ifade edildiği yaklaşımlar da bulunmaktadır.

Isıl iletkenlik, ısı kapasitesi, hacimsel ısı, erime ısısı ve suyun buharlaşma ısısı ısı hesaplamalarında kullanılan diğer parametrelerdir. Isı kapasitesi ile donmuş veya donmamış zeminler için basit ilişkiler kullanılarak hacimsel ısı hesabı yapılabilmektedir.

Hacimsel ısıya, birçok süreksiz ısı akışı problemlerinin çözümünde ihtiyaç duyulmaktadır. Erime ısısı zemin dondurma ve çözülme analizlerinde kullanılmaktadır. Buharlaşma ısısı ise akışkan ile buhar arasındaki faz geçişlerinde uygulanmaktadır. (Mitchell ve Soga, 2005, s. 266).

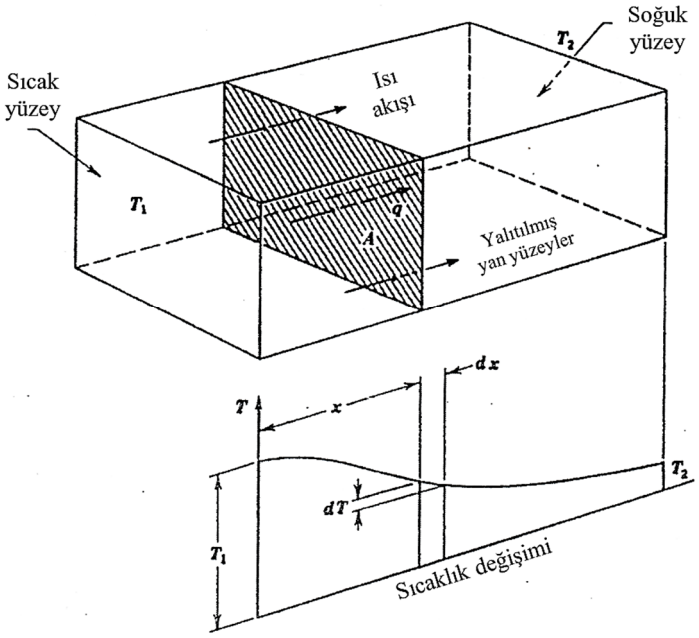
3.1.1. Isıl iletkenlik

Zemin ve kayadaki ısı aktarımı yüzey haricinde ışınımın önemsiz olduğu iletim ile gerçekleşmektedir. Taşınım ise sadece yüksek debide su ve gaz akışı olan kaba kum veya kaya dolgularda önemlidir. Isıl iletkenlik ısı aktarımını kontrol etmektedir. İletilen ısı akışı zemin kütlesinde öncelikle dane fazında gerçekleşir (Mitchell ve Soga, 2005, s. 265). Bu yüzden; hava, su ve katı malzemelerde olduğu gibi zemindeki ısı iletiminde de öne çıkan en önemli parametre ısıl iletkenlik değeridir. Isıl hesaplamalar genellikle ısıl iletkenliğin fonksiyonları olarak karşımıza çıkmaktadır.

Zemindeki ısı iletimi, moleküllerin kinetik enerjisinin kütlenin sıcak kısmından daha soğuk kısmına doğru aktarımını içermektedir. Şekil 3.1'deki prizmatik elemandaki A kesitli zeminden aktarılan ısı iletim oranı aşağıda verilmiştir (Andersland ve Ladanyi, 2004, s. 45).

$$q = \frac{Q}{A} = -k_u \frac{dT}{dx} = k_u i \tag{3.1}$$

Burada; q birim alandan geçen ısı akış oranı (birimi: J/m^2.s), k_u donmamış zeminin ısıl iletim katsayısı (J/s.m), $dT/dx = i$ ısıl eğim (ºC/m) ve A ise kesit alanıdır (m^2). Denklemdeki eksi işareti ısı akışının yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru gerçekleştiğini belirtmektedir.



Şekil 3.1. *Zemin Elemanı İçerisinden Isı Akışı*
Kaynak. *Andersland ve Ladanyi, 2004, s. 45*

Becker ve Fricke'e (1997, s. 1) göre zeminin ısıl iletkenliğinin saptanmasında doygunluk ve kuru yoğunluk önemli parametrelerdir. Bunların artması ile iletkenlik artmakta olup her ikisi de iletkenliğin tahmin metotlarında kullanılan değişkenler olduğu belirtilmiştir.

Zemin içerisindeki ısı iletim hesaplamaları genellikle Fourier Yasası'na göre yapılmaktadır. Ayrıca kütlenin korunumu ve Darcy Kanunu'na göre yapılan kabuller de bulunmaktadır. Literatürde geçen ve zeminler için belirtilen bazı ısı iletim denklemleri aşağıda verilmiştir. Chalhoub vd. (2017, s. 298) Fourier yasası ve kütlenin korunumunu kullanarak zemin için verilen tek doğrultulu ısı iletimini Denklem 3.2'deki gibi vermişlerdir.

$$C\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) = -k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{3.2}$$

Burada; C zeminin hacimsel ısı kapasitesi, k zeminin ısı iletim katsayısı, t süre ve z ise derinliktir. k/C oranı ise zeminin ısıl yayılma katsayısını (α) vermektedir.

Marwan vd. (2016, s. 115) tarafından Fourier kanunu Denklem 3.3.'teki eşitlikle verilmiştir.

$$q = -\lambda_{tot} \nabla T \tag{3.3}$$

Burada; q genel ısı akış vektörü, λ_{tot} genel ısıl iletkenlik ve ∇T ise sıcaklığa bağlı vektör yüzeyin normali ve gradyan (∇) ise sıcaklığa bağlı skaler alanın yön türevi artımın en çok olduğu yere doğru yönelmiş vektör alanını vermektedir. Diğer bir ifade ile gradyan yüksek enerjiden düşük enerjiye doğru akış yönünü vermektedir.

Vitel vd. (2016, s. 4) tarafından ısı akış yoğunluğu $\vec{\Psi}$ ile ifade edilmekte olup, Fourier'in ısı iletim yasasına göre Denklem 3.4'te tanımlanmıştır.

$$\vec{\Psi} = -\lambda \vec{\nabla} T \tag{3.4}$$

Burada; λ görünür ısıl iletkenlik, $\vec{\nabla}$ gradyan ve T ise anlık sıcaklıktır.

Zemin içerisindeki düşük hıza sahip akışlarda, akışkan ve dane arasındaki sıcaklık farkı az olmakta ve bu ortamlar arasındaki iletim ihmal edilebilmektedir. Toplam ısı iletimi Denklem 3.5 ile tanımlanmıştır (Johansen, 1977, s. 21).

$$\lambda_e' \nabla^2 T + \left(c_p\right)_{f'} \bar{v} \nabla T = \left(c_p\right)_{m'} \frac{\partial T}{\partial t} \tag{3.5}$$

Burada; λ_e' gözenekli malzeme için efektif iletkenlik (W/mK), $\left(c_p\right)_{f'}$ akışkanın ısı kapasitesi (J/m^{3}K) ve $\left(c_p\right)_{m'}$ akışkan dolu gözenekli malzemenin ısı kapasitesi, $\bar{v}$ hız vektörü, ∇T sıcaklığın skaler yön türevidir.

3.1.2. Isı iletim katsayısı

Isı yayılımının iletim yoluyla olması durumunda; malzemenin içeriği, fiziksel hali, yoğunluğu ve sıcaklığına göre değişen katsayıdır. "λ" veya "k" ile gösterilmektedir. Birimi genellikle W/mK alınmaktadır.

Doygunluk derecesine bağlı olarak donmamış (Denklem 3.6) ve donmuş zeminler (Denklem 3.7) için verilen ampirik denklemler aşağıdaki gibidir. (Johansen, 1977, s. 221).

$$\sqrt{\lambda - \lambda^0} = \sqrt{\lambda^1 - \lambda^0} S_r \tag{3.6}$$

$$\lambda/_{\lambda^0} = \left(\lambda^1/_{\lambda^0}\right)^{S_r} \tag{3.7}$$

Burada; λ^0 kuru zemin iletkenliği (ortalama 0,05 W/mK olarak önerilmektedir), λ^1 doygun zemin iletkenliği (donmamış zemin için ortalama 0,55 W/mK, donmuş zemin için ortalama 1,80 W/mK olarak önerilmektedir) ve S_r ise doygunluk derecesidir.

Standartlaştırılmış iletkenlik "Kersten numarası" ile ifade edilmektedir (Johansen, 1977, s. 206).

$$K_e = \frac{\lambda - \lambda^0}{\lambda^1 - \lambda^2} \tag{3.8}$$

Burada; λ ölçülen iletkenlik, λ^0 kuru malzemenin iletkenlik değeri ve λ^1 ise doygun malzemenin iletkenlik değeridir.

Van Rooyen ve Winterkon'un (1957'den aktaran Becker ve Fricke, 1997, s.2) kum ve çakıllar için önerdikleri korelasyonda ısıl iletkenlik Denklem 3.9 ile hesaplanmaktadır. Fakat bu metot donmamış kum ve çakıllarda % 1,5 ile % 10,0 doygunluk seviyeleri ile sınırlandırılmıştır.

$$\frac{1}{k} = A10^{-BS_r} + s \tag{3.9}$$

Burada; k zeminin ısıl iletkenlik katsayısı, S_r doygunluk derecesi, A kuru yoğunluk fonksiyonu, B mineral tipi fonksiyonu ve s ise dane boyut dağılımının fonksiyonudur.

Kersten'nin (1949, s. 91-92) donmuş siltli ve killi kumlu zeminler için önerdiği ısıl iletkenlik katsayısının ampirik korelasyonu Denklem 3.10'da, kumlu zeminler için geçerli olanı ise Denklem 3.11'de verilmiştir.

$$k = 0.01(10)^{0.022\gamma_d} + 0.085(10)^{0.008\gamma_d}\omega \tag{3.10}$$

$$k = 0.076(10)^{0.013\gamma_d} + 0.032(10)^{0.0146\gamma_d}\omega \tag{3.11}$$

Burada; k zeminin ısıl iletkenliği (birim: Btu.in/ft^{2}hF^o), ω su muhtevası, γ_d kuru birim hacim ağırlık değeridir.

3.1.3. Öz ısı - Isı kapasitesi

Bir maddenin 1 gramının sıcaklığını 1 ºC arttırmak için gereken ısı enerjisi miktarı olarak tanımlanmaktadır. Maddeye özgü bir değer olan ısı kapasitesi öz ısı olarak da adlandırılmakta ve "c" ile gösterilmektedir. Birimi J/gr/ºC alınmaktadır. Fizik ve termodinamikte öz ısıya bağlı ısı miktarı hesaplamalarında kullanılan denklem aşağıda verilmiştir.

$$Q = m.c.\Delta T \tag{3.12}$$

Burada; Q ısı miktarı, m kütle, c öz ısı ve ΔT ise sıcaklık değişimidir.

Kersten (1949, s. 89) tarafından 12 farklı zeminde yapılan deneyler sonucunda hesaplanan zemin ve su karışımının öz ısı değeri Denklem 3.13'teki gibi verilmiş

$$c = \frac{(100.c_{zemin})+\omega}{100+\omega} \tag{3.13}$$

Burada; c öz ısı ve ω ise su muhtevasıdır.

de Vries'a (1963'ten aktaran Chalhoub, 2017, s. 299) göre, hacimsel ısı kapasitesi (C), zemin yapısı ve su muhtevası ile ilişkilidir.

$$C = 1.92 \times 10^6 f_m + 2.51 \times 10^6 f_{OM} + 4.18 \times 10^6 \theta \tag{3.14}$$

$$f_m = \frac{\rho_b}{\rho_s} \tag{3.15}$$

$$\emptyset = 1 - f_m \tag{3.16}$$

$$f_{OM} = \frac{OM}{1000}\frac{\rho_b}{\rho_{OM}} \tag{3.17}$$

Burada; f_m danenin hacimsel kısmı, f_{OM} zemindeki organik maddenin hacimsel kısmı, ρ_b hacimsel yoğunluk, ρ_s hacimsel dane yoğunluğu, ρ_{OM} hacimsel organik madde yoğunluğu, OM zemindeki organik madde miktarı ve $\emptyset$ ise zemin gözenekliliğidir.

Akışkanın ilk faz kütle bölüntüsünün 1'den küçük olması durumunda ısıl iletkenlik, öz ısı, yoğunluk ve durağan ısı değerlerinin düzeltilmesi gerekmektedir. Song vd. tarafından (2016, s. 36) düzeltilmiş öz ısı için denklem 3.18 önerilmiştir. Denklem 3.18'de ise ilk fazdaki kütle bölüntüsü hesabı verilmiştir (Song vd., 2016, s. 32).

$$c = c_\sigma X_\sigma + c_\delta X_\delta \tag{3.18}$$

$$X_\sigma = \frac{\rho_\sigma}{\rho_\sigma + \rho_\delta} \tag{3.19}$$

Burada; c öz ısı, X kütle bölüntüsü, σ ilk faz ve δ ikinci fazı belirtmektedir. ρ ise yoğunluk değeridir.

3.1.4. Donmuş silindirde ısı iletimi

Yapay zemin dondurma yönteminde elde edilmesi amaçlanan donmuş duvar, dondurucu boruların çevresinde zamanla oluşan donmuş silindirlerin kesişmesi ile meydana gelmektedir. Kersten (1949, s. 18-19) tarafından ısı iletiminde genel bir yaklaşım yerine sadece donmuş zemin silindiri göz önüne alınarak, çevresindeki zemin ile etkileşimi sonucunda meydana gelen ısı iletimine odaklanılmıştır. Boru ile muhafazaya alınmış veya herhangi bir boş silindir numune içerisinde bulunan zemin ile benzer modellemeyi gerçekleştirebilmek için silindir kap içerisindeki zemin boyunca ısı iletimi denklem 3.20'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$q = \frac{\frac{k(A_2 - A_1)}{2.3 log_{10}(A_2/A_1)}(T_1 - T_2)}{t} \tag{3.20}$$

Burada; q saatlik ısı akış oranı (Btu cinsinden), k ısı iletim katsayısı (Btu/ft^2.in.h.F^o), A_2 zemin deney silindirinin dış yüzey alanı (ft^2), A_1 zemin deney silindirinin iç yüzey alanı (ft^2), T_1 iç yüzeydeki sıcaklık (F^o), T_2 dış yüzeydeki sıcaklık (F^o) ve t ise silindirin iç ve dış yüzeyleri arasındaki uzaklık değeridir (in).

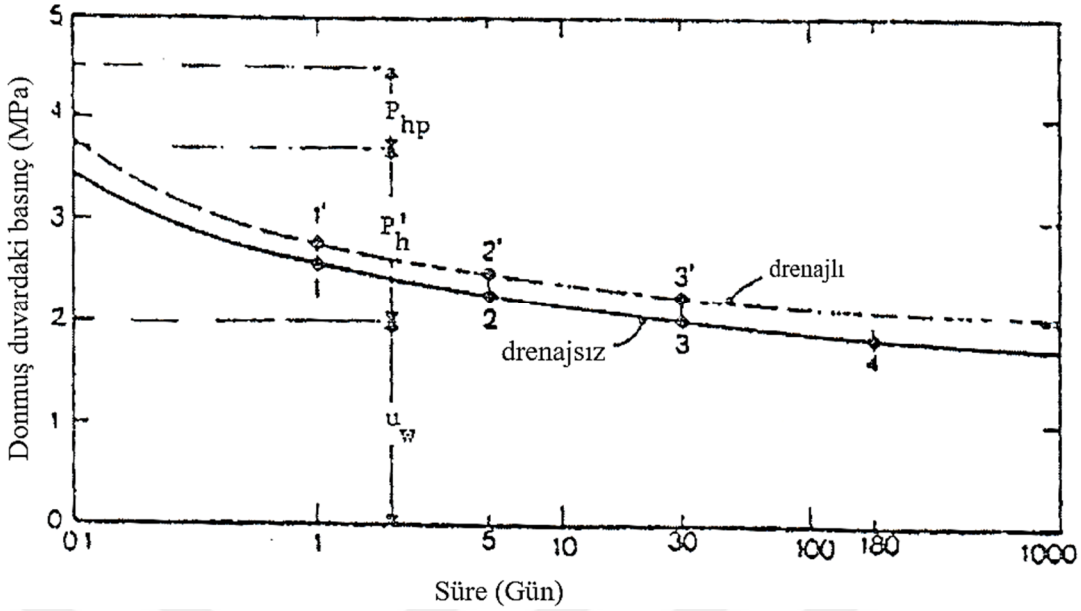
Zemin, su ve buz için ısıl iletkenlik değerleri sırasıyla 1,82, 0,55 ve 2,22 W/m^{o}C mertebelerinde verilmiştir (Zhao vd., 2014, s. 1483). Bir diğer çalışmada kumlu organik zemin, su, bu ve hava için ısıl iletkenlik değerleri sırasıyla 1,62, 0,56, 2,24 ve 0,026 W/mK^o olarak verilmiştir. (Song vd., 2016, s. 34). Mitchell ve Soga (2005, s. 267) tarafından hava, su, buz ve zemin malzemeleri için ısıl iletkenlik değerleri sırasıyla; 0,024, 0,60, 2,25 ve 0,15 - 1,5 W/m/K olarak verilmiştir.

3.2. Yapısal Tasarım

Yapay zemin dondurma işlemi sonucunda meydana gelecek donmuş duvar yapısının kalınlığı, dayanımı ve geometrisi yapısal tasarımdaki en önemli parametrelerdir. İnşa edilmesi planlanan yapı veya tünel şartları göz önünde bulundurularak, kazı derinliği ve zemin şartlarına göre zemin dondurma uygulaması gerçekleştirilmektedir. Yapısal tasarım konusunda Andersland ve Ladanyi (2004, s. 148-152) zaman bağlı dayanım esaslı tasarım ve sünme esaslı tasarım olmak üzere iki farklı yönteme yer vermişlerdir.

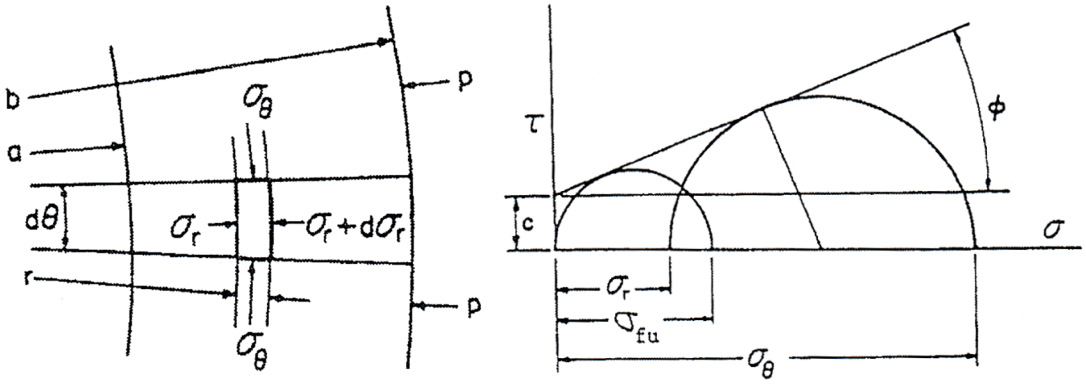
3.2.1. Zamana bağlı dayanım esaslı tasarım

Donmuş duvar tasarımı genellikle kavisli duvar teşkili ile yapılmaktadır. Derin kazılarda veya tüneller uygulanan bu kavisli duvarlarda yapısal anlamda kemerlenme etkisi ön plana çıkarılarak, oluşan kuvvetlerin duvar yapısı içerisinde veya sadece birkaç mesnet noktasında sönümlenmesi amaçlanmaktadır. Tasarım öncesinde ise donmuş zeminde meydana gelecek basınçların yaklaşık olarak öngörülmesi gerekmektedir. Bu amaçla Andersland ve Ladanyi (2004, s. 148) tarafından 200 metre derinliğindeki şaft uygulanmasında donmuş kil duvarda meydana gelen basınçlar Şekil 3.2'de verilmiştir. Grafikte P_{hp} donma işlemindeki öngerilme basıncı, $P_{h'}$ yatay efektif basınç ve u_w ise hidrostatik su basıncını ifade etmektedir. Eğer yükleme aşamasında donmuş duvardaki şekil değiştirmeler bilinirse; yapısal tasarım geometrisinin değiştirilmesi, duvar kalınlığının arttırılması veya duvar sıcaklığının düşürülmesi ile tasarım geliştirilebilmektedir.



Şekil 3.2. *Donmuş Duvarda Kazı Sonrası Zamana Bağlı Basınç Değişimi*
Kaynak. *Ladanyi 1982c'den Aktaran Andersland ve Ladanyi, 2004, s. 148*

Zamana bağlı dayanım esaslı tasarımda ilk olarak kalın, içi boş, dairesel donmuş silindir dikkate alınmaktadır. Düşey silindir duvar için gerilme durumları Şekil 3.3a'da verilmiştir. "a" yarıçaplı iç duvar yüzeyinde basınç bulunmamaktadır. "b" yarıçaplı donmuş zeminin dış duvar yüzeyindeki basınç ise etkiyen zemin basıncı "p" ile değişmektedir. "r" yarıçaplı zemin elemanına etkiyen yatay radyal gerilme σ_r, yatay çevresel gerilme σ_θ ve düşey gerilme σ_z bileşenlerinin tamamı normal gerilmeyi oluşturmaktadır. Çünkü silindirin merkez hattı boyunca düşey kesitteki kayma gerilmesi sıfıra eşittir ve çevresel gerilme σ_θ asal gerilme değeridir. Radyal gerilme σ_r değerinin ise genellikle minimum asal gerilmeyi tanımlamak için kullanıldığı belirtilmektedir. Radyal doğrultudaki gerilmeler dikkate alınarak denklem 3.21'deki eşitlik yazılabilmektedir. Şekil 3.3b'deki donmuş zemindeki plastik eşitlik durumunda Mohr-Coulomb diyagramı temel alınarak denklem 3.22 elde edilmektedir (Andersland ve Ladanyi, 2004, s. 148).



a. b.

Şekil 3.3. *a. Kalın Silindir Duvar Kesiti (p = dış basınç) ve b. Gerilme İlişkilerini Gösteren Mohr-Coulomb Diyagramı*
Kaynak. *Andersland ve Ladanyi, 2004, s. 148*

$$r\frac{d\sigma_r}{dr} = \sigma_\theta = \sigma_r \tag{3.21}$$

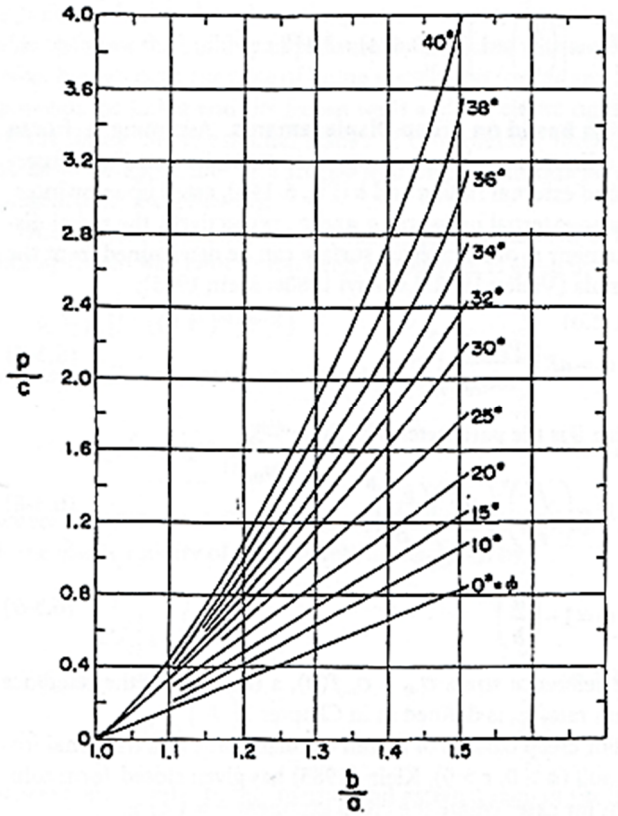
$$\sigma_\theta = 2c\sqrt{N_\emptyset} + \sigma_r N_\emptyset \tag{3.22}$$

Burada; c kohezyon ve N_Φ ise akış değeridir. Sınır koşulları $r = a$; $\sigma_r = 0$ ve $r = b$ olması durumunda $\sigma_r = p$ olarak tanımlanırsa;

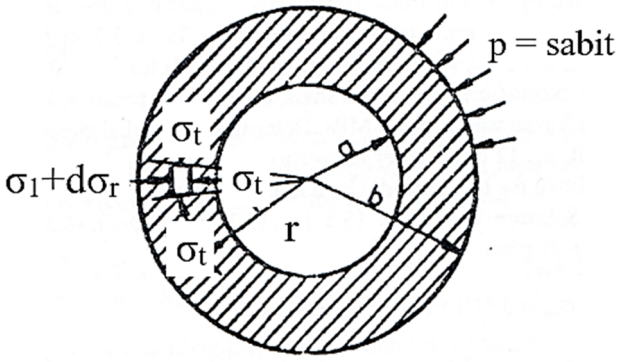
$$\frac{b}{a} = \left(\frac{p+H}{H}\right)^{1/(N_\emptyset - 1)} (\emptyset > 0 \; ve \; H = c(t,\theta)cot\emptyset \; durumunda) \tag{3.23}$$

$$\frac{b}{a} = exp\left[\frac{p}{2c(t,\theta)}\right] (\emptyset = 0) \tag{3.24}$$

Sanger (1968'den aktaran, Anderland ve Ladanyi, 2004, s.149) iksa olmaması durumunda dairesel donmuş duvar için tasarım grafiği önermiştir (Şekil 3.4).



a.



b.

Şekil 3.4. *a. Dairesel Donmuş Duvarlar için Tasarım Eğrileri ve b. İlgili Tanımlar*
Kaynak. *Sanger ve Sayles 1979'dan Aktaran Andersland ve Ladanyi, 2004, s. 149*

Klein ve Gerthold (1979'ten aktaran Anderland ve Ladanyi, 2004, s. 149) bu çözümü genişleterek duvara etkiyen iç basıncın sıfırdan büyük olması durumunda Mohr-Coulomb göçme kriterine göre Denklem 3.25 ve 3.26'yı önermişlerdir.

$$\frac{b}{a} = \left(\frac{p_e+H}{p_i+H}\right)^{1/(N_\emptyset-1)} (\emptyset > 0) \quad (3.25)$$

$$\frac{b}{a} = exp\left[\frac{p}{2c(t,\theta)}\right] (\emptyset = 0) \quad (3.26)$$

Burada; p_e donmuş silindire etkiyen dış basınç ve p_i ise donmuş silindire etkiyen iç basınç değeridir. İç basınç, zemindeki göçmeye karşı yeterli destek sağlayan iksa oluşturmaktadır.

3.2.2. Sünme esaslı tasarım

Donmuş zemin silindiri, çapına oranla çok uzun kabul edilmiş olup iç ve dış yarıçapları a ve b ile ifade edilmiştir. Silindire etkiyen iç ve dış basınçlar sırasıyla p_i ve p_e ile gösterilmiştir. Söz konusu tasarımda radyal yer değiştirme (u_i) ve eşitlikte geçen diğer parametreler aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır (Andersland ve Ladanyi, 2004, s. 150).

$$u_i = aK\left(\frac{p_e-p_i}{\omega\sigma_{c\theta}}\right)^n t^B \quad (3.27)$$

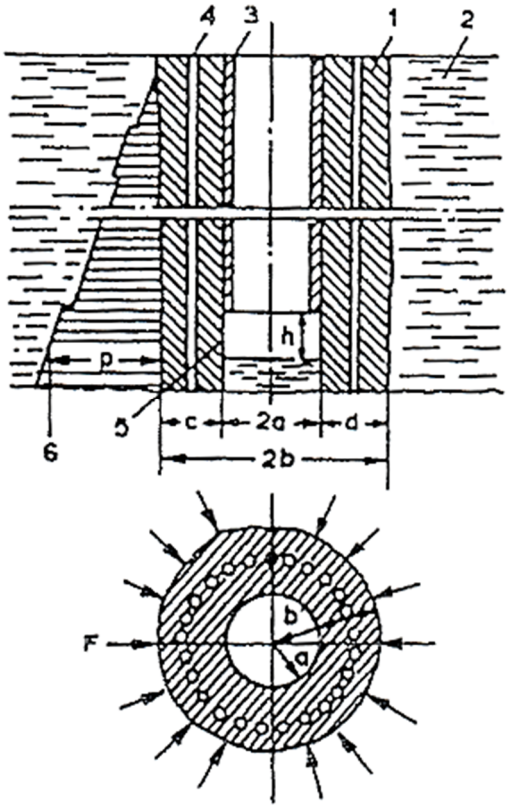
$$K = \left(\frac{\sqrt{3}}{n}\right)^n \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\left(\frac{\dot{\varepsilon}_c}{B}\right)^B \quad (3.28)$$

$$\omega = 1 - \left(\frac{a}{b}\right)^{2/n} \quad (3.29)$$

Burada; B deneysel zemin parametresi, $\sigma_{c\theta}$ referans gerilmesi, $\dot{\varepsilon}_c$ referans birim şekil değiştirme oranı, sünme sembolünün kapalı formda $n = 1$ veya 2 ile belirtildiği durumlarda içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri sıfırdan büyüktür.

3.2.3. Donmuş duvar kalınlığı

Vialov (1962'den aktaran Anderland ve Ladanyi, 2004, s. 150) tarafından sırasıyla her iki uçta tam ve eşit ankastre olma durumu, tek uçtan sabit olma durumu ile orta seviyede sabit olma durumları için önerilen ve Şekil 3.5'te açıklanan donmuş duvar kalınlığı eşitlikleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.5. *Buz-Zemin İstinat Yapısının Şeması; 1. Donmuş Zemin, 2. Çevre Zemini, 3. Kaplama, 4. Soğutucu Borular, 5. Şaftın Desteklenmemiş İşlevsel Kısmı, 6. Yanal Zemin Basınç Diyagramı*
Kaynak. *Vialov 1962'den aktaran Andersland ve Ladanyi, 2004, s. 150*

$$\delta_1 = b - a = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\frac{ph}{\sigma_{fu}} \tag{3.30}$$

$$\delta_2 = b - a = \sqrt{3}\left(\frac{ph}{\sigma_{fu}}\right) \tag{3.31}$$

$$\delta_3 = b - a = \frac{1.3ph}{\sigma_{fu}} \tag{3.32}$$

Burada; δ değerleri söz konusu sabitlenme koşulları altındaki donmuş duvar kalınlığıdır, b donmuş dairesel bölgenin dış yarıçapı, a donmuş dairesel bölgenin iç yarıçapı, h donmuş duvarın desteklenmemiş kısmının yüksekliği, p yanal zemin basıncı, σ_{fu} serbest basınçtaki sünme dayanımıdır.

Donmuş iç duvar yüzeyinin yer değiştirmesi dikkate alınarak Vialov (1962'den aktaran Anderland ve Ladanyi, 2004, s. 150) tarafından önerilen güvenli duvar kalınlığının genel ifadesi ise Denklem 3.33'te verilmiştir.

$$\frac{b}{a} = \left\{ 1 + \bar{K}\left(\frac{n-1}{n}\right)\left(\frac{p}{\sigma_{c\theta}}\right)\left[\frac{\left(\frac{h\sqrt{3}}{a}\right)^{n+1}}{\left(\frac{\Delta}{a}\right)\left(\frac{B}{\dot{\varepsilon_c} t}\right)^{B}}\right]^{1/n} \right\}^{n/n-1} \tag{3.33}$$

Burada; Δ desteksiz duvar kesit yüksekliğin ortasındaki izin verilebilir sehim miktarıdır. $\bar{K}$ desteksiz duvar kesitinin son kısmındaki mesnetlenme derecesini tanımlayan katsayıdır. n basit deneylerden elde edilen sünme parametresidir. Donmuş zemin yarıçapı (r) içinde kalan zemin halen tamamen donmamış ve basınç donmuş duvar çevresindeki donmamış zemin elastoplastik eşitlik durumuna uygunsa $\bar{K}$ değerinin "1" alınması önerilmektedir. $\bar{K}$ değerinin alt ve üst sınırı Denklem 3.34'te verilmiştir. Alt limit donmuş duvar yarıçapının içinde kalan kısmının da donmuş olduğunu ve basıncın da donmamış zeminin hidrostatik basıncından kaynaklandığını belirtmektedir (Vialov, 1962'den aktaran Anderland ve Ladanyi, 2004, s. 151).

$$2^{-(1+1/n)} < \bar{K} < 1 \tag{3.34}$$

3.2.4. Donma Kabarması

Donma işlemi sırasında, donma kabarması arazideki suyun ve göç eden suyun buza dönüşmesi ile tetiklenmektedir. Wu vd. (2015, s. 705) tarafından toplam donma kabarması hesabında denklem 3.35'in kullanılabileceği belirtilmiştir.

$$H = \frac{\int_{\Theta} \varepsilon_v d\Theta}{\int_{\psi} d\psi} \tag{3.35}$$

Burada; H donma kabarması miktarı, Θ zemin numunesinin hacmi ve ψ ise zemin numunesinin kesit alanını ifade etmektedir.

3.3. Tez Kapsamındaki Yöntem

Tezin ilk bölümü 3 temel aşamadan oluşmaktadır. Her bir aşamada kullanılacak yöntemler aşağıda verilmiştir.

AŞAMA 1: Kum, silt ve kil ağırlıklı üç farklı zeminde donma öncesi ve sonrası taşıma kapasitesi ile şekil birim değiştirme parametrelerinin değişiminin incelenmesini içermektedir. Bu aşamada ilk olarak geoteknik deneyleri ile zeminlerin tipi, dane boyut dağılımı, özgül ağırlığı, optimum su muhtevası, maksimum kuru birim hacim ağırlığı gibi indeks özellikleri hesaplanmıştır. Sonraki adımda su muhtevası, donma süresi ve donma sıcaklığının mekanik parametrelere etkisini değerlendirmek amacı ile 3 farklı deney prosedürü gerçekleştirilmiştir.

Aşama 1.1: Yapay zemin dondurma sürecinde su muhtevası değişiminin; serbest basınç direnci (q_u) ve birim şekil değiştirme (ε) değerlerine etkileri değerlendirilmiştir. Bu amaçla; optimum su muhtevası ile optimum su muhtevasından %10 düşük ve %10 yüksek olmak üzere 3 farklı su muhtevası değerinde 3 farklı zemin tipinde, her durum için 3 numune üretilmiştir. CDF / CIF cihazında 24 saat -20 ºC sıcaklıkta ve sızı azot tankında 24 saat -200 ºC'de muhafaza edilen numuneler, süre sonunda serbest basınç cihazında kırılmıştır.

Aşama 1.2: Yapay zemin dondurma sürecinde sıcaklık değişiminin; serbest basınç direnci (q_u) ve birim şekil değiştirme (ε) değerlerine etkileri değerlendirilmiştir. Bu amaçla; optimum su muhtevasında yine 3 farklı zemin tipinde, 0, -5, -10, -15, -20 ve -200 ºC sıcaklık değerlerinde, her durum için 3 numune üretilmiştir. Söz konusu sıcaklıklarda 24 saat muhafaza edilen numuneler süre sonunda serbest basınç cihazında eksenel basınca tabii tutulmuştur.

Aşama 1.3: Yapay zemin dondurma sürecinde donma süresi değişiminin; serbest basınç direnci (q_u) ve birim şekil değiştirme (ε) değerlerine etkileri değerlendirilmiştir. Bu amaçla; optimum su muhtevasında yine 3 farklı zemin tipinde, -20 ve -200 ºC sıcaklık değerlerinde; 7, 14 ve 28 günlük donma süreleri göz önünde bulundurularak, her durum için 3 numune üretilmiştir. 7, 14 ve 28 günlük donma süreleri sonunda numunelere eksenel basınç kuvveti uygulanmıştır.

Ayrıca bu çalışmada, boşluk oranı değişiminin, yapay zemin dondurma sonrasındaki zemin parametrelerine etkisinin değerlendirilmesi amacı ile 5, 10, 15 ve 25 vuruşluk kompaksiyon sıkıştırma enerjisinde numuneler üretilmiştir. Fakat deneylerde

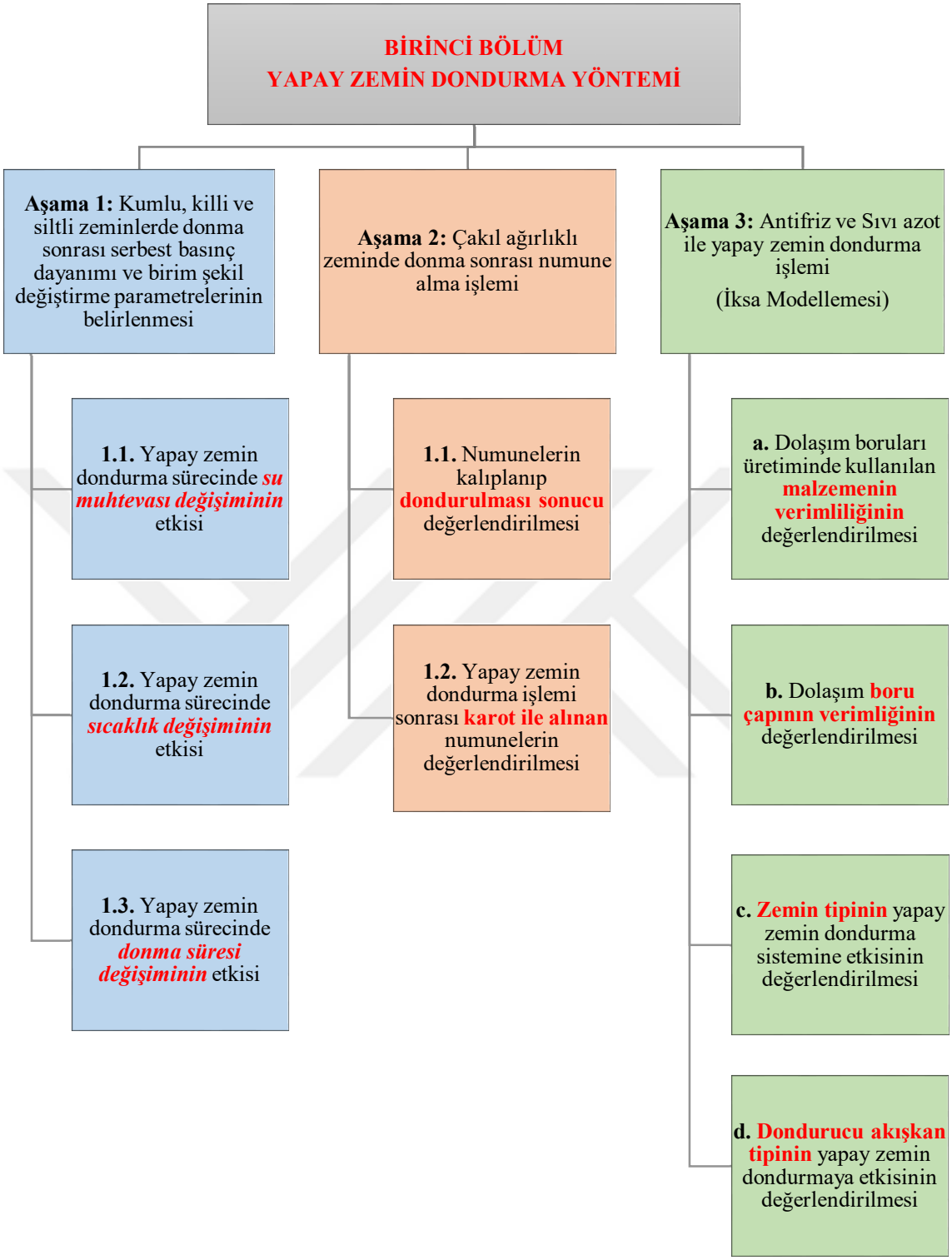
kullanılan donmamış kaolin ve zeolit tipi zeminlerin çok düşük taşıma kapasitesinden dolayı, elde edilen numunelerin ağırlıkları arasında bir fark görülmemiştir. Yani 5 ve 25 vuruşluk sıkıştırma enerjisinde aynı yoğunlukta numuneler elde edilmiştir. Dolayısıyla boşluk oranı değişimini değerlendirmenin kullanılan zemin tipleri ile gerçekleştirilme olasılığı bulunmadığından bu aşamaya gerek olmadığına karar verilmiştir. Su muhtevası değişiminin boşluk oranında farklılıklar oluşturduğu da göz önünde bulundurularak Aşama 1.1.'deki değerlerin farklı boşluk oranlarını temsil ettiği düşünülebilir.

Tüm aşamalarda; lam ve lameller arasına yerleştirilen numuneler mevcut deneydeki şartlar altında mikroskopta buz lensi ve buz modeli oluşumları incelenmiştir.

AŞAMA 2: Tamamen suya doygun çakıl ağırlıklı numune, kalıplanarak dondurulmuş ve 3 adet donmuş numune elde edilmiştir. Doğal halde araziden granüler zeminlerde örselenmemiş numune alabilmek amacı ile yapay zemin dondurma metodu uygulanarak donma işlemi sonunda karot alınmıştır. Bu sayede donmuş zeminden, arazide karot alınması durumunda karşılaşılabilecek sıkıntılar gözlemlenmiştir.

AŞAMA 3: Arazideki yapay zemin dondurma metodu uygulamasının laboratuvarda derin kazı yüzeyi destekleme (iksa) modellemesi için yapay zemin dondurma cihazı tasarlanarak üretilmiştir. Haznede -20 ºC'ye kadar soğutulan mono etilen glikol su karışımı pompa vasıtası ile borulama sistemine basılmıştır. Çözelti, zemini soğuttuktan sonra tekrar soğutma haznesini beslemektedir. Isıl ölçüm cihazları ile paslanmaz çelik, alüminyum ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) malzemeden üretilmiş 3 farklı çapta dolaşım boruları kullanılarak ince daneli iki farklı zeminde; donma ve çözülme davranışları, sıcaklık değişimleri ve donmuş duvar kalınlıkları incelenmiştir. Bir diğer yöntem olarak ise yine aynı tip boru ve zeminler kullanılarak sıvı nitrojen dolaşımının yapay zemin dondurma yönteminde kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Birinci bölümde izlenen yöntem Görsel 3.1'deki şemada özetlenerek belirtilmiştir.



Görsel 3.1. *Birinci Bölüm: Yapay Zemin Dondurma Aşamaları*

4. KULLANILAN EKİPMANLAR

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada donma sonrası mekanik parametrelerin değişimi incelenmiştir. Bu amaçla, yeterli sayıda 3,5 cm çap ve 7,0 cm yüksekliğinde kalıplar üretilmiştir. Standartlara uygun olarak temin edilen 20 lt'lik kanisterli sıvı azot tankı ve Schleibinger CDF/CIF donma - çözülme cihazı kullanılarak numuneler istenilen sıcaklığa düşürülmüştür. Dondurma sürecinde zemin boşluklarındaki su, buz lensi ve buz oluşumlarını incelemeye olanak sağlayacak dijital mikroskop temin edilmiştir. İkinci aşamada granüler zeminden örselenmemiş numune alımına olanak sağlamak için 50 cm boyutlarında küp pvc hücre yaptırılmış olup zemin hücresi olarak kullanılmıştır. 3. Aşamada ise antifriz ve sıvı azot ile derin kazı modellemesi gerçekleştirilmiştir. Antifriz dolaşımını sağlayan tamamen özgün yapay zemin dondurma cihazı üretilmiştir. Nitrojen dolaşımı için gerekli olan 100lt kapasiteli saklama tankları ve aktarım ünitesi temin edilmiştir. Her iki sistemde de kullanılacak dolaşım (sirkülasyon) boruları tasarlanıp üretilmiştir. Zemin hücresi olarak kullanılacak 1 m^3 hacimli pleksiglass çerçeve üretilmiştir. Deneyler boyunca sıcaklık verilerinin alınabilmesini sağlamak amacı ile T tipi ısıölçerler alınmıştır. Tezde laboratuvar ölçeğinde tasarlanan bu iki farklı derin kazı sisteminin sıcaklık değişimine etkileri ve arazide ne derecede uygulanabilirliğinin araştırılmıştır. Yukarıda bahsedilen söz konusu ekipmanlar ayrıntılı biçimde tanımlanmıştır.

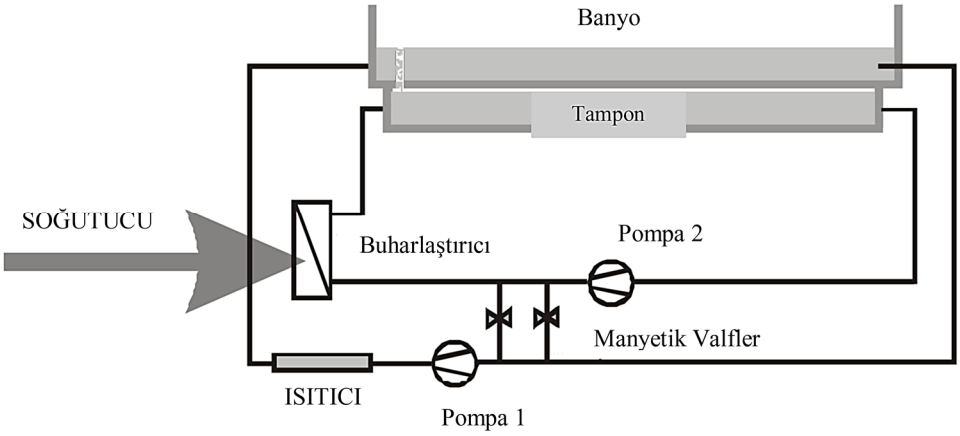
4.1. Scheleibinger CDF/CIF Donma - Çözülme Cihazı

Bölüm yapı laboratuvarında bulunan Avrupa standartlarına uygun CDF / CIF (donma çözülme) cihazı kullanılarak donma çözülme çevrimleri sonrasında kullanılan zeminlerdeki geoteknik parametrelerin değişimleri incelenmiştir (Görsel 4.1). Soğutucu akışkan olarak sabit banyoda %50 çeşme suyu %50 etilen glikol (antifriz) solüsyonunun dolaşımı ile sistem sıcaklığı ayarlanmaktadır. Cihazda bulunan bazı koruma sensörleri ile sistem ve işçi güvenliği sağlanmaktadır. Bunlar; ısıtma ünitesi için yüksek sıcaklık koruması, banyo ve akışkan tamponu için seviye göstergesi, kompresörün yüksek ve alçak basınç sınırları için güvenlik sensörü gibi aygıtlardır. Aşamada 1'de gerekli olan sıcaklık değerlerinin sağlanarak, uygun metal kaplarda muhafaza edilmesine olanak sağlamıştır. Söz konusu cihaz ile yapay zemin dondurma işlemi sonucunda; çevresel

etkiler en aza indirgenmiş olup numunelerde en kısa sürede maksimum donma elde edilerek deney sürelerinden tasarruf sağlanmıştır.

Görsel 4.1. *CDF / CIF (Donma Çözülme Cihazı) ve Soğutma - Isıtma Bölümleri*

Donma çözülme cihazı pompa kısıtlamaları nedeniyle -20 ºC ile +20 ºC arasında CDF/CIF standartlarını sağlamak üzere tasarlanmıştır. Kısa zaman aralıklarında ani ısıtıp soğutma kapasitesine sahiptir. Soğutma bölümündeki buharlaştırıcı (evaporatör) yardımı ile banyo içerisindeki akışkanın sıcaklığı istenilen değere kadar düşürülmektedir. Banyo altında bulunan tampon bölge ısı kayıplarını dengelemek amacı ile kullanılmaktadır. Isı diyagramlarında sıcaklık çıkışı gereken durumlarda ısıtıcı ünite devreye girmektedir. Cihazda ısıtma ve soğutma için çift tesisat bulunduğundan, işlem geçişlerinde manyetik valfler devreye girerek gerekli pompayı çalıştırmaktadır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. *CDF / CIF (Donma Çözülme Cihazı) Çalışma Mekanizması*

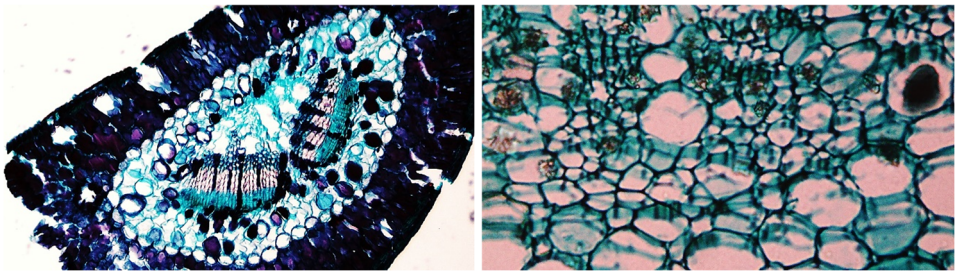
Kaynak: *Schleibinger Geräte CDF-Freeze-Thaw-Testing Machine User Manuel, s. 10*

4.2. Dijital Mikroskop

Aşama 1'deki farklı su muhtevasına sahip numunelerin, ilgili sıcaklıklarda planlanan bekleme süreleri sonunda, boşluklardaki suyun faz değişimleri 2400 kat büyütme kapasitesine sahip dijital mikroskop ile incelenmiştir (Görsel 4.2). Yine aynı şartlarda hazırlanan numunelerin sıvı nitrojen içinde bekletilmesi durumunda da donmuş numunelerdeki değişimler incelenmiştir.

Görsel 4.2. *2400 Kat Büyütme Kapasiteli Dijital Mikroskop*

Mikroskobun malzeme kütüphanesinde gönderilen örnek kök numuneleri üzerinden alınan görüntüler Görsel 4.3'te verilmiştir.



Görsel 4.3. *Mikroskoptan Elde Edilen Örnek Görüntüler*

4.3. Yapay Zemin Dondurma Cihazı

Soğutucu akışkan (tuz çözeltileri, antifriz) dolaşımı ile zemini -40 ºC'ye kadar soğutması amacıyla özgün zemin dondurma cihazı tasarlanmıştır. Ana cihaz 1 Hp gücünde besleme motoru (kompresör), yoğunlaştırıcı, fan, likit tutucu, likit deposu, serpantin, soğutma haznesi, difüzyon pompa, dolaşım boruları ve bağlantı elemanlarından

oluşmaktadır (Görsel 4.4). Ek cihaz ise 2 Hp kompresör, yoğunlaştırıcı ve fan motoru, likit deposu, emiş hattı vanası, basınç hattı vanası, genişleme valfi, kurutucu, serpantin, kumanda panosu ve dijital termostat elemanları ile paket grup olarak temin edilerek ana cihaza montajı gerçekleştirilmiştir. Cihaz tasarımında en fazla sorun akışkan iletimini sağlayacak olan pompada yaşanmıştır. Piyasada genellikle su iletimi için kullanılan pompalar metal aksam ile üretildiğinden ne düşük sıcaklıklara ne de korozyona neden olan akışkanlara karşı dirence sahiptir. Bu yüzden cihaz kapsamında, düşük sıcaklığa ve korozyona dirençli termoplastik esaslı elastomer maddeden üretilen difüzyon pompa kullanılmıştır. Pompa basınçlı hava ile çalışmakta olup sabit debide akış sağlamaktadır.

Haznede istenilen sıcaklığa kadar soğutulan antifriz çözeltisi difüzyon pompa yardımı ile dolaşım borularına iletilmektedir. Çözelti; gerekli sayı, çap, boy ve aralıklarla yerleştirilen boruları dolaşarak tekrar hazneye dönmektedir. Sistem antifriz ile yapay zemin dondurma aşamasında ve granüler malzemeden donma sonrası karot alınması aşamasında kullanılmıştır. Deneyler sırasında pompa hızı 2,5 kg/cm^2 basınç değerinde yaklaşık 0,025 lt/sn debide akışkan iletecek şekilde ayarlanmıştır.

Görsel 4.4. *Tez Kapsamında Üretilen Yapay Zemin Dondurma Cihazı*

4.4. Sıvı Azot Tankları

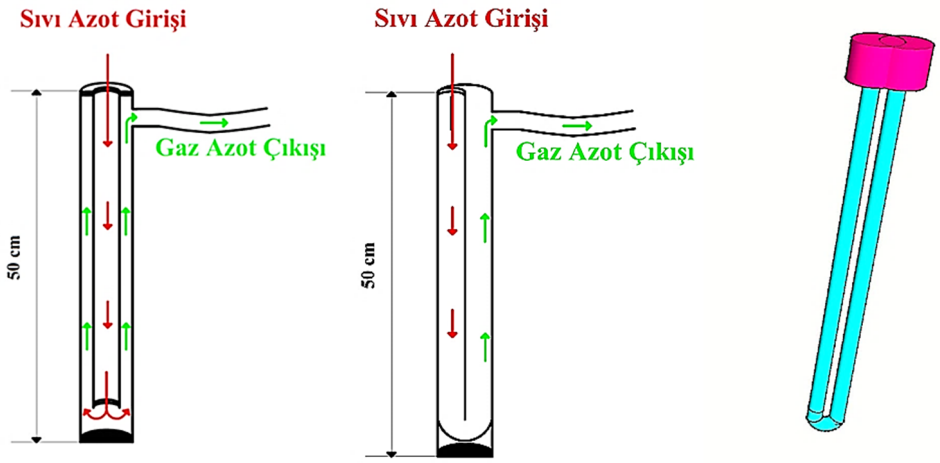
Tez sürecinde sıvı azot ile dondurma işlemini gerçekleştirebilmek için, Anadolu Üniversitesi Bitki Bilimleri ve Araştırma Merkezinden (BİBAM) yaklaşık 1000 lt sıvı azot temin edilmiştir. Tez başlangıcında nitrojen depolaması için 2 adet 100 lt kapasiteli nitrojen saklama tankı ve 1 adet de 20 lt kanister sistemli tank ile bunlara ait ekipmanlar temin edilmiştir (Görsel 4.5). 100 lt'lik tanklar sıvı azotun taşınıp depolanması ve sisteme iletilmesi sürecinde (Aşama 3) kullanılmıştır. Kanisterli tank ise Aşama 1'de üretilen numunelerin azot içerisinde bekletilmesi sürecinde kullanılmıştır.

Sıvı azot (sıvı nitrojen); donma noktası -196 ºC ile -320 ºC arasında değişen bir akışkandır. Atomlardaki elektron hareketini yavaşlatarak ve kimi zaman durdurarak donma işlemini gerçekleştirmektedir. Faz geçişi sırasında basınç oluşturduğundan patlama olasılığı bulunmaktadır. Bu yüzden düşük basınçlarda çalışmak daha güvenli ortamın oluşturulmasını sağlayacaktır. Yapay zemin dondurma yöntemi için en uygun akışkandır. Harici bir soğutma işlemine gerek duyulmayacağından soğutucu bir ünite gerektirmemektedir (Evirgen, 2009, s. 114).

Görsel 4.5. *Sıvı Azot İçin Alınan Saklama, Taşıma ve Kanister Sistemli Tanklar*

4.5. Borulama Sistemi (Dolaşım Boruları - Sirkülasyon Boruları)

Sıvı azot ve antifriz ile yapay zemin dondurma işlemlerinin gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan borulama sistemi çalışma başlangıcından itibaren farklı tiplerde tasarlanarak geliştirilmiştir. Boru detayı için üç farklı alternatif üzerinde çalışılmıştır. Birinci durumda dolaşım boruları içerisinde akışkan giriş çıkışını sağlayacak çift cidar bulunmaktadır (Şekil 4.2a). İkinci durumda ise akışkan tek doğrultuda "U" biçimli dış dolaşım boruları ile iletilmektedir (Şekil 4.2b-c). "U" tipi borunun üretimi sırasında karşılaşılabilecek sorunlar da düşünülerek, arazi uygulamalarında zemine yerleştirilmesinin zor olacağına karar verilmiş ve son tasarımda çift cidarlı boru tipi seçilmiştir.



a. b. c.

Şekil 4.2. *Dolaşım Borusu Kesitleri; a. İç İçe Geçmiş İki Boru, b. Tek Boru İçerisine Yerleştirilmiş "U" Boru ve* ***c.*** *"U" Boru Detayı*

Tasarım aşamasında borulama sistemi detayları (Şekil 4.3) aşağıda belirtildiği gibi kararlaştırılmıştır:

- Borulama sistemi ile yapay zemin dondurma işlemi sırasında akışkanların dolaşımı için kullanılmıştır.
- 1 m^3'lük zemin hacmi için kullanılmıştır.
- Şekil 4.3'te belirtilen kısımlar aşağıdaki gibidir;

  - Yeşil kısımlar **(1)**; sirkülasyon borularıdır. Soğutma işlemi sırasında antifriz ve sıvı azot akışkanlarının dolaşımı ile zemin dondurulur. Borular 10, 20 ve 30 mm çapında her birinden 20 adet olarak üretilmiştir. Borular 500 mm boyundadır ve üst kısımlarına ayrıca diş açılmıştır. Çelik, alüminyum ve HDPE (yüksek yoğunluklu polietilen) malzemelerden 3 farklı set halinde üretilmiştir. Tüm borular azota karşı yeterli dayanıma sahiptir.

  - Sarı kısımlar **(2)**; ana dağıtıcı boruya giriş ve çıkış bölümleridir. Yeşil borular ile birleşim bölgelerine 30 mm çapa uygun diş açılmıştır. İki boru arasında çift taraflı erkek rakor kullanılarak uygun geçiş sağlanmıştır. Rakorlar 30 mm - 30 mm, 30 mm - 20 mm ve 30 mm - 10 mm boyutlarında olmak şartıyla temin edilmiş ve her bir setten 20 adettir.

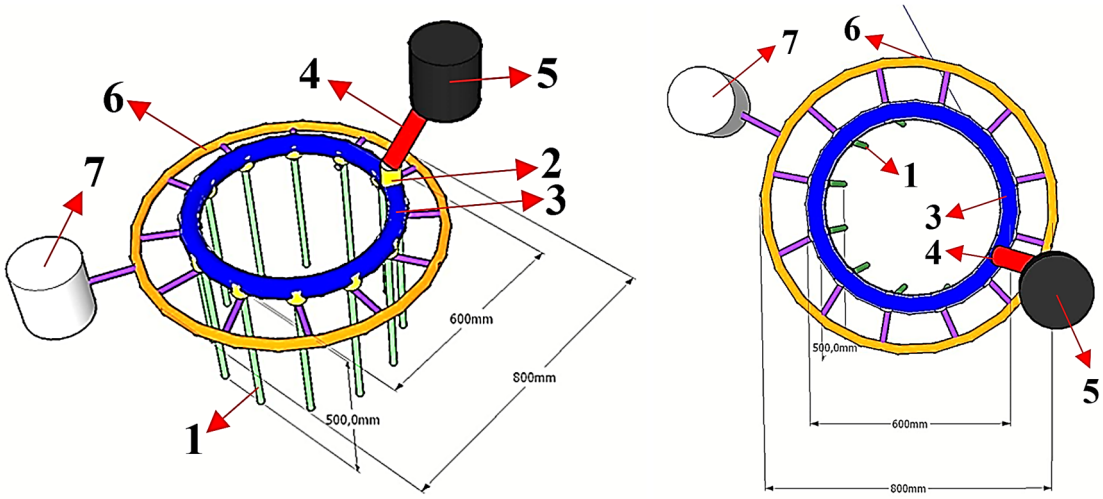
- Mavi kısım **(3)**; ana dağıtıcı borudur. Depodan gelen azot sirkülasyon borularına buradan dağıtılacaktır. 50 mm çapında azota dayanıklı ve ısı yalıtımlı borudan 600 mm çapında simit olarak teşkil edilmiştir.

- Kırmızı kısım **(4)**; azot deposu ile ana dağıtıcı boru arasındaki bağlantıyı sağlayan çift tarafı rakorlu elastik borudur (HDPE olabilir). 1,0, 1,5 ve 2,0 m boyunda 3 adet temin edilmiştir.

- Siyah kısım **(5)**; azot deposudur. Sıvı azot tanklarından besleme sağlanarak depoda sabit seviyede azot bulundurulacaktır. Alt kısmındaki elastik boruya uygun çıkış bulunmalıdır. Üst kısımda ise azot tankından gelen aktarım ünitesine uygun giriş bulunmalıdır. Buharlaşan azota bağlı olarak depo içerisindeki basınç artışını buhar düzenleyecek tahliye sensörü bulunmaktadır.

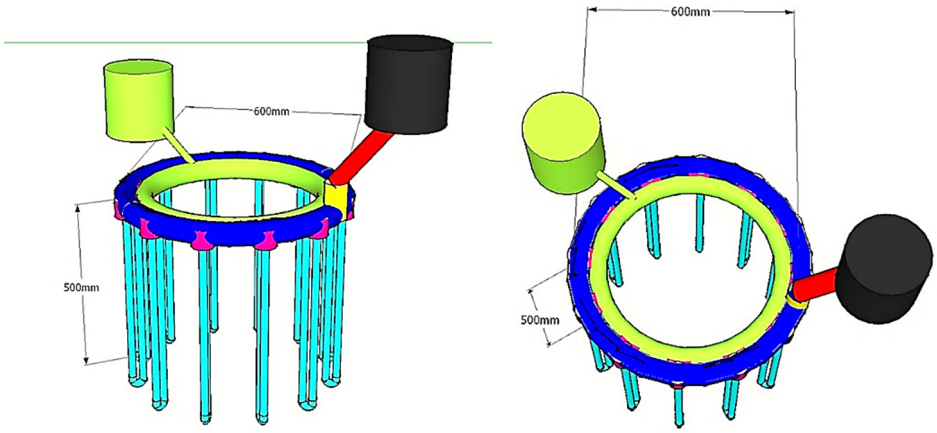
- Turuncu kısım **(6)**; ana toplayıcı borudur. Sirkülasyon borularından dönen gaz fazdaki azot bu boruda toplanıp, gaz deposuna iletilmelidir. Mor renkli ara bağlantı elemanları ile geçiş sağlanmaktadır.

- Beyaz kısım **(7)**; sistemden dönen gaz fazdaki azot bu depoda toplanacaktır. Sistem güvenliğini sağlamak adına gaz basıncını belirleyen manometre olmalıdır. Basınç 1,5 bar üstüne çıktığında gaz çıkışına izin verilip, yerine sıvı azot alınması sağlanmaktadır. Bu sayede sistem içerisinde sabit hacimde sıvı-gaz azot karışımı bulunacaktır. Sistemde, gerekli bölgelerde emniyet valfleri bulunmaktadır.



Şekil 4.3. *Borulama Sistemi Detayları "Alternatif 1"*

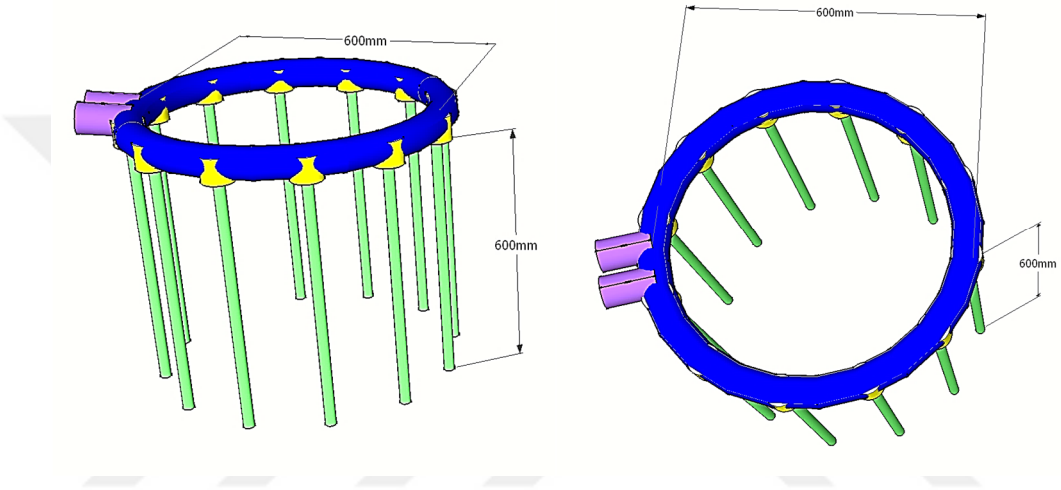
Şekil 4.4'teki ikinci borulama sistemi tasarımında ise; ana dağıtıcı boru, ana toplayıcı boru, U tipi sirkülasyon boruları ve sıvı - gaz azot toplama depolarından oluşmaktadır. Borulardaki farklı çap geçişleri uygun redüksiyonlar ile sağlanmaktadır. Daha az sayıda bağlantı içermesi ve akışkanın daha az ısı kaybı ile iletileceği düşünülen ikinci borulama sisteminin, aynı zamanda diğer sistemden daha ekonomik olacağı düşünülmüştür.



Şekil 4.4. *Borulama Sistemi Detayları "Alternatif 2"*

İlk iki alternatif tasarımda likit ve gaz nitrojen depoları ile valfler ve basınç alıcılarının bulunması, laboratuvar ölçeğindeki bu çalışma için maliyetleri oldukça yükseltmiştir. Bu yüzden Şekil 4.5'te verilen ve sadece borulardan oluşan borulama

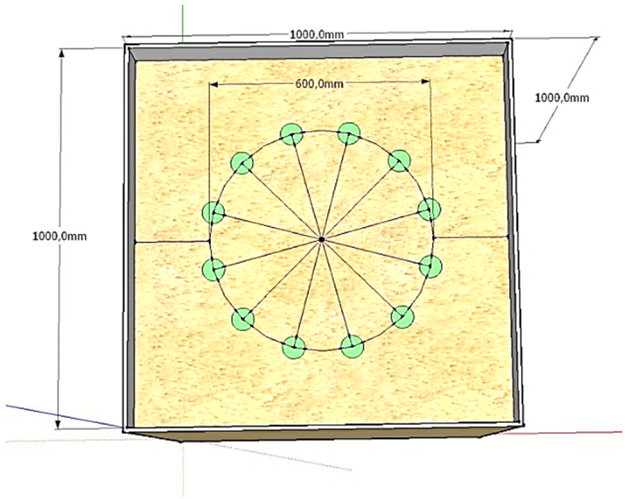
sistemi detayı (Alternatif 3) tasarlanmıştır. Söz konusu sistemde, dondurucu akışkan boru girişine bağlanarak çift cidarlı borulardan dolaşımı sağlanmıştır. Antifriz dolaşımı için zemin dondurma cihazı kullanılmış olup soğutucu hazneden çıkan akışkanın sistemi dolaştıktan sonra tekrar hazneye dönmesi sağlanmıştır. Sıvı azot dolaşımında ise, azot tanklarında gaz faza dönüşen azotun oluşturduğu tank içi basınçtan faydalanılarak, iletim borusu ile akışkan sisteme basılmış ve dolaşım sonunda gaz faza geçen azot açık havaya iletilmiştir.



Şekil 4.5. *Borulama Sistemi Detayları "Alternatif 3"*

Sistemde kullanılan tüm parçalar sıvı azot, donma - çözülme çevrimleri ve basınca dayanıklıdır. Kaynak ve diş gibi bağlantı detayları ile rakor ve bağlantı hortumları gibi elemanlarda sıvı-gaz sızdırmazlığı sağlanmıştır. Üretici firmalar tarafından helyum testleri yapılarak kaçak olmadığı onaylanmıştır. Yine kullanılan tüm malzemelerin iş ve işçi güvenliğine uygun olduğu belirtilmiştir.

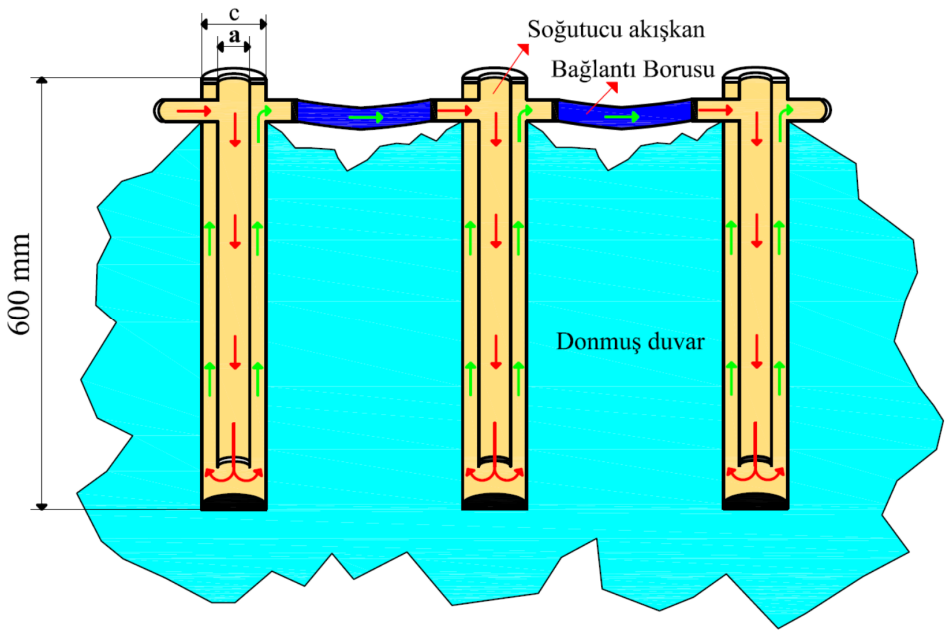
Zemin hücresine yerleştirilen dolaşım borularının konumları Şekil 4.6'da verilmiştir. Burada 600 mm çapındaki çember üzerine 30º açısal aralıklarla toplam 12 adet boru tanımlanmıştır.



Şekil 4.6. *Dolaşım Borularının Konumları*

Borulama sistemi her birinde 12 adet 600 mm boyunda iç-içe geçmiş boru entegre edilen, ana dağıtıcı borular ve giriş - çıkış borularını içeren tamamen paslanmaz çelikten 3 seri halinde üretilmiştir. Sabit paslanmaz çelik dolaşım borularının detayları Tablo 4.1'de verilmiştir.

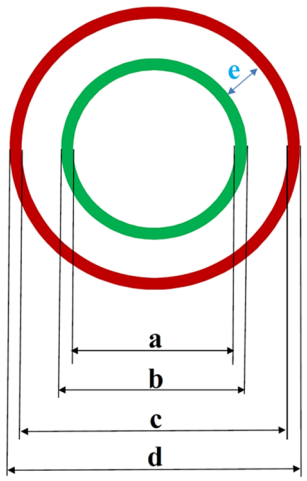
Sistemin efektif çalışması durumunda Şekil 4.7'de verilen buzdan duvarın elde edilmesi amaçlanmıştır. Şekildeki "a" ve "c" uzunlukları içteki ve dıştaki boruların iç çaplarını belirtmektedir.



Şekil 4.7. *Donmuş Duvarın Şematik Gösterimi*
Kaynak: *Evirgen, 2009, s. 118*

Tablo 4.1. *Sabit Paslanmaz Çelik Dolaşım Borularının Çapları*

(mm)	İç Boru		Dış Boru		e. İki Boru arası mesafe
	a. İç Çap	b. Dış Çap	c. İç Çap	d. Dış Çap	
Seri 1 (Büyük)	27,0	30,0	40,0	42,0	**7,0**
Seri 2 (Orta)	18,0	21,0	25,0	28,0	**4,0**
Seri 3 (Küçük)	8,0	10,0	14,0	16,0	**4,0**



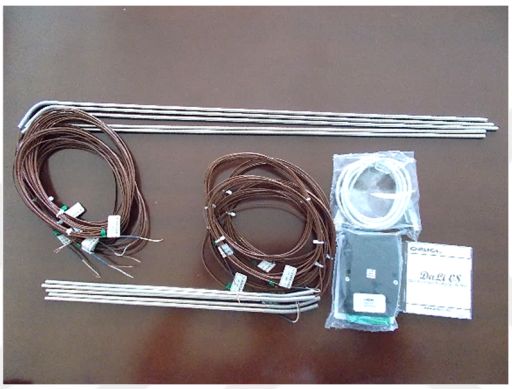
Sabit teşkil edilen paslanmaz çelik sirkülasyon borularına, dıştan harici olarak alüminyum ve yüksek yoğunluklu polietilen (hdpe) borular geçirilmiştir. 540 mm boyunda üretilen harici boru detayları ise Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. *Alüminyum ve HDPE Boru Detayları*

(mm)	Malzeme	İç Çap	Dış Çap	Cidar Kalınlığı
Seri 1 (Büyük)	Alüminyum	47,00	50,00	1,50
Seri 2 (Orta)	Alüminyum	32,00	35,00	1,50
Seri 3 (Küçük)	Alüminyum	15,75	18,75	1,50
Seri 1 (Büyük)	HDPE	47,00	50,00	1,50
Seri 2 (Orta)	HDPE	29,00	32,00	1,50
Seri 3 (Küçük)	HDPE	17,00	20,00	1,50

4.6. Isıölçerler

Yapay zemin dondurma sürecinde zemin içerisinde meydana sıcaklık değişimleri ölçmek üzere -200 °C'den 2320 °C'ye kadar değişen ısıl işlemlerde kullanılabilen 5 mm çapında 300 mm ve 600 mm boylarında iki tip toplam 30 adet T tipi ısıölçer temin edilmiştir (Görsel 4.6). Eş zamanlı sıcaklık ölçümü almak kamacıyla 6 adet 5 girişli portatif veri toplama cihazı alınmıştır. 1.4301 DIN standardına uygun ve paslanmaz koruyucu içeren OB02 süngü (bayonet) tipi, boru ısıölçerler kullanılmıştır. Cihazın sulu ortamda okuma almasına olanak sağlayacak şekilde sızdırmazlık sağlanmıştır.

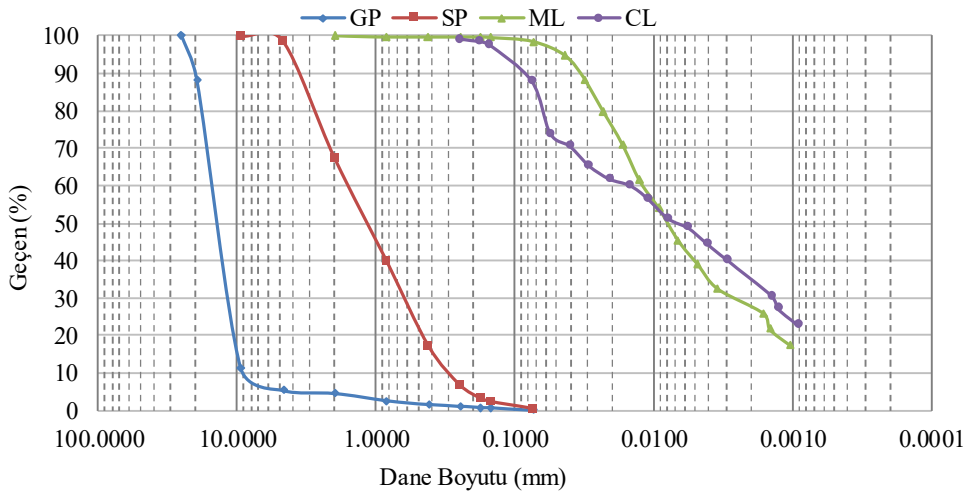


Görsel 4.6. *T Tipi Isıölçerler ve Veri Toplama Cihazı*

5. DENEYLER

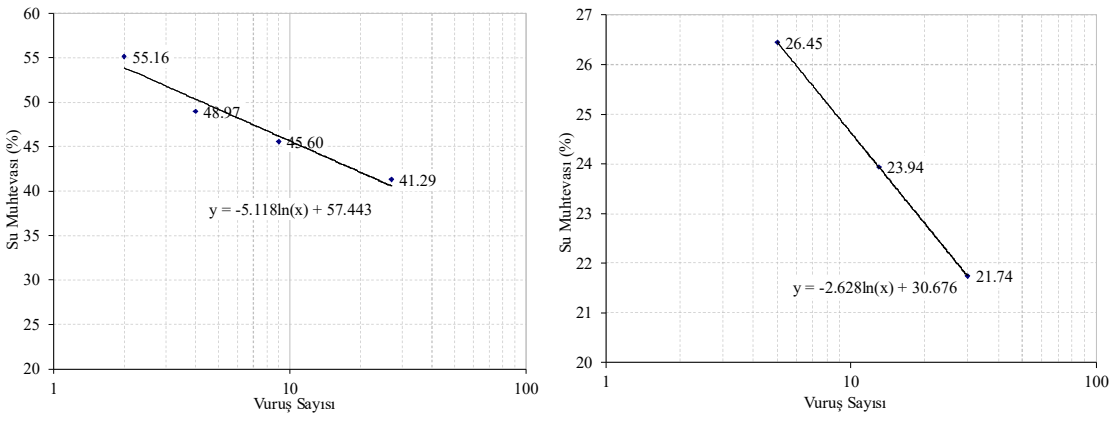
5.1. Geoteknik Deneyler

Tez süresince; farklı amaçlarla ağırlıklı olarak kil, silt, kum ve çakıl özelliği gösteren 4 temel zemin tipi kullanılmıştır. Zemin numuneleri üzerinde ilk olarak dane-boyut dağılımının belirlenebilmesi amacıyla elek analizi ve hidrometre deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen dane boyut dağılımı eğrileri Şekil 5.1'de sunulmuştur.



Şekil 5.1. *Kullanılan Zeminlerin Dane - Boyut Dağılımı*

İnce daneli siltli ve killi zeminlerde Atterberg limit deneyleri gerçekleştirilmiştir. Likit limit grafikleri Şekil 5.2'te verilmiştir.



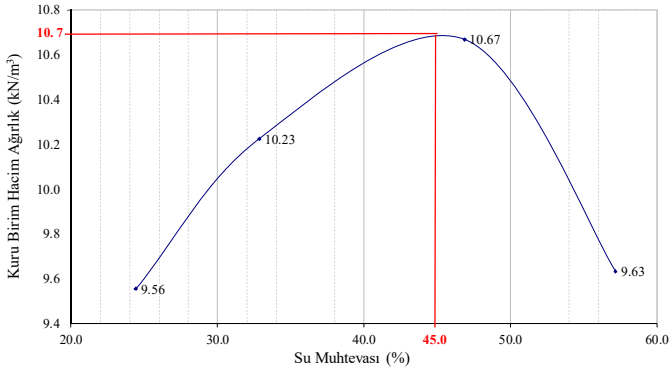
Şekil 5.2. *a. Beyaz Zeolit ve b. Sarı Kaolin Numunelerinin Likit Limit Grafikleri*

Zeminlerin özgül ağırlık değerleri, zemin sınıfları ve ilgili diğer parametreler Tablo 5.1'de verilmiştir.

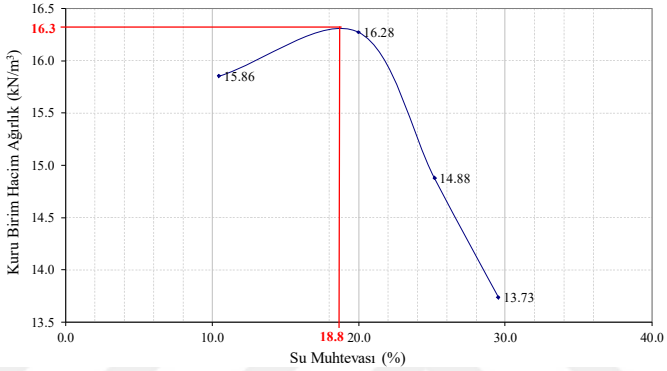
Tablo 5.1. *Kullanılan Zeminlerin Özellikleri*

	Çakıl	**Kum**	**Silt**	**Kil**
			Beyaz Zeolit	**Sarı Kaolin**
Özgül Ağırlık	2,54	2,58	2,37	2,71
Çakıl (%)	94,60	1,30	0,00	0,00
Kum (%)	5,20	98,30	1,50	12,20
Silt (%)	0,80	0,40	70,50	52,80
Kil (%)			28,00	35,00
D_{10}	9,10	0,30		
D_{30}	11,00	0,62		
D_{60}	15,00	1,60	-	-
C_u	1,65	5,33		
C_c	0,89	0,80		
Rötre Limiti (%)	-	-	21,10	13,20
Plastik Limit (%)	-	-	40,00	18,30
Likit Limit (%)	-	-	41,00	22,20
Plastisite İndisi (%)	-	-	1,00	3,90
Zemin Sınıfı (USCS)	GP	SP	ML	CL

İnce daneli zeminlerin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının belirlenebilmesi için standart proktor deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.3). Deneyler sonucunda beyaz zeolit ve sarı kaolin numuneleri için sırasıyla % 45,0 ve % 18,8 optimum su muhtevası ile 10,7 kN/m^3 ve 16,3 kN/m^3 maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri elde edilmiştir.



a.



b.

Şekil 5.3. *a. Beyaz Zeolit ve b. Sarı Kaolin Numunelerinin Standart Proktor Deneyi Sonuçları*

5.2. Deneme Numunelerinin Üretimi ve Ön Deneylerin Gerçekleştirilmesi

Tez yönteminin birinci aşamasının ilk adımı olarak tanımlanan; kum, kil ve siltli numunelerde su muhtevasının dayanım ve deformasyon parametrelerine etkisinin değerlendirilmesi kapsamında deneme numuneleri hazırlanmıştır. Kanisterli sıvı azot tankının boyun çapı 57 mm olduğundan, projeye özel 35 mm x 70 mm boyutlarında silindirik kalıplar ve kalıpların iç çapına uygun numune çıkarıcı mil üretilmiştir. Beyaz zeolit ve sarı kaolin tipi zemin malzemelerinden optimum su muhtevası, optimum su muhtevasından %10 daha düşük ve %10 daha yüksek değerlerinde toplam 6 adet deneme numunesi üretilmiştir (Görsel 5.1). Optimum su muhtevasındaki numuneler standart proktor kalıbında standart enerji ile sıkıştırıldıktan sonra silindir kalıp itilerek minimum örselenme ile uygun numuneler alınmıştır. Düşük ve yüksek su muhtevasındaki numuneler ise harici olarak kalıplar içerisine yerleştirilmiştir. Bu numuneler kendini tutamayacağından tümü 24 saat süre ile CDF/CIF cihazında ön dondurma işlemine tabii tutulmuştur (Görsel 5.2). Kalıplardan çıkarma işlemi esnasında optimum ve yüksek su

içerikli numunelerde herhangi bir sorun gözlenmezken; düşük su muhtevalı numunelerde kısmi dağılmalar gözlemlenmiştir. Su içeriğinin artması numune yüzeylerindeki donmaya bağlı kabarma ve çatlama miktarlarını arttırmıştır.

a. b.

Görsel 5.1. *a. Farklı Su İçeriğindeki Deneme Numuneleri ve b. Ön Dondurma İşlemi*

a. b. c. d. e. f.

Görsel 5.2. *Ön Dondurma İşlemi Sonrası Deneme Numuneleri a. %35 Su Muhtevasında ML, b. Optimum Su Muhtevasında ML, c. %55 Su Muhtevasında ML, d. %8,8 Su Muhtevasında CL, e. Optimum Su Muhtevasında CL ve f. %28,8 Su Muhtevasında CL*

Ön dondurma işlemi sonrasında kalıplardan çıkarılan numunelerin 4'ü CDF/CIF cihazında, 2'si ise kanisterli sıvı azot tankı içerisinde bekletilmiştir. Azot ile zemin dondurma süresince gerekli olacak sıvı azot, Üniversitemiz Bitki İlaç ve Bilimsel Araştırma Merkezi'nden yaklaşık 60 lt deneme amaçlı temin edilmiştir. Azot içerisinde bekletilen numunelerden birisi direkt diğeri ise poşete sarılarak tüplere yerleştirilmiştir. Burada numune yüzeyinin azot ile temas etmemesi amaçlanmıştır. Donma işlemi sonucunda çıkarılan numuneden poşetin örselenmeden çıkarılabildiği görülmüştür (Görsel 5.3). Poşete sarılmayan numunelerde ise, azot ile direkt temas sonucunda ani kırılmalar ve çatlamalar oluşmuştur. Sonuç olarak azot tankı içerisinde bekletilecek tüm numuneler poşete sarılarak işlem görmüştür.

a. b.

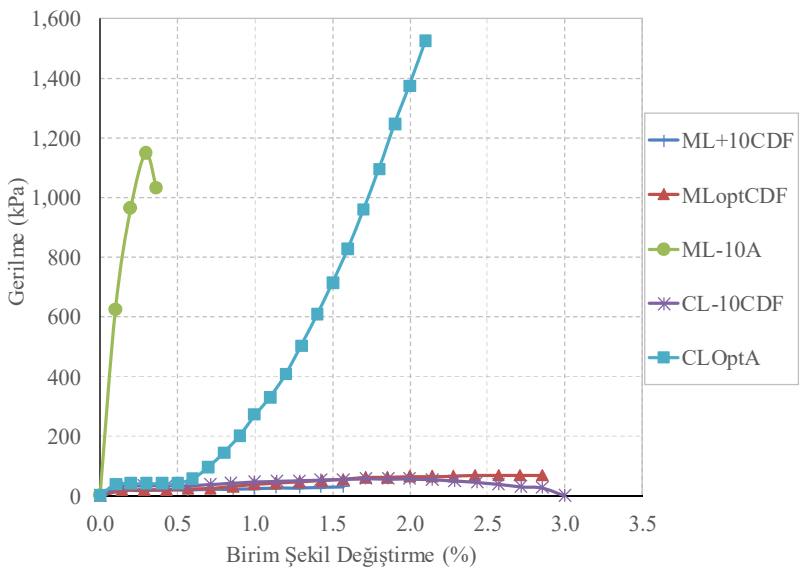
Görsel 5.3. *a. Kanisterli Sıvı Azot Tankında Bekletilmek Üzere Hazırlanan Numuneler ve b. Numunelerin Yerleştirilmesi*

Deneme numunelerinin kırımı sürecinde, tek eksenli basınç deneyi sırasında iki temel sorunla karşılaşılmıştır. Birinci sorun; optimum su muhtevasından %10 daha fazla su içeriğine sahip numuneler, basınç düzeneğine yerleştirilip deneye tabii tutulduğunda, sıcaklık farkına bağlı olarak hızla çözüldükleri gözlenmiştir (Görsel 5.4a). Bu durum numunenin sahip olduğundan daha düşük dayanım göstermesine yol açmıştır. İkinci sorunda ise; azot tankında bekletilen numuneler düzeneğe yerleştirildiğinde ani ısı değişimine bağlı olarak beklenmedik kırılmalar gözlenmiştir (Görsel 5.4b). Ciddi sıcaklık farkından kaynaklanan bu iki sorunun çözülebilmesi için esas deneylerde numuneler düzeneğe yerleştirilmeden önce, serbest basınç deney cihazında eksenel kuvveti sağlayan alt ve üst metal tablalar azot ile soğutulmuştur (Görsel 5.4c). Böylece ani sıcaklık değişimlerinin önüne geçilmesi sağlanmıştır.

a. b. c.

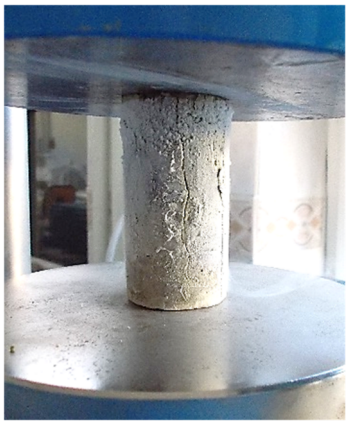
Görsel 5.4. *a. Yüksek Su Muhtevasındaki Numunelerde Gözlenen Erime Sorunu, b. Azot Tankındaki Numunelerde Ani Sıcaklık Değişimine Bağlı Olarak Alt Kısımda Meydana Gelen Beklenmedik Kırılma Sorunu ve c. Alt - Üst Başlıkların Azot ile Soğutulması*

Deneme numunelerinden elde edilen gerilme - birim şekil değiştirme grafiği Şekil 5.4'te verilmiştir. Grafik göstergesinde belirtilen isimlendirme şu şekildedir; ML (Zemin tipi) / +10 (su muhtevasının optimum değere göre değişimi) / CDF (numunenin içinde bekletildiği soğutucu ekipman). Grafikte görüldüğü gibi azot tankında bekletilen numuneler CDF/CIF cihazında bekletilen numunelere göre yaklaşık 10 kat daha fazla eksenel gerilme değerine sahip olup daha gevrektir. Killi numuneler ise aynı ortamda bekletilen siltli numunelere göre daha yüksek dayanıma sahiptir. % 28.8 su muhtevasına sahip killi numunede, yüksek su içeriğine bağlı olarak hızlı çözülme meydana geldiğinden anlamlı veri alınamamıştır. Fakat esas deneyler sırasında her değişken için 3 adet numune hazırlanması ön görüldüğünden, daha doğru gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri kolaylıkla çizilebilmiştir.

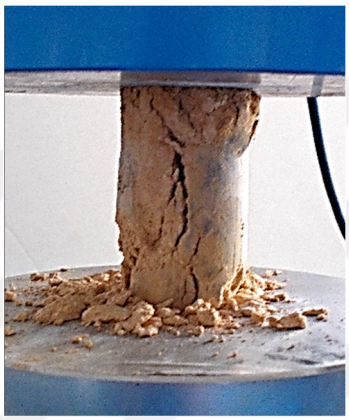


Şekil 5.4. *Deneme Numunelerinden Elde Edilen Gerilme - Birim Şekil Değiştirme Grafikleri*

Görsel 5.5'te deneme numunelerinde serbest basınç deneyi sonucunda meydana gelen çatlaklar ve kırılma biçimleri verilmiştir. Tüm numunelerde yükleme eksenine paralel çatlaklar meydana gelmiştir. Genellikle ince daneli zeminlerde meydana gelen fıçı tipindeki bel verme gözlenmemiştir. Bu durum donma etkisinin kohezyona üstün geldiğini göstermektedir. Sonuç olarak yüksek dayanımlı ve normalden çok daha gevrek zemin numuneleri elde edilmiştir.



a.



b.

c.

Görsel 5.5. *Eksenel Basınç Deneyi Sonrası Numunelerde Meydana Gelen Kırılma Biçimleri, a. Azot Tankında Bekletilen -%10 Su Muhtevasındaki ML Numunesi, b. Azot Tankında Bekletilen Optimum Su Muhtevasındaki CL Numunesi ve c. CDF Cihazında Bekletilen -%10 Su Muhtevasındaki CL Numunesi*

6. DENEY SONUÇLARI

6.1. Aşama 1 (Kil, Silt ve Kum Ağırlıklı Zeminlerin Donma Sonrası Serbest Basınç Dayanımı ve Şekil Değiştirme Davranışları)

Kil, silt ve kum ağırlıklı zemin tiplerinin su muhtevası, sıcaklık ve donma süresi değişkenlerine göre donma sonrası taşıma kapasiteleri ve şekil değiştirme davranışlarının incelenebilmesi amacı ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları bu bölümde sunulmuştur. İlgili aşamaya ait ayrıntılar Tablo 6.1'de verilmiştir. Donmamış kil ve silt numunelerinin serbest basınç dayanımları sırasıyla 0,16 MPa ile 0,13 MPa ve birim şekil değiştirme değerleri ise 0,02 ile 0,01 mertebelerindedir. Hız değerlendirmesi için gerçekleştirilen ön deneylerde, standart serbest basınç yükleme hızında numunelerin herhangi bir dayanım gösteremeden çözüldüğü görülmüştür. Bu yüzden, deneyler sürecinde donmuş numuneler oda sıcaklığında kısmi çözülmeye maruz bırakılacağından, deney öncesinde çözülmeyi en az seviyede tutabilmek için 1,0 mm/dk yükleme hızı seçilmiştir. Diğer taraftan, ani yükleme altında yükleme başlığı donmuş numuneye temas ettiği anda, özellikle sıvı azot içerisinde bekletilen numunelerde beklenmedik gevrek çatlamalar görülmüştür.

Bu aşamada, zemin numunelerinin dondurulması sürecinde CDF/CIF cihazı ve sıvı azot tankları yapay zemin dondurma süresinin kısaltılması amacıyla kullanılmıştır. Aksi halde deneylerde kullanılan toplamda 216 donmuş numune için harici borulama sistemi kullanılarak günlerce dondurma işlemi uygulamak gerekmektedir.

Tablo 6.1. *Aşama 1 İçin Deney Verileri*

AŞAMA - 1			
Seri	**1**	**2**	**3**
Zemin Tipi	CL, ML, SP	CL, ML, SP	CL, ML, SP
İncelenen Özellik	Su Muhtevası Değişimi	Sıcaklık Değişimi	Süre Değişimi
Su Muhtevası	-%10, Optimum, +%10	Optimum	Optimum
Süre (Gün)	1	1	7, 14 ve 28 gün
Sıcaklık (ºC)	-20 ve -200	0, -5, -10, -15, -20 ve -200	-20 ve -200
Numune Sayısı	54	108	54

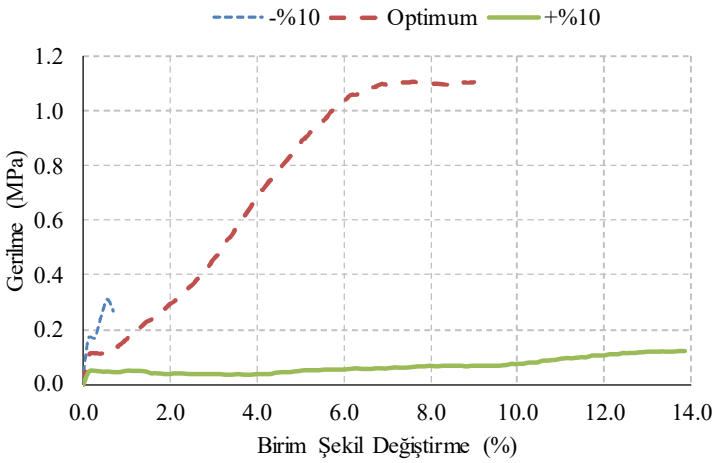
6.1.1. Su muhtevası değişiminin etkisi

Su muhtevası değişiminin, yapay zemin dondurma sonrasındaki zemin parametrelerine etkisinin değerlendirilmesi amacı ile optimum, optimum değerden %10 düşük ve optimum değerden %10 fazla olmak suretiyle, 3 farklı su muhtevasında numuneler hazırlanmıştır. Tüm numunelere -20 ºC'de 1 günlük ön dondurma işlemi uygulanarak kalıplanmıştır. CL, ML ve SP tipindeki zeminlerden toplamda 54 adet hazırlanan numunelerin yarısı CDF/CIF donma çözülme cihazında -20 ºC'de 24 saat bekletilmiştir (Görsel 6.1). Diğer yarısı ise kanisterli sıvı azot tankında -200 ºC'de 24 saat bekletilmiştir. Sonrasında serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir.

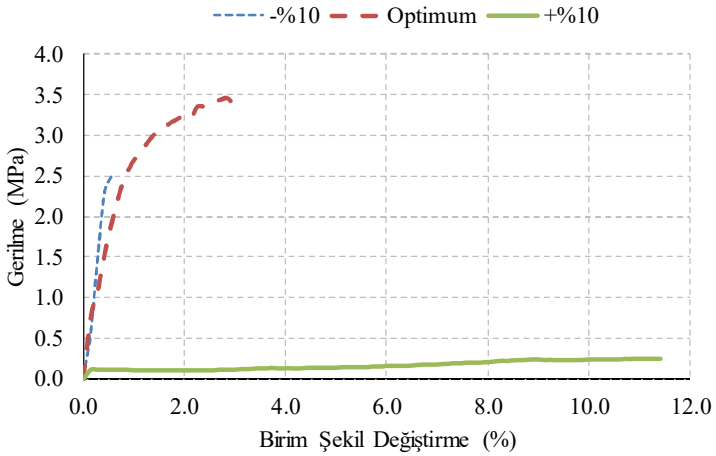
Görsel 6.1. *Donma Öncesi Numuneler*

Seri 1 için deney sonrası elde edilen su muhtevası değişimine bağlı gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 6.1'de verilmiştir. Hem gerilme – birim şekil değiştirme grafiklerindeki davranışları hem de göçme durumlarında numunelerde meydana gelen çatlaklar göz önünde bulundurulduğunda; killi numunelerde optimum su muhtevasında en yüksek dayanım gözlenirken, siltli ve kumlu numunelerde ise optimum su muhtevasından %10 düşük su içeriğinde daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Boşlukların tamamen su ile dolu olması durumunda donma sonucunda meydana gelen hacim artışı, diğer bir ifade ile donma kabarması oluşumu daneleri birbirinden ayırmaktadır. Dolayısıyla siltli ve kumlu numunelerde dayanım düşmektedir. Fakat daha düşük su muhtevası değerlerinde donma sonucundaki hacim artışı, boşluklarda sönümlenmektedir. Diğer bir ifadeyle, daneler arasındaki boşluklarda tamamen su yerine

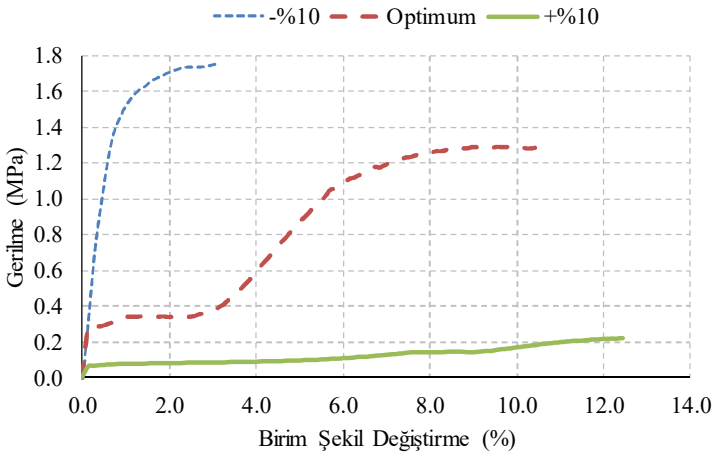
kısmen hava olması durumunda, buz fazına geçen su hava bulunan kısımlara göç etmektedir. Dolayısıyla bu aşamada buz, daneleri birbirinden uzaklaştırmamaktadır. Diğer taraftan, kilin kimyasal yapısından dolayı; boşluk suyu, dane yüzey suyu ve dane tarafından emilen su komple donma işlemine maruz kalarak, optimum su muhtevası değerinde zeminin tamamının hacimsel genişlemesine yol açmaktadır. Su muhtevasının düşmesi ile aynı yükleme mertebelerinde daha düşük şekil değiştirme değerleri gözlenmiştir. Sıvı azota maruz bırakılan kil, silt ve kum numuneleri için sırasıyla 3,1, 7,0 ve 24,7 MPa serbest basınç dayanımı elde edilmiştir. Özellikle kumlu numunedeki dayanım değeri ciddi oranda yüksektir. Bu değerler yapay zemin dondurma yönteminin geçici kazı destekleme çalışmalarında güvenle kullanılabileceğinin kanıtı olarak sunulabilir.



a.

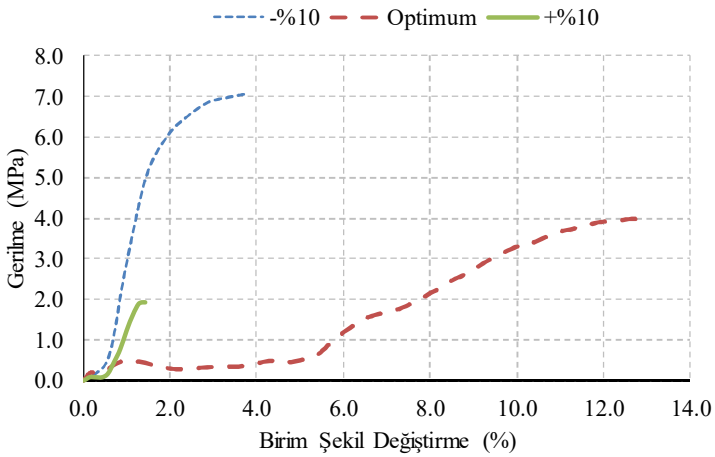


b.

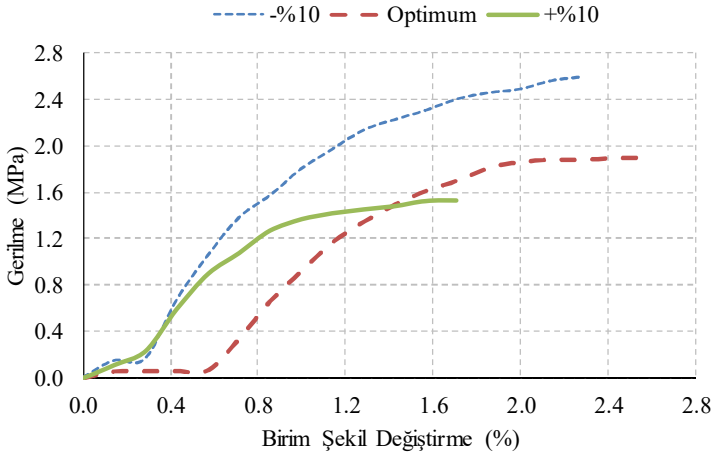


c.

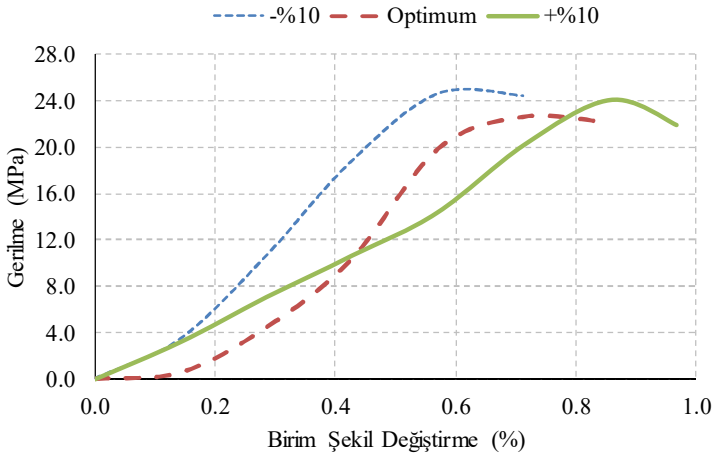
Şekil 6.1. *Su Muhtevası Değişimine Bağlı Gerilme - Birim Şekil Değiştirme Grafikleri; a. -20 ºC, CL, b. -200 ºC, CL, c. -20 ºC, ML, d. -200 ºC, ML, e. -20 ºC, SP ve f. -200 ºC, SP*



d.



e.



f.

Şekil 6.1. (Devam) *Su Muhtevası Değişimine Bağlı Gerilme - Birim Şekil Değiştirme Grafikleri; a. -20 ºC, CL, b. -200 ºC, CL, c. -20 ºC, ML, d. -200 ºC, ML, e. -20 ºC, SP ve f. -200 ºC, SP*

Görsel 6.2'de deneyler sonrasında numunelerin göçme durumları verilmiştir.

a.

b.

c.

d.

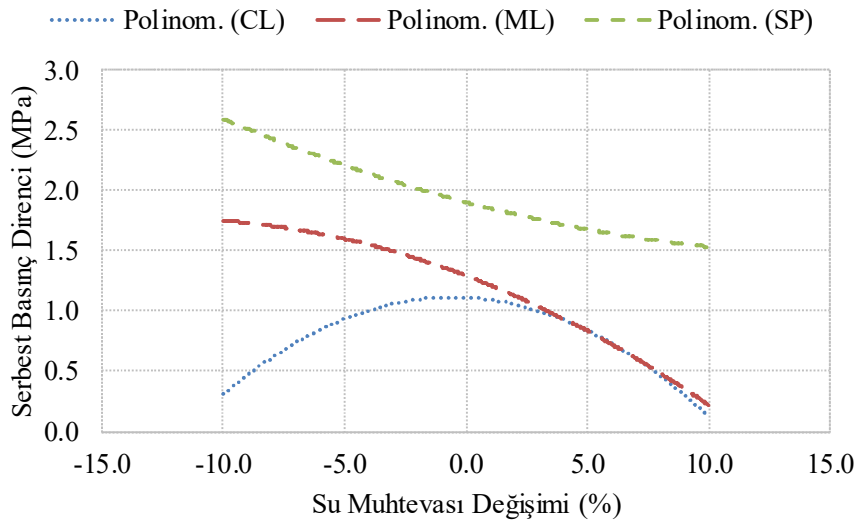
Görsel 6.2. *Su Muhtevası Değişimine Bağlı Göçme Modları; a. -20 ºC, CL, b. -200 ºC, CL, c. -20 ºC, ML, d. -200 ºC, ML, e. -20 ºC, SP ve f. -200 ºC, SP (Her Değişken Kendi İçerisinde Sırasıyla -%10, Optimum ve +%10 Su Muhtevası Değerlerini İçermektedir)*

e.

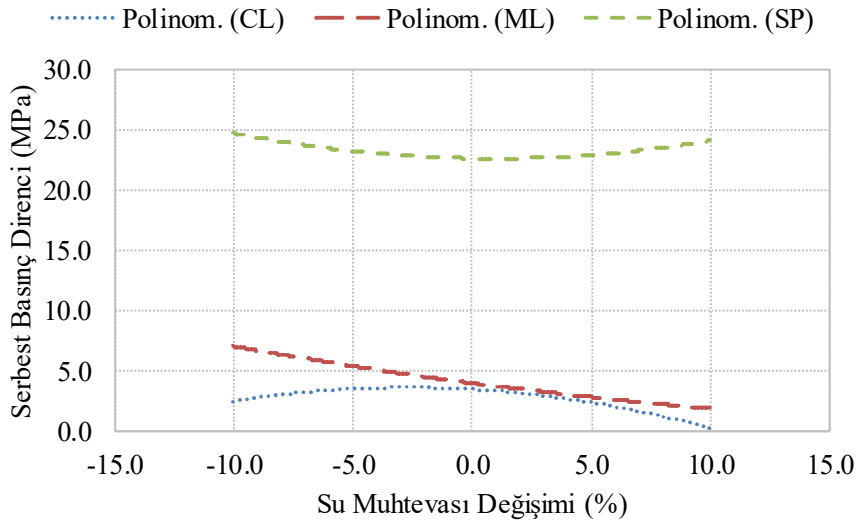
f.

Görsel 6.2. (Devam) *Su Muhtevası Değişimine Bağlı Göçme Modları; a. -20 ºC, CL, b. -200 ºC, CL, c. -20 ºC, ML, d. -200 ºC, ML, e. -20 ºC, SP ve f. -200 ºC, SP (Her Değişken Kendi İçerisinde Sırasıyla -%10, Optimum ve +%10 Su Muhtevası Değerlerini İçermektedir)*

Deneylerde her bir değişken için en az 3 numune kullanılarak, su muhtevası değişimine bağlı olarak elde edilen nihai serbest basınç direnci değerlerine ait grafikler Şekil 6.2'de verilmiştir. Deneylerdeki dondurma sıcaklıkları -20 ºC ve -200 ºC olduğundan; -20 ºC (Şekil 6.2a) düşük donma seviyesi, -200 ºC ise (Şekil 6.2b) yüksek donma seviyesi olarak tanımlanmıştır. Değişkenlere en uygun ve en yüksek doğruluktaki (R^2_{min}=1.00) polinom dağılımlı eğilim çizgileri oluşturulmuştur. Su muhtevası değişimi ekseninde (yatay eksen) % 0.0 değeri optimum su muhtevasını göstermekle birlikte, deney sınır şartları dahilinde optimum su muhtevasının %10 daha az (-%10) ve optimum su muhtevasının %10 daha fazlası (+%10) ile bu değerlerin arasındaki noktaları için su muhtevası değişimine bağlı serbest basınç direnci değerleri, kesim noktaları bulunarak grafiklerden elde edilebilmektedir.



a.



b.

Şekil 6.2. *Su Muhtevası Değişimine Bağlı Serbest Basınç Direnci Değerleri; a. -20 ºC Düşük Donma Seviyesi ve b. -200 ºC Yüksek Donma Seviyesi*

Bu serbest basınç direnci değerleri, deney numuneleri ile aynı şartlar altındaki donmuş zeminlerde taşıma kapasitesi değerlerinin hesaplanmasında güvenle kullanılabilecektir. Şekil 6.2'de verilen grafiklerin denklemleri çıkarılarak, tezin ilgili aşamasındaki zemin tipleri göz önünde bulundurulup, *optimum su muhtevası ile %10 düşük ve %10 yüksek su muhtevası sınır şartları dahilinde 24 saatlik donma süresi sonunda* taşıma kapasitesi hesabı için aşağıda verilen denklemler önerilmiştir. Sıcaklık değişimi için 6.3 ve donma süresi değişimi için ise 6.4 ve 6.5 numaralı denklemler kullanılarak ara değer hesabı yapılabilmektedir.

$$T = -20\,℃ \Longrightarrow q_u = \begin{cases} -0{,}009\omega^2 - 0{,}0094\omega + 1{,}1095; & CL\ tipi\ zemin \\ -0{,}0031\omega^2 - 0{,}0765\omega + 1{,}2937; & ML\ tipi\ zemin \\ 0{,}0016\omega^2 - 0{,}0532\omega + 1{,}9034; & SP\ tipi\ zemin \end{cases} \quad (6.1)$$

$$T = -200\,℃ \Longrightarrow q_u = \begin{cases} -0{,}021\omega^2 - 0{,}1129\omega + 3{,}4739; & CL\ tipi\ zemin \\ 0{,}0049\omega^2 - 0{,}2568\omega + 3{,}9922; & ML\ tipi\ zemin \\ 0{,}0176\omega^2 - 0{,}0308\omega + 22{,}607; & SP\ tipi\ zemin \end{cases} \quad (6.2)$$

Burada; q_u serbest basınç direnci veya taşıma kapasitesi, ω su muhtevası ve T ise sıcaklık değerini belirtmektedir. Denklemlerde su muhtevası değeri olarak; optimum su muhtevası için 0.0 sayısı tanımlanmıştır. Su muhtevasının artan değerleri için en fazla "10" sayısı tanımlanmakla birlikte bu değer optimum su muhtevasının %10 fazlasına karşılık gelmektedir. Su muhtevasının azalan değerleri ise yine en düşük "10" sayısı tanımlanarak, optimum su muhtevasının %10 düşük değerini temsil etmektedir. Bu sınır değerlerinin haricindeki oranlar denklemlerin eğilimiyle benzer özellik gösterse de deneysel olarak ispatlanmamıştır.

6.1.2. Sıcaklık değişiminin etkisi

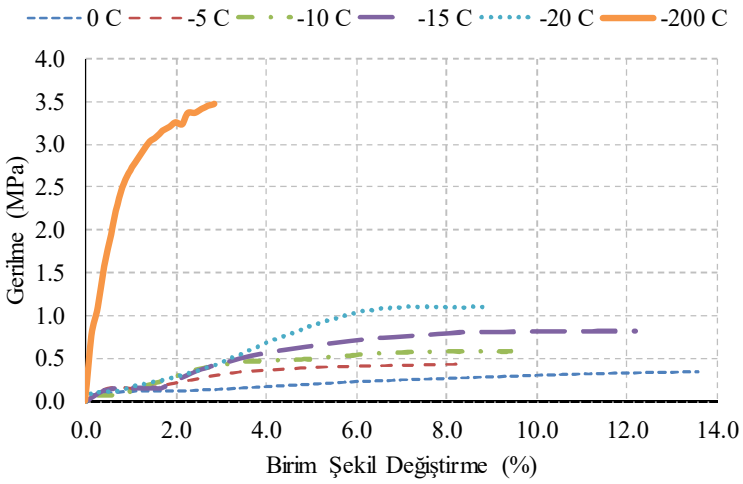
Bu bölümün çıktıları Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi kapsamında Erzurum Atatürk Üniversitesi'nde paylaşılmıştır (Evirgen vd., 2016, s. 1045-1054). Sıcaklık değişiminin, yapay zemin dondurma sonrasındaki zemin parametrelerine etkisinin değerlendirilmesi amacı ile 0, -5, -10, -15, -20 ve -200 ºC olmak suretiyle, 6 farklı sıcaklıkta numuneler hazırlanmıştır. Tüm numuneler planlanan sıcaklıkta 1 günlük ön dondurma işlemi uygulanarak kalıplanmıştır. CL, ML ve SP tipindeki zeminlerden toplamda 108 adet numune hazırlanmış olup 24 saatlik donma işlemi sonucunda serbest basınç deneyi uygulanmıştır (Görsel 6.3).

a. b. c.

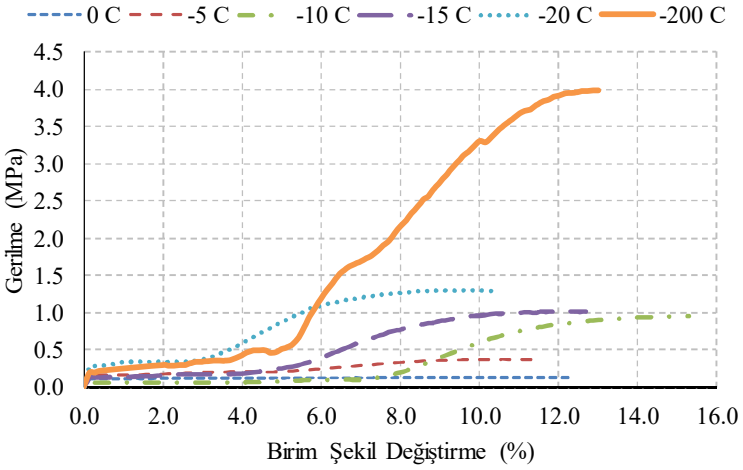
Görsel 6.3. *Donma İşleminin Uygulanması, a. CDF/CIF Cihazı ve b-c. Kanisterli Sıvı Azot Tankı*

İkinci seri numunelerinin deney sonuçlarından elde edilen sıcaklık değişimine bağlı gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri Şekil 6.3'te verilmiştir. 0 ºC ile -20 ºC arasındaki sıcaklıklarda bekletilip ani çözülmeye maruz bırakılan numunelerde birim şekil değiştirme değerleri, zemin tipi içerisinde ciddi bir farklılık göstermemekle birlikte kil, silt ve kum için sırasıyla ortalama % 10,5, % 12,4 ve % 3,3 oranlarındadır. Fakat sıvı azot içerisinde bekletilen kil ve kum tipi numuneler yüksek oranda gevrek davranış sergilemekle birlikte bu değerler % 2,9 ve % 0,9 mertebelerine kadar düşmüştür. -200 ºC'de bekletilen silt tipi numunelerde ise birim şekil değiştirme miktarı diğer sıcaklıklarda olduğu gibi yaklaşık % 13 civarındadır.

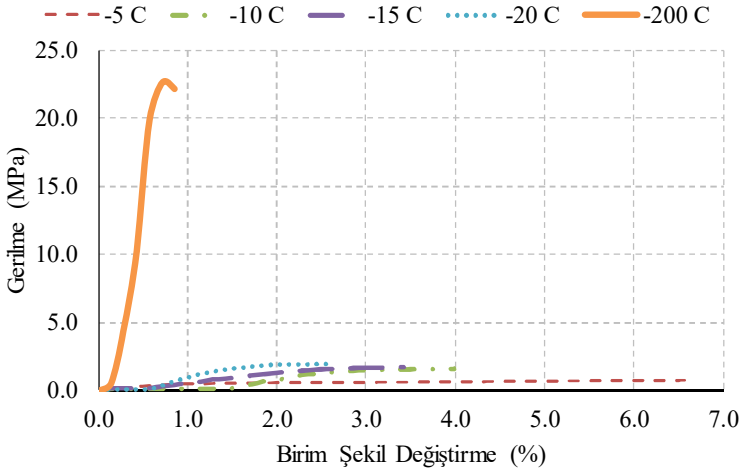
0.16 MPa serbest basınç dayanımına sahip donmamış kil numunesi için 0 ºC'de yaklaşık 2 kat ve -20 ºC'de yaklaşık 7 kat daha yüksek dayanım gözlenmiştir. Numunenin sıvı azot ile dondurulması durumunda dayanım yaklaşık 21 kat artarak 3,5 MPa değerine ulaşmıştır. Silt numunelerinde normal şartlarda 0,13 MPa olan dayanım, sıcaklığın 0 ºC'ye düşürülmesi sonrasında değişmemesine rağmen -20 ºC'de yaklaşık 10 kat artmıştır. -200 ºC'de dayanım yaklaşık 31 kat artarak 4,0 MPa değerine kadar yükselmiştir. Donmamış granüler zeminlerdeki dayanım üç eksenli deneyi ile bulunabilmektedir. Fakat tezin bu aşaması kapsamında numunelerin sadece serbest basınç dayanımı değerlendirilmiştir. Dolayısıyla donma işlemi gerçekleşene kadar granüler zeminlerde uygulanan serbest basınç deneyinde herhangi bir dayanımdan bahsetmek söz konusu değildir. Kum numunelerde -5 ºC'de 0,7 MPa olan serbest basınç dayanımı, -20 ºC'de sadece 1,9 MPa değerine çıkabilmiştir. Fakat sıvı azot uygulanan donmuş kum numunelerinin dayanımı yaklaşık 23 kat artmıştır. Bu dayanım C23 beton dayanımına eşdeğerdir (Evirgen vd., 2016, s. 1052).



a.



b.

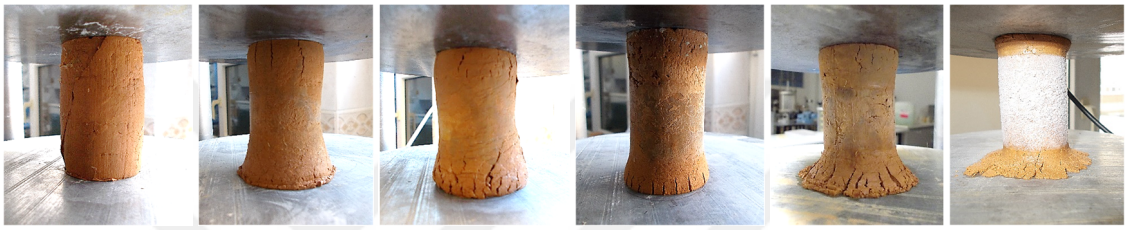


c.

Şekil 6.3. *Sıcaklık Değişimine Bağlı Gerilme - Birim Şekil Değiştirme Grafikleri; a. CL, b. ML ve c. SP*

Kaynak: *Evirgen vd., 2016, s. 1051*

Görsel 6.4'te numunelere ait göçme durumları verilmiştir. Çalışmadaki ince daneli zeminlerde normal şartlarda numunenin orta kısmındaki şişme sonucu meydana gelen fıçılanma davranışı, donmuş numunelerde alt ve üst kısımlarda yayılma biçimine dönüşmüştür. Bu davranış, yükleme çerçevesinin alt ve üst başlıkları ile donmuş numune arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, ani sıcaklık artışına maruz kalan donmuş zeminlerde, artışın meydana geldiği bölgelerde buz fazının buz lensi veya suya dönüşmesi sonucu mukavemet kaybı meydana gelmektedir. Sıvı azot uygulanan numunelerde ise beton benzeri eksenel çatlaklar meydana gelmiştir.



a.

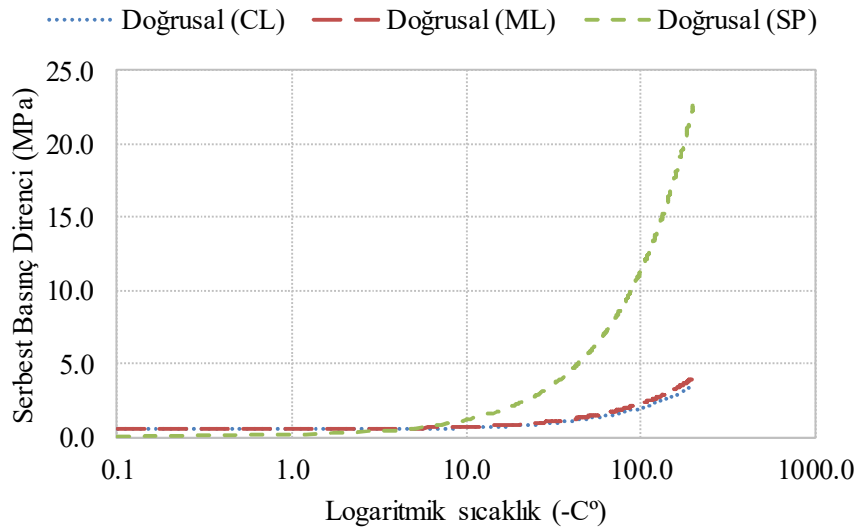
b.

c.

Görsel 6.4. *Donmuş Zeminlerde 0, -5, -10, -15, -20 ile -200 ºC'de Göçme Durumları; Sırasıyla a. Kil (CL), b. Silt (ML) ve c. Kum (SP)*
Kaynak: *Evirgen vd., 2016, s. 1052-1053*

Deneylerde her bir değişken için en az 3 numune kullanılarak, sıcaklık değişimine bağlı olarak elde edilen nihai serbest basınç direnci değerlerine ait grafik Şekil 6.4'te verilmiştir. Deneylerdeki dondurma sıcaklıkları geniş saçılımda olduğu için sıcaklık ekseni logaritmik ölçekte tanımlanmıştır. Logaritmik eksende negatif değerler bulunamayacağından değerler pozitif alınarak eksen negatif tanımlanmıştır.

Değişkenlere en uygun ve en yüksek doğruluktaki (R^2_{min}=0.95) doğrusal dağılımlı eğilim çizgileri oluşturulmuştur. Sıcaklık değişimine bağlı serbest basınç direnci değerleri, kesim noktaları bulunarak grafiklerden elde edilebilmektedir. Kumlu numunelerde 0 ºC'de dayanım sıfır alınmıştır. Fakat eğilim çizgisi ortalamasına bağlı olarak değerler değişkenlik gösterebilmektedir.



Şekil 6.4. *Sıcaklık Değişimine Bağlı Serbest Basınç Direnci Değerleri*

Bu serbest basınç direnci değerleri, deney numuneleri ile aynı şartlar altındaki donmuş zeminlerde taşıma kapasitesi değerlerinin hesaplanmasında güvenle kullanılabilecektir. Şekil 6.4'te verilen grafiklerin denklemleri çıkarılarak, tezin ilgili aşamasındaki zemin tipleri göz önünde bulundurulup *optimum su muhtevası dahilinde 24 saatlik donma süresinde* taşıma kapasitesi hesabı için aşağıda verilen denklemler önerilmiştir. Diğer su muhtevası değerleri için 6.1 ve 6.2 numaralı denklemler, donma süresi değişimi için de 6.4 ve 6.5 numaralı denklemler kullanılarak ara değer hesabı yapılabilmektedir.

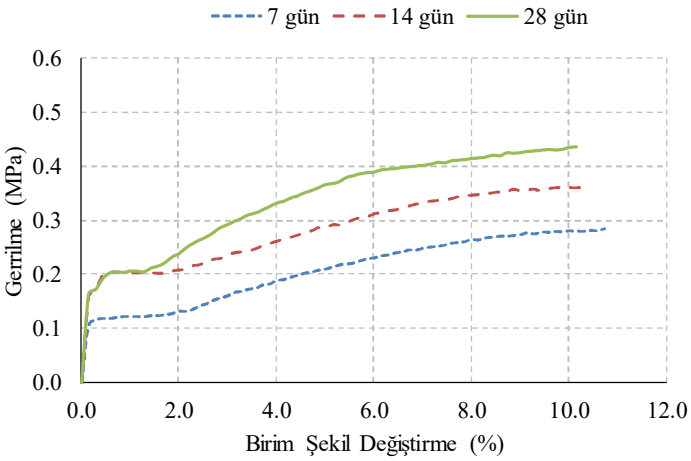
$$0℃ \leq T \leq -200℃ \Longrightarrow q_u = \begin{cases} 0{,}015(-T) + 0{,}5015; & CL\ tipi\ zemin \\ 0{,}0176(-T) + 0{,}5294; & ML\ tipi\ zemin \\ 0{,}1127(-T) + 0{,}054; & SP\ tipi\ zemin \end{cases} \quad (6.3)$$

Burada; q_u serbest basınç direnci veya taşıma kapasitesi ve T ise sıcaklık değerini belirtmektedir. Denklemlerde sıcaklık değerinin negatifi alınacaktır. Bu sınır değerlerinin haricindeki oranlar denklemlerin eğilimiyle benzer özellik gösterse de deneysel olarak ispatlanmamıştır.

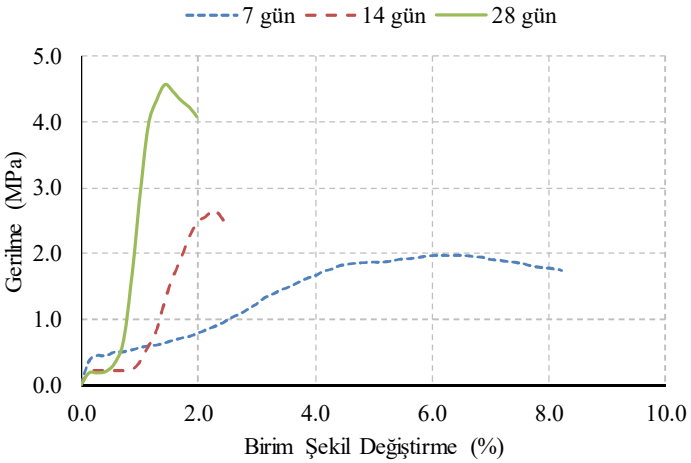
6.1.3. Donma süresi değişiminin etkisi

Bu bölümün çıktıları 25. Uluslararası Okyanus ve Kutup Mühendisliği Konferansı (25. ISOPE) kapsamında Amerika Birleşik Devletleri'nde paylaşılmıştır (Evirgen vd., 2015, 1798-1802). Donma süresi değişiminin, yapay zemin donma sonrasındaki zemin parametrelerine etkisinin değerlendirilmesi amacı ile 7, 14 ve 28 gün olmak suretiyle, 3 farklı donma işlemi uygulama süresi için numuneler hazırlanmıştır. Tüm numunelere -20 C'de 1 günlük ön dondurma işlemi uygulanarak kalıplanmıştır. CL, ML ve SP tipindeki zeminlerden toplamda 54 adet numune hazırlanmış olup ilgili süre sonunda serbest basınç deneyi yapılmıştır.

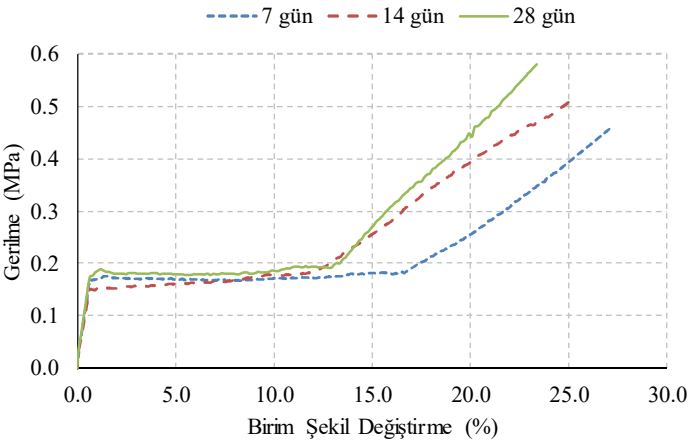
Donmamış kaolin (CL) ve zeolit (ML) numuneleri için serbest basınç direnci değerleri 160 kPa ve 135 kPa bulunmuş olup, birim şekil değiştirme değerleri ise sırasıyla 0,02 ve 0,01'dir. Granüler malzemede kohezyon faktörü bulunmadığından, donmamış kum tipi numune (SP) kendisini taşıyamamakta olup herhangi bir mukavemet değeri yoktur. Donmuş numuneler için serbest basınç deneyi sonucunda her bir numuneye ait gerilme - birim şekil değiştirme eğrileri çizilmiştir (Şekil 6.5). Grafiklerde görüldüğü üzere sıvı nitrojen tankında bekletilen numunelerin taşıma kapasitesi değerleri ciddi ölçüde artmıştır. Killi ve siltli numunelerde donma süresi artışı ile dayanım doğru orantılı olmakla birlikte, kumlu numunelerde -20 ºC'de donma süresinin artması ile dayanım düşmüştür. Bu durum kritik sıcaklıklarda, donma sonucu hacim artışının zemin yapısında meydana getirebileceği olumsuz bir etki olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Tasarım sürecindeki dayanım kriterleri belirlenirken nihai dondurma sıcaklığına dikkat edilmelidir. Genel olarak ince daneli numunelerde -20 ºC'de donma süresi değişiminin yer değiştirme değerlerinde ciddi bir etkisi bulunmamaktadır. Fakat -200 ºC'deki numunelerde yaklaşık 4 kat birim şekil değiştirme düşüşü görülmüştür. Kumlu numunelerde ise her iki sıcaklıkta da birim şekil değiştirme değerleri dondurma süresinden bağımsız biçimde % 2,5 ile 3,0 arasında değişmektedir.



a.



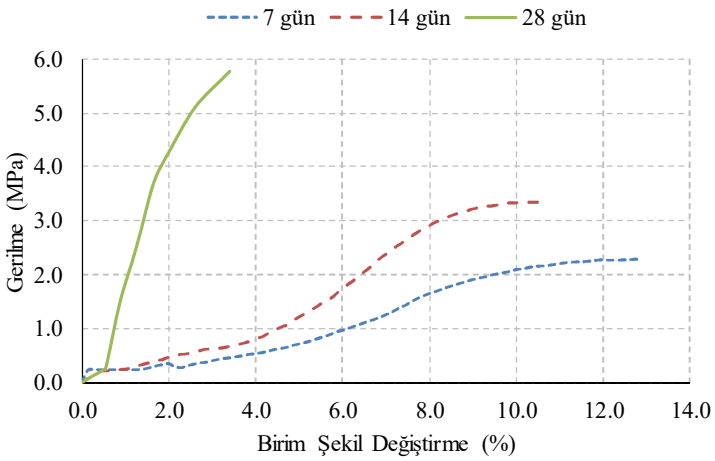
b.



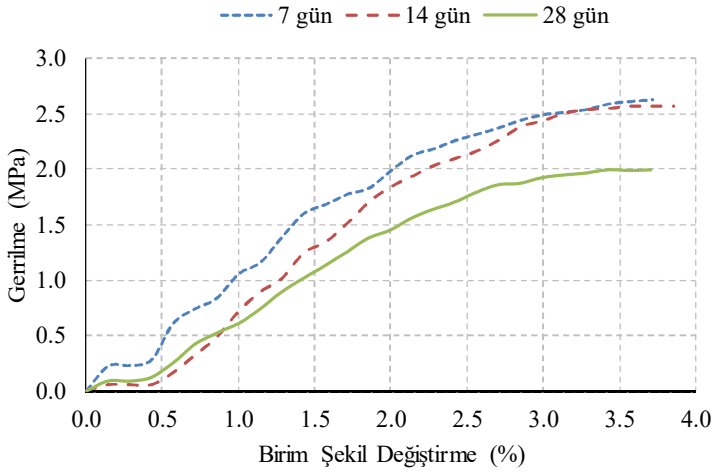
c.

Şekil 6.5. *Donma Süresine Bağlı Gerilme - Birim Şekil Değiştirme Grafikleri; a. -20 ºC, CL, b. -200 ºC, CL, c. -20 ºC, ML, d. -200 ºC, ML, e. -20 ºC, SP ve f. -200 ºC, SP*

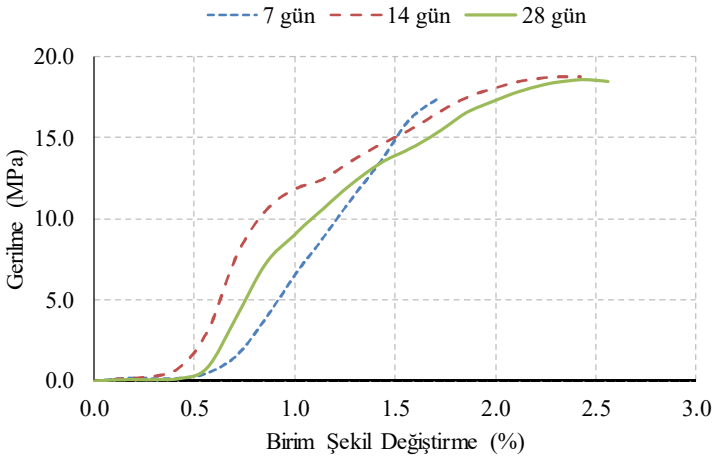
Kaynak: *Evirgen vd., 2015, 1800-1801 (e ve f grafikleri hariç)*



d.



e.

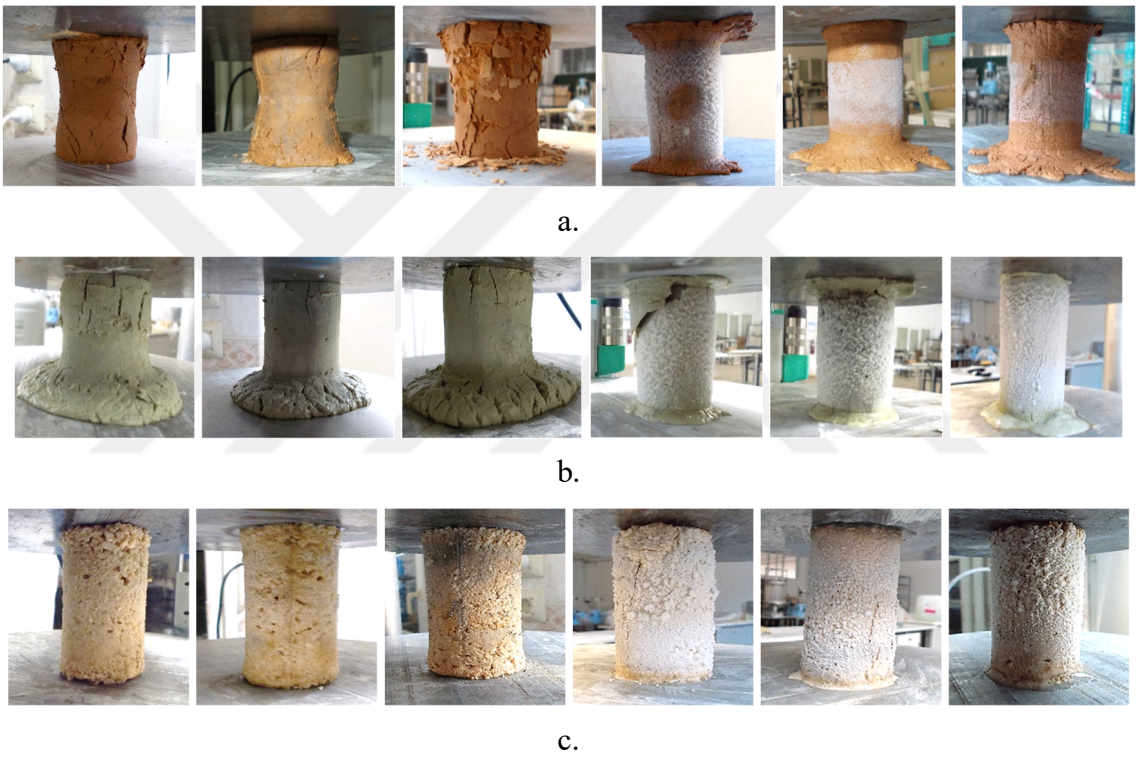


f.

Şekil 6.5. (Devam) *Donma Süresine Bağlı Gerilme - Birim Şekil Değiştirme Grafikleri; a. -20 ºC, CL, b. -200 ºC, CL, c. -20 ºC, ML, d. -200 ºC, ML, e. -20 ºC, SP ve f. -200 ºC, SP*

Kaynak: *Evirgen vd., 2015, 1800-1801 (e ve f grafikleri hariç)*

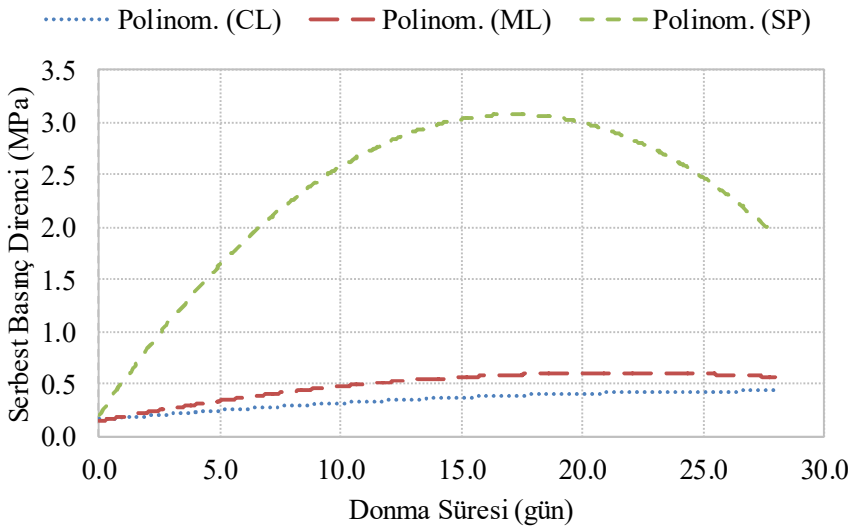
Normal şartlarda eksenel basınç altında killi ve siltli numuneler orta kısımda fıçı tipi deformasyon göstermektedir. Fakat donma sonrasında davranışları tamamen değişerek, gevrek hale dönüşmektedir. Siltlerin hassas donma duyarlılığının bir sonucu olarak, killi numuneler siltli numunelere kıyasla çözülmeye karşı daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Isı transferine bağlı olarak ilk çözülme, alt ve üst yükleme başlıkları ile zemin arasındaki temas bölgelerinde görülmüştür. -200 ºC'deki numunelerin çözülme davranışı, bu etkileşim bölgelerindeki aşırı sıcaklık farkından dolayı kolaylıkla görülebilmektedir (Görsel 6.5).



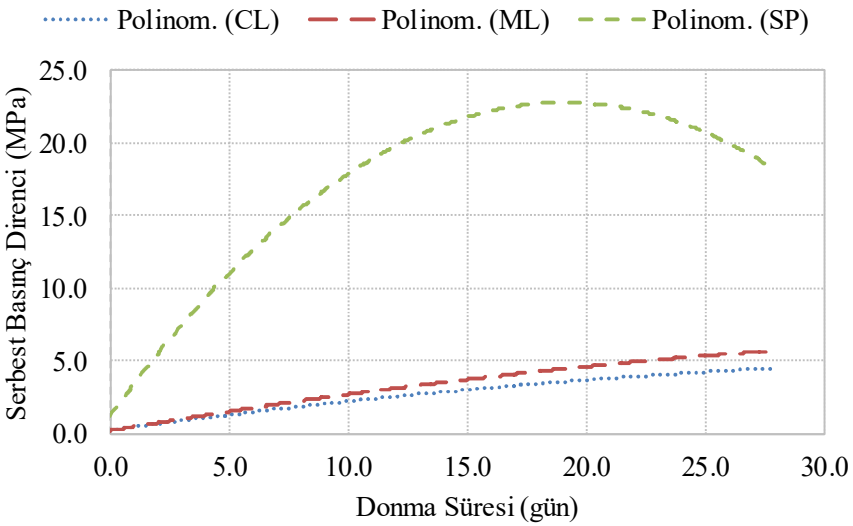
Görsel 6.5. *Sırasıyla; -20 ºC, 7 Gün; -20 ºC, 14 Gün; -20 ºC, 28 Gün; -200 ºC, 7 Gün; -200 ºC, 14 Gün ve -200 ºC, 28 Gün Şartlarında Bekletilen a. CL, b. ML ve c. SP Numuneleri İçin Göçme Modları*
Kaynak: *Evirgen vd., 2015, 1801-1802 (SP numuneleri hariç)*

Deneylerde her bir değişken için en az 3 numune kullanılarak, donma süresi değişimine bağlı olarak elde edilen nihai serbest basınç direnci değerlerine ait grafikler Şekil 6.6'da verilmiştir. Deneylerdeki dondurma sıcaklıkları 0 ºC ile -200 ºC arasında değiştiği için 0 ºC ile -20 ºC arası (Şekil 6.6a) düşük donma seviyesi, -20 ºC ile -200 ºC arası ise (Şekil 6.6b) yüksek donma seviyesi olarak tanımlanmıştır. Değişkenlere en uygun ve en yüksek doğruluktaki (R^2_{min}=0.89) polinom dağılımlı eğilim çizgileri

oluşturulmuştur. Deney sınır şartları dahilinde donma süresi değişimine bağlı serbest basınç direnci değerleri, kesim noktaları bulunarak grafiklerden elde edilebilmektedir.



a.



b.

Şekil 6.6. *Donma Süresine Bağlı Serbest Basınç Direnci Değerleri; a. -20 ºC Düşük Donma Seviyesi ve b. -200 ºC Yüksek Donma Seviyesi*

Şekil 6.6'da verilen grafiklerin denklemleri çıkarılarak, tezin ilgili aşamasındaki zemin tipleri göz önünde bulundurulup, *optimum su muhtevası dahilinde* taşıma kapasitesi hesabı için aşağıda verilen denklemler önerilmiştir. Diğer su muhtevası değerleri için 6.1 ve 6.2 numaralı denklemler ile belirtilen sıcaklık değerlerinin

haricindeki sıcaklıklarda da 6.3 numaralı denklem kullanılarak ara değer hesabı yapılabilmektedir.

$$T = -20\ ℃ \Longrightarrow q_u = \begin{cases} -0{,}0003t^2 + 0{,}0194t + 0{,}1615; & CL\ tipi\ zemin \\ -0{,}001t^2 + 0{,}0429t + 0{,}1512; & ML\ tipi\ zemin \\ -0{,}0098t^2 + 0{,}3353t + 0{,}2065; & SP\ tipi\ zemin \end{cases} \quad (6.4)$$

$$T = -200\ ℃ \Longrightarrow q_u = \begin{cases} -0{,}0025t^2 + 0{,}2218t + 0{,}2676; & CL\ tipi\ zemin \\ -0{,}0029t^2 + 0{,}2783t + 0{,}2248; & ML\ tipi\ zemin \\ -0{,}0589t^2 + 2{,}2524t + 1{,}2482; & SP\ tipi\ zemin \end{cases} \quad (6.5)$$

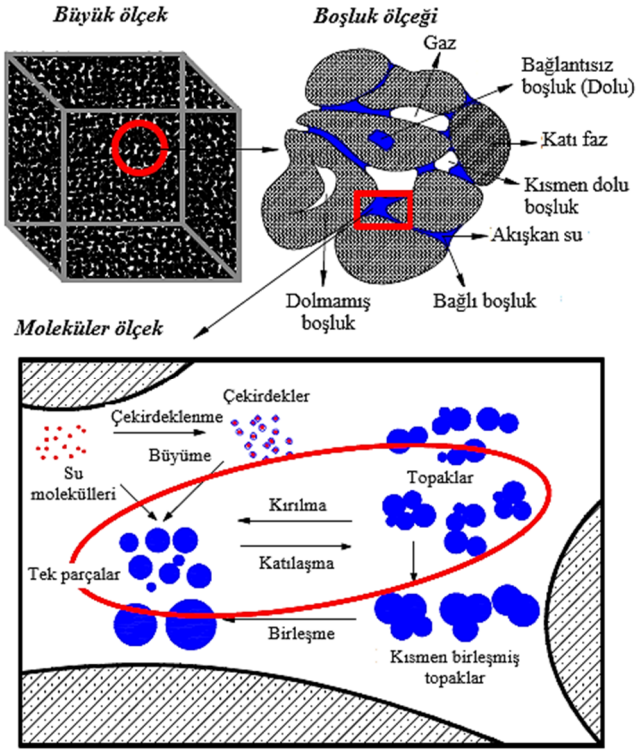
Burada; q_u serbest basınç direnci veya taşıma kapasitesi, t donma süresi ve T ise sıcaklık değerini belirtmektedir. Denklemlerde en fazla 28 gün donmaya maruz bırakılan numuneler kullanıldığından, bu sınır değerden fazla olan donma süresi denklemlerin eğilimiyle benzer özellik gösterse de deneysel olarak ispatlanmamıştır.

6.1.4. Mikro yapı

Doğal halde su içeriği bulunan zemine soğutma işlemi uygulanması durumunda gelişen donma süreci ve oluşan yapılar, literatürdeki öne çıkan çalışmalarda mikro ölçekte aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

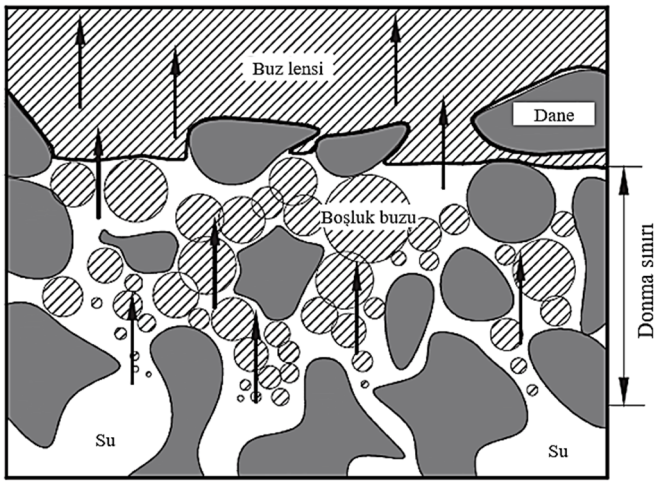
Donma sırasındaki ısı ve kütle iletimini kontrol etmek için, buz kristallerinin faz değişim özelliklerini anlamak birinci derecede önem arz etmektedir. Bu kapsamda Wu vd. (2015, s. 699-709) tarafından yapılan çalışmada buz oluşumu sürecinde çekirdeklenme durumları ve kristal gelişimi incelenmiştir. Söz edilen bu karmaşık yapı Şekil 6.7'de verilmiş olup süreç şu şekilde işlemektedir.

Akışkanın sıcaklığı faz geçiş sıcaklığından düşükse akışkanda kristallenme meydana gelir. Sıcaklık düştüğünde, aşırı soğutulmuş suyun moleküler enerjisi düşer ve belirli sayıda çekirdekten oluşan su molekülünün topak formuna geçmesini sağlar. Çekirdeklenmenin başlangıç aşamasında boşluk hacmi su hacminden daha büyük olduğundan, çekirdeklerin sınır dizilimine ulaşılamaz. Donma süresinin artması ile çekirdek sayısı artar, çekirdekler giderek büyür ve sonunda "tek parçalara" dönüşür. Donma sürecinin devamında tek parçalar, topaklara; topaklar da buz lensine dönüşür (Wu vd., 2015, s. 705).



Şekil 6.7. *Gözenekli Ortamın Farklı Ölçeklerdeki Nitelikleri*
Kaynak. *Wu vd., 2015, s. 704*

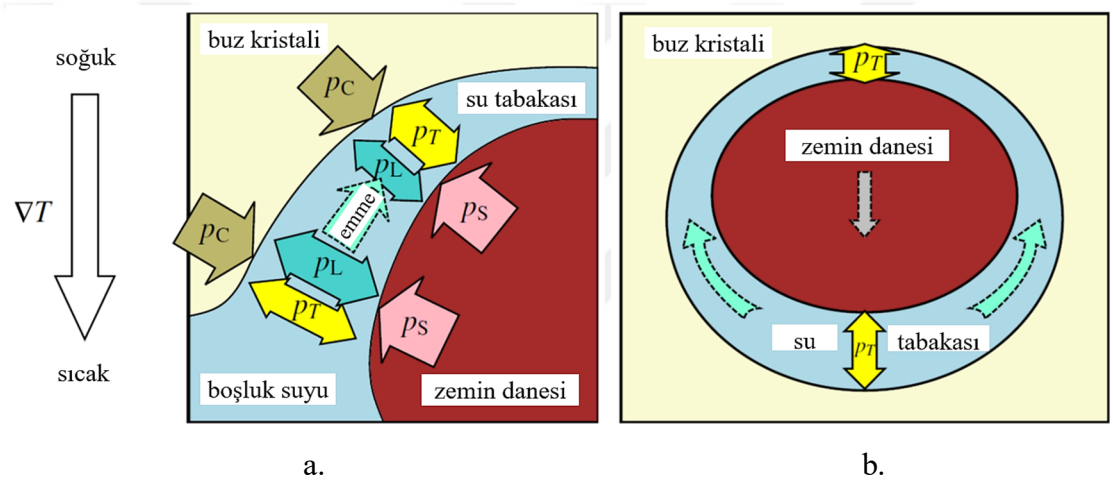
Gözenekli ortamdaki buz kristallenmesi ve su göçünün şematik çizimi Şekil 6.8'de verilmiştir. Su moleküllerinin aşırı derecede soğutulduğu yerde ilk olarak buz çekirdekleri ile donma sınırının oluştuğu; dondurma ilerledikçe bunlar büyüyüp ve sonunda donma sınırının arkasında buz lensi oluşturduğu belirtilmiştir (Wu vd., 2015, s. 705).



Şekil 6.8. *Gözenekli Ortamda Buz Kristallenmesi ve Su Göçü*
Kaynak. *Wu vd., 2015, s. 705*

Zhou ve Meschke (2013, s. 3173-3193) tarafından yapılan modelleme sonucunda faz geçişlerinin bulunduğu yerde elde edilen mekanizmalar Şekil 6.9'da verilmiştir. Buz kristali, yüzeysel su tabakası ve zemin danesi arasındaki basınç geçişleri gösterilmektedir. Çalışmada basınç geçişleri şu şekilde tanımlanmaktadır:

Ön erime dinamiğine göre, sıcaklık artışı ile akışkan tabaka kalınlığı artmakta ve bunun sonucunda ısıl-moleküler basınç (p_T) düşmektedir ve bu durum basınç bağlarının ayrıldığını belirtmektedir. Zemin danesine uygulanan basınçla (p_S) özdeş olan kristal buza uygulanan dış basınç (p_C), ısıl-moleküler basınç (p_T) ve hidrodinamik basıncın (p_L) toplamına eşittir. Eğer dış basınç sabit tutulursa, kuvvet dengesi düşük sıcaklık tarafındaki hidrodinamik basıncın artmasını gerektirir. Sonuçta, akışkan su sıcak taraftan soğuk tarafa doğru akış eğilimine girmektedir (Zhou ve Meschke, 2013, s. 3179).

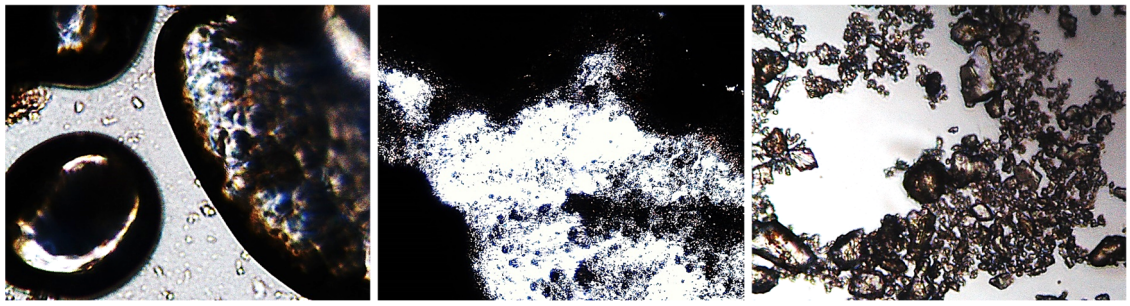


a. b.

Şekil 6.9. *Şematik Resimler; a. Mikro-Dondurucu-Emme Mekanizması ve b. Yeniden Donma*

Kaynak: *Zhou ve Meschke, 2013, s. 3179*

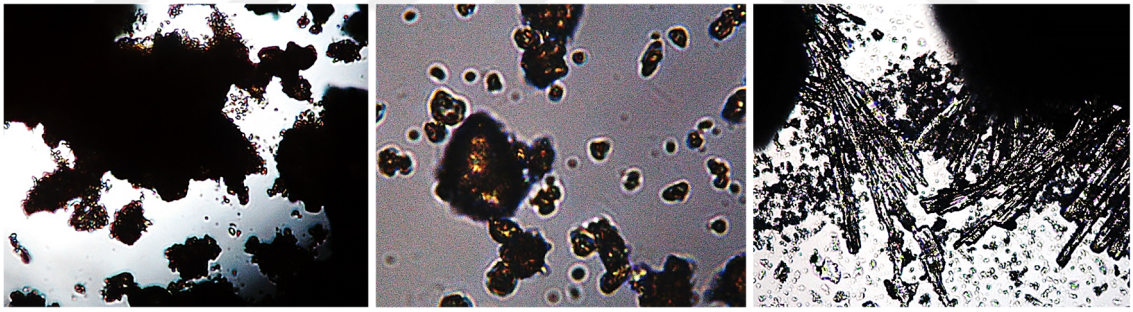
Donmamış su, kısmi sulu ortam, kısmen dolu boşluk, çekirdeklenme, buz kristalleri ve buz lensi gibi oluşumların gözlenebilmesi için incelenen her bir değişkene uygun hazırlanan mikroskop numuneleri lam ve lamel arasına yerleştirilerek ilgili parametre ile aynı şartlarda donma işlemine maruz bırakılmıştır. Sonrasında, buz lensi ve buz oluşumları mikroskopta incelenmiştir. Donmamış numuneler ait fotoğraflar Görsel 6.6'da verilmiştir. Parantez içindeki değerler büyütme miktarlarıdır. Bu fotoğraflarda donmamış su oluşumları görülmektedir. Görsel 6.6a'da bağlantısız boşluk suyu bulunmaktadır. Ayrıca silt ve kil tipi numunelerin kendine has ince daneli yapıları görülürken, kum tipi numunede danelerin kristal yapısı ön plandadır.



a. b. c.

Görsel 6.6. *Donmamış Zemin Numuneleri; a. CL (20x), b. ML (4x) ve c. SP (20x)*

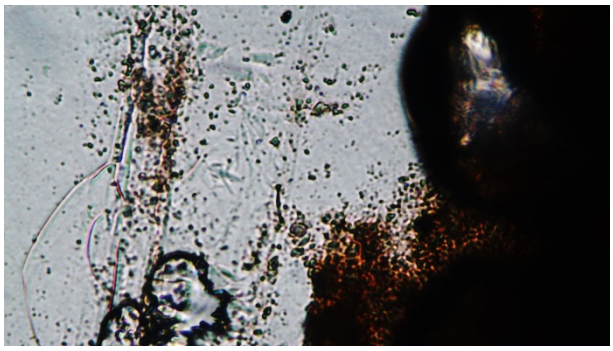
Kısmen suya doygun numunelerden elde edilen mikroskop görüntüleri Görsel 6.7'de verilmiştir. İnce daneli zeminlerde donmamış danelerin çevresindeki düz geçişler, donma sonrasında keskin bir yapıya dönüşmektedir. Kısmen suya doygun numunelerde, doğal olarak kısmi buz dolu boşluklar elde edilmiştir. Çekirdeklenmenin başlangıcı olarak kabul edilebilecek bu oluşumlar kapsamında, danelerin dış çeperlerinde buz tabakaları oluşmaya başlamaktadır. Kumlu numunede ise diğerlerinden tamamen farklı biçimde, dane yüzeylerinde uzun kristaller meydana gelmektedir.



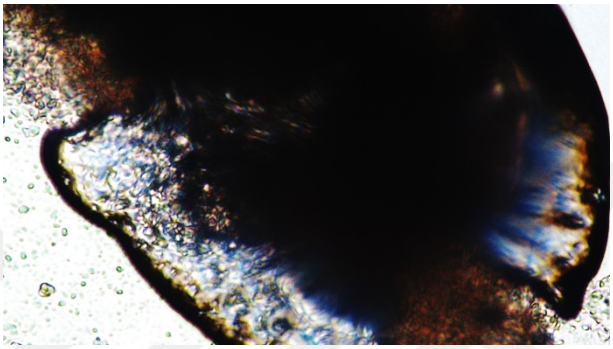
a. b. c.

Görsel 6.7. *Donmuş Zemin Numuneleri; a. CL (20x), b. ML (60x) ve c. SP (10x)*

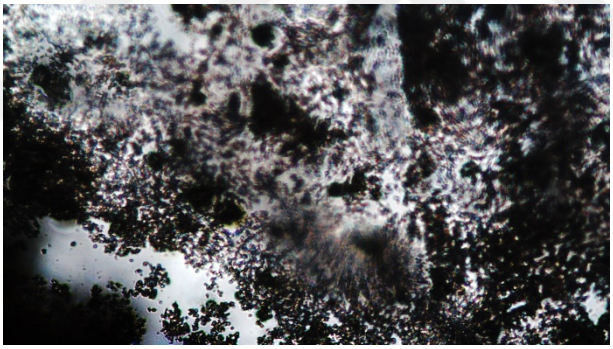
Suya doygun numunelerde gözlenen oluşumlar ise Görsel 6.8'de verilmiştir. Bu aşamada yüksek orandaki su içeriğine bağlı olarak, akışkan fazdaki su tamamen buz formuna geçmiştir. Elde edilen görüntülerde tek parça ve buz lensleri oluşumları açıkça görülmektedir. Dane yüzeylerindeki donmuş tabakaların kalınlığı artmaktadır. Kumlu zemindeki tamamen donmuş bölgede danelerin birbirinden ayrıldığı görülmektedir.



a.



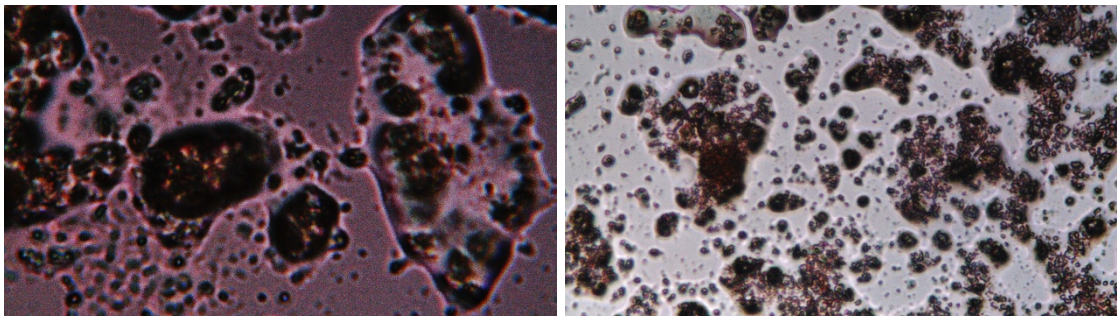
b.



c.

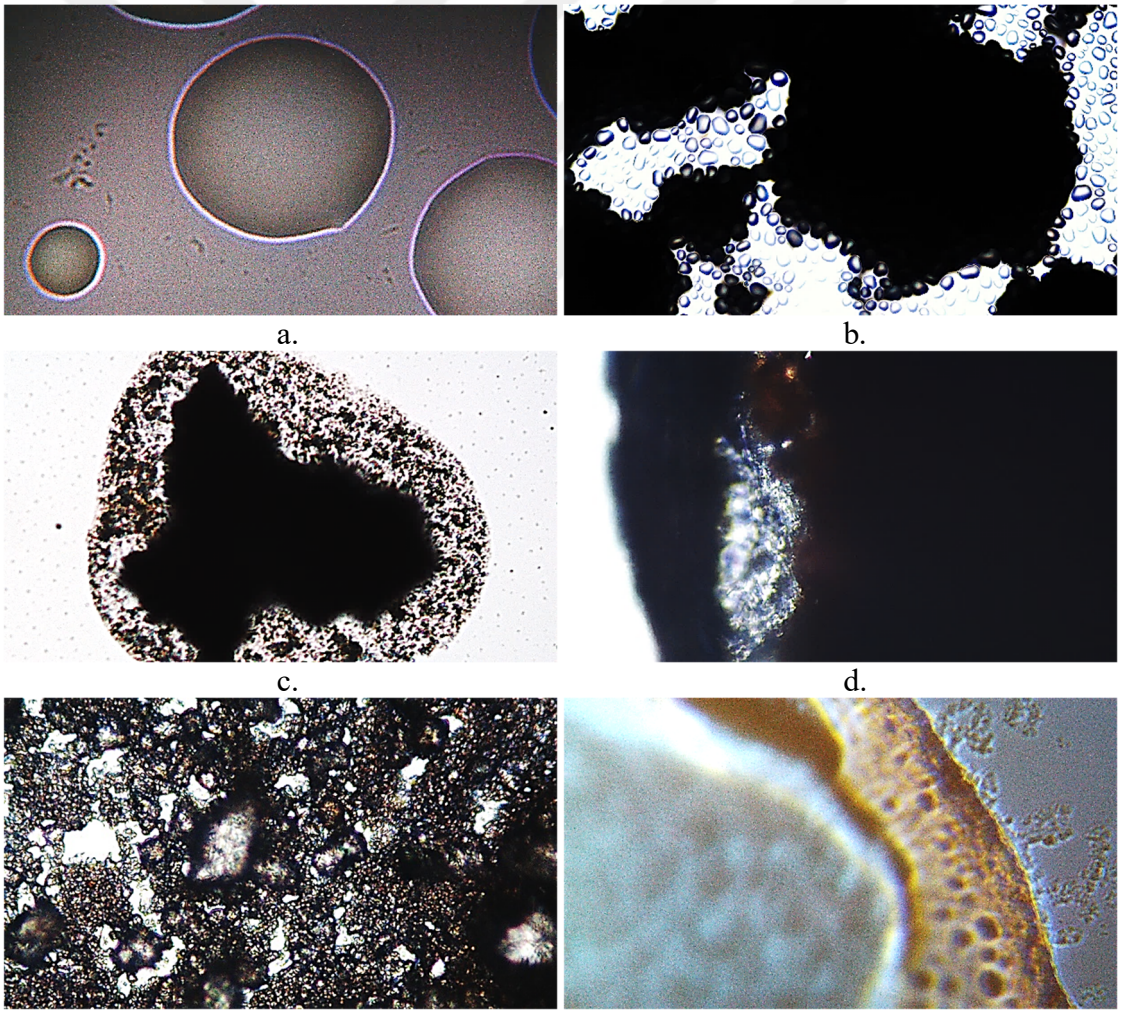
Görsel 6.8. *Donmuş Zemin Numuneleri; a. CL (20x), b. ML (20x) ve c. SP (10x)*

Deneyde kullanılan değişkenler göz önünde bulundurulduğunda donma süresi ve sıcaklık değişiminin buz oluşumlarında ciddi bir farklılığa neden olmadığı görülmüştür. Çünkü deneylerde en az donma süresi seçilen 24 saatte akışkan fazda bulunan tüm sulu kısımlar donmaktadır. Böylece buz - su karışımı evresi aşılarak tamamen donma evresine geçilmektedir. Benzer biçimde sıcaklık değişimi aşamasında da 0 ºC haricinde seçilen sıcaklıkların tümünde su fazı donmaktadır. 0 ºC'de ise donma yeni başladığından buz - su karışımı gözlenmektedir (Görsel 6.9).



Görsel 6.9. *0 ºC'de Buz - Su Karışımları*

Ayrıca donmuş zeminlere ait sırasıyla boşluk buzu, kısmen dolu boşluk, dane yüzeyindeki buz tabakası, bağlantısız boşluktaki buz, topaklaşma ve buz lensi oluşumlarına ait diğer fotoğraflar Görsel 6.10'da verilmiştir.



Görsel 6.10. *Gözlenen Oluşumlar; a. Boşluk Buzu, b. Kısmen Dolu Boşluk, c. Dane Yüzeyindeki Buz Tabakası, d. Bağlantısız Boşluktaki Buz, e. Topaklaşma ve f. Buz Lensi*

6.2. Aşama 2 (Yapay Zemin Dondurma Sistemi İle Çakıl Tipi Zeminden Numune Alma İşlemi)

Yapay zemin dondurma yönteminin, granüler zeminlerde doğal özelliklerini koruyacak biçimde yeni bir numune alma metodu olarak kullanımı amaçlanarak, donma sonrası karot ile numuneler alınmıştır. Alınan karotların doğrulanabilmesi için donmamış granüler zemin kalıp içerisinde dondurulmuş (Shelby ile numune alma işleminin örneklenmesi) ve serbest basınç deneyi uygulanarak donma sonrası değerlendirme yapılmıştır. İlgili aşamaya ait ayrıntılar Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2. *Aşama 2 İçin Deney Verileri*

AŞAMA - 2		
İşlem Adı	**Kalıpta Dondurma İşlemi**	**Donma Sonrası Karot Alma İşlemi**
Zemin Tipi	GP	GP
Süre	4 gün	4 gün
Sıcaklık (ºC)	-15	-25
Numune Sayısı	3	2

6.2.1. Kalıplanan numunelerin donma sonrası değerlendirme işlemi

Yeteri oranda ince malzeme içermeyen granüler zeminlerde, kohezyon bulunmadığından doğal şartları sağlayan örselenmemiş numune alınamamaktadır. Arazideki doğal şartlarda granüler zeminden numune alma işlemini gerçekleştirebilmek için kötü derecelendirilmiş çakıl tipi zeminden 7 cm çapında ve 14 cm yüksekliğinde 3 adet numune hazırlanmış ve tamamen suya doygun hale getirilmiştir (Görsel 6.11). Sonrasında -15 ºC'de 1 gün ön dondurma süresi uygulanmıştır. Numunelerin donmasının ardından üst yüzey taşlanarak düzlenmiş olup, numune çıkarıcı ile kalıptan çıkarılmıştır. Ağırlık ve hacim değerlerinin hesaplanmasının ardından boşluk oranı ortalama 0.84 olarak bulunmuştur.

Görsel 6.11. *Doğal Koşullarda Numune Hazırlama İşlemi*

Hücre içerisinde dondurulan ve 4 gün sonunda ancak -15 ºC'ye düşürülebilen numuneler ile karşılaştırabilmek için, bir önceki adımda hazırlanan numuneler 4 gün boyunca CDF-CIF donma çözülme cihazında -15 ºC'de tutulmuş ve serbest basınç deneyi uygulanmıştır (Görsel 6.12). Bu sistemde hiç örselenme uygulanmadığı göz önünde bulundurulmalıdır.

Görsel 6.12. *Donmuş Numunelerin Göçme Sonrası Durumları*

6.2.2. Yapay donma sonrasında karot ile numune alma işlemi

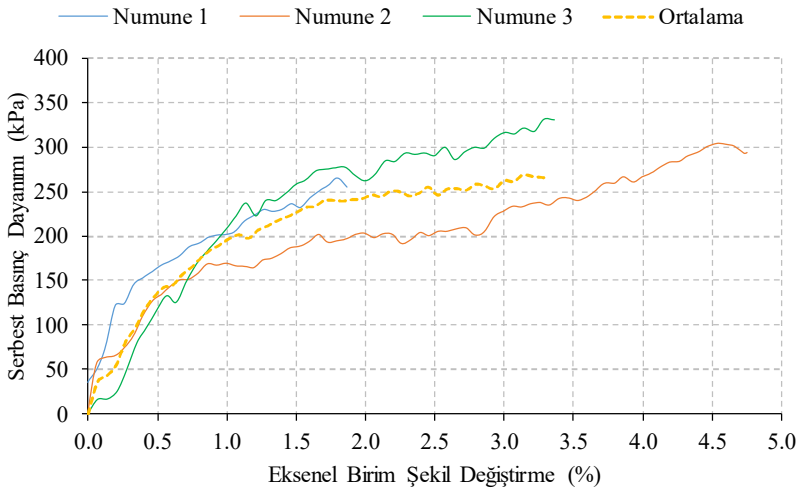
Bir kenarı 50.0 cm uzunluğunda küp hücre, kötü derecelendirilmiş çakıl tipi numune ile doldurulup zemin yüzeyine kadar su eklenmiştir. Sistemin dondurulabilmesi için Görsel 6.13'te görülen 4 adet çift cidarlı dondurucu bakır boru yerleştirilmiş ve -25 ºC hazne sıcaklığında etilen glikol sisteme basılmıştır. 3 farklı kritik bölgeden termometre ile sıcaklıklar alınmıştır. Dış çevreden gelen sıcaklığın yalıtımı için 5 cm kalınlığında xps köpük kullanılmıştır Fakat oda sıcaklığının yüksek olması ve çakıllı zeminde

çalışıldığından dolayı 4 gün sonunda ancak -15 ºC'ye ulaşılabilmiştir. Donmuş zeminden, uygun boyutlarda karotlar alınmıştır. Karot alma işlemi esnasında GP tipi zeminde ince malzeme olmamasına bağlı aşırı örselenme gözlenmiştir. Fakat bu durum gözlenebilecek en olumsuz ihtimali örneklemektedir. Doğal halde ince malzeme oranı yüksek granüler zeminlerde çok daha iyi sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

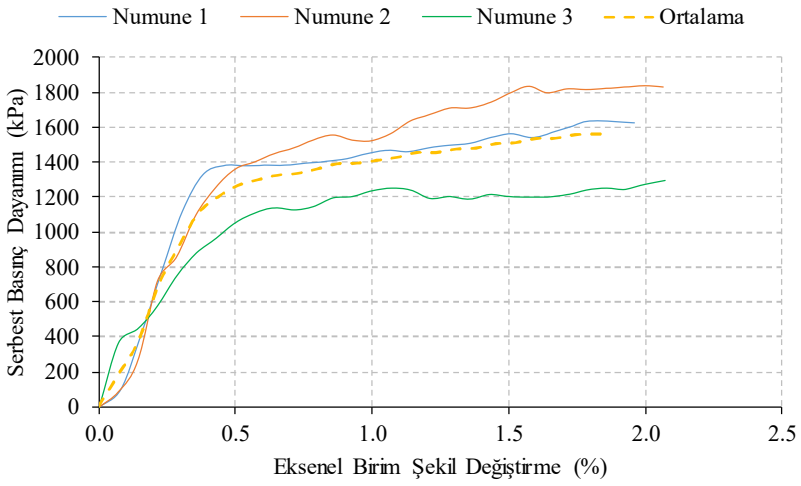
Görsel 6.13. *Donma Sonrası Karot Alma İşlemi ve Serbest Basınç Deneyi*

Şekil 6.10'da serbest basınç deneyinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. CDF/CIF cihazının ani soğutma kapasitene bağlı olarak, haznede bekletilen numunelerin dayanımı, karottan elde edilen numunelerden yaklaşık 6 kat daha fazla çıkmıştır. Buradaki dayanım farkını dört temel sebep ile açıklanabilir. Birinci sebep daha önce de bahsedilen ince malzeme oranının yetersizliğine bağlı olarak, numune içerisinde kohezyon oluşmaması durumudur. Bu yüzden aşırı örselenme meydana gelmektedir. İkinci sebep CDF/CIF donma çözülme cihazındaki numuneler aniden -15 ºC sıcaklığa düşen haznede 4 gün boyunca dıştan içe donma işlemine maruz bırakılmıştır. Yapay zemin dondurma sisteminde boru merkezlerinden dışa doğru gerçekleştirilen dondurma işleminde ise ortam sıcaklığının yüksek olması ve çakıllı zeminlerdeki yüksek geçirgenlik sebebi ile 4

gün sonunda ancak istenilen sıcaklığa düşülebilmiştir. Ancak arazide sonsuz ortamdaki zeminin herhangi bir dondurma cihazına yerleştirilip donduramayacağımızdan YZD sistemi söz konusu numune tipi için ısı kayıpları da göz önünde bulundurularak gerçek şartları yansıtmaktadır. Üçüncü sebep ise granüler malzeme arasındaki boşlukların tamamen su ile dolu olmasıdır. Donma sonrası hacim artışı gösteren su fazı, daneleri birbirinden ayırarak dayanımın olması gerekenden kısmen daha düşük çıkmasına neden olmaktadır. Dördüncü sebep ise karot alınırken kesme işlemi sırasında ortaya çıkan ısıya bağlı dayanım kaybıdır. Dolayısıyla bu 4 koşulla göre numunelerde gözlenen dayanım farkı normaldir.



a.



b.

Şekil 6.10. *Serbest Basınç Deneyi Sonuçları, a. Karot Numuneleri ve b. CDF/CIF Numuneleri*

6.3. Aşama 3 (Yapay Zemin Dondurma Sisteminin İksa Modeli Üzerinde Değerlendirilmesi)

İlgili aşamaya ait ayrıntılar Tablo 6.3'te verilmiştir.

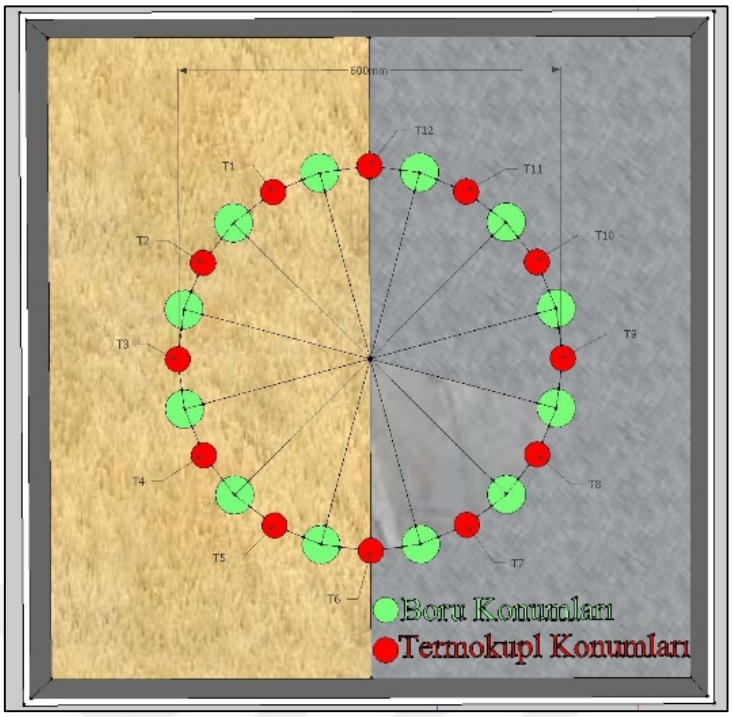
Tablo 6.3. *Aşama 3 İçin Deney Verileri*

	AŞAMA - 3		
SERİ	**1**	**2**	**3**
Zemin Tipi	CL, ML	CL, ML	CL, ML
Sıcaklık (ºC)	-20 ve -200	-20 ve -200	-20 ve -200
Süre (Saat)	3 (azot) ve 24 (antifriz)	3 ve 24	3 ve 24
Boru Malzemesi	Paslanmaz Çelik	Alüminyum	Polietilen
Boru Çapı (mm)	42,00, 28,00, 16,00	50,00, 35,00, 18,75	50,00, 32,00, 20,00
Dondurucu Sıvı	Etilen Glikol, Sıvı Azot	Etilen Glikol, Sıvı Azot	Etilen Glikol, Sıvı Azot
Çevrim	Donma - Çözülme	Donma - Çözülme	Donma - Çözülme
Deney Sayısı	12	12	12
Geçen Süre (Yaklaşık)	30 Gün	30 Gün	30 Gün

6.3.1. Örnek derin kazı modeli

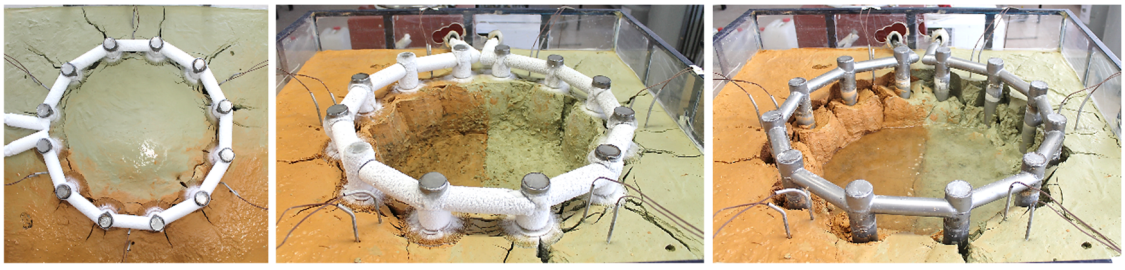
Bu bölümün çıktıları 6. Geoteknik Sempozyumu kapsamında Adana Çukurova Üniversitesi'nde paylaşılmıştır (Evirgen vd., 2015, s. 75). Çalışmaya ek olarak yapılan örnek derin kazı modeli için soğutulan etilen glikol (antifriz) - su solüsyonu, difüzyon pompa yardımı ile dolaşım borularına basılmıştır. Bu modelde sistemin çalışabilirliği değerlendirilmiştir.

42 mm çapındaki dış boru ve 30 mm çapındaki iç boru kullanılarak çift cidarlı paslanmaz çelik borular üretilmiştir. Toplamda 12 adet 600 mm uzunluğunda boru ile 300 mm yarıçapında dairesel borulama sistemi teşkil edilmiştir (Şekil 6.11). Sıcaklık verilerinin eş zamanlı toplanabilmesi amacı ile ilk altısı (T1-T6) kaolin numunesi için diğer altısı da (T7-T12) zeolit numunesi için toplamda 12 adet T tipi ısıölçer kullanılmıştır. 500 mm'lik kısmı zemin içerisine yerleştirilen boruların yatayda ve düşeyde orta noktalarından 30 sn aralıklarla deney boyunca sıcaklık verisi elde edilmiştir (Evirgen vd., 2015, s. 75).



Şekil 6.11. *Örnek Derin Kazı Modeli Yerleşim Planı*
Kaynak: *Evirgen vd., 2015, s. 75*

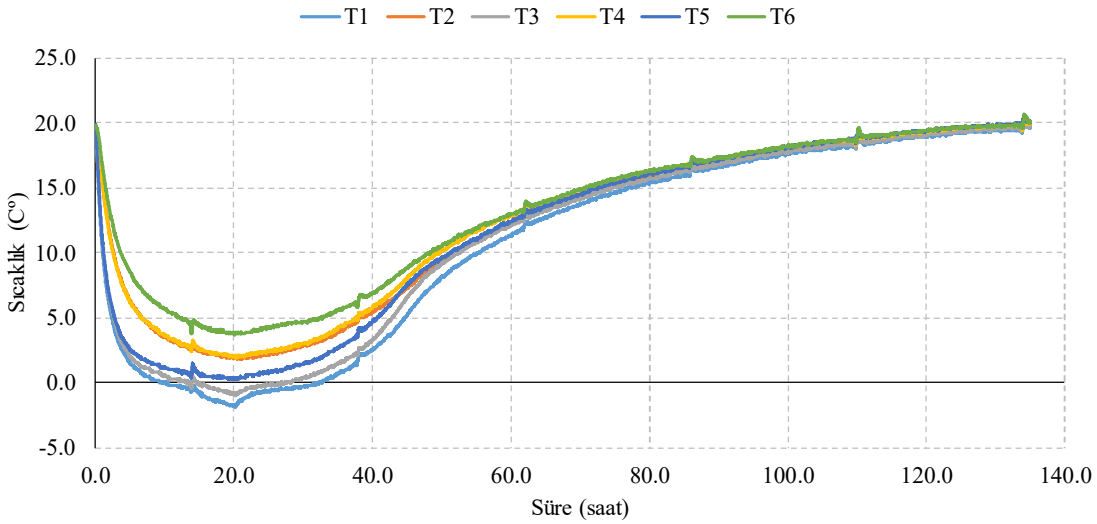
Örnek modelleme için; -10 ºC'ye kadar soğutulan solüsyon 16 saat süresince sisteme iletilmiş ve donma sağlanmıştır (Görsel 6.14a). Sonrasında temsili derin kazı işleminin gerçekleştirilmesi amacıyla, zemin hücresinin orta kısmı kazılmıştır (Görsel 6.14b). Kazının ardından dondurma işlemine 4 saat daha devam edilmiş ve sonrasında solüsyon dolaşımı kesilerek sistem çözülmeye bırakılmıştır (Görsel 6.14c) (Evirgen vd., 2015, s. 75).



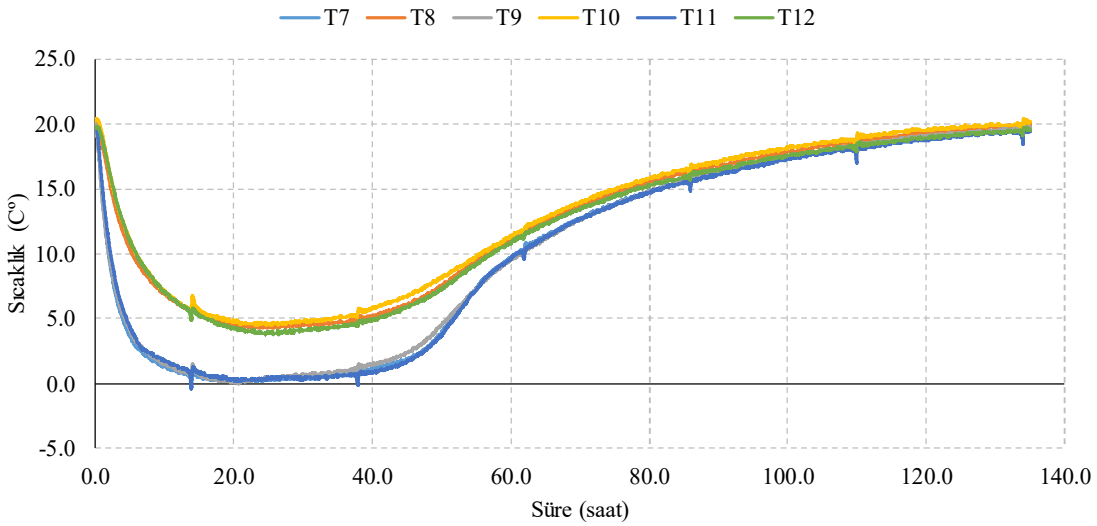
a. b. c.

Görsel 6.14. *a. Donma Süreci (16 saat); b. Donma-Kazı Sonu (20 saat); c. Çözülme Sonu (135 saat)*
Kaynak: *Evirgen vd., 2015, s. 75*

Başlangıçta 20 saat donma işlemi uygulandığında hem CL hem de ML tipi zeminlerde ilk olarak doğrusal sonrasında ise parabolik biçimde sıcaklık düşüşü meydana gelmiştir (Şekil 6.12). Her iki zeminde de ısıölçerler arasında farklılıklar görülmektedir. CL tipi zeminde çözülme daha hızlı olmakla birlikte 115 saat sonunda iki zeminde de yaklaşık olarak oda sıcaklığına ulaşılmıştır. Kazı işlemi sonunda boru çevrelerinde CL tipi zeminde yaklaşık 11 cm ve ML tipi zeminde ise boruların çevresinde yaklaşık 10 cm çapında donmuş kazıklar elde edilmiştir. CL tipi ve ML tipi zeminlerde elde edilen en düşük sıcaklık değerleri sırasıyla -1,9 ºC ve -0,4 ºC'dir. Elde edilen en düşük ortalama değerler ise CL tipi zemin için 0,8 ºC ve ML tipi zemin için 2,3 ºC'dir (Evirgen vd., 2015, s. 75).



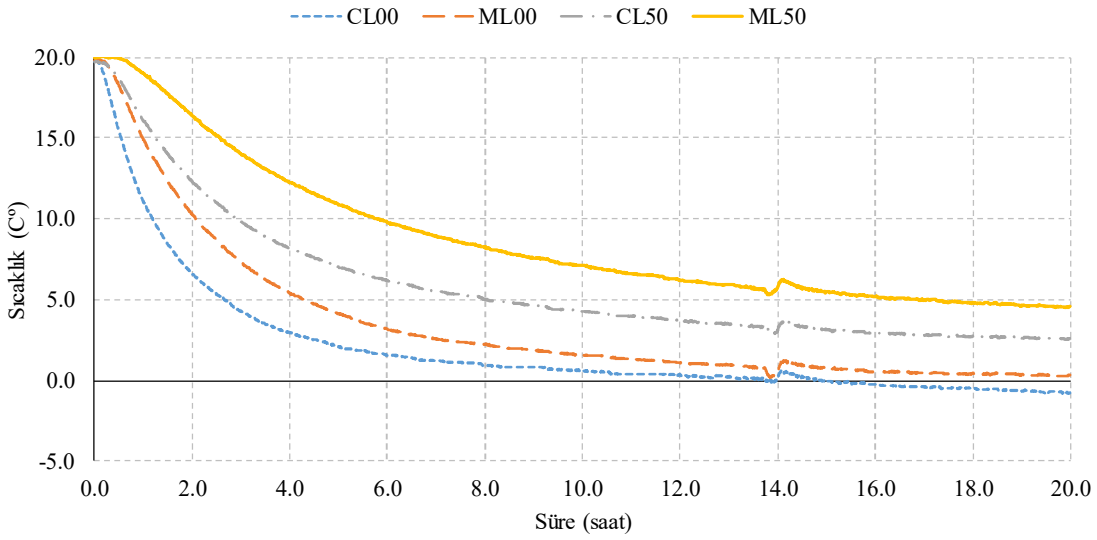
a.



b.

Şekil 6.12. *Örnek Modellemede Elde Edilen Donma - Çözülme Grafikleri; a. CL Tipi Zemin Numunesi, b. ML Tipi Zemin Numunesi*
Kaynak: *Evirgen vd., 2015, s. 75*

Şekil 6.13'te verilen donma değerleri ilk 20 saatte; hem kil hem de silt zemin için ayrı ayrı merkez eksenden alınan üç sıcaklık verisi ile merkezden 50 mm uzaklıktaki yine üç sıcaklık verisinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Merkez eksenden alınan ortalama donma değerleri kil için (CL00) 2,0 ºC olarak gözlenirken, silt için (ML00) 3,5 ºC olarak elde edilmiştir. 50 mm uzaklıktan alınan ortalama donma değerleri ise kil için (CL50) 6,0 ºC ve silt için (ML50) 8,8 ºC olarak belirlenmiştir. 20 saat ile 135 saat arası ortalama çözülme ise merkez eksen değerleri için kilde 12,8 ºC ve silt için 11,6 ºC hesaplanırken, 50 mm uzaklıktaki değerlerde yine kil ve siltte sırasıyla 13,7 ºC ve 13,2 ºC gözlenmiştir. Dolayısıyla, hem merkezde hem dolaşım borularından 50 mm uzaklıkta kil tipi zeminde daha düşük değerler elde edilmiştir. Yani düşük plastisiteli kilde, düşük plastisiteli silte oranla daha hızlı donma ve çözülme meydana gelmektedir (Evirgen vd., 2015, s. 75).



Şekil 6.13. *Örnek Modeldeki Ortalama Sıcaklıklar*
Kaynak: *Evirgen vd., 2015, s. 75*

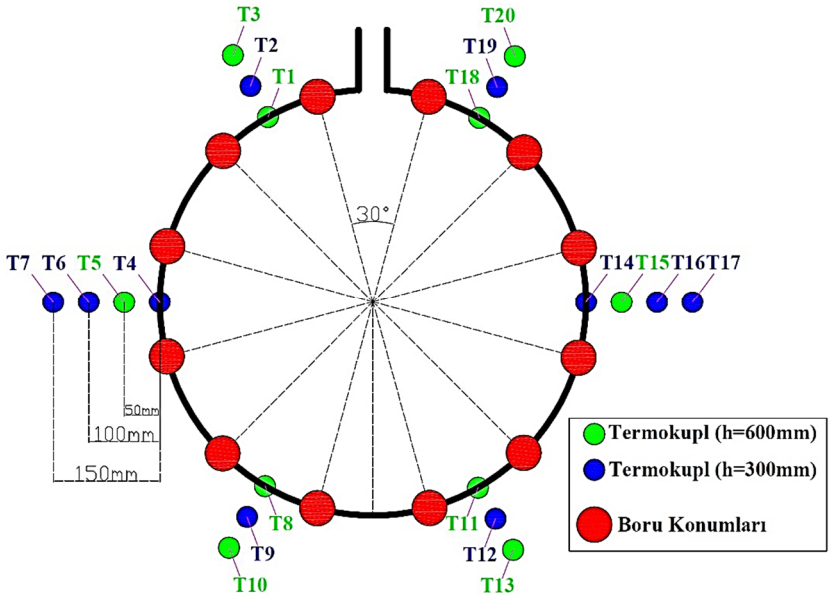
6.3.2. Sistem kurulumu

Arazideki yapay zemin dondurma uygulaması, laboratuvarda ölçekli olarak gerçekleştirilmiştir. 1 m^3 hacme sahip hücre iki kısma ayrılarak iki farklı zemin, tamamen doygun halde kademe kademe yerleştirilmiştir (Görsel 6.15). Çalışma kapsamında killi ve siltli iki farklı zemin; paslanmaz çelik, alüminyum, polietilen olmak üzere 3 farklı boru malzemesi ile değerlendirilmiş olup her bir malzeme için 3 farklı boru çapı kullanılmıştır (Görsel 6.16). Paslanmaz çelik borular sabit biçimde teşkil edilmiş olup alüminyum ve hdpe serilerde deney yapılırken, bu borular paslanmaz çeliğe dıştan giydirme yapılarak uygulanmıştır.

Görsel 6.15. *Zemin Hücresinin Hazırlanması*

Görsel 6.16. *Sabit Paslanmaz Çelik Dolaşım Boruları*

Her bir paslanmaz çelik dolaşım sistemi için 12 adet paslanmaz çelik dolaşım borusu, 600 mm çapındaki dairesel çember üzerine 30 derece açılar ile sabitlenmiştir. Sistemden 10 adet 600 mm boyunda ve 10 adet 300 mm boyunda olmak üzere toplamda 20 adet T tipi ısıölçer ile 30 sn aralıklarla veri toplanmıştır (Şekil 6.14). Deneyler hem etilen glikol (antifriz) hem de sıvı azot dolaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan zemin dondurma cihazı (Görsel 6.17a) etilen glikol solüsyonunun soğutulması için, basınca dayanıklı özel tanklar (Görsel 6.17b) ise sıvı azotun depolanıp sisteme iletilmesi esnasında kullanılmıştır. Sıvı azotun zamanla gaz faza geçmesi, kapalı tank içerisindeki basıncı arttırmaktadır. Bu özellikten faydalanarak, basınç yaklaşık 0,4 bar değerine ulaştığında azot sisteme basılmıştır. Boruları dolaşıp zeminin soğutan sıvı azot, gaz faza geçerek açık havaya bırakılmıştır. Sıvı azotla dondurma sürecinde her aşamada önce sarı kaolin sonrasında ise beyaz zeolit tank basıncı göz önünde bulundurularak 3 saat dondurulduktan sonra 3 saat çözülmeye bırakılmıştır.



Şekil 6.14. *Dolaşım Boruları ve Isıölçerlerin Yerleşim Planı*

Antifriz ile dondurulan serilerde akışkan çıkış sıcaklığı -20 ºC'ye ayarlanarak, ilk 24 saat donma işlemi uygulanmış olup, sonrasında akışkan iletimi kesilip 24 saat daha çözülmeye bağlı sıcaklık verisi toplanmıştır. Ortam sıcaklığının yüksek olması sebebi ile antifriz ile soğutma sırasında, ilk birkaç saatte haznedeki akışkan sıcaklığında dalgalanmalar gözlenmiştir. İlerleyen dondurma sürecinde, zemin dışında kalan dondurucu borular ve bağlantı boruların dış kısmında meydana gelen karlanma sonucunda doğal yalıtım sağlanmış olup sistem dengeye gelmiştir. Sistemdeki ısı kayıpları, ortam sıcaklığı, dondurucu boru çapı ve malzemesine bağlı olarak akışkan dönüş sıcaklıkları deneylerde farklılık göstermektedir. Bu doğrultuda akışkan çıkış sıcaklığının -20 ºC sabit tutulabilmesini sağlamak amacı ile cihaz kapasitesi göreceli artmaktadır. Arazi uygulamasındaki gerçek boyutlu inşaatlarda bu ısı kayıpları maliyeti birincil derecede etkileyen unsurdur. Özellikle dış ortama açık bağlantı borularında ısı yalıtımının yapılması şarttır. Bu yüzden deneylerde cihaz çıkış ve dönüş bağlantı hortumları xps köpük ile yalıtılmıştır.

Donma – çözülme sonrası her aşamada ince daneli zeminler yeniden karıştırılarak tamamen suya doygun hale getirilmiştir. Bu sayede mevcut numunelerle en düşük donmamış zemin dayanımını elde edilmiştir. Yapay zemin dondurma yönteminin bu tip zayıf zeminlerde bile güvenle kullanılabilirliğinin ispatlanmasının ardından, yüksek taşıma kapasitesine sahip zeminlerde daha verimli çözümler sunacaktır.

a.

b.

Görsel 6.17. *a. Zemin Dondurma Cihazı ve b. Sıvı Azot Tankı*

6.3.3. Paslanmaz çelik borulama sistemi sonuçları (Seri 1)

Tasarlanan iksa modeli üzerinde yapay zemin dondurma yönteminin değerlendirilmesi konusunun ilk aşaması olan paslanmaz çelik borulama sisteminin süreye bağlı sıcaklık değişimi sonuçları Ek-1'de verilmiştir. Grafik göstergelerinde CL (kil) ve ML (silt) zeminlerin yanlarında bulunan 0, 5, 10 ve 15 değerleri sıcaklık verilerinin dolaşım borularının eksenine ne kadar mesafeden alındığını belirtmektedir.

Ek 2'de paslanmaz çelik borulama sistemi ile gerçekleştirilen derin kazı modellemesi sürecinde elde edilen donma öncesi, donma sonu ve çözülme sonu durumlarını gösteren şekiller verilmiştir. Donma öncesi durumu henüz sisteme akışkan verilmeden oda sıcaklığındaki stabil suya doygun zemin olmakla birlikte, arazideki normal koşulları temsil etmektedir. Donma sonu olarak tabir edilen durum akışkan tarafından yeteri derecede sıcaklığı düşürülen zeminde donmuş duvar elde edilmekle

birlikte dolaşımın kapatılmış olup, arazide geçici iksanın devreden çıktığı dönemi temsil etmektedir. Donma kabarması bu süreçte meydana gelmektedir. Çözülme sonu durumu ise donmuş zeminin yaklaşık oda sıcaklığına ulaşıncaya kadar çevre sıcaklığına maruz bırakılması hali olmakla birlikte, arazide proje sonunu temsil etmektedir. Çözülme oturması bu süreçte meydana gelmektedir.

6.3.4. Alüminyum borulama sistemi sonuçları (Seri 2)

Tasarlanan iksa modeli üzerinde yapay zemin dondurma yönteminin değerlendirilmesi konusunun ikinci aşaması olan alüminyum borulama sistemi sonuçları Ek-3'te sunulmuştur. Ek 4'te ise alüminyum borulama sistemi ile gerçekleştirilen derin kazı modellemesinde donma çözülme sürecine ilişkin şekiller verilmiştir.

6.3.5. Yüksek yoğunluklu polietilen (hdpe) borulama sistemi sonuçları (Seri 3)

Tasarlanan iksa modeli üzerinde yapay zemin dondurma yönteminin değerlendirilmesi konusunun üçüncü aşaması olan yüksek yoğunluklu polietilen - HDPE borulama sistemi sonuçları Ek-5'te sunulmuştur. Deney sürecinde zeminlerde gözlenen donma çözülme davranışları ise Ek-6'da verilmiştir.

Yapay zemin dondurma sisteminde iksa modelinin değerlendirildiği üçüncü aşamada, merkez eksendeki ısıölçerlerden elde edilen en düşük sıcaklıkların ortalaması alınmıştır. Gözlenen ortalama sıcaklık değerleri Tablo 6.4'te verilmiştir. Burada görüldüğü gibi ortalamada -32,3 ºC değerine kadar düşülmüştür.

Tablo 6.4. *Aşama 3'te Elde Edilen En Düşük Ortalama Sıcaklık Değerleri (ºC)*

	SERİ 1 Paslanmaz Çelik				**SERİ 2** Alüminyum				**SERİ 3** Hdpe			
	Antifriz		Sıvı Azot		Antifriz		Sıvı Azot		Antifriz		Sıvı Azot	
	CL	ML	CL	ML	CL	ML	CL	ML	CL	ML	CL	ML
Büyük Boru*	-5,0	-9,0	0,1	-32,3	2,3	0,9	4,7	3,8	3,8	0,6	5,2	2,6
Orta Boru*	-1,1	-1,7	4,0	-10,5	5,8	1,4	6,7	1,5	3,1	0,8	8,4	6,1
Küçük Boru*	0,8	1,5	11,1	10,8	0,8	-0,7	11,7	11,4	5,1	4,8	14,9	9,7

***Boru çapı detayları için Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'ye bakınız.**

Laboratuvar ortamında 24 saatte elde edilen bu değerlerin arazi şartlarında uygulanabilmesi için birçok faktörün ayrıca değerlendirilmesi gerekir. Bu faktörler aşağıda verilmiştir.

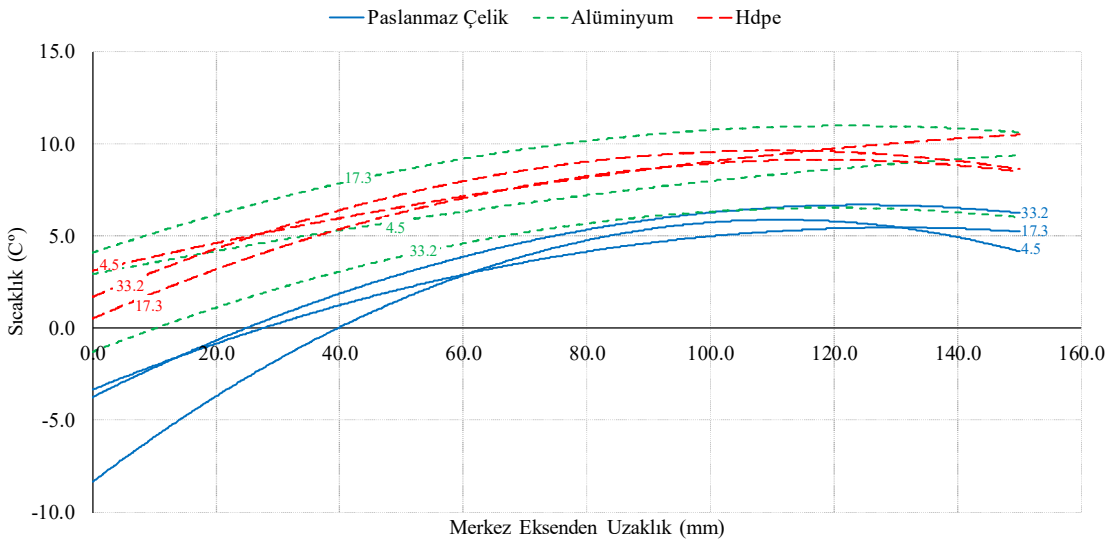
1. Yeraltı su seviyesi
2. Yeraltı suyunun akış hızı ve akifer durumu
3. Yeraltı suyu ile zemin içerisinde bulunan kimyasallar ve tuzlar
4. Farklı jeolojik katmanlar ve ara tabakalar
5. Ön dondurma süresi
6. Soket boyu yatay ve düşeyde farklılık arz etmektedir-
7. Olası sistem kaçakları
8. Yedek ekipman gerekliliği
9. İşçi sağlığı ve iş güvenliği
10. Çevredeki dış kuvvetler

Ayrıca sistemin arazide uygulanabilmesi; logaritmik artan soğutma ihtiyacının karşılanması için verimli ve büyük çaplı makine tasarımı ihtiyacını doğurmaktadır.

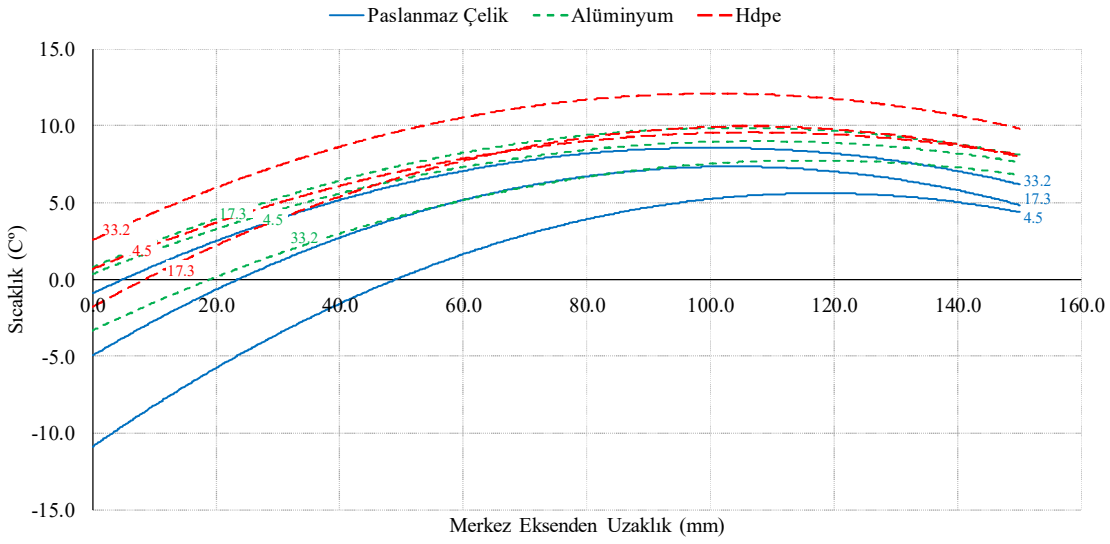
6.3.6. Isıl eğriler

Yapay zemin dondurma sisteminin iksa modeli üzerinde değerlendirilmesini konu alan 3. aşamada, merkez eksenden uzaklığa bağlı olarak sıcaklık değişimini içeren grafikler oluşturulmuştur. Arazideki uygulama şartlarına en uygun sıcaklık değerlerini alabilmek için antifriz dolaşımında CL tipi zeminde Şekil 6.14'te verilen ısıölçerlerden T4-T5-T6-T7'nin sıcaklık verileri kullanılarak, değişkenlere en uygun ve en yüksek doğruluktaki (R^2_{ort}=0,89) polinom dağılımlı eğilim çizgileri oluşturulmuştur (Şekil 6.15a). ML tipi zeminde ise aynı amaçla yine Şekil 6.14'te verilen ısıölçerlerden T14-T15-T16-T17'nin verileri kullanılarak polinom dağılımlı eğilim çizgileri (R^2_{ort}=0,95) oluşturulmuştur (Şekil 6.15b). Merkez eksen dondurucu boruların tam ortasından geçen ve T4 ile T14 ısıölçerlerinin bulunduğu sıfır noktasıdır. Verilerin alındığı bu kritik noktalar, sağ - sol taraflardan da donma işlemine maruz kalarak, dış sıcaklığın en aza indirgendiği ve bu sayede arazi şartlarına en yakın şartların sağlandığı bölümdür. Ayrıca en düşük sıcaklıklar da en verimli olan bu orta bölgelerde görülmektedir. Büyük, orta ve küçük dondurucu boruların, dış boru ile iç boru arasında kalan efektif akış alanı sırasıyla 5,5, 1,4 ve 0,8 cm^2 olarak hesaplanmıştır. Antifriz dolaşımı sırasında sistemde kullanılan basınç (2,5 bar veya kg/cm^2) ve debi (25,0 cm^3/s) değerleri kullanılarak büyük, orta ve

küçük borulama sistemleri için akışkan akış hızları sırasıyla 4.5, 17.3 ve 33.2 cm/s mertebelerinde hesaplanmıştır. Grafiklerde her bir boru malzemesine göre çizilen eğriler üzerinde akış hızları tanımlanmıştır (Boru çapı detayları için Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'ye bakınız).



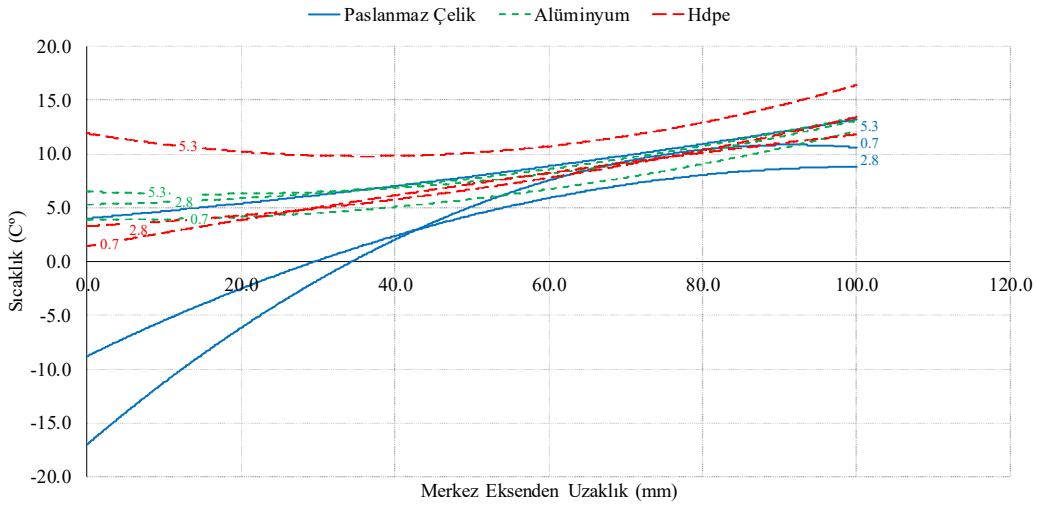
a.



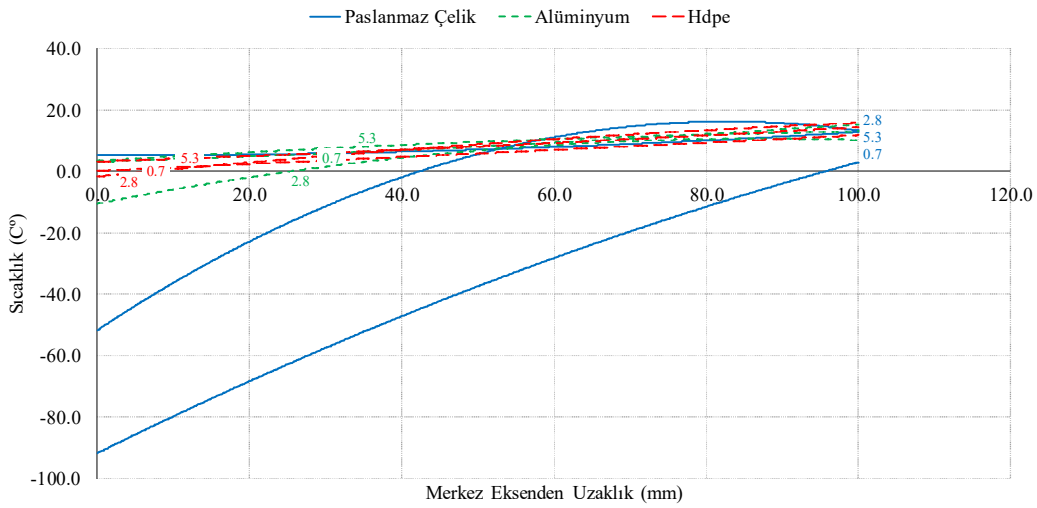
b

Şekil 6.15. *Antifriz Dolaşımı Sonucunda Elde Edilen Merkez Eksenden Uzaklığa Bağlı Sıcaklık Değişimi; a. CL Tipi Zemin ve b. ML Tipi Zemin*

Sıvı azot dolaşımında ise Şekil 6.14'te belirtilen ısıölçerlerden T1-T2-T3 ve T18-T19-T20 sırasıyla CL ve ML tipi zeminlerin grafiklerinin oluşturulmasında kullanılmıştır (Şekil 6.16). Bu noktalar sıvı azota en yakın verilerin alındığı noktalar olmakla birlikte, en düşük sıcaklıkların görüldüğü en verimli bölümlerdir. T1 ve T18 ısılölçerlerinin bulunduğu konumlar sıfır noktalarıdır. Sıvı azot dolaşımında; sistemdeki 0,4 bar basınç ve 4,0 cm^3/s debi değerleri göz önüne alınarak; büyük, orta ve küçük borulama sistemleri için akışkan akış hızları sırasıyla 0,7, 2,8 ve 5,3 cm/s olarak hesaplanmıştır. Grafiklerde her bir boru malzemesine göre çizilen eğriler üzerinde akış hızları tanımlanmıştır (Boru çapı detayları için Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'ye bakınız).



a.



b.

Şekil 6.16. *Sıvı Azot Dolaşımı Sonucunda Elde Edilen Merkez Eksenden Uzaklığa Bağlı Sıcaklık Değişimi; a. CL Tipi Zemin ve b. ML Tipi Zemin*

Dondurucu akışkan, dondurucu boru malzemesi, akışkan hızı (veya boru çapı) ve zemin tipi göz önünde bulundurularak türetilen Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'daki eğrilerin denklemleri aşağıda verilmiştir. Sınır şartları göz önünde bulundurularak, merkez eksene olan mesafeye bağlı sıcaklık değerleri söz konusu denklemlerle hesaplanabilmektedir.

CL tipi zeminde, paslanmaz çelik borulardan antifriz dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0012x^2 + 0{,}2559x - 8{,}355; & V = 4.5\ cm/s \\ -0{,}0005x^2 + 0{,}1352x - 3{,}34; & V = 17.3\ cm/s \\ -0{,}0007x^2 + 0{,}1671x - 3{,}745; & V = 33.2\ cm/s \end{cases} \quad (6.6)$$

CL tipi zeminde, alüminyum borulardan antifriz dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0002x^2 + 0{,}0655x + 2{,}925; & V = 4.5\ cm/s \\ -0{,}0005x^2 + 0{,}1126x + 4{,}08; & V = 17.3\ cm/s \\ -0{,}0006x^2 + 0{,}1311x - 1{,}295; & V = 33.2\ cm/s \end{cases} \quad (6.7)$$

CL tipi zeminde, yüksek yoğunluklu polietilen borulardan antifriz dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0002x^2 + 0{,}0792x + 3{,}11; & V = 4.5\ cm/s \\ -0{,}0006x^2 + 0{,}1462x + 0{,}51; & V = 17.3\ cm/s \\ -0{,}0007x^2 + 0{,}1437x + 1{,}685; & V = 33.2\ cm/s \end{cases} \quad (6.8)$$

ML tipi zeminde, paslanmaz çelik borulardan antifriz dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0012x^2 + 0{,}2803x - 10{,}885; & V = 4.5\ cm/s \\ -0{,}0012x^2 + 0{,}2379x - 4{,}955; & V = 17.3\ cm/s \\ -0{,}001x^2 + 0{,}1899x - 0{,}905; & V = 33.2\ cm/s \end{cases} \quad (6.9)$$

ML tipi zeminde, alüminyum borulardan antifriz dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0008x^2 + 0{,}1611x + 0{,}355; & V = 4.5\ cm/s \\ -0{,}0008x^2 + 0{,}1748x + 0{,}79; & V = 17.3\ cm/s \\ -0{,}0008x^2 + 0{,}1906x - 3{,}32; & V = 33.2\ cm/s \end{cases} \quad (6.10)$$

ML tipi zeminde, yüksek yoğunluklu polietilen borulardan antifriz dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0008x^2 + 0{,}1666x + 0{,}68; & V = 4.5\ cm/s \\ -0{,}001x^2 + 0{,}2212x - 1{,}79; & V = 17.3\ cm/s \\ -0{,}0009x^2 + 0{,}1894x + 2{,}57; & V = 33.2\ cm/s \end{cases} \quad (6.11)$$

CL tipi zeminde, paslanmaz çelik borulardan sıvı azot dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0033x^2 + 0{,}608x - 17; & V = 0.7\ cm/s \\ -0{,}0017x^2 + 0{,}348x - 8.8; & V = 2.8\ cm/s \\ 0{,}0003x^2 + 0{,}064x + 4; & V = 5.3\ cm/s \end{cases} \quad (6.12)$$

CL tipi zeminde, alüminyum borulardan sıvı azot dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} 0{,}0009x^2 - 0{,}006x + 3{,}9; & V = 0.7\ cm/s \\ 0{,}0007x^2 + 0{,}015x + 5{,}3; & V = 2.8\ cm/s \\ 0{,}001x^2 - 0{,}03x + 6{,}5; & V = 5.3\ cm/s \end{cases} \quad (6.13)$$

CL tipi zeminde, yüksek yoğunluklu polietilen borulardan sıvı azot dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0002x^2 + 0{,}128x + 1{,}4; & V = 0.7\ cm/s \\ 0{,}0007x^2 + 0{,}035x + 3{,}3; & V = 2.8\ cm/s \\ 0{,}0016x^2 - 0{,}117x + 11{,}9; & V = 5.3\ cm/s \end{cases} \quad (6.14)$$

ML tipi zeminde, paslanmaz çelik borulardan sıvı azot dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0028x^2 + 1{,}225x - 91{,}7; & V = 0.7\ cm/s \\ -0{,}0099x^2 + 1{,}642x - 51{,}7; & V = 2.8\ cm/s \\ 0{,}0008x^2 + 5{,}2; & V = 5.3\ cm/s \end{cases} \quad (6.15)$$

ML tipi zeminde, alüminyum borulardan sıvı azot dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} 0{,}0005x^2 + 0{,}075x + 3{,}2; & V = 0.7\ cm/s \\ -0{,}0028x^2 + 0{,}485x - 10{,}5; & V = 2.8\ cm/s \\ -0{,}0006x^2 + 0{,}152x + 3{,}4; & V = 5.3\ cm/s \end{cases} \quad (6.16)$$

ML tipi zeminde, yüksek yoğunluklu polietilen borulardan sıvı azot dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} 0{,}00008x^2 + 0{,}108x + 0{,}2; & V = 0.7\ cm/s \\ -0{,}0007x^2 + 0{,}245x - 1{,}7; & V = 2.8\ cm/s \\ 0{,}0003x^2 + 0{,}084x + 3{,}2; & V = 5.3\ cm/s \end{cases} \quad (6.17)$$

Denklemlerde; T sıcaklık, x merkez eksene olan mesafe ve V ise akışkan akış hızı değerleridir.

Mesafeye bağlı sıcaklık denklemleri sayesinde ısıl eğriler çizilmiştir (EK-7). Eksenler merkez eksene olan mesafeyi göstermektedir. Isıl eğrilerde açık mavi kalın çizgi ile belirtilen halka 0 ºC'yi göstermektedir. Dolayısıyla bu noktadan merkeze doğru olan bölüm donmuş silindir kalınlığını vermektedir. Merkez noktadaki lacivert değerler sıfırın altındaki sıcaklıkları, kırmızı değerler ise donmanın gerçekleşmediği sıcaklıkları göstermektedir. En dış halkada ise gözlenen en yüksek sıcaklıklar verilmiştir. Hem

antifriz hem de sıvı azot dolaşımında en verimli dondurma işlemi ısıl iletkenliği en yüksek malzeme olan paslanmaz çelik borulama sisteminde gözlenmiştir. Bu borulama sistemi antifriz dolaşımında 4,5 cm/s ve sıvı azot dolaşımında ise 0,7 cm/s ile en düşük akış hızına sahiptir. Her ne kadar alüminyum ve yüksek yoğunluklu polietilen borulama sistemleri paslanmaz çelik üzerine geçirilerek kullanılsa da daha düşük ısıl iletkenlik değerlerine sahip olduğundan sıcaklık düşüşü daha az miktarda gerçekleşmiştir. Önerilen sıcaklık denklemleri kapsamında antifriz dolaşımında CL tipi zeminde en düşük sıcaklık -8,4 ºC ile 80,4 mm donmuş silindir çapı elde edilmiştir. Yine antifriz dolaşımında ML tipi zeminde en düşük sıcaklık olan -10,9 ºC'de 98,4 mm çapında donmuş silindir oluşmuştur. Sıvı azot dolaşımında CL ve ML tipi zeminlerde en düşük sıcaklık değerleri sırasıyla -17,0 ºC ve -91,7 ºC; donmuş silindir çapları ise 68,8 mm ve 191,7 mm olarak gözlenmiştir. Sunulan ısıl eğriler göz önünde bulundurularak zemin dondurma uygulamasında; zemin tipi, akışkan tipi, akışkan hızı (veya boru çapı) ile boru malzemesi değişkenlerinin her birinin kendisine has sıcaklık parametrelerinin ısı iletimine etkileri incelenerek uygun tasarım seçilebilecektir.

7. PATENT BAŞVURUSU - 1: "GRANÜLER ZEMİNLERDE ÖRSELENMEMİŞ NUMUNE ALICI"

1403F079 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi ile desteklenen bu tezin ilk bölümü kapsamında tasarlanan ve "Granüler Zeminlerde Örselenmemiş Numune Alıcı" olarak adlandırılan buluş için 2016 yılı içerisinde Anadolu Üniversitesi adına patent başvurusunda bulunulmuştur (Evirgen vd., 2016, Türkiye Patent Enstitüsü, Referans No: 15602/55). Buluş modeli için de ayrıca tasarım başvurusunda bulunulmuştur. Bu bölümde buluş ile ilgili kısa bir açıklama yapılmıştır.

Buluşun ilgili olduğu teknik alan: Buluş, geoteknik mühendisliği alanında, yapay zemin dondurma sistemi ile örselenmemiş numune alınmasına olanak sağlayan granüler zeminler için örselenmemiş numune alıcı ile ilgilidir. Buluş özellikle, arazide doğal şartlarını bozmadan granüler zeminlerde (kum ve çakıl ağırlıklı zeminlerde) örselenmemiş numune alınmasına olanak sağlayan, soğutma ünitesi, gaz iletim boruları, gaz dağıtım çemberi, çarıklı uç boruları, uç bağlantı kılcalları ve gaz tahliye - dolum vanasını içeren örselenmemiş numune alıcı ile ilgilidir.

Tekniğin bilinen durumu: SPT (Standart Penetration Test), Shelby tüpü ve gözlem çukurları arazide uygulanan numune alma yöntemleri olarak bilinmektedir. SPT ile arazide zemin tabakalarının dayanımına ilişkin ön bilgi elde edilmesinin yanı sıra deneylerin yapılabilmesi için örselenmiş numune elde edilmektedir. Zemin yüzeyine yakın bölgelerde açılan gözlem çukurlarından da ayrıca örselenmiş numune temin edilmektedir. Örselenmemiş numune alınabilmesi için fazladan herhangi bir darbe etkisi uygulanmadan Shelby tüpünün zemine penetrasyonu sağlanmaktadır. Bu sayede doğal özelliklerini bozmadan zemin numunesi elde edilebilmektedir. Fakat numune alma metodu sadece kohezyonlu yani killi zeminlerde uygulanabilmektedir. Yeterince bağlayıcı malzeme bulunmayan, diğer bir deyişle kil içeriği az veya hiç olmayan kumlu - çakıllı zeminlerde ise örselenmemiş numune alma metodu bulunmamaktadır. Bunun yerine örselenmiş numuneler kullanılarak laboratuvar ortamında bazı kabullerle yeniden numune üretilmektedir. Üç eksenli basınç deneyi öncesinde hücre basıncı ile numune desteklenerek, granüler danelerin birbirlerini taşıması sağlanmaktadır. Granüler zeminlerde standart tek eksenli basınç deneyi ise gerçekleştirilememektedir. Dolayısıyla bu şekilde üretilen granüler numuneler üzerinde yapılan deneylerin gerçek değerlerden saptığı bilinmektedir. Böylece daha yüksek güvenlik sayıları kullanılarak, aşırı tasarımlar yapılmakta olup gereğinden fazla maliyetler ortaya çıkmaktadır.

Buluşun amacı: Buluşun en önemli amacı, laboratuvar ortamında numune hazırlama süreci gerekmeyecek ve bu süreçte numune üzerinde ayrıca meydana gelecek örselenme ile bozulma davranışları engelleyerek granüler zeminlerden doğal şartlarda örselenmemiş numune alınmasına olanak sağlamasıdır. Buluş sayesinde tamamen yeni bir teknik ve ekipmanla granüler zeminlerden örselenmemiş numune alınmasına olanak sağlanacaktır. Alınan numunelerden elde edilen mekanik ve fiziksel özellikler, zemine ait gerçek değerleri yansıtmış olacaktır. Donmuş halde çıkarılan numuneler direkt olarak serbest basınç deneyine tabii tutulabilecektir. Zeminin donması için gereken ön dondurma süresi ise buluşun dezavantajı olarak değerlendirilebilir. Donma işlemi sırasında meydana gelen hacim artışı da ayrıca değerlendirilmelidir.

7.1. Detaylar

Şekil 7.1'deki çizimde buluş konusu sistemin genel görüntüsü, Şekil 7.2'de gaz dağılım mekanizması ve Şekil 7.3'te yerleştirme aparatının çizimleri verilmiştir. Şekiller üzerindeki referans numaralarının tanımları ve sistemin arazideki uygulama aşamaları aşağıda sıralanmıştır:

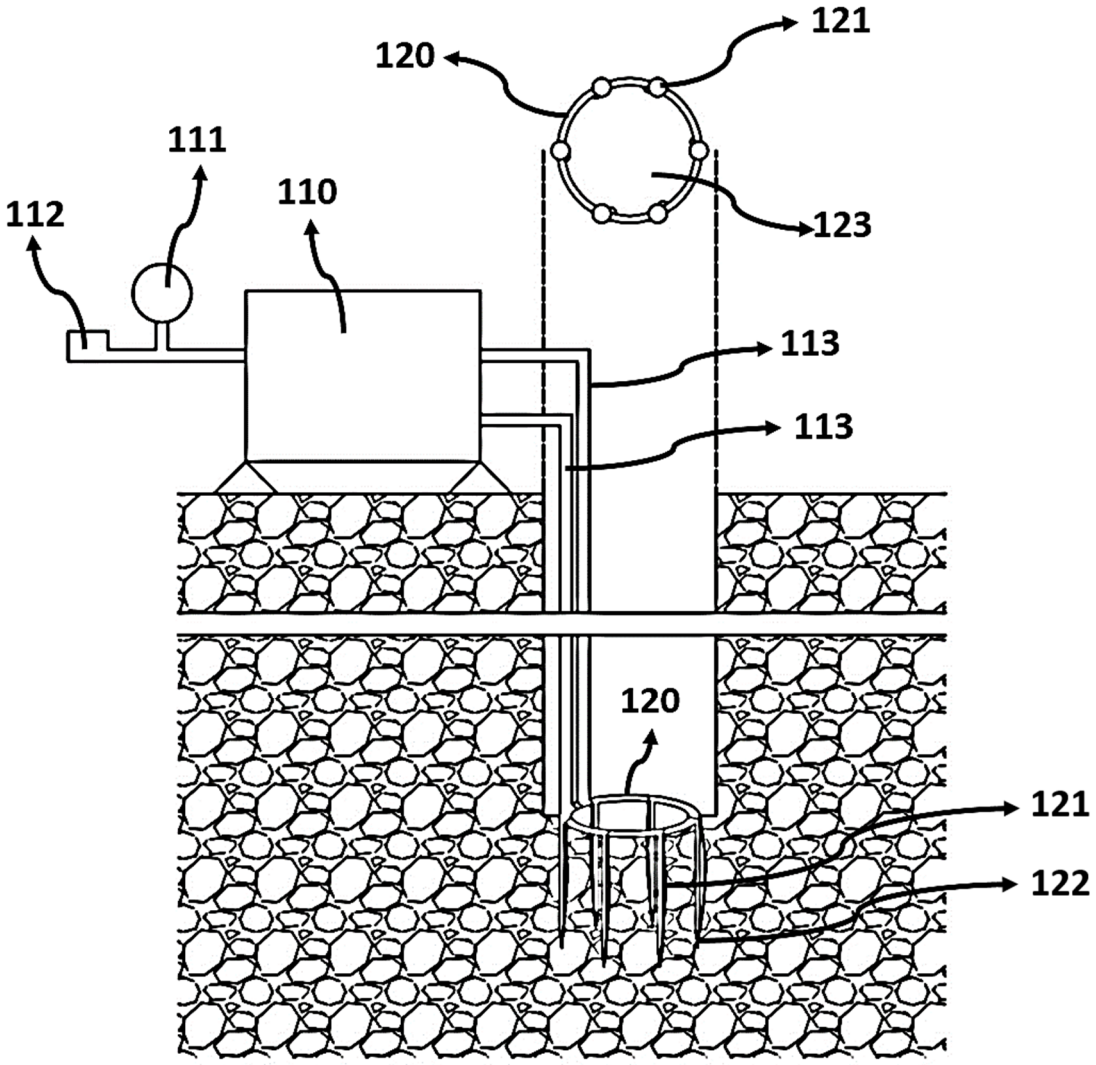
- **Numune Alıcı (100):** Buluş konusu numune alıcı (100) granüler zeminlerden örselenmemiş örnek alımını, zemini dondurarak gerçekleştirmektedir. Buluş konusu numune alıcı (100), zeminin tamamını değil gaz iletim borusunun (113) çapı kadar alanı dondurmaktadır. Bu sayede örnek alımından önce dondurma işlemi gerçekleşmekte ve numune örselenmemektedir. Buluş konusu numune alıcı (100) genel hatları ile soğutma ünitesi (110) gaz iletim boruları (113) gaz dağıtım çemberi (120), çarıklı uç boruları (121), uç bağlantı kılcalları (122) ve gaz vanası (112) bileşenlerinden oluşmaktadır.
- **Soğutma Ünitesi (110):** Soğutma Ünitesi; kompresör, kondanser (yoğuşturucu), drayer (filtre), ve evaporatör (buharlaştırıcı) bölümlerini içermektedir. Soğutma ünitesi içerisinde yoğunlaştırılarak sıcaklığı düşürülen soğutucu akışkan, gaz iletim borularına gönderilmektedir. Genellikle Freon gazı soğutucu akışkan olarak tercih edilmektedir.
- **Basınç Sensörü (111) ve Gaz Vanası (112):** Gaz vanası, numune alımı öncesinde sisteme soğutucu gaz eklenmesi veya sistemin sökülmesinden önce dolaşan gazın tahliyesinin yapılmasını sağlamaktadır. Ayrıca gaz basıncını gösteren basınç sensörü de bulunmaktadır. Basıncın azalması durumunda soğutma işlemi efektif

olmayacağından, gaz vanasından gaz dolumu gerçekleştirilmekte, basıncın yükselmesi durumunda ise sistemden gaz tahliye edilmektedir.

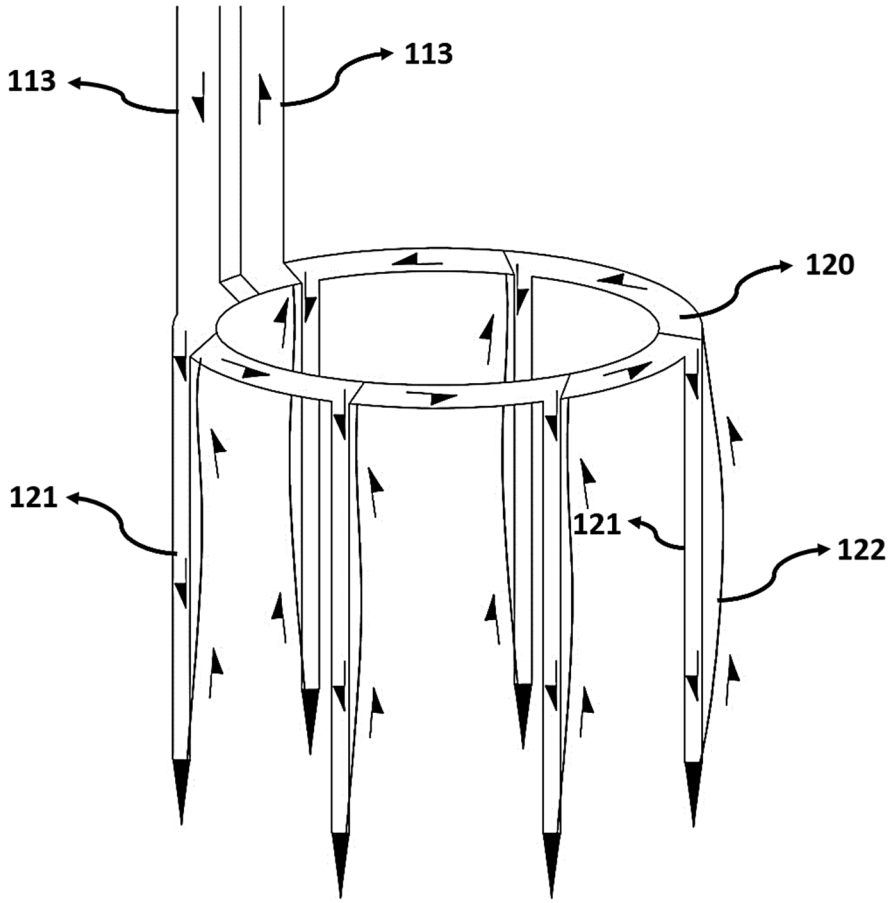
- **Gaz İletim Borusu (113):** Gaz iletim boruları, soğutma ünitesinden çıkan soğutulmuş akışkanın gaz dağıtım çemberine iletilmesini ve gaz dağıtım çemberinden gelen ısınmış akışkanın tekrar soğutma ünitesine iletilmesini sağlayan borulardır. Yüksek yoğunluklu polietilen borulardan üretilmesi ısı kayıplarını en aza indirgemektedir. Bu gaz iletim borularının dışına yapılacak harici yalıtım ile verimlilik arttırılabilmektedir. Borular 1,5 m standart sondaj tiji uzunluğunda üretilerek uç uca eklenmekte ve istenilen derinlikten numune alınabilmektedir. Gaz iletim boruları, birleşimlerinde sızdırmaz contalar bulunmaktadır.
- **Gaz Dağıtım Çemberi (120):** Gaz dağıtım çemberi, çarıklı uç borularının zemine sabitlenmesi sürecinde yeterince dayanıma sahip olması gerektiğinden, yeterli debide akışkan iletimini sağlayacak çapta içi boş paslanmaz çelikten üretilmektedir. Çelik dışında dayanımı yüksek diğer metallerde kullanılarak üretim yapılabilmektedir. Gaz dağıtım çemberinin, iç çapı dondurma işlemi sonrasında karotiyerin numune almasına olanak sağlayacak genişliktedir. Soğutulmuş akışkan gaz dağıtım çemberinin giriş kısmından çarıklı uç borularına iletilmektedir. Burada zemini soğutan akışkan, sıcaklığı yükselmiş halde uç bağlantı kılcalları ile tekrar gaz dağıtım çemberine iletilmekte ve gaz dağıtım çemberi çıkışından gaz iletim borularına, buradan da soğutma ünitesine gönderilmektedir. Ayrıca karot işlemi için yeni bir ekipmana gerek kalmadan, donma sonrasında gaz dağıtım çemberi ortasında bulunan karot boşluğundan halihazırda sondaj makinelerinde bulunan karotiyer ile donmuş numune alınması mümkündür.
- **Çarıklı Uç Borusu (121) ve Uç Bağlantı Kılcalı (122):** Çarıklı uç boruları, yeterli cidar kalınlığına sahip içi boş paslanmaz çelikten mamul boruların uç kısımlarına içi dolu konik metallerin sabitlenmesi ile elde edilmektedir. Çelik dışında dayanımı yüksek diğer metallerde kullanılarak da üretim yapılabilmektedir. Çarıklı uç boruları sayesinde zemine penetrasyon kolaylıkla gerçekleştirilmektedir. Gaz dağıtım çemberinden gelen soğutulmuş akışkan çarıklı uç borularının içerisinden geçerek zemini soğutmaktadır. Çarıklı uç borularının, gaz dağıtım çemberine bağlantısı kaynak, kelepçe veya dişli bağlantı

ile yapılabilmektedir. Bağlantı bölgelerinde sızdırmaz contaların bulunmaktadır. Çarıklı uç borularında ısınan ve tamamen gaz hale dönüşen akışkan uç bağlantı kılcalları ile gaz dağıtım çemberine iletilmektedir. Bu sayede soğutma ünitesinde yapılan soğutma işlemi küçük oranda burada da gerçekleştirilmektedir. Uç bağlantı kılcallarının çarıklı uç boruları ve gaz dağıtım çemberine sabitlenmesi kaynak, kelepçe veya dişli bağlantı ile yapılabilmektedir. Bağlantı bölgelerinde sızdırmaz contalar bulunmaktadır.

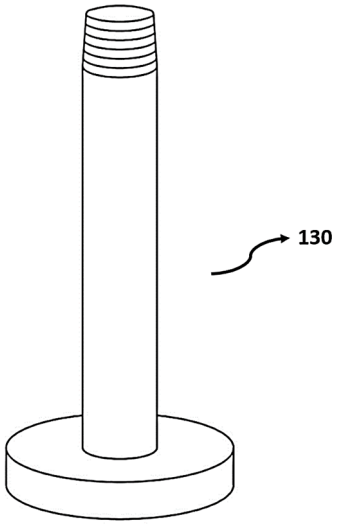
- **Karot Boşluğu (123):** Dondurma işlemi sonucunda karotiyer ile numune alınacak net donmuş bölge olarak tanımlanmaktadır.
- **Yerleştirme Aparatı (130):** Yerleştirme aparatı, gaz dağıtım çemberi ve buna bağlantılı çarıklı uç borularını sondaj deliğinde istenilen derinliğe itmek için kullanılmaktadır. Uç kısmı yeterli mukavemete sahip rijit dairesel çelik plakadan üretilen yerleştirme aparatının, diğer kısmı da sondaj makinesi tijine sabitlenmek için uygun dişli biçiminde üretilmektedir. Dairesel çelik plaka gaz dağıtım çemberine sabitlendikten sonra, gaz iletim borularını engellemeyecek biçimde zemin dayanıma göre kuyu yüzeyinden SPT çekici, harici şahmerdan veya sadece sondaj makinesinin itme kuvveti ile dinamik etki sağlanarak çarıklı uç boruları zemine itilmektedir. Çarıklı uç boruları istenilen derinliğe indirildikten sonra yerleştirme aparatı kuyudan çıkarılmaktadır. Bu sayede ön kısmı açılan karot boşluğundan donma sonrasında karotiyerle numune alınmaktadır. Örselenmemiş numune alımının ardından sistem çözülmeye bırakılmaktadır. Gaz dağıtım çemberi, gaz iletim boruları sayesinde kuyudan çıkarılmaktadır. Yüksek mukavemetli zeminlerde gaz iletim borularının kuvveti, ekipmanı zeminden çıkarmaya yetmeyeceğinden; sistemi kuyuya indirmeden, gaz dağıtım çemberine sabitlenen halatlar işlem sonrasında gaz dağıtım çemberi ve bağlı elemanları kuyudan çıkarmak için kullanılabilmektedir.



Şekil 7.1. *Buluş Konusu Sistemin Genel Görüntüsü*
Kaynak: *Evirgen vd., 2016, Türkiye Patent Enstitüsü, Referans No: 15602/55, Şekil 1*



Şekil 7.2. *Buluş Konusu Sistemin Gaz Dağılım Mekanizması*
Kaynak: *Evirgen vd., 2016, Türkiye Patent Enstitüsü, Referans No: 15602/55, Şekil 3*



Şekil 7.3. *Yerleştirme Aparatı Detayı*
Kaynak: *Evirgen vd., 2016, Türkiye Patent Enstitüsü, Referans No: 15602/55, Şekil 4*

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER: YAPAY ZEMİN DONDURMA YÖNTEMİ

Tezi birinci bölümü kapsamında; yeni nesil derin kazı ve destek sistemi olarak tercih edilen, fakat ülkemizde henüz uygulaması bulunmayan yapay zemin dondurma yönteminin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Tez kapsamındaki sonuçlar, dört temel başlık altında önerilerle birlikte aşağıda verilmiştir.

8.1. Laboratuvar İçin Yapay Zemin Dondurma Cihazı Tasarımı

Soğutucu akışkan (tuz çözeltileri, antifriz) dolaşımı ile zemini -40 ºC'ye kadar soğutması amacıyla tamamen özgün zemin dondurma cihazı tasarlanmıştır.

- Ana cihaz 1 Hp gücünde besleme motoru (kompresör), yoğunlaştırıcı, fan, likit tutucu, likit deposu, serpantin, soğutma haznesi, difüzyon pompa, dolaşım boruları ve bağlantı elemanlarından oluşmaktadır.
- Ek cihaz ise 2 Hp kompresör, yoğunlaştırıcı ve fan motoru, likit deposu, emiş hattı vanası, basınç hattı vanası, genişleme valfi, kurutucu, serpantin, kumanda panosu ve dijital termostat elemanları ile paket grup olarak temin edilerek ana cihaza montajı gerçekleştirilmiştir.
- Akışkan iletimi için düşük sıcaklığa ve korozyona dirençli termoplastik esaslı elastomer maddeden üretilen difüzyon pompa kullanılmıştır. Pompa basınçlı hava ile çalışmakta olup sabit debide akış sağlamaktadır.
- Haznede istenilen sıcaklığa kadar soğutulan antifriz çözeltisi difüzyon pompa yardımı ile dolaşım borularına iletilmektedir.
- Çözelti; gerekli sayı, çap, boy ve aralıklarla yerleştirilen boruları dolaşarak tekrar hazneye dönmektedir.
- Sistem antifriz ile yapay zemin dondurma aşamasında ve granüler malzemeden donma sonrası karot alınması aşamasında kullanılmıştır.

8.2. Laboratuvar Sonuçları (1. Aşama)

Düşük plastisiteli kil (CL), düşük plastisiteli silt (ML) ve kötü derecelenmiş kum (SP) olmak üzere 3 farklı özellikteki zemin seçilerek; ani çözülme etkisi altında su muhtevası, sıcaklık değişimi ve donma süresi parametrelerinin donmuş numunelerin taşıma kapasitesi ve birim şekil değiştirme değerlerine etki incelenmiştir. Bu aşamada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Killi numunelerde optimum su muhtevasında en yüksek dayanım gözlenirken, siltli ve kumlu numunelerde ise optimum su muhtevasından %10 düşük su içeriğinde daha yüksek dayanım elde edilmiştir.
- Boşlukların tamamen su ile dolu olması durumunda donma kabarması oluşumu daneleri birbirinden ayırmaktadır. Daha düşük su muhtevası değerlerinde donma sonucundaki hacim artışı boşluklarda sönümlenmektedir. Diğer bir ifadeyle, daneler arasındaki boşluklarda tamamen su yerine kısmen hava olması durumunda buz fazına geçen su, hava bulunan kısımlara göç etmektedir. Böylece buz, daneleri birbirinden uzaklaştırmamaktadır. Diğer taraftan, kilin kimyasal yapısından dolayı; boşluk suyu, dane yüzey suyu ve dane tarafından emilen su komple donma işlemine maruz kalarak, optimum su muhtevası değerinde zeminin tamamının hacimsel genişlemesine yol açmaktadır.
- Su muhtevasının azalması ile aynı yükleme mertebelerinde daha düşük şekil değiştirme değerleri gözlenmiştir. Sıvı azota maruz bırakılan kil, silt ve kum numuneleri için sırasıyla 3,1, 7,0 ve 24,7 MPa serbest basınç dayanımı elde edilmiştir. Özellikle kumlu numunedeki dayanım değeri ciddi oranda yüksektir. Bu değerler yapay zemin dondurma yönteminin geçici kazı destekleme çalışmalarında güvenle kullanılabileceğinin kanıtı olarak sunulabilir.
- Oda sıcaklığında 0,16 MPa serbest basınç dayanımına sahip kil numunesinde 0 ºC'de yaklaşık 2 kat ve -20 ºC'de yaklaşık 7 kat daha yüksek dayanım gözlenmiştir. Numunenin sıvı azot ile dondurulması durumunda dayanım yaklaşık 21 kat artarak 3,5 MPa değerine ulaşmıştır. Silt numunelerinde normal şartlarda 0,13 MPa olan dayanım, sıcaklığın 0 C'ye düşürülmesi sonrasında değişmemesine rağmen -20 C'de yaklaşık 10 kat artmıştır. -200 C'de dayanım yaklaşık 31 kat artarak 4,0 MPa değerine kadar yükselmiştir.
- Kum numunelerde -5 C'de 0,7 MPa olan serbest basınç dayanımı, -20 C'de sadece 1,9 MPa değerine çıkabilmiştir. Fakat sıvı azot uygulanan donmuş kum numunelerinin dayanımı yaklaşık 23 kat artmıştır. Bu dayanım C23 beton dayanımına eşdeğerdir.
- Çalışmadaki ince daneli zeminlerde normal şartlarda numunenin orta kısmındaki şişme sonucu meydana gelen fıçılanma davranışı, donmuş

numunelerde alt ve üst kısımlarda yayılma biçimine dönüşmüştür. Buna bağlı olarak, ani sıcaklık artışına maruz kalan donmuş zeminlerde, artışın meydana geldiği bölgelerde buz fazının buz lensi veya suya dönüşmesi sonucu mukavemet kaybı meydana gelmektedir. Sıvı azot uygulanan numunelerde beton benzeri eksenel çatlaklar meydana gelmiştir.

- Killi ve siltli numunelerde donma süresi artışı ile dayanım doğru orantılı olmakla birlikte, kumlu numunelerde -20 ºC'de donma süresinin artması ile dayanım düşmüştür. Bu durum kritik sıcaklıklarda, donma sonucu hacim artışının zemin yapısında meydana getirebileceği olumsuz bir etki olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Diğer taraftan, -20 ºC'deki numunelerin sertleşme davranışı ispatlanmıştır.
- Tasarım sürecindeki dayanım kriterleri belirlenirken nihai dondurma sıcaklığına dikkat edilmelidir. Genel olarak ince daneli numunelerde -20 ºC'de donma süresi değişiminin yer değiştirme değerlerinde ciddi bir etkisi bulunmamaktadır. Fakat -200 ºC'deki numunelerde yaklaşık 4 kat birim şekil değiştirme düşüşü görülmüştür. Kumlu numunelerde ise her iki sıcaklıkta da birim şekil değiştirme değerleri dondurma süresinden bağımsız biçimde % 2,5 ile 3,0 arasında değişmektedir.
- Siltlerin hassas donma duyarlılığının bir sonucu olarak, killi numuneler siltli numunelere kıyasla çözülmeye karşı daha dayanıklı olduğu görülmüştür.
- Sıvı nitrojen kullanımı ile donmamış düşük taşıma kapasitesine sahip numunelerin serbest basınç dayanımı 40 kata kadar arttırılmıştır.
- Ayrıca bu aşamada, donmuş numuneler mikroskopta incelenerek; buz - su karışımı, boşluk buzu, kısmen dolu boşluk, dane yüzeyindeki buz tabakası, bağlantısız boşluktaki buz, çekirdeklenme, topaklaşma, buz kristali ve buz lensi oluşumları gözlenmiştir (Görsel 6.6 - 6.10). Görüntülerde silt ve kil tipi numunelerin kendine has ince daneli yapıları görülürken, kum tipi numunede danelerin kristal yapısı ön plandadır. İnce daneli zeminlerde donmamış danelerin çevresindeki düz geçişler, donma sonrasında keskin bir yapıya dönüşmektedir. Kısmen suya doygun numunelerde, doğal olarak kısmi buz dolu boşluklar elde edilmiştir. Çekirdeklenmenin başlangıcı olarak kabul edilebilecek bu oluşumlar kapsamında, danelerin dış çeperlerinde buz tabakaları oluşmaya başlamaktadır. Kumlu numunede ise diğerlerinden

tamamen farklı biçimde, dane yüzeylerinde uzun kristaller meydana gelmektedir.

- Yapay zemin dondurma uygulamasında ani sıcaklık değişimleri veya beklenmedik koşullar oluşması durumunda, muhakeme yapılabilmesi için ilgili sonuçlar güvenle kullanılabilecektir.

8.2.1. Taşıma kapasitesi denklemleri

- *Optimum ile %10 düşük ve %10 yüksek su muhtevası sınır şartları dahilinde 24 saatlik donma süresi sonunda* **su muhtevası değişimine bağlı taşıma kapasitesi hesabı** için aşağıda verilen denklemler önerilmiştir.

$$T = -20\,℃ \Longrightarrow q_u = \begin{cases} -0{,}009\omega^2 - 0{,}0094\omega + 1{,}1095; & CL\ tipi\ zemin \\ -0{,}0031\omega^2 - 0{,}0765\omega + 1{,}2937; & ML\ tipi\ zemin \\ 0{,}0016\omega^2 - 0{,}0532\omega + 1{,}9034; & SP\ tipi\ zemin \end{cases} \quad (8.1)$$

$$T = -200\,℃ \Longrightarrow q_u = \begin{cases} -0{,}021\omega^2 - 0{,}1129\omega + 3{,}4739; & CL\ tipi\ zemin \\ 0{,}0049\omega^2 - 0{,}2568\omega + 3{,}9922; & ML\ tipi\ zemin \\ 0{,}0176\omega^2 - 0{,}0308\omega + 22{,}607; & SP\ tipi\ zemin \end{cases} \quad (8.2)$$

Burada; q_u serbest basınç direnci veya taşıma kapasitesi, ω su muhtevası ve T ise sıcaklık değerini belirtmektedir. Denklemlerde su muhtevası değeri olarak; optimum su muhtevası için 0.0 sayısı tanımlanmıştır. Su muhtevasının artan değerleri için en fazla "10" sayısı tanımlanmakla birlikte bu değer optimum su muhtevasının %10 fazlasına karşılık gelmektedir. Su muhtevasının azalan değerleri ise yine en düşük "10" sayısı tanımlanarak, optimum su muhtevasının %10 düşük değerini temsil etmektedir.

- *Optimum su muhtevasında 24 saatlik donma süresinde* **sıcaklık değişimine bağlı taşıma kapasitesi hesabı** için aşağıda verilen denklemler önerilmiştir.

$$0℃ \leq T \leq -200℃ \Longrightarrow q_u = \begin{cases} 0{,}015(-T) + 0{,}5015; & CL\ tipi\ zemin \\ 0{,}0176(-T) + 0{,}5294; & ML\ tipi\ zemin \\ 0{,}1127(-T) + 0{,}054; & SP\ tipi\ zemin \end{cases} \quad (8.3)$$

Burada; q_u serbest basınç direnci veya taşıma kapasitesi ve T ise sıcaklık değerini belirtmektedir. Denklemlerde sıcaklık değerinin negatifi alınacaktır.

- *Optimum su muhtevasında* **donma süresi değişimine bağlı taşıma kapasitesi hesabı** için aşağıda verilen denklemler önerilmiştir. Diğer su muhtevası değerleri için 8.1 ve 8.2 numaralı denklemler ile belirtilen sıcaklık değerlerinin haricindeki sıcaklıklarda da 8.3 numaralı denklem kullanılarak ara değer hesabı yapılabilmektedir.

$$T = -20\ ℃ \Longrightarrow q_u = \begin{cases} -0{,}0003t^2 + 0{,}0194t + 0{,}1615; & CL\ tipi\ zemin \\ -0{,}001t^2 + 0{,}0429t + 0{,}1512; & ML\ tipi\ zemin \\ -0{,}0098t^2 + 0{,}3353t + 0{,}2065; & SP\ tipi\ zemin \end{cases} \quad (8.4)$$

$$T = -200\ ℃ \Longrightarrow q_u = \begin{cases} -0{,}0025t^2 + 0{,}2218t + 0{,}2676; & CL\ tipi\ zemin \\ -0{,}0029t^2 + 0{,}2783t + 0{,}2248; & ML\ tipi\ zemin \\ -0{,}0589t^2 + 2{,}2524t + 1{,}2482; & SP\ tipi\ zemin \end{cases} \quad (8.5)$$

Burada; q_u serbest basınç direnci veya taşıma kapasitesi, t donma süresi ve T ise sıcaklık değerini belirtmektedir.

Denklemler, sadece bu aşamada kullanılan zemin tipleri için geçerli olmakla birlikte, önerilen sınır değerler dışındaki aralıklar denklemlerin eğilimleri ile benzer özellik gösterse de deneysel olarak ispatlanmamıştır.

- Bu denklemler; ilgili sınır şartları da dikkate alınarak, uygulama veya tasarımda istenilen taşıma kapasitesi için gereken dondurma süresi, dondurma sıcaklığı ve su muhtevası değerleri veya bu değerlere bağlı taşıma kapasitesi hesabının yapılmasına olanak sağlamaktadır. Söz konusu taşıma kapasitelerine karşılık gelen şekil değiştirme değerlerinin hesabında ise alakalı gerilme - birim şekil değiştirme grafikleri önerilmektedir (Şekil 6.1, 6.3 ve 6.5).

8.3. Donmuş Granüler Zeminden Karot Alma İşlemi (2. Aşama)

Arazideki granüler zeminlerden doğal şartlarda en az örselenme ile numune alabilmek için, yapay zemin dondurma metodu kullanılarak yeni bir yöntem önerilmiştir. Söz konusu uygulama için arazide uygulanabilecek tasarım ve patent başvurusu yapılmıştır. İlgili aşamada; ince malzeme oranı bulunmayan kötü derecelenmiş çakıl (GP) yerleştirilmiş hücrede yapay zemin dondurma uygulanmasının ardından karot alınarak, pratikte en uygun donmanın sağlandığı numuneler ile karşılaştırılmıştır.

- Karot alınan numunelerde donmuş zeminin taşıma kapasitesi olması gereken değerden ciddi ölçüde (yaklaşık 6 kat) düşük çıkmıştır. Fakat bu durumda bile karot alınmasına olanak sağlayan yeni yöntemin, belirli miktarda ince malzeme içeren doğal şartlardaki granüler zeminlerde güvenle kullanılabileceği kanıtlanmıştır.
- Buradaki dayanım farkı aşağıda verilen dört temel sebep ile açıklanmıştır.
    1. İnce malzeme oranının yetersizliğine bağlı olarak, numune içerisinde kohezyon oluşmaması durumudur. Bu yüzden aşırı örselenme meydana gelmektedir.
    2. CDF/CIF donma çözülme cihazındaki numuneler aniden -15 ºC sıcaklığa düşen haznede 4 gün boyunca dıştan içe donma işlemine maruz bırakılmıştır. YZD sisteminde boru merkezlerinden dışa doğru gerçekleştirilen dondurma işleminde ise ortam sıcaklığının yüksek olması ve çakıllı zeminlerdeki yüksek permeabilite sebebi ile 4 gün sonunda ancak istenilen sıcaklığa düşülebilmiştir.
    3. Granüler malzeme arasındaki boşlukların tamamen su ile dolu olmasıdır. Donma sonrası hacim artışı gösteren su fazı, daneleri birbirinden ayırarak dayanımın olması gerekenden daha düşük çıkmasına neden olmaktadır.
    4. Karot alınırken kesme işlemi sırasında ortaya çıkan ısıya bağlı dayanım kaybıdır. Dolayısıyla bu 4 koşulla göre numunelerde gözlenen dayanım farkı normaldir.

8.4. İksa Modeli Sonuçları (3. Aşama)

Tamamen özgün yapay zemin dondurma cihazı kullanılarak laboratuvardaki derin kazı (iksa) modeli; dolaşım borularının çapı (3 farklı çap; büyük, orta ve küçük) ile boru malzemesinin (paslanmaz çelik, alüminyum ve yüksek yoğunluklu polietilen) değişimi iki farklı soğutucu akışkan kullanılarak (mono etilen glikol ve sıvı azot) incelenmiştir. CL (kil) ve ML (silt) tipi iki farklı zemindeki, zamana bağlı sıcaklık değişimleri ayrıntılı biçimde sunulmuştur (Ek 1 - 6). Bu aşamadaki sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Mesafeye bağlı sıcaklık denklemleri kullanılarak arazi uygulamasındaki kritik kesitler için ısıl eğriler çizilmiştir (EK-7).
- Önerilen sıcaklık denklemleri kapsamında antifriz dolaşımında CL tipi zeminde en düşük sıcaklık -8,4 ºC ile 80,4 mm donmuş silindir çapı elde

edilmiştir. Yine antifriz dolaşımında ML tipi zeminde en düşük sıcaklık olan -10,9 ºC'de 98,4 mm çapında donmuş silindir oluşmuştur.

- Sıvı azot dolaşımında CL ve ML tipi zeminlerde en düşük sıcaklık değerleri sırasıyla -17,0 ºC ve -91,7 ºC; donmuş silindir çapları ise 68,8 mm ve 191,7 mm olarak gözlenmiştir.
- Hem antifriz hem de sıvı azot dolaşımında en verimli dondurma işlemi paslanmaz çelik borulama sisteminde gözlenmiştir. Bu borulama sistemi antifriz dolaşımında 4,5 cm/s ve sıvı azot dolaşımında ise 0,7 cm/s ile en düşük akış hızına sahiptir.
- Paslanmaz çelik üzerine kaplama biçiminde teşkil edilen, alüminyum ve yüksek yoğunluklu polietilen borulama sistemleri daha düşük ısıl iletkenlik değerlerine sahip olduğundan sıcaklık düşüşü daha az miktarda gerçekleşmiştir.
- Sunulan ısıl eğriler göz önünde bulundurularak zemin dondurma uygulamasında; zemin tipi, akışkan tipi, akışkan hızı (veya boru çapı) ile boru malzemesi değişkenlerinin her birinin kendisine has sıcaklık parametrelerinin ısı iletimine etkileri incelenerek uygun tasarım seçilebilecektir.

Proje kapsamında elde edilen sonuçlar yapay zemin dondurma metoduna genel anlamda yenilikçi yaklaşımlar getirmektedir. Arazi uygulaması; yanal kazıklar, palplanş, istinat duvarı gibi yoğun emek ve masraf gerektiren mevcut kazı destekleme yöntemlerine alternatif olarak; düşük iş gücü ile ekonomik ve çevre dostu bir yöntem sunmaktadır. Sonuç itibariyle, ülke ekonomisine çok ciddi kazanımlar sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca ilgili standart ve yönetmeliklere de yol gösterici nitelikte kullanılabilecektir.

8.4.1. Mesafeye bağlı sıcaklık denklemleri

Sınır şartları göz önünde bulundurularak, merkez eksene olan mesafeye bağlı kritik kesitteki sıcaklık değerleri aşağıdaki denklemlerle hesaplanabilmektedir. Sıcaklığa bağlı dayanım ve şekil değiştirme değerlerine geçiş yapılabilir

CL tipi zeminde, paslanmaz çelik borulardan antifriz dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0012x^2 + 0{,}2559x - 8{,}355; & V = 4.5\ cm/s \\ -0{,}0005x^2 + 0{,}1352x - 3{,}34; & V = 17.3\ cm/s \\ -0{,}0007x^2 + 0{,}1671x - 3{,}745; & V = 33.2\ cm/s \end{cases} \quad (8.6)$$

CL tipi zeminde, alüminyum borulardan antifriz dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0002x^2 + 0{,}0655x + 2{,}925; & V = 4.5\ cm/s \\ -0{,}0005x^2 + 0{,}1126x + 4{,}08; & V = 17.3\ cm/s \\ -0{,}0006x^2 + 0{,}1311x - 1{,}295; & V = 33.2\ cm/s \end{cases} \quad (8.7)$$

CL tipi zeminde, yüksek yoğunluklu polietilen borulardan antifriz dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0002x^2 + 0{,}0792x + 3{,}11; & V = 4.5\ cm/s \\ -0{,}0006x^2 + 0{,}1462x + 0{,}51; & V = 17.3\ cm/s \\ -0{,}0007x^2 + 0{,}1437x + 1{,}685; & V = 33.2\ cm/s \end{cases} \quad (8.8)$$

ML tipi zeminde, paslanmaz çelik borulardan antifriz dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0012x^2 + 0{,}2803x - 10{,}885; & V = 4.5\ cm/s \\ -0{,}0012x^2 + 0{,}2379x - 4{,}955; & V = 17.3\ cm/s \\ -0{,}001x^2 + 0{,}1899x - 0{,}905; & V = 33.2\ cm/s \end{cases} \quad (8.9)$$

ML tipi zeminde, alüminyum borulardan antifriz dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0008x^2 + 0{,}1611x + 0{,}355; & V = 4.5\ cm/s \\ -0{,}0008x^2 + 0{,}1748x + 0{,}79; & V = 17.3\ cm/s \\ -0{,}0008x^2 + 0{,}1906x - 3{,}32; & V = 33.2\ cm/s \end{cases} \quad (8.10)$$

ML tipi zeminde, yüksek yoğunluklu polietilen borulardan antifriz dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0008x^2 + 0{,}1666x + 0{,}68; & V = 4.5\ cm/s \\ -0{,}001x^2 + 0{,}2212x - 1{,}79; & V = 17.3\ cm/s \\ -0{,}0009x^2 + 0{,}1894x + 2{,}57; & V = 33.2\ cm/s \end{cases} \quad (8.11)$$

CL tipi zeminde, paslanmaz çelik borulardan sıvı azot dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0033x^2 + 0{,}608x - 17; & V = 0.7\ cm/s \\ -0{,}0017x^2 + 0{,}348x - 8.8; & V = 2.8\ cm/s \\ 0{,}0003x^2 + 0{,}064x + 4; & V = 5.3\ cm/s \end{cases} \quad (8.12)$$

CL tipi zeminde, alüminyum borulardan sıvı azot dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} 0{,}0009x^2 - 0{,}006x + 3{,}9; & V = 0.7\ cm/s \\ 0{,}0007x^2 + 0{,}015x + 5{,}3; & V = 2.8\ cm/s \\ 0{,}001x^2 - 0{,}03x + 6{,}5; & V = 5.3\ cm/s \end{cases} \quad (8.13)$$

CL tipi zeminde, yüksek yoğunluklu polietilen borulardan sıvı azot dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0002x^2 + 0{,}128x + 1{,}4; & V = 0.7\ cm/s \\ 0{,}0007x^2 + 0{,}035x + 3{,}3; & V = 2.8\ cm/s \\ 0{,}0016x^2 - 0{,}117x + 11{,}9; & V = 5.3\ cm/s \end{cases} \quad (8.14)$$

ML tipi zeminde, paslanmaz çelik borulardan sıvı azot dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} -0{,}0028x^2 + 1{,}225x - 91{,}7; & V = 0.7\ cm/s \\ -0{,}0099x^2 + 1{,}642x - 51{,}7; & V = 2.8\ cm/s \\ 0{,}0008x^2 + 5{,}2; & V = 5.3\ cm/s \end{cases} \quad (8.15)$$

ML tipi zeminde, alüminyum borulardan sıvı azot dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} 0{,}0005x^2 + 0{,}075x + 3{,}2; & V = 0.7\ cm/s \\ -0{,}0028x^2 + 0{,}485x - 10{,}5; & V = 2.8\ cm/s \\ -0{,}0006x^2 + 0{,}152x + 3{,}4; & V = 5.3\ cm/s \end{cases} \quad (8.16)$$

ML tipi zeminde, yüksek yoğunluklu polietilen borulardan sıvı azot dolaşımı yapıldığında;

$$T = \begin{cases} 0{,}00008x^2 + 0{,}108x + 0{,}2; & V = 0.7\ cm/s \\ -0{,}0007x^2 + 0{,}245x - 1{,}7; & V = 2.8\ cm/s \\ 0{,}0003x^2 + 0{,}084x + 3{,}2; & V = 5.3\ cm/s \end{cases} \quad (8.17)$$

Denklemlerde; T sıcaklık, x merkez eksene olan mesafe ve V ise akışkan akış hızı değerleridir.

8.5. Öneriler

Tez kapsamında yapay zemin dondurma cihazı ile dondurulan zeminlerdeki değişimler göz önünde bulundurularak sonraki çalışmalarda, araziye yönelik gerçek boyutlu tasarımlar yapılması önerilmektedir. Uygun sistemin geliştirilmesinin ardından her türlü ortamda arazi çalışmalarını gerçekleştirmek adına güneş enerjisi ve / veya rüzgar enerjisi entegre edilerek sistem verimliliği arttırılabilir.

Su muhtevası, donma süresi ve dondurma sıcaklığı gibi değişkenlere bağlı olarak önerilen donmuş zeminler için taşıma kapasitesi değerleri, farklı değişkenler kullanılarak geniş çeşitlilikteki zemin tipleri için genişletilmelidir. Donma sonrası numunelerdeki hacim değişimi ve sadece buz numunesinin dayanım değerleri de incelenmelidir.

Laboratuvar ortamında 24 saatte elde edilen bu değerlerin arazi şartlarında uygulanabilmesi için birçok faktörün ayrıca değerlendirilmesi gerekir. Bu faktörler yeraltı su seviyesi, yeraltı suyunun akış hızı ve akifer durumu, yeraltı suyu ile zemin içerisinde bulunan kimyasallar ve tuzlar, farklı jeolojik katmanlar ve ara tabakalar, ön dondurma

süresi, yatay ve düşey kullanımdaki soket boyu, olası sistem kaçakları, yedek ekipman gerekliliği, işçi sağlığı ve iş güvenliği ile çevredeki dış kuvvetler olarak belirtilebilir. Gelecek çalışmalarda sorun oluşturan bu faktörlere çözüm bulunması, yapay zemin dondurma yönteminin gelişmesine katkı sağlayacaktır.

Ayrıca sistemin arazide uygulanabilmesi; logaritmik artan soğutma ihtiyacının karşılanması için verimli ve büyük çaplı makine tasarımı ihtiyacını doğurmaktadır. Gerçek boyutlu makine tasarımı başlı başına bir konu olarak belirtilebilir.

İKİNCİ BÖLÜM

9. GİRİŞ: ŞEMSİYE ANKRAJ YÖNTEMİ

Gelişen kentleşme ve merkezi alanlardaki iş gücü potansiyeli artışı ile dünya genelinde ortaya çıkan çok katlı yapı ihtiyacı, bu yapıların zemin altında kalan kısımları için derin kazı sistemlerinin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Diğer taraftan karayolu ve demir yolu inşaatlarında tercih edilen kazı ve dolgu işlemleri de şev kararlılığının sağlanmasını gerektiren mühendislik uygulamalarıdır. Hem yol inşaatları sırasındaki bu uygulamalar hem de derin kazılar, doğal zemin koşullarının bozulması ile meydana gelebilecek kayma hareketlerinin uygun mühendislik yaklaşımları ve tasarımları ile önlenmesi amacıyla kullanılan şev stabilitesi sistemleri ve iksa sistemleri ön plana çıkmaktadır.

> İnşaat mühendisliğinde üst yapının yüksek dayanımlı zemin tabakalarına iletilmesi, temelin çevre koşullarından etkilenmesinin önlenmesi, bodrum alanlarının değerlendirilmesi gibi amaçlarla, zeminde kazı işi yapılmaktadır. Bu çalışmalar esnasında, inşa sahası civarında bulunan yapılar olumsuz yönde etkilenebilmekte, statik açıdan güvensiz duruma düşebilmektedir. Güvenilir bir kazı çalışmasının gerçekleştirilebilmesi için, ilgili zemine ait fiziksel parametrelerin tespit edilmesi gerekmektedir. Elde edilen parametreler kullanılarak ve çeşitli analiz teknikleri yardımıyla optimum sonuçlar üretilmelidir (Çetin, 2012, s. 1).

Derin kazı destek sistemleri olarak; destekli duvarlar, palplanş, yanal kazıklar, diyafram duvarlar, prefabrike diyafram duvarlar, betonarme istinat duvarları, zemin çivili duvarlar, batardolar, kesonlar, jet-enjeksiyon (jet-grout) ve derin karıştırma (deep mixing) ile oluşturulmuş duvarlar, top-down yöntemi ile oluşturulmuş duvarlar, kısmi kazı ya da ada yöntemi ile oluşturulmuş duvarlar sıralanabilir (Ergun, 2008, s. 2).

Dik ya da dik açıya yakın şekilde zemin veya diğer malzemelerle teşkil edilen dolguların tutulabilmesi amacı ile inşa edilen yapılar istinat duvarları olarak adlandırılmaktadır. İstinat yapıları taş veya palplanştan inşa edilebilir. İstinat yapılarına etkiyen basınçlar, duvarı mevcut konumundan hareket ettirmeye çalışır. Buna karşılık stabilitenin korunmasına yönelik tasarım yapılır (Murthy, 2003, s. 419). Betonarme perde duvarlar ise imalat yöntemi olarak alışılagelmiş inşaat teknikleri ile uyum gösterdiğinden yükleniciler tarafından sıkça tercih edilmektedir. Yanal zemin basıncına karşı inşa edilen bu geoteknik yapıları; zemin koşulları, yeraltı suyunun durumu, çevresel şartlar, dış yükler ve dinamik etkiler göz önüne alınarak tasarlanır. Diğer mühendislik yapılarında olduğu gibi; hem proje birimi, hem uygulama birimi hem de yüklenici açısından maliyet, uygun destek yönteminin seçimini etkileyen en önemli unsurlardan birisidir. Söz konusu

destek yapılarının yetersiz kaldığı veya yüksek inşa maliyetleri gerektirdiği durumlarda ise ankrajlar devreye girmektedir. Yanal yüklerin artışına ve zemin koşullarının yetersizliğine bağlı olarak iksa elemanının üzerine etkiyen iç kuvvetleri azaltmak veya elemanın çakma derinliğini düşürmek gibi nedenlerle de ankrajlar kullanılmaktadır. Özellikle birçok projede iksa elemanının yeterli derinlikte çakılmasının zorluğu ve üzerine etkiyecek kuvvetler nedeni ile oluşacak kesme kuvveti ve momentler karşısında kesit yetersizlikleri ile karşı karşıya kalınması ankraj kullanımını artırmıştır.

Ülkemizde, yanlış tasarım, işçilik ve malzeme kusurları ile uygulama hataları gibi sebeplerden kaynaklanan ankrajlı veya ankrajsız yanal destek yapılarının göçtüğü görülmektedir. Bu durum can ve mal kayıplarına neden olmakla birlikte çevresindeki yapılarda geri dönüşü olmayan hasarlara sebebiyet vermektedir. Türkiye'de istinat yapıları, tüneller ve madenlerde meydana gelen kazalar en çok karşılaştığımız zemin kaynaklı göçme durumlarıdır. Görsel 9.1'de istinat duvarı göçmeleri sonucunda meydana gelen bazı kazalar verilmiştir. İstinat duvarları tasarımında; taşıma kapasitesi, kayma ve dönme tahkikleri sonucunda yeterli güvenlik sayılarına ulaşılması gerekmektedir. Yanlış tasarım sonucu meydana gelen göçmeler birincil sebep olarak belirtilebilir. Yetersiz don derinliği, yıl içerisindeki farklı mevsim şartlarına dikkat edilmemesi sonucunda zemin içerisindeki suya bağlı parametrelerdeki değişimler ve istinat yapısı arkasındaki suyun tahliyesini sağlayan barbakanların kapanması veya hiç bulunmaması diğer göçme sebepleridir.

a. b.

c. d.

e. f.

Görsel 9.1. *İstinat Duvarı Göçmeleri; a. Şırnak 2013, b. Gaziantep 2014, c-d. Bursa 2006, e. Bursa 2013, f. Ordu 2013, g. İstanbul 2014 ve h-ı. İstanbul 2016*

Kaynaklar: *a. http://www.sabah.com.tr/galeri/yasam/sirnakta-hali-saha-istinat-duvarinin-coktu; b. http://www.anteppress.com/yagmur-bir-tek-onlari uzdu; e. http://www.haberler.com/istinat-duvari-coktu-cevresindeki-3 apartman-5380552-haberi; f.http://www.kanalb.com.tr/haber.php? HaberNo=47823; (Erişim tarihleri: 07.12.2016)*

g.

h.

ı.

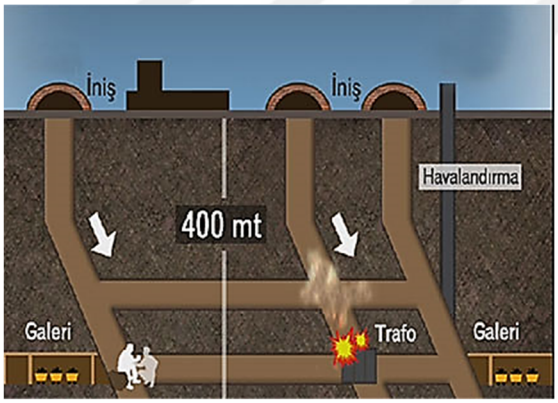
Görsel 9.1. (Devam) *İstinat Duvarı Göçmeleri; a. Şırnak 2013, b. Gaziantep 2014, c-d. Bursa 2006, e. Bursa 2013, f. Ordu 2013, g. İstanbul 2014 ve h-ı. İstanbul 2016*

Kaynaklar: *g. https://www.emlakwebtv.com/uskudar-daki-duvar-neden-coktu/15637 h. http://www.superhaber.tv/yasam/istanbulda-tehlikeli-anlar-devasa istinat-duvari-boyle-coktu-video/haber-21078; ı.http://www.hurriyet. com.tr / maltepede -istinat-duvari-coktu-40297027 (Erişim tarihleri: 07.12.2016)*

Tünellerde ve madenlerdeki göçmelerde de çok sayıda can kaybı yaşanmaktadır. Diğer taraftan maddi hasarlar, maliyeti yüksek makinelerin yeraltında kalması ve büyük ölçekli işlerin durması da ikincil sorunlar olarak değerlendirilebilir. Bu gibi yeraltı yapıları herhangi bir sorun durumunda çalışanların dışarı çıkabilme ihtimallerini kısıtlamaktadır. İhmal edilmemesi gereken işçi sağlığı ve iş güvenliği şartları ölüm ve yaralanma oranlarını düşürse de en uygun çözüm uygun tasarım ve ekipmanlar kullanılarak göçüklerin hiç meydana gelmemesini sağlamaktadır. Görsel 9.2'de ülkemizde meydana gelen bazı tünel ve maden kazaları verilmiştir. 2014 yılında Soma'da gerçekleşen patlama ve sonrasında meydana gelen göçmeler sonucunda birçok madenci yeraltında kalmıştır. Resmi kurumlardan bu elim kazada 301 işçi kaybı olduğu açıklanmıştır.

a.

b.



c.

d.

Görsel 9.2. *Bazı Tünel ve Maden Göçmeleri; a. Ankara İstanbul YHT İnşaatı - Bilecik - 2009, 33 Milyon Avro Maddi Hasar; b. Karadon Kömür Ocağı - Zonguldak 2010 - 30 ölü, c. Soma Maden Ocağı - Manisa 2014 - 301 Ölü, d. Ermenek Maden Ocağı - Karaman 2014 - 18 Ölü*

Kaynak: *a. http://www.haber7.com/guncel/haber/1177618-33-milyon-avroluk-makina-5-yildir-toprak-altinda; b. http://www.sabah.com.tr/gundem/2014/10/31/30 kisinin-oldugu-karadon-maden-faciasinda-karar;c.http://www.soguksuhaber. com /guncel/ somada-maden-faciasi-h2129.html; d.http://www.internethaber. com/ ermenek-son-durum-madencilere-ulasildi-mi-736364h.htm (Erişim tarihleri: 07.12.2016)*

Doğal zemin koşullarının dış etkenlerle bozulması sonucunda mevcut zeminin içsel parametrelerdeki değişim sonucunda dayanımını yitirmesi de şevlerde görülen bir başka göçme sebebidir. Ülkemizde özellikle Karadeniz bölgesinde yıllık yağış ortalamalarının yüksek olması heyelan ve şev göçmelerine neden olmaktadır. Kimi zaman da zemindeki tabakalaşma ve farklı jeolojik katmanların meydana getirdiği duraysızlıklar, projelerde beklenmedik göçmelere yol açmaktadır. Görsel 9.3'te doğal yapısı 20 derecelik tabakalaşmaya sahip kiltaşı biriminin, palyede oluştuğu gözlenen 70 - 90 derecelik çatlaklarla kesişmesi sonucunda kayma meydana gelmiştir. Bu sorun kaplama çeşidi olan çivili iksa projesi uygulanarak çözülmüştür.

a. b.

Görsel 9.3. *a. Kayma Öncesi Şevde Öngörülen Kayma Yüzeyi ve b. Kayma Sonrası Gözlenen Kayma Açıları*
Kaynak: *Evirgen ve Yaman, 2010, s.5*

Sözü edilen istinat duvarı göçmeleri, tünel ve maden göçmeleri ile doğal koşullardan kaynaklı şev göçmeleri; şev stabilitesinin sağlanması hususunda kullanılan güvenlik sayılarının düşük kaldığını göstermektedir. Tez kapsamında tasarlanan şemsiye ankraj yöntemi verimli biçimde uygulandığı takdirde, zemin içerisinde inşa edilen ankraj sistemlerindeki bilinmeyen faktörlerin sayısı en aza indirgenecek ve bu sayede güvenlik sayısı yükseltilmiş olacaktır.

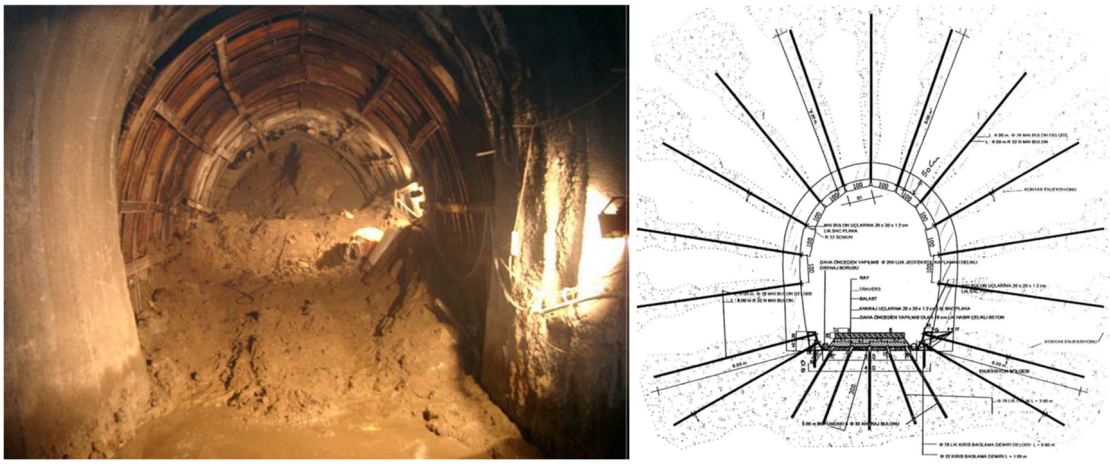
9.1. Standart Ankraj Uygulama Metodu

Normal şartlar altında ankraj uygulanacak bölgeye ilk olarak yeterli uzunlukta delgi işlemi uygulanır. Genellikle uygulamalarda rastlanılan 3, 5 veya 7 sarımlı çelik tendonlardan oluşan yeteri sayıda çelik halat ankraj kuyusuna yerleştirilir. Kök bölgesine basınçlı şerbet enjekte edilerek, patlatma olarak adlandırılan işlem uygulanır. Patlatma sonucunda kök bölgesinde betonlaşmış bir yapı elde edilir. Betonun dayanımı almasından sonra çelik halatlar gerilerek art germe verilir. Halatlar göğüsleme kirişlerine ankraj kamaları yardımıyla sabitlenerek stabil bir sistem elde edilir. Fakat standart yöntemin hiçbir aşamasında; malzeme dayanımının, enjeksiyon kriterlerinin, ön germe şartlarının veya zemin - beton - çelik etkileşiminin hesaplanan değerlere tam olarak yaklaşıp yaklaşmadığı belirlenemediğinden dolayı güvenlik sayısı yüksek tutulmaktadır. Mevcut istinat yapıları ve iksa sistemlerinde kullanılan ankrajların yük taşıma prensibi, kök bölgesinin dayanımını temel almaktadır. Burada oluşturulan betonun sürtünme yüzeyi ve dayanımı çeliğin sıyrılmasını önlemektedir. Killi zeminlerde kohezyon direncine bağlı olarak sürtünme kuvveti artmasında rağmen, granüler zeminlerde sürtünme direncinden daha çok oluşturulan kök çapı önem arz etmektedir. Bu gibi sebepler ankraj inşasında maliyet, zaman ve işçilik kayıplarına neden olmakla birlikte, gereksiz sayı ve uzunlukta ankraj yapılmasına ortam hazırlamaktadır. Sözü edilen çeşitli olumsuzlukların giderilmesi amacı ile "şemsiye ankraj" yöntemi geliştirilmiştir. Şemsiye ankraj; ankraj gövdesi ve kanatlar ile bu kısımları aktif hale getiren parçalardan oluşmaktadır. Delgi işleminden sonra ankrajın yerleştirilmesini takiben enjeksiyon sistemi kullanılarak beton şerbeti basılmaktadır. Böylece ankrajın uç kısmında beton blok oluşturularak, kuvvet taşıma prensibi sürtünme kuvvetinden ziyade blok üzerindeki toplam gerilme ile doğru orantılı olmaktadır. Bu sayede hemen aktif bölge bitiminden itibaren kayma yüzeyini geçecek şekilde tasarlanan bir ankraj kökü ile sıyrılmaya karşı hem beton blok hem de sürtünme ile dayanım sağlanmaktadır. Diğer bir deyişle ankraj şemsiyesine gelen eksenel karşı koyma kuvvetleri ile ek bir pasif kuvvet oluşturulmaktadır. Ankraj uzunluğunun kısalması, ankraj sayısının azalması ve ankraj aralığının artmasına bağlı olarak daha ekonomik ve hızlı iksa yapımına olanak sağlanmaktadır. Kısacası tez kapsamında, inşaat sektöründe sıkça tercih edilen ankrajlar ile ilgili olarak geliştirilen yeni yöntem ile ankraj sayısı, uzunluğu, işçilik vb. kalemlerde meydana gelecek iyileşmeler ile projelerde maliyetlerin azaltılması amaçlanmıştır. Bununla beraber ülkemizde sık sık meydana gelen istinat yapısı göçmelerinin önüne geçilmesi de en önemli katkılardan birisi olacaktır.

10. LİTERATÜR TARAMASI: ŞEMSİYE ANKRAJ YÖNTEMİ

Tez kapsamında önerilen şemsiye ankraj detayı ve sadece sürtünme davranışından kaynaklanan dayanıma göre değil, eksenel kompozit yapı davranışı ve sürtünmenin birlikte çalışmasını ön planda tutan ankraj çalışma prensibine odaklanılmış bir çalışmaya rastlanmamaktadır. Literatürde ankraj, bulon ve cıvatalı destek sistemlerine yönelik teorik, pratik ve analitik modellemeleri içeren dizilim, malzeme iyileştirilmesi, enjeksiyon, yeni ölçüm yöntemleri gibi çalışmalar bulunmaktadır. Genellikle beton - çelik veya zemin - çelik arasındaki etkileşimi iyileştirmeye, dayanımı arttırmaya yönelik deneysel, modelleme, arazi uygulamaları ve teorik çalışmalara rastlanmaktadır. İncelenen çalışmalar ve sonuçları aşağıda sunulmaktadır.

Ön tasarım aşamasında enjeksiyonlu kaya bulonları davranışının değerlendirildiği çalışmada, önerilen yaklaşımla en uygun kaya bulonu dizilimi geliştirilmiştir (Osgouli ve Ünal, 2009, s. 154-166). Kaya donatı tekniğinin; performans, maliyet verimliliği ve güvenlik sebebiyle her türlü yeraltı yapılarında sıklıkla kullanıldığı, bulonlarla güçlendirilen yapıların genellikle güvenilir ve uzun ömürlü olduğu belirtilmiştir. Önerilen yöntem Malatya demiryolu tünelinde deneye dayalı olarak değerlendirilmiştir (Görsel 10.1). Deney tabanlı tasarım yöntemi tünellerde enjeksiyonlu bulonlar için geliştirilmiştir. Ancak yöntemin bulon yoğunluğu ve destek basıncına bağlı olarak her tünel tipinde uygulamaya yönelik optimize edilmesi gerekmektedir. RMR (Rock Mass Rating - Kaya Kütle İndeksi) veya Q sistemleri enjeksiyonlu bulonlarla zayıf ve çok zayıf kaya kütlelerinde yetersiz kaldığında, çalışmada önerilen *GSI* (Geological Strength Index - Jeolojik Dayanım İndeksi) tasarım yöntemini temel alan verimli bulon tasarımının Malatya demiryolu tünelinde olduğu gibi kullanılabileceği belirtilmiştir. Çalışmada, tünel destek basıncının hesaplanmasının ankraj sisteminin boyutlandırılmasındaki en önemli aşamalardan birisi olduğu belirtilmiştir. Destek basıncının; GSI, D, σ_{cr}, D_e, γ, C_s, S_q parametrelerine bağlı olduğu vurgulanmıştır. Burada; GSI, jeolojik dayanım indeksi olup kaya kütlesinin kalitesini belirtmektedir; D, kazı metoduna bağlı örselenme faktörüdür; σ_{cr}, tünel etrafındaki yenilmiş bölgede ayrışmış kayaçların basınç dayanımıdır; D_e, eşdeğer tünel kazı çapıdır; γ, kaya kütlesinin birim hacim ağırlığıdır; C_s, düşeyden yatay yöne gerilme düzeltme faktörüdür; S_q ise sıkıştırılmış zemin için düzeltme faktörüdür.



a. b.

Görsel 10.1. *a. Malatya Demiryolu Tünelinde Sıkıştırılmış Zeminde Meydana Gelen Göçme Durumu ve b. Tünelde Uygulanan Bulon Diziliminin Şematik Gösterimi*
Kaynak: *Osgouli ve Ünal, 2009, s. 162 - 163*

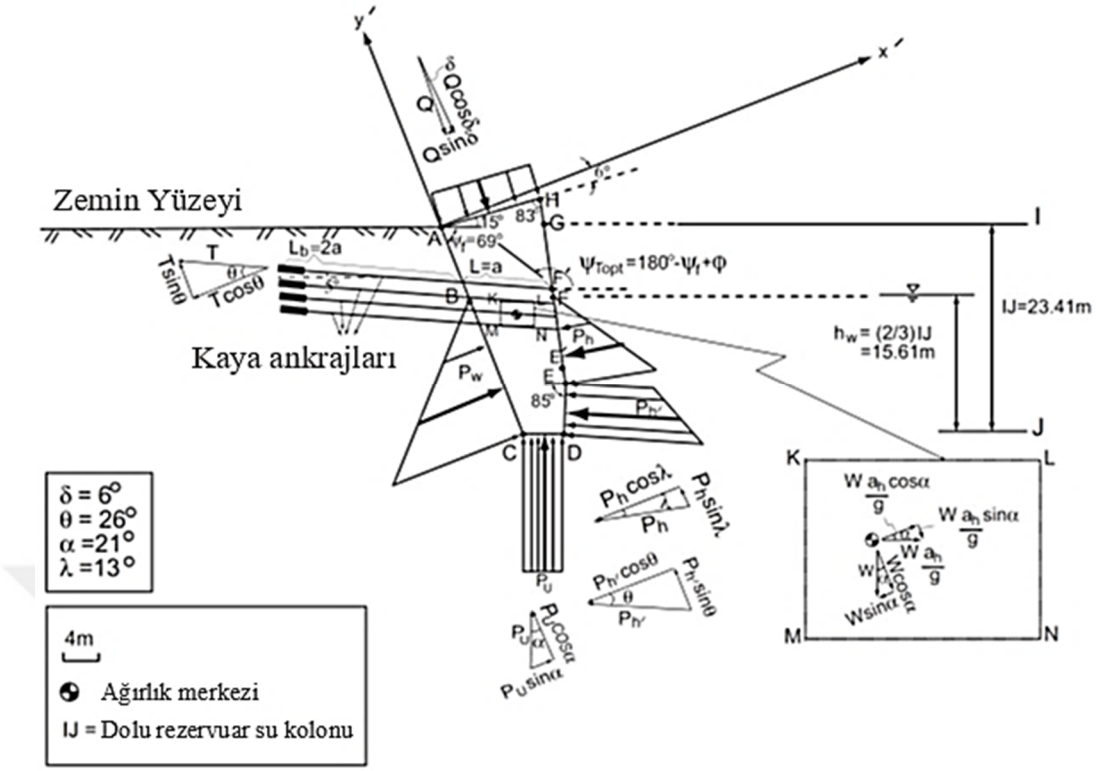
Akgün ve Koçkar (2004, s. 37-49) tarafından, Türkiye'nin güneydoğusunda Hasankeyf tarihi yerleşkesi Ilısu Barajı rezervuarında; siltli kumlu kireçtaşında bulunan açıklıkların stabilite değerlendirmeleri, kaya karakteristikleri ve ankraj tasarımı yapılmıştır. Kaya kütlesinde (Şekil 10.2) kohezyon 257 kPa ve içsel sürtünme açısı 52º olarak hesaplanmıştır. Kaya içerisinde oluşturulan insan yapımı mağaralar dokuz farklı destek kalınlığı ile sonlu elemanlar programı kullanılarak modellemiştir. 0,5 m ve daha az duvar kalınlığı olan yerlerde çelik kemer desteği önerilmiştir. İncelenen kayada % 70 *RQD* (Rock Core Quality) değeri ve 0,6 - 2,0 m arasında süreksiz boşluklar gözlenmiştir. Su seviyesinin Şekil 10.1'de bulunan F noktasında olduğu kabul edilerek denge denklemleri aşağıdaki gibi oluşturulmuştur:

$$\sum F_{x'} = Q \sin\delta + W \sin\alpha - W_e \cos\alpha + P_h \cos\lambda + P_{h'} \cos\theta - P_u \sin\alpha - P_w + T \cos\theta \quad (10.1)$$

$$\sum F_{y'} = Q \cos\delta + W \cos\alpha + W_e \sin\alpha - P_h \sin\lambda - P_{h'} \sin\theta - P_u \cos\alpha - T \sin\theta \quad (10.2)$$

Çalışmada; bloğun AC ekseni boyunca kaymaya karşı güvenlik sayısı aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır. Burada $c_f{}'$ ve $\emptyset_f{}'$ ifadeleri kayan kaya kütlesi boyunca geçerli olan kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleridir.

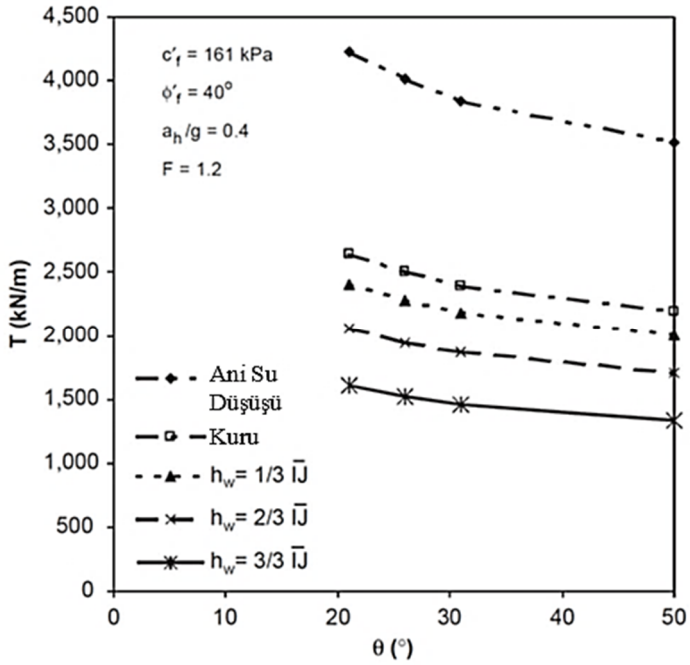
$$F = \frac{c_f{}'(AC) + \sum F_{x'} \tan \emptyset_f{}'}{\sum F_{y'}} \quad (10.3)$$



Şekil 10.1. *Stabil Olmayan Düzlemsel ACHD Bloğuna x' ve y' Eksenlerine Göre Etkiyen Yük Dağılımı*

Kaynak: *Akgün ve Koçkar, 2004, s. 41*

Blok 27 m yükseklikte, zirvede 11,55 m genişlikte ve topukta 4 m genişlikte olup 14 m kalınlığa sahiptir. Güvenlik sayısı 1,2, içsel sürtünme açısı 26º, pik yatay ivme katsayısı 0,4 olan durumda her bir ankraj için kuvvet 4000 kN/m olarak hesaplanmıştır. 14 m genişlikte düzlemsel şev yüzeyine sahip stabil olmayan bloğa toplamda 56 kaya ankrajı 1000 kN servis yükü ve 1 m aralıklar ile uygulandığında 56000 kN/m destek kuvveti önerilmiştir. Ayrıca ankraj için çift korozyon koruması da önerilmiştir. Ankraj kuvveti değişimi Şekil 10.2'de verilmiştir (Akgün ve Koçkar, 2004, s. 154-166).



Şekil 10.2. *Ankraj Yerleştirme Açısı (θ) ve Rezervuar Su Durumunun Fonksiyonu Olarak Gerekli Ankraj Kuvveti (T). (Güvenlik Sayısı 1,2 ve Depremde Oluşan Pik Yatay İvme Katsayısı 0,4 Alınmıştır)*
Kaynak: *Akgün ve Koçkar, 2004, s. 44*

Epoksi bağlı ankraj sistemlerinin (EBAS – Epoxy bonded anchor systems) uzun süreli performansının incelendiği çalışmada, uzun süreli davranışa yönelik çalışmaların literatürde nadir bulunduğu belirtilmiştir (Yang vd., 2014, s. 96-103). Yapışkan tabakanın viskoelastik etkisine odaklanılarak EBAS sistemlerinin (Şekil 10.3) uzun dönem performansı teorik olarak incelenmiştir. Teorik model, ABAQUS'te uygulanan numerik model ile karşılaştırılmıştır. Ankraj ve epoksi etkileşim yüzeylerindeki zamana bağlı çekme ve kayma gerilmeleri değerlendirilmiştir. Önerilen modelde temel kayma gerilmesi kabulü aşağıda verilmiştir;

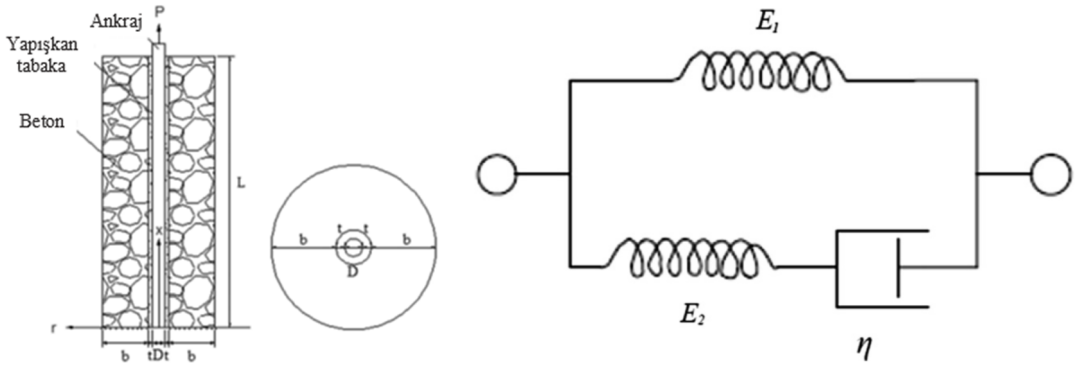
$$0 < \delta < \delta_m \, ise; \;\; \tau = k\delta \tag{10.4}$$

$$\delta > \delta_m \, ise; \;\; \tau = \tau_r \tag{10.5}$$

Burada; τ kayma gerilmesi, τ_r kalıcı sürtünme gerilmesi ve δ ankraj – epoksi etkileşim yüzeyindeki sıyrılmaya bağlı kayma değeri, k ankraj – epoksi ara yüzey kayma modülü, δ_m ara yüzey kayma gerilmesinde meydana gelen sıyrılmaya bağlı kayma değeridir.

Çalışmada aşağıdaki parametrelerin ankraj sisteminde uzun dönem yükleme durumunda uç yer değiştirmesi davranışına etkisi değerlendirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli ile % 92 yakınlık elde edilmiştir (Yang vd., 2014, s. 96-103).

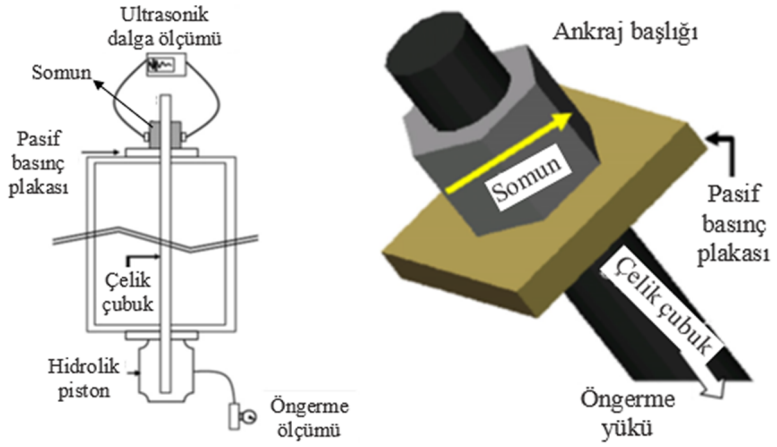
- *Ankraj çapının etkisi:* Uzun dönem yer değiştirme miktarı ankraj çapının artmasıyla azalmıştır. Çapın artışı ile azalma oranı düşmüştür.
- *Epoksi katman kalınlığının etkisi:* Ankraj sistemindeki epoksi enjekte kalınlığının artması ile sünmeye bağlı yer değiştirme artmaktadır.
- *Penetrasyon uzunluğunun etkisi:* Uzun dönem yüklemeye bağlı uç yer değiştirme miktarı ve azalış oranı; bağ uzunluğunun artmasıyla azalmaktadır, sonrasında ise tekrar artış eğilimindedir.
- *Beton elastisite modülünün etkisi:* Sabit sıcaklıkta (111,2 ºF) farklı elastisite modülü değerlerinde; yükleme ucunda öngörülen uzun dönem yer değiştirme değeri beton elastisite modülü artışı ile azalmıştır. Ancak, beton elastisite modülü 6000 ksi değerine ulaştığında etkisini yitirmektedir. Bu aşamadan sonra uç yer değiştirme miktarında daha fazla bir azalma olmamaktadır.
- *Ankraj elastisite modülünün etkisi:* Uzun dönem uç yer değiştirme değeri çelik elastisite modülü artışı ile azalmaktadır. Beton rijitliğinde olduğu gibi ankraj rijitliği 37000 ksi değerine ulaştıktan sonra daha fazla etki sağlamamaktadır.
- *Ankraj yerleştirme sıcaklığı:* Epoksinin mekanik karakteristiği sıcaklıktan oldukça yüksek derecede etkilenmektedir. Isı artışı ile uç yer değiştirme miktarı artmaktadır.



a. b.

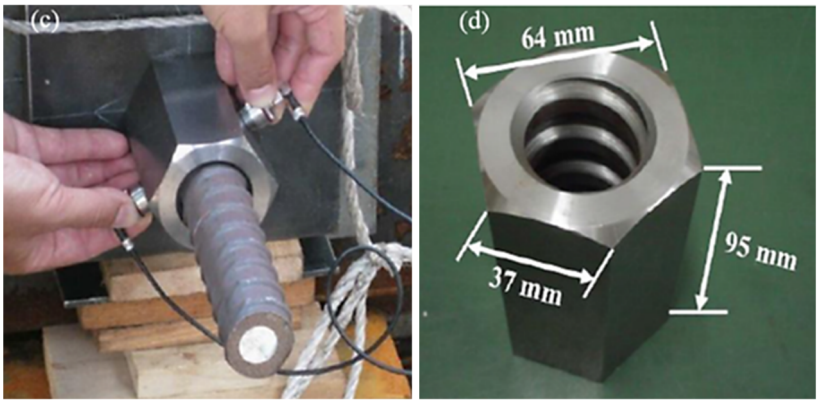
Şekil 10.3. *a. Önerilen EBAS Modelinin Şematik Gösterimi ve b. Standart Doğrusal Katı Modelin Şematik Gösterimi*
Kaynak: *Yang vd., 2014, s. 97-98*

Aggelis vd. (2012, s. 55-63) tarafından yapılan çalışmada ankraj kafasından ön germe değerinin gözlemlenebileceği düşünülmüş ve ankraj kafasındaki elastik dalgalar sayısal olarak modellenmiştir (Görsel 10.2). Donatı olarak kullanılan çelik tendonlardaki ön germe uygulamasının, beton veya zemin malzemesinde düşük çekme gerilmelerini karşılayabilmenin bir yolu olduğu belirtilmiştir. Kullanım yılı artıkça çelik halatlar, korozyon veya başka sebeplerle ön germe kuvvetini yitirebilmekte ve tüm yapı için tehlikeli sonuçlar doğurmaktadır. İnşa edilmiş halatlara dışarıdan herhangi bir ulaşım imkanı bulunmadığından; çalışma kapsamındaki deneyler süresince ön germe yapılan ankraj başlıklarında bir çift sensor (dalga kaynağı ve toplayıcı) kullanılmıştır. Uygulama frekansının olası etkilerini incelemek amacıyla 1MHz (Görsel 10.3a), 5MHz ve 10MHz nominal frekansta piezoelektrik dönüştürücüler kullanılmıştır. Dişli çelik donatı ve ankraj kafası çevresindeki temas özelliklerini etkileyen; dalga büyüklüğü ve yayılma zamanı gibi parametreler değerlendirilmiştir (Görsel 10.3b). Yöntem metal tendonlarda hasarsız ön germe değerlendirmesi sunmaktadır. Tendon ön germesi açısından simülasyonda kullanılan interfaz rijitliği ve uyarım hızı en önemli parametrelerdir. Dalganın yayılma büyüklüğü veya zamanında artış gözlenirse, bu durum olası ön germe kayıplarına sebep olabilir.



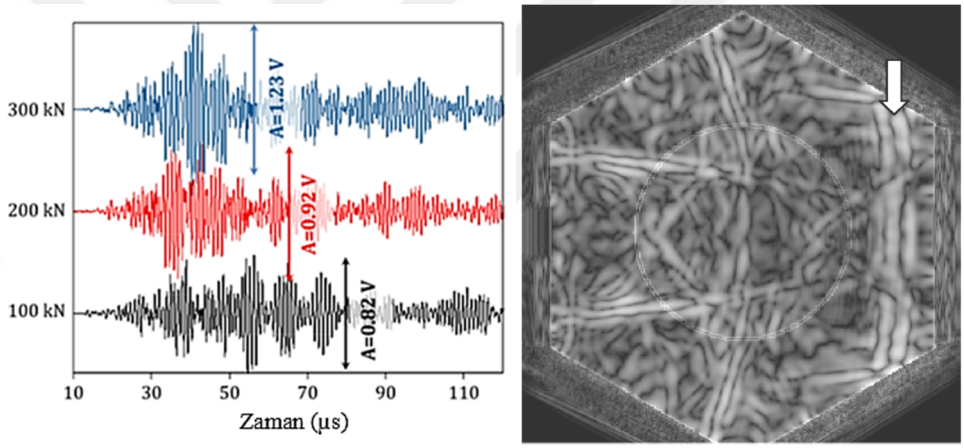
a. b.

Görsel 10.2. *a. Öngerme İşleminin Şematik Gösterimi, b. Başlık Boyunca Dalga İletimi, c. Deney Fotoğrafı ve d. Ankraj Başlığında Kullanılan Cıvata Detayı*
Kaynak: *Aggelis ve diğerleri, 2012, s. 56*



c. d.

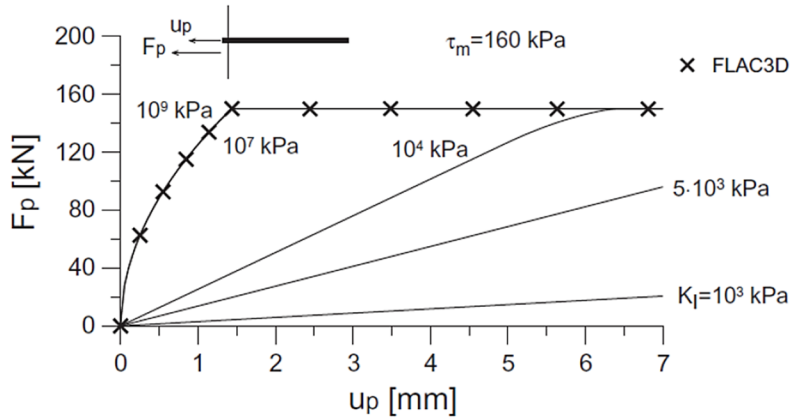
Görsel 10.2. (Devam) *a. Öngerme İşleminin Şematik Gösterimi, b. Başlık Boyunca Dalga İletimi, c. Deney Fotoğrafı ve d. Ankraj Başlığında Kullanılan Cıvata Detayı*
Kaynak: *Aggelis ve diğerleri, 2012, s. 56*



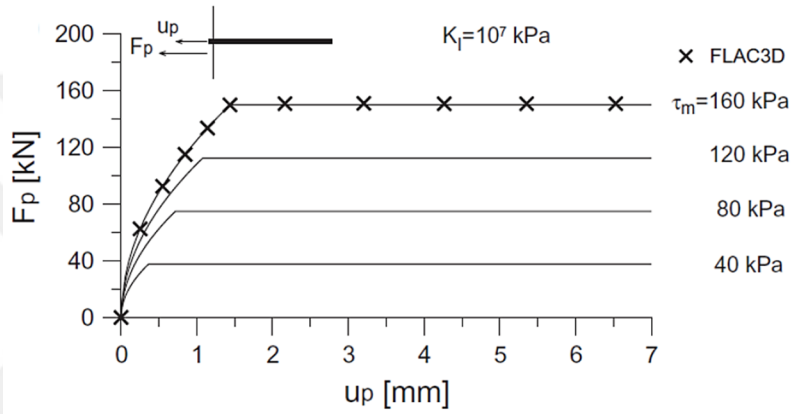
a. b.

Görsel 10.3. *a. 1 MHz Frekansta Farklı Ön Germe Kuvvetleri İçin Deneysel Ultrasonik Dalga Formları ve b. Çelik Ara Fazı İçin Uyarımdan Yaklaşık 31 µs Sonra Oluşan Yer Değiştirme Alanları. İlk dalga halen gözlenebilmektedir (oka bakınız)*
Kaynak: Aggelis ve diğerleri, 2012, s. 57 - 60

Perazzelli ve Anagnostou (2013, s. 87-98) tarafından yapılan çalışmada üç boyutlu sayısal gerilme analizi ile kohezyonlu zeminlerde ve kuru granüler zeminlerde, bulonların donatılı tünel yüzeylerinde stabiliteye etkisi araştırılmıştır. Sayısal hesaplamalar sonlu elemanlar modelinde elastik, mükemmel plastik kabule göre Mohr-Coulomb akma kriteri altında yapılmıştır (Şekil 10.4 - 10.5). Çalışmada bağ dayanımını ve göçmeleri inceleyebilmek adına cıvata çekme dayanımı sonsuz kabul olup, FLAC 3D ile göreceli sayısal hesap yapılmıştır.



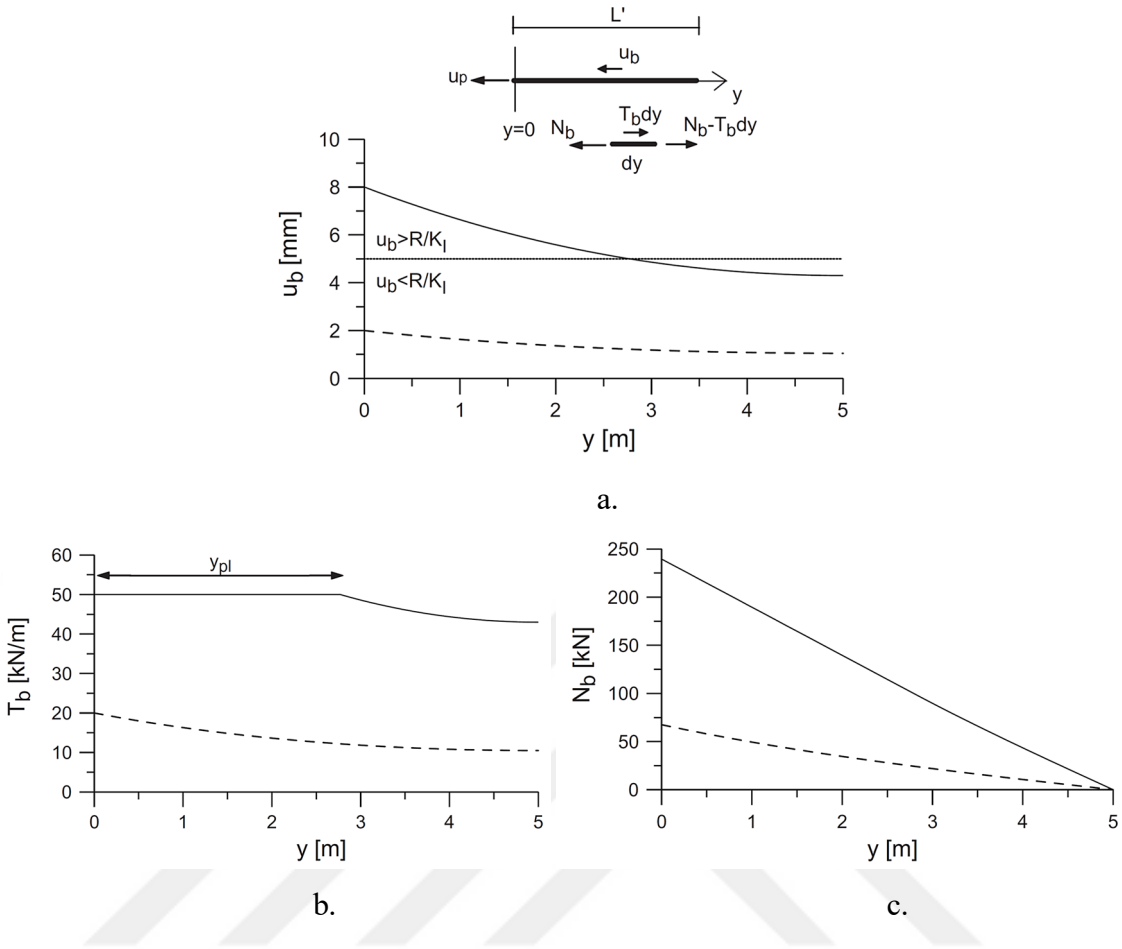
a.



b.

Şekil 10.4. *Farklı Basınç Değerleri İçin Rijit Zeminde Çekip Çıkarma Deneyi (Pull-out test) Modellemesine Göre Kuvvet - Yer Değiştirme Sonuçları a. K_1 Ara Yüzey Bağ Rijitliği ve b. Bağ Dayanımı τ_m*
Kaynak: *Perazzelli ve Anagnostou, 2013, s. 89*

Çalışmada; enjeksiyonlu bulon ve çevreleyen zemin arasındaki katı etkileşim modelinde mevcut bulon geometrisi değerlendirilmiştir. Tek eksenli bulon modelleri ara yüz kabullerinde hasır doğruluğunu etkilemekte veya bulon – zemin arasındaki sürtünme direncini göz ardı edebilmektedir. Zemin elemanının grid boyutu uygun şekilde dikkatlice seçilerek hatalar engellenebilmektedir. Bağ gerilmesi yüksek ise (yüksek zemin hacimsel genleşme veya yüksek enjeksiyon basıncı) çok kaba grid kabulünün yeterli olduğu, ancak bu durumum sayısal sonuçları limit durumuna yaklaştırdığı bildirilmiştir. Bulonlardan kaynaklanan donatı etkisi zeminin ara yüzey kayma dayanımını düşük sargı gerilmesi ile aşırı derecede sınırlandırmaktadır (Şekil 10.5). Zemin kohezyonunun düşüşü ile yüzey stabilizasyonunu sağlayan bulon yoğunluğu ihtiyacı hızla artmaktadır (Perazzelli ve Anagnostou, 2013, s. 87-98).

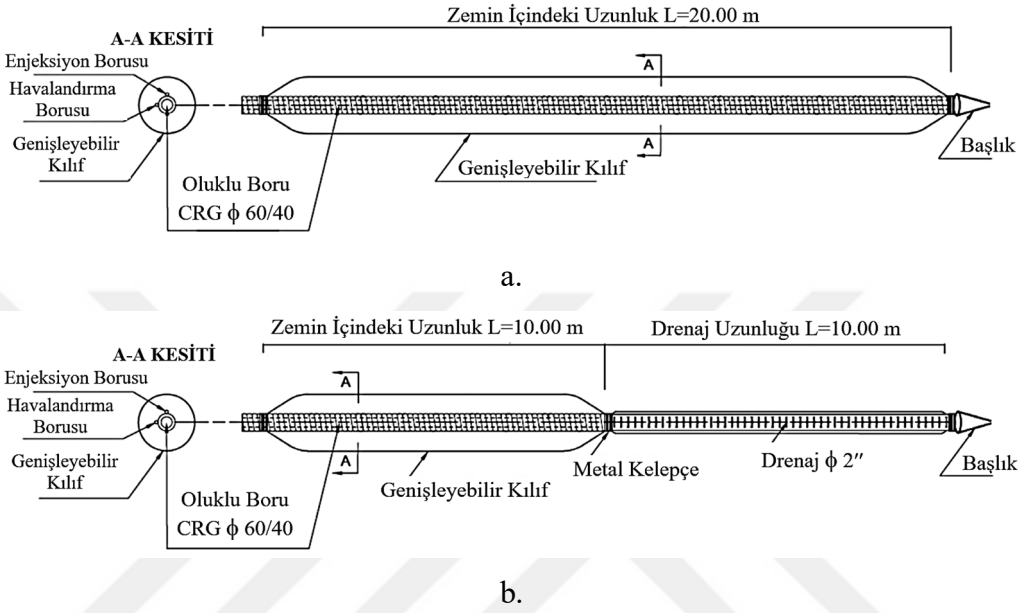


Şekil 10.5. *Sonlu Elemanlar Modeline Göre Elde Edilen Dağılımlar; a. Bulon Yer Değiştirmesi, b. Birim Uzunlukta Bağ Kayma Kuvveti ve c. Bulon Boyunca Eksenel Yük (Kesikli Çizgi 2 mm Bulon Kafa Yer Değiştirmesi ve Elastik Ara Yüz Modeli; Düz Çizgi 8 mm Bulon Kafa Yer Değiştirmesi ve Elasto-Plastik Ara Yüz Modeli)*

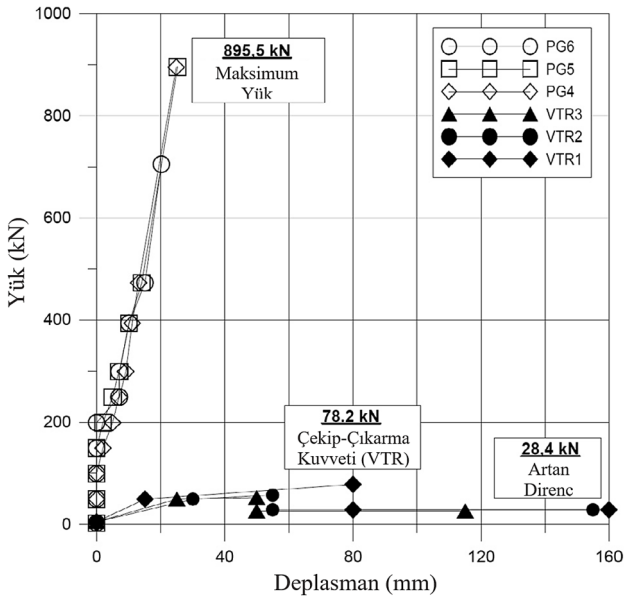
Kaynak: *Perazzelli ve Anagnostou, 2013, s. 96*

Problemli jeolojik şartlar altında tünel inşaatı; stabilitenin sağlanmasından sonra efektif tünel kazısı gerektirmektedir. Sterpi vd. (2013, s. 129-139) tarafından yapılan çalışmada zor şartlarda tünel inşaatı sırasında, boşluk suyu basıncı olması durumunda kaya zeminler için geliştirilen yenilikçi zemin çivisi tekniği değerlendirilmiştir. Önerilen çiviler genişleyebilir geotekstilden üretilmiş fiberglas donatı borusudur. İlk sistemde (f2); önceden açılmış deliğe çivi yerleştirildiğinde boru ve kılıf arasına düşük rötreli çimento bazlı enjeksiyon basılır. Böylece boşluk kapanırken aradaki hava yardımı ile kılıf şişer. 60 mm dış çap 40 mm iç çapa sahip fiberglas boru 20 m uzunluğunda olup 24 m'ye kadar kullanılmaktadır (Şekil 10.6a). Diğer metotta ise (f1) önceki uygulama geliştirilerek inşa edilmektedir (Şekil 10.6b). 10 m uzunluğunda f2 tipi elemana ek olarak 10 m eş eksenli birleşim yapılmaktadır. Drenaj borusu geotekstil ile korunan mikro delikli HDPE

borudur. Su, çivinin en derin kısmında toplanır ve oluklu boru ile drene edilir. Doğal boşluk basıncı veya pompa bu işlemi hızlandırabilir. Tünellerde genelde su bulunduğundan ikinci sistem daha etkilidir. Zemin çivilerinde çekme deneyi uygulanmış olup, sonuçlar Şekil 10.7'de verilmiştir.



Şekil 10.6. *Yenilikçi Zemin Çivisi Sistemleri; a. f2 Tipi Donatı Sistemi ve b. f1 Tipi Hem Donatı Hem de Drenaj Sistemi*
Kaynak: *Sterpi vd., 2013, s. 131*



Şekil 10.7. *Fiberglas ile f2 Tipi Donatıların Arazide Çekme Deneyi Sonuçları*
Kaynak: *Sterpi vd., 2013, s. 132*

Önerilen yenilikçi çiviler güney İtalya'da Timpa Delle Vigne Tüneli'nde kullanılmıştır (Sterpi vd., 2013, s. 129-139). Tünel yaklaşık 14 m eşdeğer çapa sahip olup, gözlenen en yüksek örtü kalınlığı 65 m'dir. Zemin aşırı ayrışmış filitik şist ve killi seviyelerden oluşmaktadır. Yeni tekniğin ağır desteklerle birlikte kullanımı sağlanarak, tünelde güvenli ortam elde edildiği bildirilmiştir (Tablo 10.1 ve Görsel 10.4).

Tablo 10.1: *f2 Tipi Elemanlarla Geomekanik Birimlerde (G3a) Tünel Yüzeyi ve Sınırlarında Oluşturulan Sargı Basıncı $\Delta\sigma_3$ ve Gözlenen Kohezyon c^a Sonuçları*

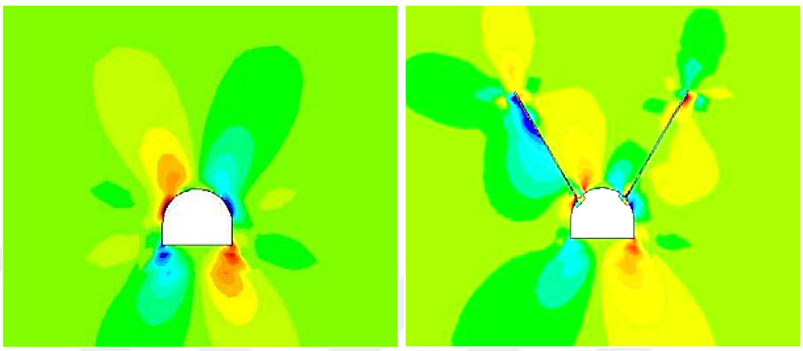
İyileştirilen Bölge	**Tünel yüzeyi**	**Tünel sınırı**
Donatı sayısı	55	40
G3a birimlerindeki sargı basıncı $\Delta\sigma_3$ (MPa)	0,392	0,032
G3a birimlerinde minimum dayanımda gözlenen kohezyon (MPa)	0,311	0,044
G3a birimlerinde maksimum dayanımda gözlenen kohezyon (MPa)	0,354	0,066

Kaynak: *Sterpi vd., 2013, s. 135*

Görsel 10.4. *Zemin Çivisi Uygulaması İle İyileştirilen Timpa Delle Vigne Tünel Yüzeyi*
Kaynak: *Sterpi vd., 2013, s. 136*

Sun vd. (2009, s. 352-357) tarafından yapılan çalışmada, sayısal yöntemle bulon - hasır - ankraj birleşiminin derin tünellerde mekanik etkileri değerlendirilmiştir (Görsel 10.5). Kazı derinliği arttıkça tünel destek tekniği pasif sistemlerden (çelik çerçeve ve ahşap destekler), aktif tarafa geçen sistemlere dönmektedir (bulon - hasır ve ankraj destekler). Tünellerde birleşik destek (coupling support) teorisi yumuşak kayalar için 1997 yılında önerilmiş olup, bulon - hasır - ankraj sistemi ile iç tünel desteği arasında birleşim oluşturmaktadır. Bulon - hasır - tabla sistemi ise derin tünellerde kaya çevresi karakteristiklerini yeterli dayanıma ulaştırmaktadır (Görsel 10.6). Kısacası kaya kütlesini, toplanan plastik enerji ile kendi kendini taşıma potansiyeline uygun hale getirmektedir.

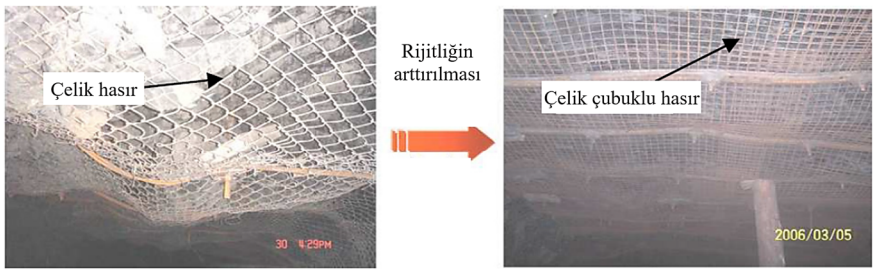
Rijit bulon destek sistemlerinin kapasitesi bulon - hasır ve çevresindeki kaya kütlesi arasında birleşim destek sistemleri ile etkili biçimde arttırılabilir. Yüksek rijitlikte çelik donatı ve kompozit tabla kullanımı bulon - hasır - tabla birleşimi çevre kayasında yeterli ölçüde dayanım ve rijitlik artışı sağlamaktadır. Toplanan plastik enerji de kaya kütlesine iletilmektedir.



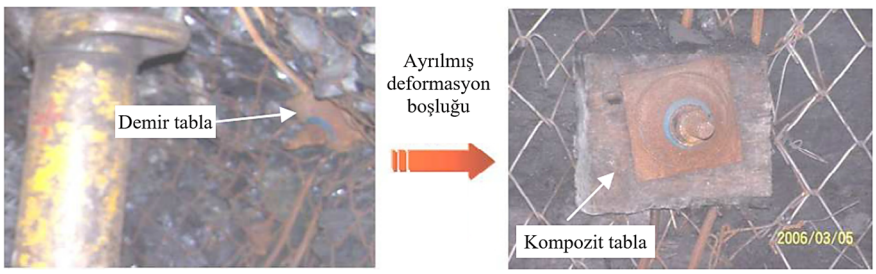
a. b.

Görsel 10.5. *Farklı Destek Durumlarında Çevre Kaya Kütlesinde Meydana Gelen Kayma Gerilmesi Dağılımı; a. Ankrajsız Destek ve b. Ankrajlı Destek Sistemi*

Kaynak: *Sun vd., 2009, s. 355*



a.

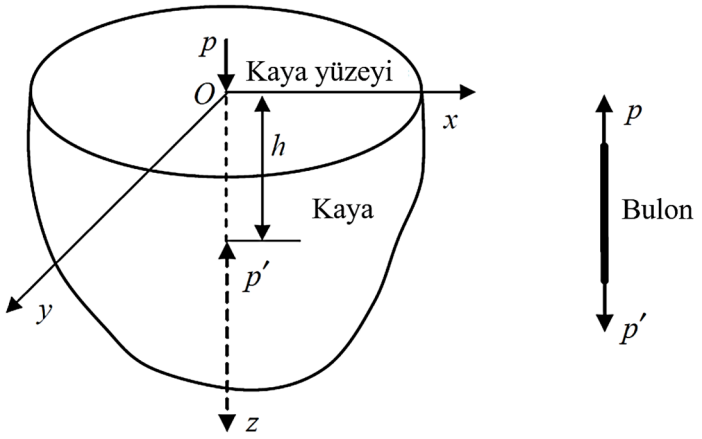


b.

Görsel 10.6. *Derin Tünellerde Bulon - Hasır - Tabla Sistemi; a. Düşük Rijitliğe Sahip Çelik Hasır Yerine Yüksek Rijitlikte Hasır Kullanımı ve b. Tekil Demir Tabla Yerine Kompozit Tabla Kullanımı*

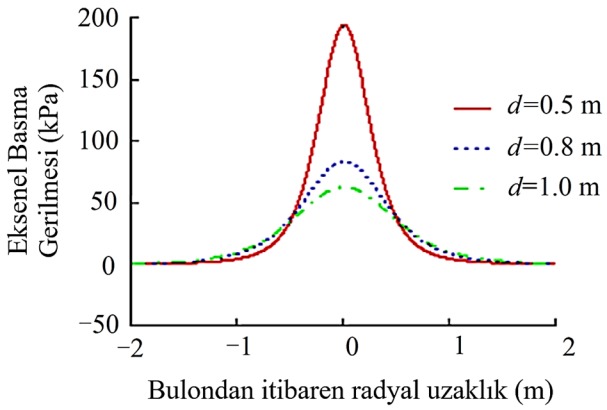
Kaynak: *Sun vd., 2009, s. 354*

Wu vd. (2010, s. 625-628) tarafından yapılan çalışmada, ankraj çevresindeki kayada delik boyunca elastik değişimleri araştırmak adına uç ankraj bulonu için mekanik model geliştirilmiştir (Şekil 10.8). Çalışılan uç ankraj bulonunda, ucun birisi tabla boyunca çevre kayasının yüzeyine monte edilmiş, diğer uç ise bulon başından kaya içerisine bağlanmış, ankraj başlığından döndürme momenti uygulanarak bulona düzgün dağılımlı ön germe uygulanmıştır.

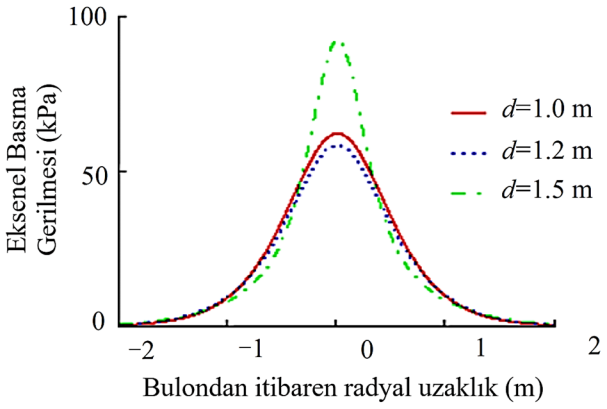


Şekil 10.8. *Bulonun Çevre Kayası Üzerinde Etkisi İçin Geliştirilen Mekanik Model*
Kaynak: *Wu vd., 2010, s. 626*

Problem asimetrik olduğundan eksenel basma gerilmelerinin analizi için x0z ekseni kullanılarak uç ankraj bulonunun çevre kayasındaki hareketi yoğunlaştırılmış kuvvet çifti kabulü ile basitleştirilmiştir. Ankraj yüzeyden 0.5, 0.8, 1.0, 1.2, ve 1.5 m radyal uzaklıklar boyunca çevre kayasındaki basma gerilmeleri değerlendirilmiştir (Şekil 10.9). Bulon uzunluğu 2 m, ön germe kuvveti 100 kN kabul edilmiştir. Ankraj alanındaki eksenel basma gerilmeleri ön germe kuvveti ile doğru orantılıdır ve bulondan eksenel mesafe arttıkça keskin düşüş görülmektedir. Sonuç olarak, eksenel basınç alanının boyutunun bulon uzunluğu ile hesaplanabileceği kanaatine varılmıştır (Wu vd., 2010, s. 625-628).



a.



b.

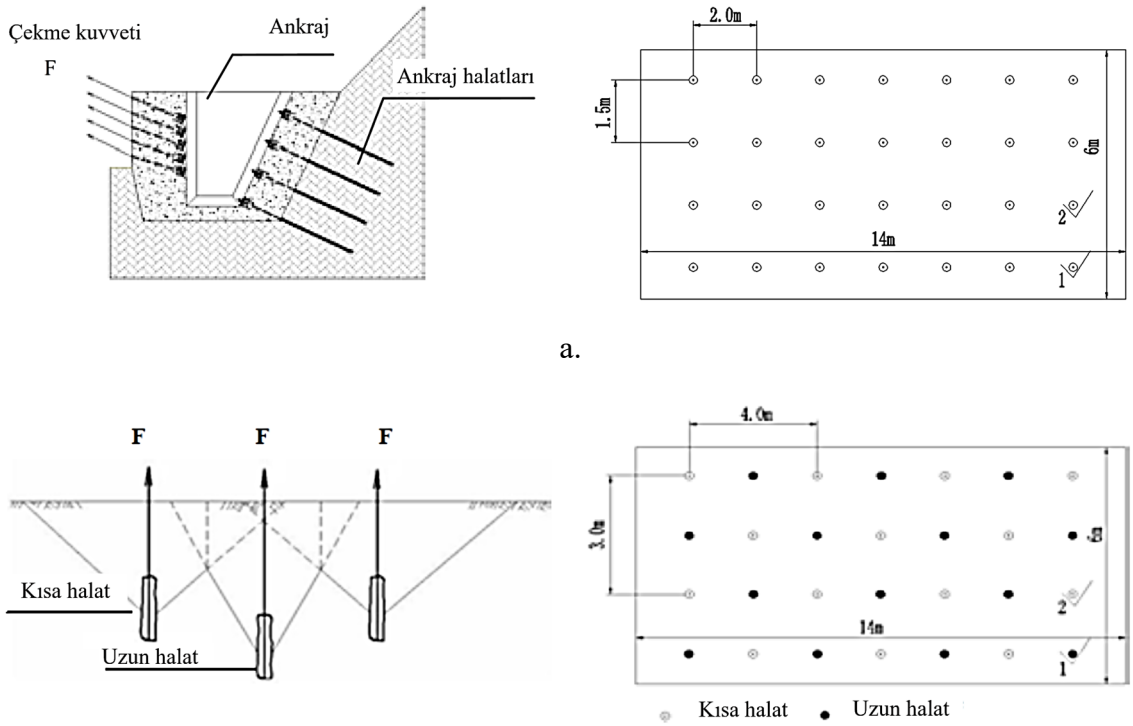
Şekil 10.9. *Bulonun Radyal Uzaklığının İşlevi Olarak Eksenel Basınç Gerilmesi Değişimi; a. 0.5, 0.8, 1.0 m Mesafe ve b. 1.0, 1.2, 1.5 m Mesafe*
Kaynak: *Wu vd., 2010, s. 627*

Nikitenko vd. (2013, s. 808-813) tarafından ankraj projelerinde yapılan gözlemler sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

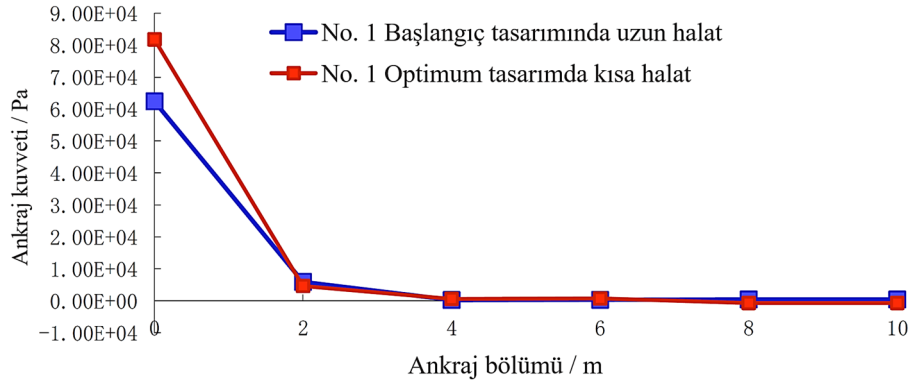
- Hendek duvarlar ve palplanşlar derin temel çukurlarında etkili biçimde kullanılmaktadır.
- Duvarlara ankraj sabitlenmesi, duvar kalınlığını düşürür ve çakma derinliğini azaltırken, gerekli çalışma zamanını arttırmaktadır.
- Açılı payanda kullanımı, kazık çapının arttırılması ve özellikle yumuşak zeminlerde çimento enjeksiyonu ile zemin iyileştirilmesi gibi önlemler istinat duvarının inşasının hızlanmasına yardımcı olmaktadır.

Ankrajlardaki ön germe kabloları genellikle eşit uzunlukta kullanılır ve kök bölgesinin hemen ön kısmında çekme gerilmesi yoğunlaşmasına bağlı olarak kaya

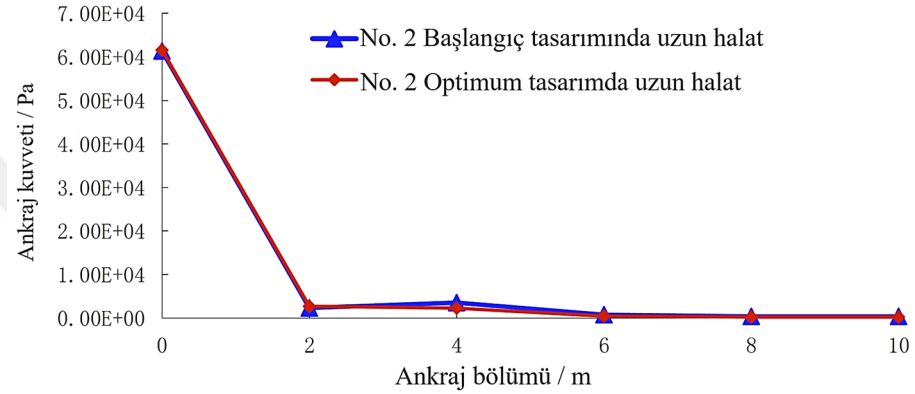
stabilitesi zayıflar. Ayrıca, yakın kablo diziliminden dolayı ön germe kablolarının inşası genellikle zor olmaktadır. Eşit uzunluklu ankraj uygulamasına alternatif oluşmak amacıyla Liu vd. (2012, 5, s. 76-82) tarafından yapılan çalışmada, New Nanning - Guangzou Demiryolu hattı Batı Nehir Köprüsü inşaatında "quincunx" ankraj dizilimi ile uzun kablolar ve alternatif kısa kablolar birlikte kullanılarak çekme gerilmeleri düşürülmüştür. Eşit boy dizilimi ile "quincunx" dizilimi kıyaslandığında karşılaşılan sonuçlar; ön germe kablo gruplarının "quincunx" dizilimine uyarlandığında; kaya şevlerinde yer değiştirmelerin azalacağını, kısa kablo kullanımın karşılanan ankraj kuvvetini arttırarak maliyeti düşüreceğini ve önerilen ankraj sisteminin köprü yüklerini güvenle taşıyacağını göstermiştir. Standart kablolar 10 m uzunlukta kullanılmış olup, yatayla 20 - 25º açı ve 1050 - 1350 kN arasında ön germe kuvveti uygulanmıştır (Şekil 10.10a). Quincunx diziliminde ise kabloların yarısının boyları kısaltılmıştır. Aralıklar 1,5 - 2,0 m arttırılmış ve uzun kablo boyları eşdeğer uzunluğu sağlamak adına 2 - 4 m arttırılmıştır (Şekil 10.10b). İki farklı dizilim sonuçları karşılaştırılmıştır (Şekil 10.11).



Şekil 10.10. *a. Ankraj Yapısının Dikey İzdüşümü İle Ankraj Aralıkları ve b. Önerilen Quincunx Diziliminde Alternatif Kısa Kabloların Uzun Kablolarla Kullanımı İle Ankraj Dizilimi*
Kaynak: *Liu vd., 2012, 5, s. 78 - 79 - 80*



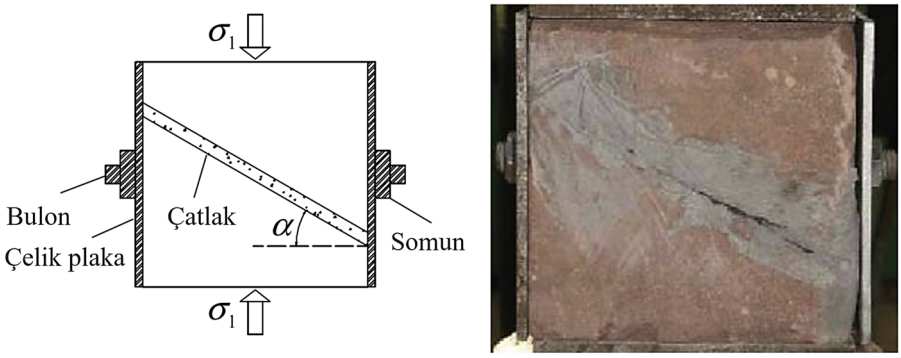
a.



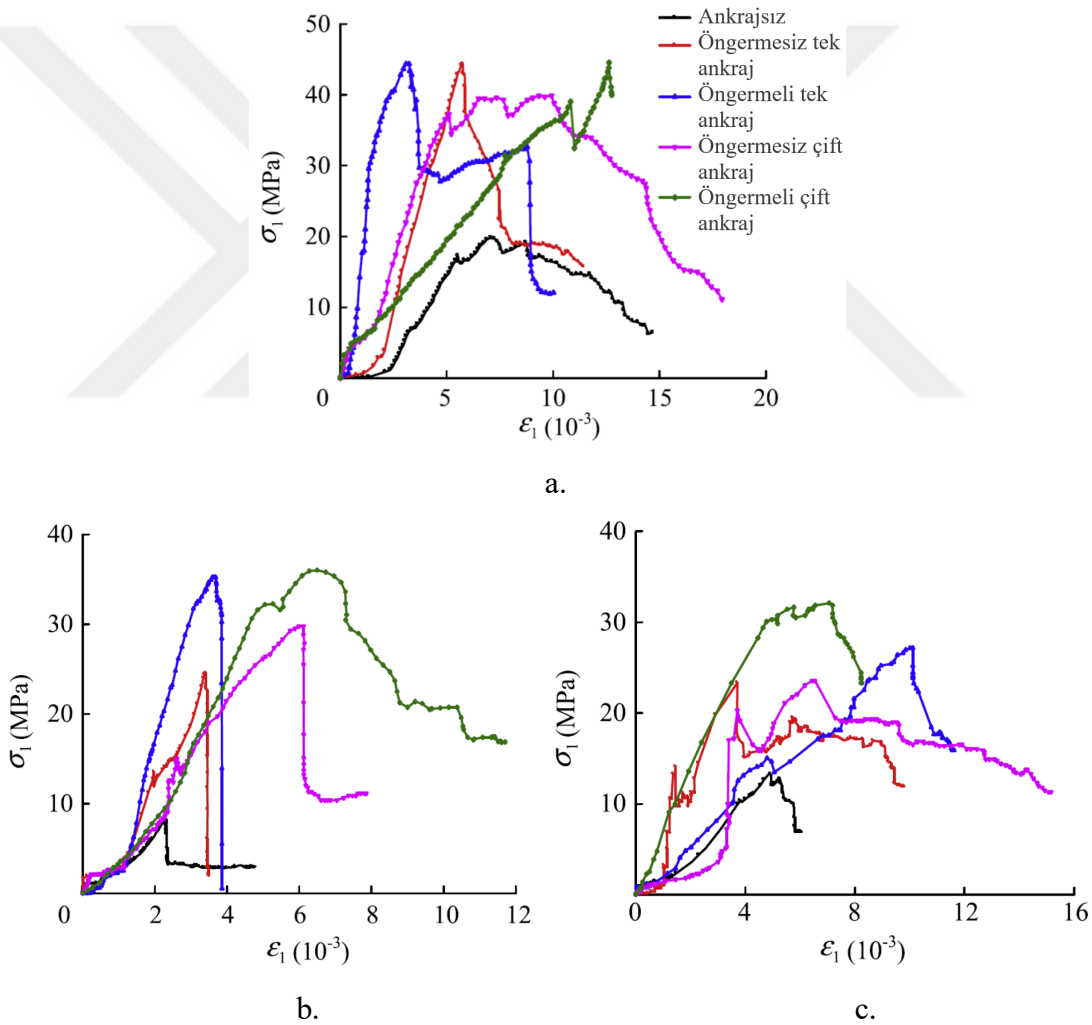
b.

Şekil 10.11. *Enjeksiyonlu Kısımda Ankraj Kuvveti Dağılımının Karşılaştırılması; a. Kablo Uzunluğu Değiştiğinde Oluşan Kayma Gerilmesi, b. Kablo Uzunluğu Sabit Kaldığında Oluşan Kayma Gerilmesi*
Kaynak: *Liu vd., 2012, 5, s. 81*

Zong vd. (2014, s. 165-170) tarafından yapılan çalışmada, çatlaklı kumtaşının enjeksiyonlu ve ankrajlı serbest basınç deneyi sonuçları baz alınarak; dayanım ve deformasyon özellikleri, göçme modeli, çatlak oluşumları değerlendirilmiştir. Çalışma kullanılan 150 mm boyutlarında standart küp numuneler düzensiz kaya parçalarından üretilmiştir. 30º, 45º ve 60º açılarla ön çatlaklar oluşturulmuştur. Çatlaklar çimento şerbeti ile doldurulduktan sonra 28 gün bekletilmiştir. Yükleme eksenine dik olacak şekilde iki çelik plaka ve ankrajlar kullanılarak numune sabitlenmiştir (Şekil 10.12). 500 N tork ile ankrajlar sıkıştırılmıştır. Ankrajsız (NA), ön germesiz tek ankraj (NPSA), ön germeli tek ankraj (PSA), ön germesiz çift ankraj (NPDA) ve ön germeli çift ankraj (PDA) olmak üzere 5 farklı ankraj dizilimi test edilmiştir (Şekil 10.13).



Şekil 10.12. *Enjeksiyon ve Ankraj Uygulanan Çatlaklı Kumtaşı Numunesi*
Kaynak: *Zong vd., 2014, s. 166*



Şekil 10.13. *Farklı Ankraj Koşullarında Çatlaklı Numunelerin Gerilme - Birim Şekil Değiştirme Grafikleri; a. 30º, b. 45º ve c. 60º*
Kaynak: *Zong vd., 2014, s. 167*

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre (Zong vd., 2014, s. 165 - 170);

- Çatlaklı numunelerin farklı çatlak açılarıyla serbest basınç dayanımı ve elastisite modülü değerleri, bozulmamış numunelerden daha düşüktür.
- Pik dayanım ve geri kalan dayanım değerleri; ankraj sayısı ile ön germe derecesinden kesinlikle etkilenmektedir.
- Kayma ve kısıtlamalar bulonların birim şekil değiştirme değerlerini etkilemektedir.
- Çatlak sayısı ankrajlı durumlarda ankrajsızlara göre daha azdır.

11. YÖNTEM VE AŞAMALAR

İnşaat sektöründe sıkça tercih edilen ankraj uygulaması konusunda geliştirilen yeni yöntem ile ankrajların çalışma prensibi geliştirilmiş olup, yöntemin uygulanması ile ülke ekonomisine ciddi oranda katkı sağlanması amaçlanmıştır. Kesit, geometri, taşıma kapasitesi, üretim ve arazi koşullarında uygulama gibi adımları içeren tasarım aşamasının ardından şemsiye ankraj üretimleri yapılmıştır. Şemsiye ankraj yöntemi ile günümüze kadar literatürde olmayan yeni bir yöntem uygulama ile doğrulanarak literatüre kazandırılmış olup aynı zamanda ulusal patent başvurusunda bulunulmuştur. Yöntemin en önemli katkısı ise istinat yapılarındaki göçme güvenliğinin kat kat arttırmasıdır. Önerilen yöntemin farkının anlaşılabilmesi açısından mevcut yöntemde istinat yapıları ve bu yapılarda kullanılan ankrajlar çalışma prensipleri ile birlikte açıklanmıştır.

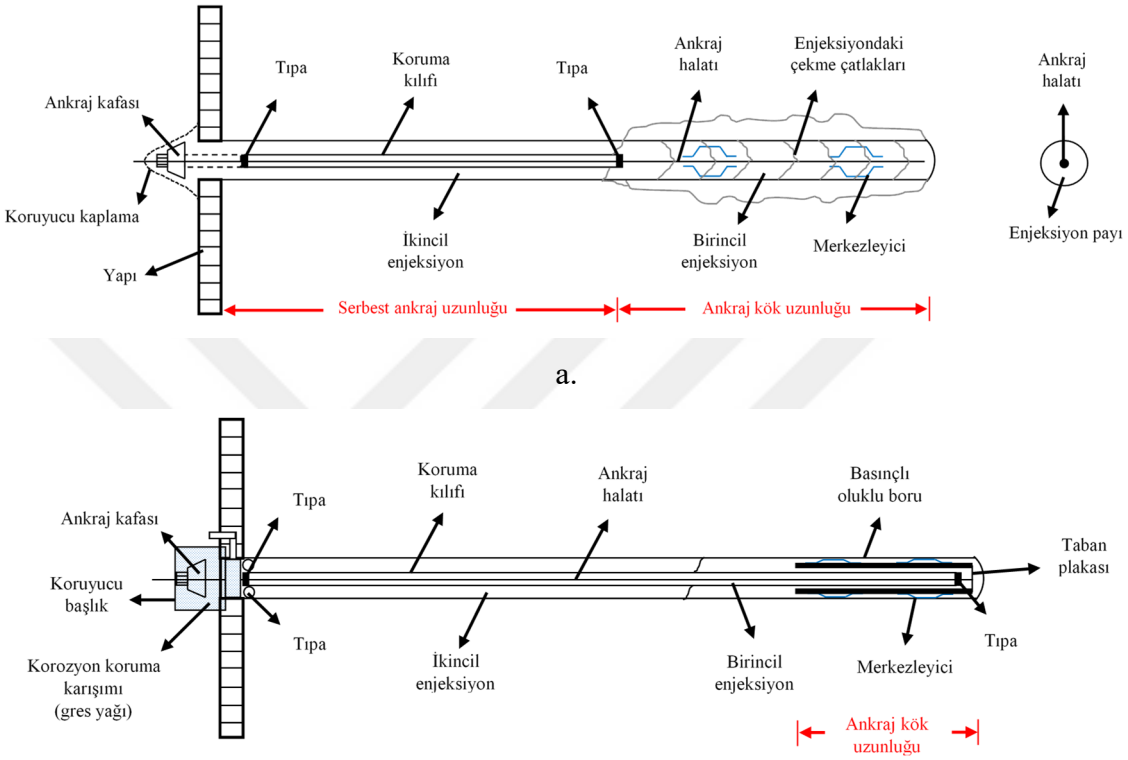
11.1. İstinat Yapılarında Kullanılan Ankraj Çeşitleri

Geoteknik mühendisliğinde; şevlerde, derin kazılarda, tüneller ve madenlerde stabilitenin sağlanması amacı ile tercih edilen ankrajların; çalışma prensibi, kullanım amacı, sabitlendiği eleman ve sabitlendiği biçime göre çeşitleri bulunmaktadır.

Halatın enjeksiyon kolonuna sabitlenmesi metoduna göre ankraj kökü uzunluğuna bağlı olarak uygulanan yük kuyu yüzeyinden aşağıya veya tabandan yukarıya doğru hareket ettirilebilmektedir. Süregelen uygulamalarda; halat enjeksiyona gömülür ve sonrasında uygulama yükünde enjeksiyon / zemin ara yüzünde kayma gerilmesi ve normal gerilmeler meydana gelir. Bu gerilmeler ankraj kök uzunluğu boyunca kademeli biçimde göç eder. Sonuç olarak çekme, halat çevresindeki enjeksiyonun çekmeye maruz kalmasına ve çekme çatlakları oluşmasına yol açar. Söz konusu çalışma prensibi çekme ankrajları (Şekil 11.1a) için geçerlidir. Daha ilgi çekici olanı ise basınç ankrajlarıdır (Şekil 11.1b). Bu ankraj tipinde ise kuvvet ankraj bölgesinin tabanına iletilir (Hanna, 1982, s.27). Bir başka sınıflandırmada ise ankraj tipleri sabitlendikleri yere ve yapılara göre şu şekilde verilmiştir (Murthy, 2003, s. 926):

1. Ankraj kütlesi (deadman), ankraj plakası, ankraj kirişleri: Küçük beton bloklar veya sürekli beton kirişlerin direnci ile pasif zemin basıncı oluşturulmaktadır. Doğal zemin yüzeyinin hemen altındaki uygulamalar için uygundur.
2. Eğik kazıklarla desteklenen ankraj blokları: Sağlam zeminin derinde olduğu durumlarda tercih edilir.

3. Palplanşlar: Ankraj kütlesi ile benzer amaçla pasif zemin kütlesi oluşturmak için kullanılan ve sürekli duvar biçiminde inşa edilen kısa metal elemanlardır.
4. Mevcut yapılar: Ankrajlar, sağlam yapı veya vinç temellerine bağlantı çubukları ya da halatlarla sabitlenebilir.



Şekil 11.1. *Genel Çalışma Prensibine Göre Ankraj Çeşitleri; a. Çekme Ankrajı ve b. Basınç Ankrajı (Hanna 1977'den sonra)*
Kaynak: *Hanna, 1982, s. 27*

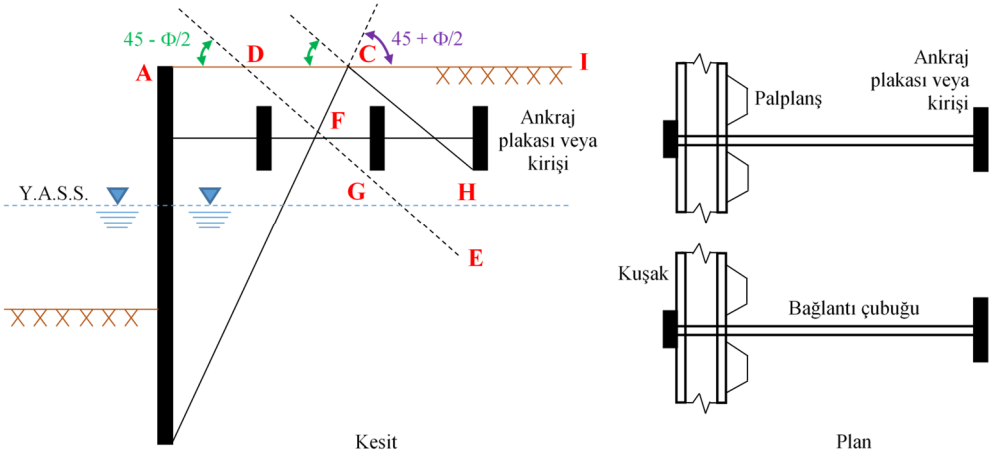
Ankraj plakası ve kirişleri genellikle döküm beton bloklar şeklinde üretilmektedir. (Şekil 11.2a). Ankrajlar palplanşlara ankraj çubukları ile bağlanmaktadır. Kuşak kirişi palplanşın ön veya arka yüzüne yerleştirilerek, ankraj çubuğu duvara rahatlıkla sabitlenir. Ankraj çubuğunu korozyona karşı koruyabilmek için, çubuk genellikle boya veya asfaltlı malzeme ile kaplanır. Ankraj çubuklarını inşasında; donatı veya çelik kablolar enjeksiyon ile önceden açılmış deliklere yerleştirilir (Şekil 11.2b). Genellikle yüksek dayanımlı ön germeli çelik tendonlar kablo olarak kullanılır. Şekil 11.2c ve 11.2d'de düşey ankraj kazıkları ve eğimli kazıklarla desteklenen ankraj kirişleri görülmektedir. Ankraj plakası veya kirişlerinin karşı koyma direnci birincil olarak önlerinde bulunan zeminin pasif kuvvetinden kaynaklanmaktadır. Ankraj plakalarının en yüksek verimlilikte nereye yerleştirileceğini Şekil 11.2a'dan anlayabiliriz. Eğer ankraj Rankine aktif bölgesinde yer alan ABC kaması içerisine yerleştirilirse, göçmeye karşı herhangi bir mukavemet sağlamayacaktır. Alternatif olarak, ankraj CFEH bölgesine yerleştirilebilir. DFG hattının Rankine kayma çizgisi olduğu dikkate alınmalıdır. Eğer pasif kamanın bir kısmı, ABC aktif bölgesinde

kalırsa, ankrajın tam kapasitede çalışması sağlanamaz. Ancak, ankraj ICH bölgesine yerleştirilirse, ankraj kökü tamamen pasif bölgede kalacağından, aktif bölgenin dışında olacak ve tam kapasitede çalışabilecektir (Das, 1984, s. 295).

"Ankraj sistemlerinin bir diğer kullanım alanı ise Palplanş duvarlardır. Palplanş sistemlerinde kullanılan genel ankraj tipleri aşağıdaki gibidir (Das, 1984, s. 295)":

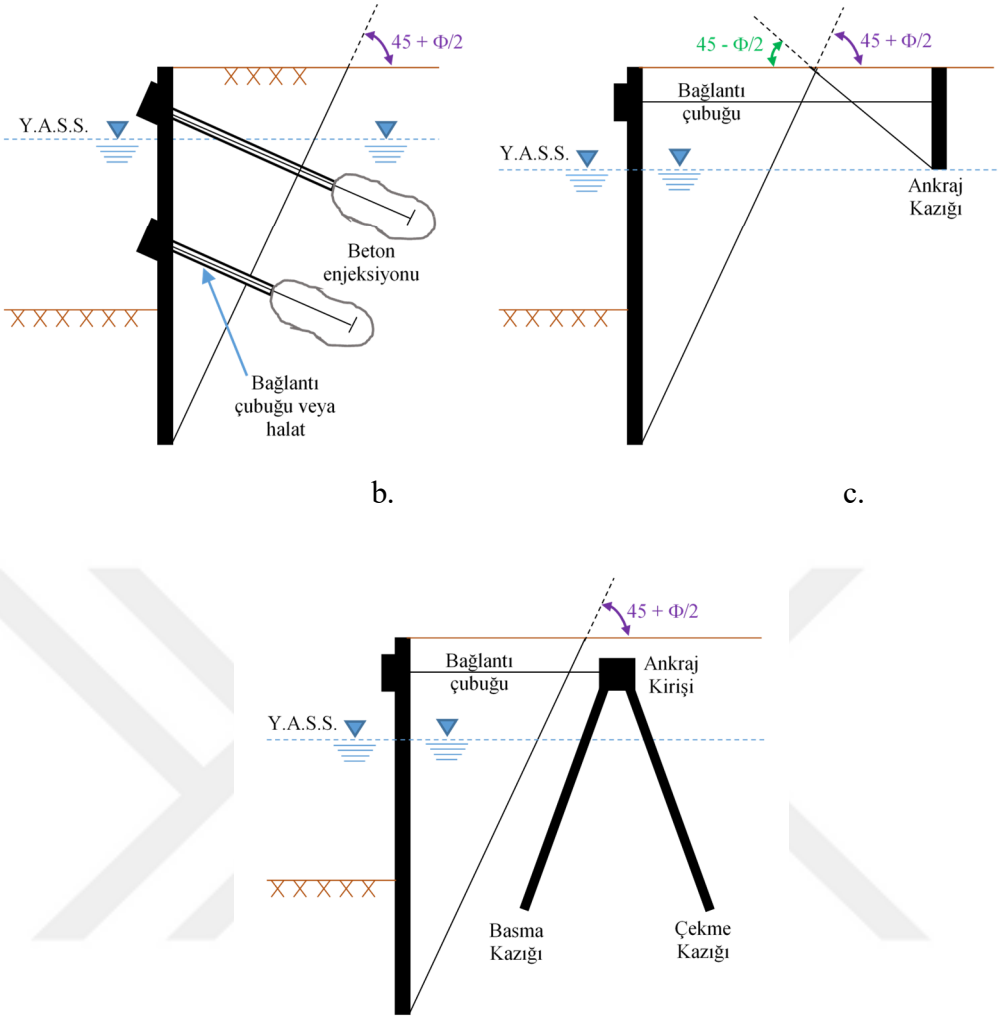
1. Ankraj plakası ve kirişleri (dead man)
2. Ankraj çubuğu
3. Düşey ankraj kazıkları
4. Eğimli kazıklar ile desteklenen ankraj kirişleri

Ankrajlar tasarım süresine göre geçici ve kalıcı olmak üzere iki farklı tipte uygulanmaktadır. Genellikle 2 yıl tasarım ömrüne sahip geçici ankrajlar sadece bu süre içinde stabiliteyi sağlamak için kullanılır. Kalıcı ankrajlar ise yapı ömrü ile aynı tasarım ömrüne sahiptir. İki tip arasındaki temel farklar korozyon koruma detayları ve güvenlik sayılarıdır (Ergun, 2008, s. 16).



a.

Şekil 11.2. *Palplanş Duvarlarda Kullanılan Çeşitli Tiplerde Ankraj Uygulamaları; a. Ankraj Plakası veya Kirişi, b. Ankraj Çubuğu Bağlama, c. Düşey Ankraj Kazıkları ve d. Eğimli Kazıklar İle Desteklenen Ankraj Kirişleri*
Kaynak: *Das, 1984, s. 296-297*



Şekil 11.2. (Devam) *Palplanş Duvarlarda Kullanılan Çeşitli Tiplerde Ankraj Uygulamaları; a. Ankraj Plakası veya Kirişi, b. Ankraj Çubuğu Bağlama, c. Düşey Ankraj Kazıkları ve d. Eğimli Kazıklar İle Desteklenen Ankraj Kirişleri*
Kaynak: *Das, 1984, s. 296-297*

Derin kazılarda farklı tiplerde destekleme sistemleri mevcuttur. En sık kullanılan ise kazık-kiriş tipi desteklerdir (Berlin destek sistemi, Görsel 11.1). Fakat açılı geri dolgu olan arazi koşullarında ankrajsız kullanımda ötelenmeler gözlenebilmektedir. Temel kazısının 7 m'den derin olduğu durumlarda sistem; hendek duvarı, kanallı payanda veya ankraj gibi bağlantılarla desteklenmelidir (Görsel 11.2). Bu işlem aynı zamanda çakma derinliğini de düşürmektedir. Ankraj işlemine kontrollü harç enjeksiyonu çevredeki zeminin kalitesini etkiler. Ankrajın taşıma kapasitesini arttırır ve çimento tüketimini düşürmektedir (Nikitenko vd., 2013, s. 808-813).

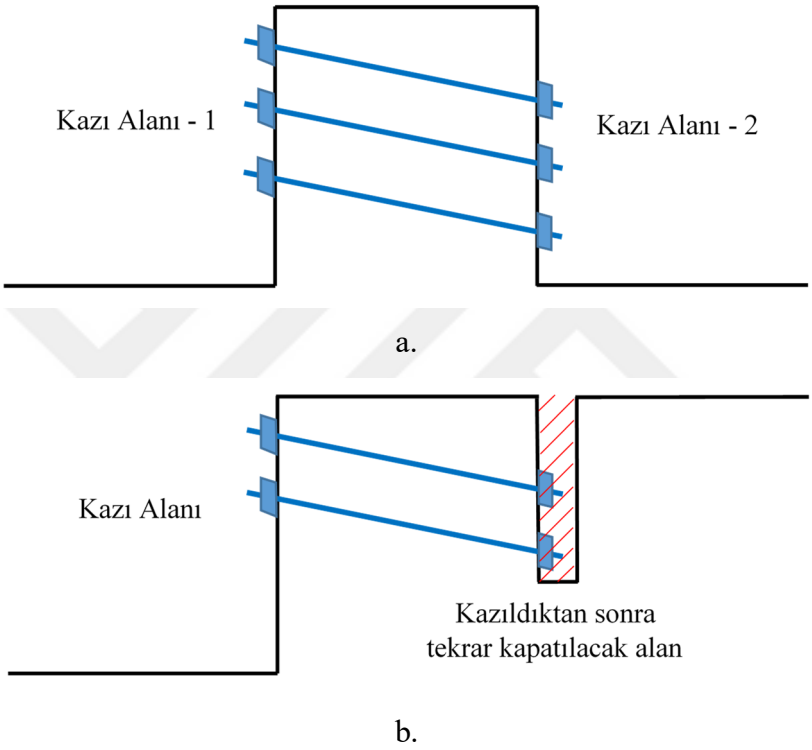
Görsel 11.1. *Derin Temel Kazısında Ankrajsız Kazık-Kiriş Duvar Sistemi*
Kaynak: *Nikitenko vd., 2013, s. 808*

a. b.

Görsel 11.2. *Ankraj İçeren Duvarlar, a. Kazık-Kiriş Tipi ve b. Arazideki Deliklere Sonradan Yerleştirilen Tip*
Kaynak: *Nikitenko vd., 2013, s. 809*

Zemin içerisinde kullanılan ankrajların kök bölgelerinde sabit uç oluşturmanın yanı sıra sabitleme işlemi iki şev yüzeyinin birbirine sabitlenmesi (Şekil 11.3a) veya söz konusu ankraj derinliğine kadar yüzeyden açık kazı yapılıp sabitleneme şeklinde de gerçekleştirilebilir (Şekil 11.3b). Fakat bu işlemler geçici kazı destek çalışmalarıdır. İlgili arazide yapılacak yeni yapıda ankrajlar boşa çıkmaktadır. Ayrıca bu uygulamalar çok ciddi hafriyat gerektirdiğinden zaman, işçilik ve maliyet kaybına yol açmakta olup işlem yapılan bölgelerin geçici ankrajlarda inşa süresi bitimine kadar kalıcı ankrajlarda ise sürekli sabitleme işlemi yapılan komşu arazinin kullanımını engellemektedir. Diğer taraftan geleneksel ankraj uygulamalarında kök bölgelerinde sıklıkla yaşanan sıyrılmalar can ve mal kayıplarına yol açmaktadır. Kompozit yapı teşkili ile ankraj kök bölgesi

uzunluğunun azaltılması, ankraj çekme kapasitesinin arttırılarak aynı yük değeri için ankraj sayısının azaltılması, tasarım sürecinde kullanılan güvenlik sayısının düşürülmesi ile maliyet açısından kazanç sağlanması, işçilik ve zaman kazancı gibi sebepler yeni ankraj tasarım sürecini başlatılmıştır. Kuyu içerisinde şemsiye mantığı ile kolayca açılabilecek mekanik bir ankraj elemanı tasarımının yenilikçi bir yaklaşım olarak şevlerde, madenler ve tünellerde yaşanan ve ciddi can ve mal kayıpları ile sonuçlanan göçmelerin önüne geçebileceği kanaatine varılmıştır.



Şekil 11.3. *Yakın Arazilerde Ankraj Uygulama Yöntemleri; a. İki Şev Yüzeyinin Birbirine Sabitlenmesi ve b. Açık Kazı Yapılarak Sabitleme*

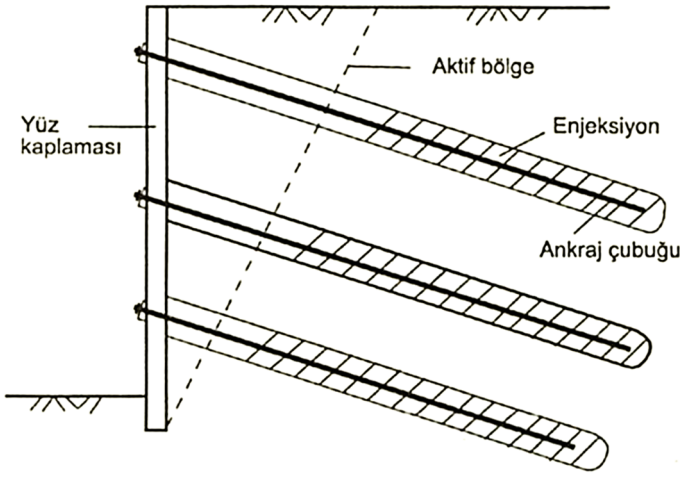
11.2. Ankraj Tasarım Kriterleri

Hareketli bir elemanı daha rijit bir eleman sabitlemek amacı ile kullanılan ankrajlar hem betonarme hem de geoteknik mühendisliğinde vazgeçilmez birer bağlantı aracı olarak tercih edilmektedir. Her iki alanda da benzer yöntemlerle uygulanan ankrajlar, betonarme elemanlarda genellikle mevcut yapıya sonradan monte edilmesi planlanan parça veya elemanların sabitlenmesinde kullanılmaktadır. Epoksi ile filiz bırakılması, genleşebilir çelik dübeller, bulonlar ve prefabrik elemanların montajı sırasında tercih edilen mekanik bağlantılar birer basit ankraj olarak tanımlanabilir. Yine geoteknik

projelerinde uygulanan sürenler, kaya bulonları ve standart ankrajlar; malzeme ve zemin yüzeyleri arasındaki sürtünme yani aderans kuvvetine göre çalışmaktadır.

Ankraj uygulanabilmesi için öncelikle kazı yüzeyine inşa edilmiş bir kazı destek yapısı gerekmektedir. Bu istinat yapılarının tasarımındaki ilk aşama da yanal zemin basıncının hesaplanmasıdır. Yanal zemin basıncının hesaplanmasında genel itibari ile kabul gören iki teori ön plana çıkmaktadır. Bunlar, Rankine (1857) ve Coulomb (1776) teorileridir. Rankine teorisinde; zemin kütlesi boyunca kayma göçmesi meydana gelen noktada plastik denge durumu aşıldığında, zemin kütlesindeki gerilme durumuna odaklanılmaktadır. Teori; plastik çözümün alt sınırına karşılık gelmektedir. İlgili kayma dayanımı parametreleri kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (Φ) ile ifade edilmektedir. Kayma göçmesi ana asal düzleme $45^{o}+ \Phi /2$ açısı ile oluşan düzlem boyunca meydana gelmektedir (Craig, 1997, s. 181). Coulomb teorisi ise istinat yapısı ve deneme göçme düzlemleri arasındaki zemin kamasının tamamının stabilitesine odaklanılmasını kapsamaktadır. Kama ve duvar yüzeyi arasındaki kuvvet; kayma düzleminin ne altında ne de üstünde olan kayma noktasında, kamanın sınır dengesi durumunda kamaya etkiyen kuvvetlerin dengesi ile hesaplanmaktadır. Zemin ve duvar malzemesi arasındaki sürtünme açısı δ (adezyon) ile ifade edilmekte ve laboratuvardaki karşılığı direkt kesme deneyi ile hesaplanmaktadır. Duvar sürtünmesi sebebi ile hem aktif hem de pasif durumda kayma yüzeyinin şekli duvar tabanına yakın yerde eğrilmektedir. Fakat Coulomb teorisinde, kayma yüzeyleri her durum için düzlemsel kabul edilmektedir. Coulomb teorisi plastik çözümün üst sınır değeri olarak yorumlanmaktadır (Craig, 1997, s. 195).

Kazılarda, yüz kaplamasını tutmak üzere; kaplama, aralıklarla yerleştirilen ankraj çubuklarıyla (genellikle çelik çubuklar) zemine bağlanır (Şekil 11.4). Bir çubuklu ankraj; 0,1 - 0,3 m çapındaki burgularla, gerekirse kaplama borusu da kullanılarak, zeminin delinmesi, deliğin içine çelik çubukların (ankraj çubukları) yerleştirilmesi ve çubuk çevresindeki boşluğun (varsa kaplama borusu çekilerek) enjeksiyonla doldurulması ile oluşturulur. Enjeksiyon, aktif bölge dışındaki uzunluğa uygulanır. Ankraj çubukları, yüz kaplamasına tespit edilir. Bazı durumlarda, çubuğa ön gerilme verilir. Ankraj çubukları çekme kuvvetine uğrarken, bu; ankraj çubuğu çevresindeki sürtünmelerle karşılanır. Hesap ilkeleri vardır. Benzer şekilde, delik açılmaksızın, zemine doğru çakılan ankraj çivileri de vardır (Uzuner, 2011, s. 359 - 360).



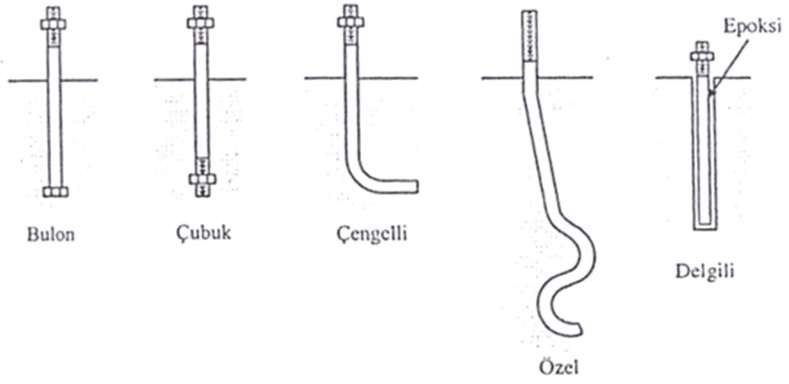
Şekil 11.4. *Bir Ankrajlı Kaplama*
Kaynak: *Uzuner, 2011, s. 359*

Zemin ankrajları serbest bölge ve kök bölgesi olmak üzere iki kısımdan meydana gelmektedir. Serbest boy istinat yapısının yüksekliğinin bir fonksiyonudur. Bu değer istinat yapısının yüksekliği ile orantılı biçimde değişecek aktif bölge, geçiş bölgesi ve pasif bölge ile alakalıdır. Kök boyu ise zemin tipine göre seçilir ve 3 m ile 10 m arasında değişmektedir. Kök bölgesi zemin içerisindeki ankrajın çekme yükünü taşıyan kısımdır. Kök bölgesinden zemine gerilme aktarımı genellikle aderans gerilmesi olarak tanımlanır ve zemin tipi ile enjeksiyon özelliklerine bağlıdır (Ergun, 2008, s. 17). Serbest bölge, ankraj halatının zemin ile temasının olmayan, sadece kök ile yüzey arasındaki bağlantıyı sağlayan ve bireysel olarak halatın gerildiği kısımdır. Ankrajın arazi uygulaması göz önünde bulundurularak, tasarımda ince ve orta sıkı kumlarda kök boyu için önerilen alt sınır 6 m verilmekle birlikte, çakıllı zeminlerde daha kısa olabilmektedir. Killerde ise kök boyu tasarımda genellikle 7 - 8 m alınmakta olup yük kapasitesi kum ve çakıllı zeminlere göre daha düşük olmaktadır. Ankraj aralıkları en az 1,5 - 2,0 m olmalı ve kök uzunlukları arasında da en az 2 - 3 m boşluk olmalıdır. Yakın aralıklı ankrajlar kullanılacaksa özdeş sıra ile yerleştirmek yerine yatayla 10º ve 15º gibi farklı açılarla uygulanarak aralık ölçütleri sağlanabilir. Derin ve sağlam tabakalarda uygulama açıları yatayla 5º ile 25º arasında seçilebilir (Ergun, 2008, s. 17). "Her ankraj kökündeki izin verilebilir kuvvet (P_{all}), maksimum yükün (P_u) güvenlik sayısına bölünmesi ile elde edilmektedir. Kök bölgesinde güvenlik sayısının 2 alınması önerilmektedir (Das, 1984, s. 300)".

Ankraj ve ankraj bulonlarındaki en önemli hususlardan birisi de malzeme dayanımıdır. Tasarımda her ne kadar zemin ve ankrajlı iksa sistemleri için uygun

hesaplamalar yapılsa da ankrajın üretildiği malzeme yeterli dayanıma sahip değilse sistem göçecektir. Bu davranış daha çok yapısal ankrajlarda ön plana çıkmaktadır. Çünkü zemin - ankraj etkileşiminde çoğu zaman halat kapasitesine ulaşamadan zemin taşıma kapasitesi aşılmaktadır. Ancak, betonarme elemanların birbirlerine sabitlenmesine olanak sağlayan ve beton - çelik etkileşimine göre çalışan yapısal ankrajlarda malzeme özellikleri daha fazla önem arz etmektedir. Diğer taraftan yapısal ankrajlar da zemin ankrajları ile benzer tasarım ölçütlerine sahiptir. Yapısal sabitleme işlerinde ankraj görevi gören çelik çubuk ve bulonların özellikle kaya ve kayaç oluşumlarında zemin ankrajı olarak kullanıldığı uygulamalar bulunmaktadır.

Ankraj bulonları, ya bulonların kendilerinin kırılması ile veya beton içindeki ankrajın kaybolması ile göçebilir. Çelik, betondan çok daha sünektir ve bu süneklik özellikle rüzgar ve sismik yükler söz konusu olduğu zaman önemlidir. Bu nedenle, ankraj bulonları; kritik yenilme şeklindeki ankraj yenilmesinden ziyade, bulonun kendisini kesmesi veya çekmesi olacak biçimde tasarlanmalıdır. Diğer bir deyişle, bulon beton yenilmeden önce yenilmelidir. Aşağıdaki yöntemler, bu ilkeyi karşılayan ankraj bulonları tasarlamada kullanılabilir. Bu yöntemler, ACI ve AISC şartlarına dayandırılır. Ancak, bazı yapı yönetmelikleri ilave şartlar öne sürebilir veya farklı tasarım teknikleri belirleyebilir. Şekil 11.5'te gösterildiği gibi 5 çeşit ankraj bulonu mevcuttur (Coduto, 2001 çeviri, s. 308).



Şekil 11.5. *Ankraj Bulonu Çeşitleri*
Kaynak: *Coduto, 2001 çeviri, s.309*

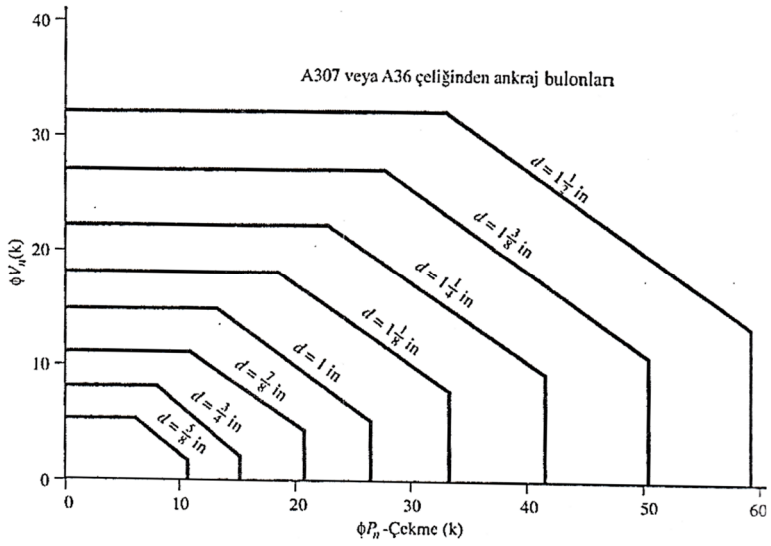
"Ankraj bulonlarının çoğu 250 MPa akma dayanımında, ASTM A36'yı veya ASTM A307'yi sağlayana çelikten yapılmaktadır. Ancak, gerekli olduğunda daha yüksek dayanımlı çelik kullanılabilir. Her bir bulon aşağıdaki tasarım ölçütünü karşılamalıdır (Coduto, 2001 çeviri, s. 309)". Şemsiye ankraj uygulaması için oluşturulan kompozit kök bölgesi için de benzer şart geçerlidir.

$$P_u \leq \emptyset P_n \tag{11.1}$$

$$V_u \leq \emptyset V_n \tag{11.2}$$

Burada: P_u pozitif bir sayı olarak ifade edilen AISC yük faktörlerine dayalı çekme kuvveti; V_u AISC yük faktörlerine dayalı kesme kuvveti; $\emptyset$ direnç faktörü; P_n nominal çekme kapasitesi, V_n nominal kesme kapasitesidir.

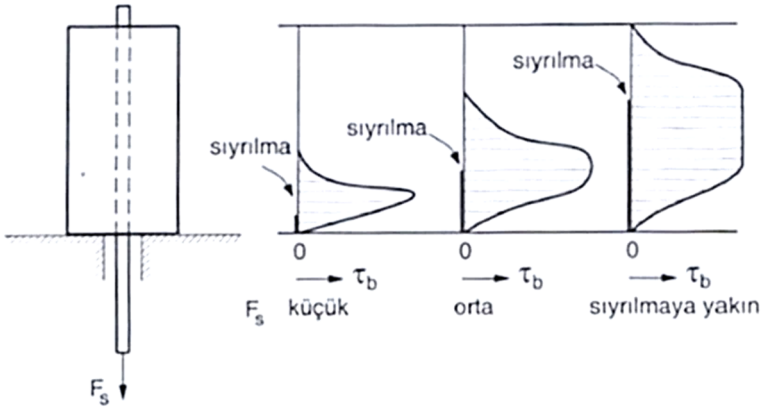
"ASTM A36 ve ASTM A307 bulonları için kesme ve çekme kapasiteleri ile etkileşim şartları Şekil 11.6'da verilmiştir. Gerekli çapın seçilmesi sırasında bu şekil kullanılabilir (Coduto, 2001 çeviri, s. 310)". Özellikle tünellerdeki kaya bulonu uygulamalarında bu kapasite şartları göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 11.6. *A36 ve A307 Ankraj Bulonlarının AISC Çekme ve Kesme Kapasiteleri*
Kaynak: *Coduto, 2001 çeviri, s. 310*

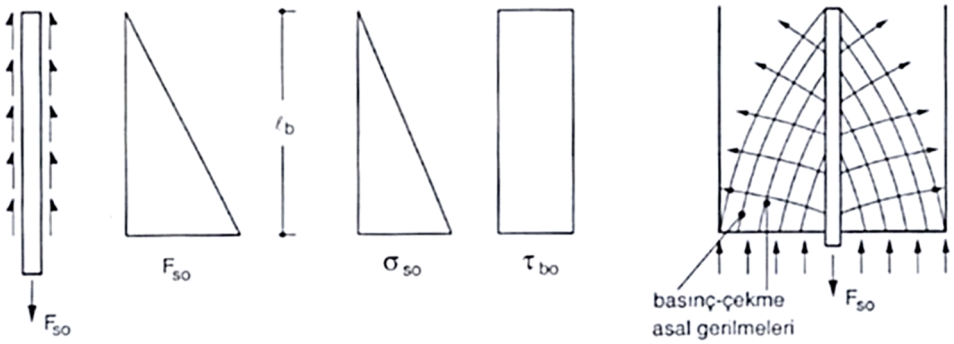
Standart ankraj uygulamasında kök bölgesinde oluşturulan beton ve içerisine yerleştirilen çelik halatın kompozit eleman dayanımının, beton - zemin arasındaki aderanstan kaynaklanan sürtünme dayanımından daha yüksek olması gerekmektedir. Oluşan çekme gerilmesini ilk adımda karşılayan, kök bölgesinde meydana getirilmiş betonarme elemanın dayanımıdır. Sonraki adımda bu kompozit elemandaki gerilme artışı ile çevre zemine yük iletimi gerçekleşmektedir.

Betonarme elemanların en önemli özelliği beton ve çeliğin beraber çalışacak, yani yük taşıyacak şekilde bir araya gelmesidir. Donatı ile onu saran beton arasında herhangi bir rölatif yer değiştirmenin, kaymanın olmaması gerekir. Donatının betondan sıyrılması veya ayrılması karma bir malzeme olan betonarmede beraber çalışmayı önlediği gibi, bazı durumlarda da elemanın göçmesine sebep olabilir. Bu nedenle, donatının tam kapasitesinin kullanılabilmesi için, göz önüne alınan kesite gelinceye kadar donatının betona tam olarak kenetlenmesinin sağlanması gerekir. Çekip - çıkarma deneyi olarak bilinen düzenle beton bir kütle içinde gömülü donatı çubuğuna uygulanan kuvvetin beton kütleye aderans gerilmeleri yoluyla geçişi incelenir. Donatıya uygulanan küçük bir yük bile yükleme ucunda büyük aderans gerilmelerinin ortaya çıkmasına ve küçük de olsa bir sıyrılma meydana gelmesine neden olur. Yük artmasıyla sıyrılma bölgesi ilerlerken aderans gerilmeleri de daha uzun bir bölgeye yayılır. Beton ile donatı arasındaki etkileşimi sağlayan ve kayma gerilmesi gibi kabul edilebilecek aderans gerilmelerinin yayılışı Şekil 11.7'de gösterilmiştir. Sıyrılma bölgesinin diğer uca erişmesiyle çıkarma meydana gelir. Eğer aderans dayanımı yüksekse veya çubuğun beton içindeki boyu büyükse çubuk sıyrılmadan kopabilir. Sıyrılma ve kopma olaylarının beraberce ortaya çıkmasını sağlayarak uygun bir durum hazırlanabilir (Celep ve Kumbasar, 2005, s. 48).



Şekil 11.7. *Çekip - Çıkarma Deneyinde Aderans Gerilmelerinin Değişimi*
Kaynak: *Celep ve Kumbasar, 2005, s. 49*

Çubuk parçasına çekme kuvveti (F_{so}) uygulanması sonucunda meydana gelen; aderans gerilmesi (τ_b) ve çekme gerilmesi (σ_{so}) değişimleri Şekil 11.8'de verilmiştir.



Şekil 11.8. *Donatı Üzerinde Kabul Edilen Aderans Gerilmesi Değişimi*
Kaynak: *Celep ve Kumbasar, 2005, s. 49*

11.3. Tez Kapsamındaki Yöntem

Yukarıdaki bölümlerde standart ankraj sisteminin özellikleri, dayanım ilkeleri, uygulama yöntemi ve çeşitleri anlatılmıştır. Bu bilgiler ışığında önerilen şemsiye ankraj yöntemindeki gelişmeler ise aşağıdaki gibi sıralanabilir;

Gelişme 1: Mevcut ankrajlarda kök bölgesinde beton ve çelik elemanların birlikte çalışması sıyrılma prensibine dayanmaktadır. Önerilen sistemde ise sürtünme davranışından ziyade beton ve çeliğin dayanımı ön plana çıkmaktadır. Dolayısıyla, birçok faktörden etkilenen ve beklenmedik göçmelere sebep olan sıyrılma hesabı yerine, bilindik mukavemet hesapları ile daha güvenli istinat yapıları elde edilebilmektedir.

Gelişme 2: Mevcut ankrajlarda kök bölgesi çevresinin zemin ile adezyonu direnci sağlarken, önerilen sistemde hem adezyon kuvveti hem de enjeksiyonla oluşturulan dairesel plaka üzerindeki zeminin toplam gerilmesi fazladan direnç sağlamaktadır. Dolayısıyla, ankrajlarda ciddi sayı ve boy azalması gerçekleşirken, dizilim aralıkları da artmaktadır. Bu gelişmeler ile ankraj içeren iksa sistemlerinde ülke çapında önemli ölçüde maddi kazanç sağlanması öngörülmektedir.

Gelişme 3: Standart elemanlarda delgi, ankraj halatlarının sarımı, geçirimsizliğin sağlanması, patlatma ile kök bölgesi oluşturulması, ankrajların yerleştirilmesi, beton prizi için beklenen süre, sonrasında sıyrılma ihtimal yüksek olan germe işlemi gibi birçok aşama bulunmaktadır. Fakat önerilen şemsiye ankraj sistemi delgi, elemanın

yerleştirilmesi, kanatların açılması ve enjeksiyon aşamalarından oluşmakta olup işçilik ve zaman bakımından yüksek oranda fayda sağlamaktadır.

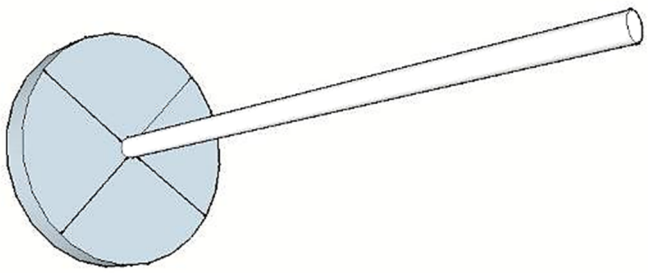
Gelişme 4: Önerilen şemsiye ankraj; ankraj çubuğu, düşey ankraj kazıkları, eğimli kazıklar ile desteklenen ankraj kirişleri gibi tüm ankraj, bulon, cıvata ve türevleri yerine kullanılabilmektedir.

Gelişme 5: Standart ankrajlarda en büyük sorun sıyrılma problemidir. Şemsiye ankrajda sıyrılma problemi ortadan kaldırılacak olup çok daha yüksek elastisite modülüne sahip içi beton dolu çelik tüp ve yine beton içerisinde kalan metal kanatların mukavemetine göre hesap yapılabilmektedir.

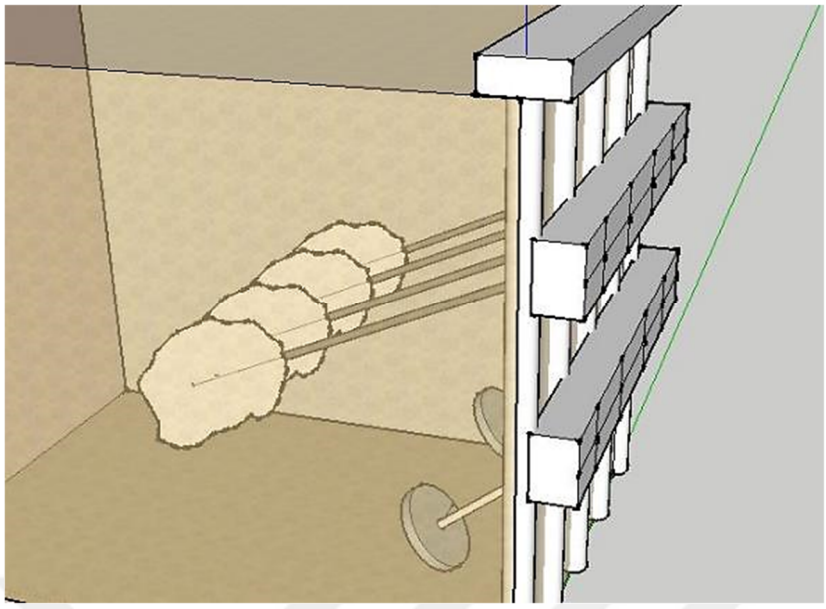
Gelişme 6: Şemsiye ankraj sisteminin ters kullanımı ile şimdiye kadar geliştirilmiş olan hiçbir ankraj sisteminde karşılanamayan basma gerilmelerine karşı bu elemanlar kullanılabilecek ve temel altı mini kazık tasarımı da gerçekleştirilebilmektedir.

Gelişme 7: Mevcut yöntemde açılan deliklerde meydana gelen kuyu göçüklerinin neden olduğu sıyrılma problemlerini en aza indirgemektedir.

Teorik ve analitik hesaplamalar ile uygulama şartları değerlendirildikten sonra öngörülen boyutlarda üretilen şemsiye ankrajın farklı zemin tipleri için laboratuvarda yük - yer değiştirme değerleri incelenmiştir. Sonraki aşamada yöntemin arazide uygulaması gerçekleştirilmiştir. Yöntemin uygulanmasının ardından Görsel 11.3'te verilen enjeksiyon sonrasında, zemin içerisinde kompozit kök bölgesinin oluşturulması temel amaçtır. Görsel 11.4'te ise standart ankraj kullanımındaki ankraj boyunun, şemsiye ankraj ile kısaltılması gösterilmiştir.

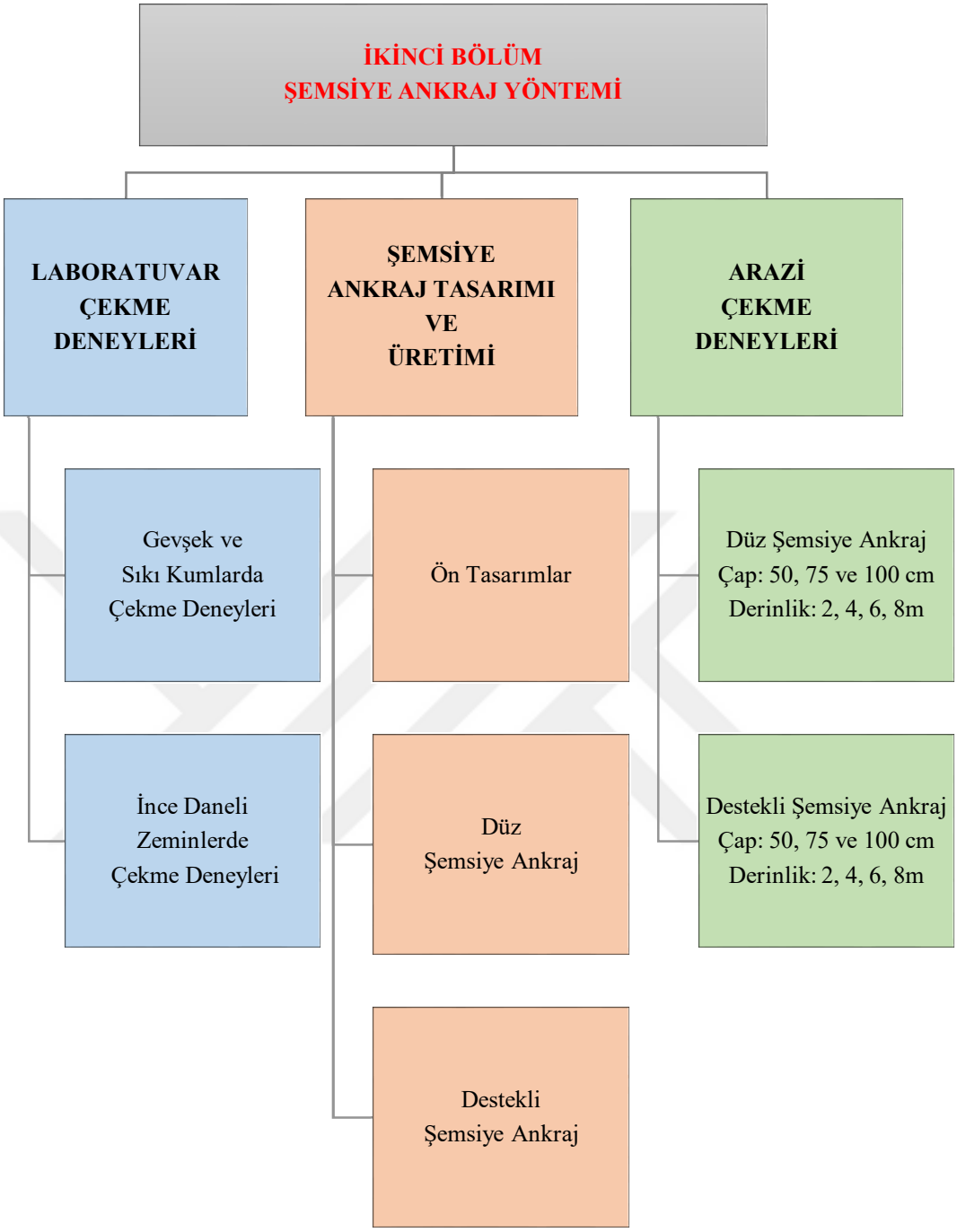


Görsel 11.3. *Şemsiye Ankrajın Enjeksiyon Sonrası Durumu*



Görsel 11.4. *Arazide Standart Ankraj (Üst Sıra) ve Şemsiye Ankraj (Alt Sıra) Kullanımı Arasındaki Fark*

Tezin ikinci bölümünü oluşturan "Şemsiye Ankraj Yöntemi" üç aşamadan oluşmaktadır (Görsel 11.5). Birinci aşamada, laboratuvar ortamında geliştirilen çekme düzeneği ile farklı çap ve derinliklerde gevşek - sıkı kumlar ve ince daneli zeminlerde çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde elde edilen yük - yer değiştirme eğrileri ile çekme sonucunda oluşan kayma yüzeyleri değerlendirilmiştir. İkinci aşamada teorik yaklaşım ve uygulama şartları da göz önünde bulundurularak arazide en uygun açma - kapama sistemini içeren şemsiye ankraj elemanları ve detayları üzerinde çalışılmıştır. Tasarımlar sonucunda destekli şemsiye ankraj ve düz şemsiye ankraj olmak üzere iki ana ankraj tipi için üretime geçilmiştir. Üçüncü aşamada ise, arazide yatay ve açılı ankraj uygulamasının zorluğu göz önünde bulundurularak düşeyde şemsiye ankraj uygulaması gerçekleştirilmiş ve enjeksiyon sonrasında, minimum 28 günlük beton dayanımının sağlanmasının ardından çekme deneyleri yapılmıştır. Arazi deneyleri sonucunda elde edilen yük - yer değiştirme eğrileri ve göçme modları tez içerisinde sunulmuştur.



Görsel 11.5. *İkinci Bölüm: Şemsiye Ankraj Yönteminin Uygulama Aşamaları*

11.4. Kullanılan Ekipmanlar

11.4.1. Enjeksiyon makinesi

Arazide şemsiye ankraj elemanlarının uygulanması sürecinde, kuyulara çimento enjeksiyonu basılabilmesi için enjeksiyon makinesi temin edilmiştir (Görsel 11.6). Enjeksiyon makinesinin özellikleri aşağıda sıralanmıştır;

- Pompa, mikser ve agitator (dinlendirme) ünitesi ile set halindedir.
- Pompa motoru 20 kW / 1400 devir güce sahip elektrikli motordur.
- Hidrolik pompası 65 lt/dak akış ve 200 bar yük algılama kapasitelidir.
- Pompa enjeksiyon silindiri 70-130 mm aralığındadır.
- Pompa çift pistonludur.
- Pompa enjeksiyon silindiri sensör kontrollüdür.
- Pompa 0 -150 lt/dk aralıkta enjeksiyon debisi için uygundur.
- Pompa 0-100 bar aralıkta enjeksiyon basıncı için uygundur.
- Pompa yağ tankı 150 lt'dir.
- Pompa soğutucu sistemi havalı, kendiliğinden fanlı ve yağ soğutuculudur.
- Mikser motoru en az 7,5 kW / 1400 devir güce sahip ve elektriklidir.
- Mikser tank kapasitesi 250 lt'dir.
- Agitator (dinlendirme) ünitesi motoru redüktörlü 4,5 kW / 1400 devir güce sahip elektriklidir.
- Agitator(dinlendirme) ünitesi tank kapasitesi 500 lt'dir.
- Enjeksiyon seti tekerlekli römork şase üzerine montajlanmış haldedir.

Görsel 11.6. *Enjeksiyon Makinesi*

11.4.2. Enjeksiyon hortumları

Enjeksiyon makinesinden kuyu girişine kadar çimento - su karışımının iletilebilmesi amacı ile 3 adet 46.0 m'lik "Hortum ve Hortum Takımları - Lastikten - Tel Örgü Takviyeli - Hidrolikte Kullanılan - Özellikler" (TS 6387/ EN853) standardına uygun; 1" çapında 165 bar kapasiteli enjeksiyon hortumu temin edilmiştir (Görsel 11.7).

Görsel 11.7. *Basınçlı Enjeksiyon Hortumları*

11.4.3. Ankraj halatı

Süregelen ankraj uygulamalarında olduğu gibi tez kapsamında tasarlanan şemsiye ankrajlarda da çelik halat kullanımı gereklidir. Şemsiye ankrajın uygulama derinliğine sürülmesinin ardından, uygun kilitleme detayı ile kanatlar açılmış ve çimento enjeksiyonu basılmıştır. Betonun en az 28 günlük dayanımını almasından sonra ankraj halatı vasıtası ile germe işlemi yapılmıştır. Bu yüzden piyasada tekli ankraj sarmalı için en büyük çap olan 0.6" (15.24 mm) çelik halat temin edilmiştir (Görsel 11.8). Üretici firma tarafından ilgili ürün için sağlanan sertifikada "Çelik Demetleri için Standart Şartlar - Öngermeli Beton için Kaplamasız Yedi Tendonlu Halat (ASTM A 416/12)" standardına göre ortalama değerler aşağıdaki gibi verilmiştir *(parantez içindeki değerler standartta verilen aralıklardır)*.

- Çap: 15,2 mm *(min:15,09 mm / maks:15,89 mm)*
- Kesit: 140,05 mm^2 *(min:137,7 mm^2 / maks:152,6 mm^2)*
- % 1 Uzamada Dayanım: 190,0 kg/mm^2 *(min 171 kg/mm^2)*
- Kopma Yükü: 28,1 kgf *(min: 26,584 kgf)*
- Kopma Dayanımı: 203,4 kg/mm^2 *(min: 190,0 kg/mm^2)*
- Demet Uzama Miktarı: % 4,87 *(min: % 3,5)*
- Elastisite Modülü: 20050 kg/mm^2
- R 1000 Saat % 80 Yükte Uzama Miktarı: ≤ % 3,5 *(maks: % 3,5)*

Görsel 11.8. *Ankraj Halatı*

11.4.4. Ankraj kaması

Germe işlemi sürecinde ve sonrasında ankraj halatının tasarlanan yükte kilitlenmesi ve sabit durabilmesi için 0.6" halata uygun ankraj kamaları temin edilmiştir (Görsel 11.9a). Kamalar için firma tarafından verilen standart değerler aşağıda sıralanmıştır.

- Model No: 701311
- Çap Aralığı: 15,0 mm - 15,3 mm
- Segment Sayısı: 3
- Kama Uzunluğu: 46 mm
- Diş Aralığı:1 mm
- Set Ağırlığı:100 gr

11.4.5. Ankraj başlığı

Ankraj başlığı ankraj kamasının dış konik yapısına karşılık gelecek şekilde üretilmektedir (Görsel 11.9b). Gerekli ankraj halatı sayısına uygun şekilde tekli, ikili ve üçlü başlıklar temin edilmiştir.

a. b.

Görsel 11.9. *a. Ankraj Kaması ve b. Ankraj Başlığı*

11.4.6. Yük hücresi

Laboratuvarda deneylerin gerçekleştirilmesi için gerekli olan 0,5, 1,0 ve 2,0 ton kapasiteli yük hücreleri alımı yapılmıştır. Öngörülen teorik hesapların farklı zemin tiplerinde ne kadar tutarlı olduğunu değerlendirmek amacıyla ankraj çekme deneyleri uygulanmıştır. Bu malzeme ve ekipmanlar haricinde; çelik profiller, somun, cıvata, perçin ile tez kapsamında ankraj brandası olarak kullanılan aramid kumaş temin edilmiştir.

12. LABORATUVAR ÇEKME DENEYLERİ

12.1. Teorik Yaklaşım

Kumlarda yüzeye yakın ankraj plakaları veya ankraj kirişlerinin nihai dayanımı için Teng (1962) tarafından önerilen hesaplama yönteminde (Şekil 12.1); plakadan kaynaklanan aktif basınç ve bu basınca karşı koyan pasif basınç arasındaki denge denklemleri türetilmiştir. Denklem 12.1 düzlemsel deformasyon durumu için geçerlidir. Tüm pratik uygulamalarda B/h değerinin 5'ten büyük olması halinde düzlemsel deformasyon durumu kabul edilebilir. Denklem 12.4 ise B/h değerinin yaklaşık olarak 5'ten küçük olması halinde ankrajın iki ucunda da sürtünme dayanımı oluşması hali yani üç boyutlu göçme yüzeyi kabulü yapılmaktadır (Das, 1984, s. 297 - 298).

H / h ≤ 1,5 ile 2,0 için B/h ≈ ∞ durumunda sürekli plaka ve kirişlerde;

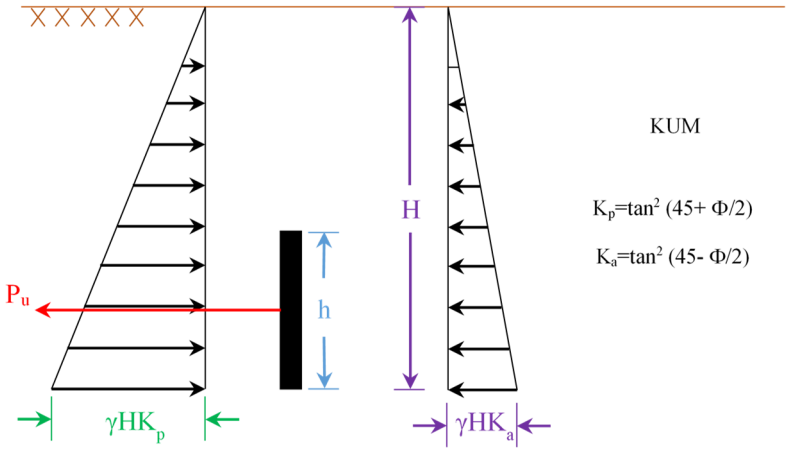
$$P_u = B(P_p - P_a) \tag{12.1}$$

$$P_p = \frac{1}{2}\gamma H^2 tan^2\left(45 + \frac{\emptyset}{2}\right) \tag{12.2}$$

$$P_a = \frac{1}{2}\gamma H^2 tan^2\left(45 - \frac{\emptyset}{2}\right) \tag{12.3}$$

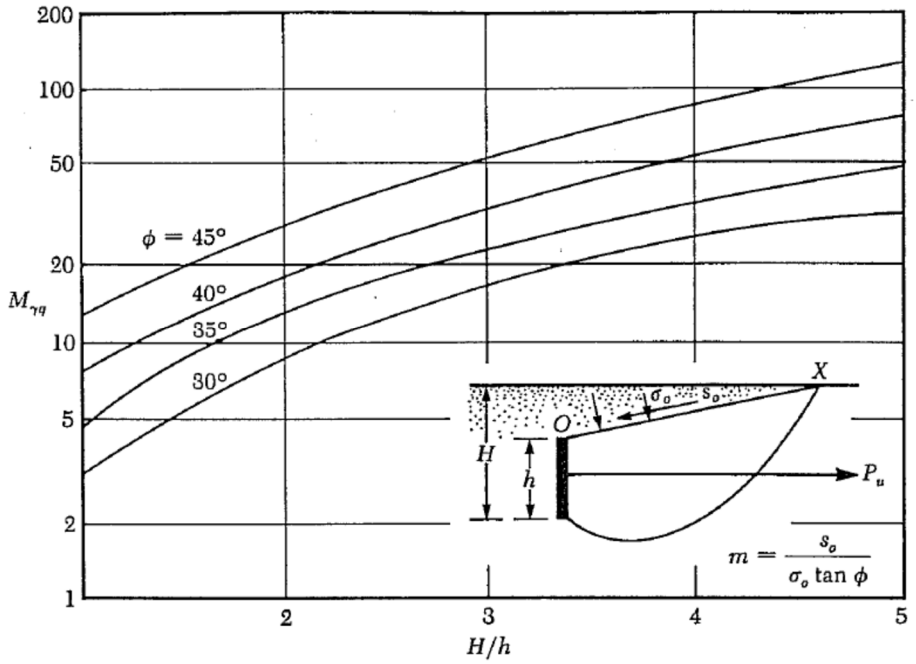
$$P_u = B(P_p - P_a) + \frac{1}{3}K_o\gamma\left(\sqrt{K_p} + \sqrt{K_a}\right)H^3 tan\emptyset \tag{12.4}$$

Burada; P_u nihai ankraj dayanımı, B ankraj kesitinde doğru açı ile teşkil edilmiş ankraj uzunluğu, K_0 sükunette zemin basıncı (yaklaşık 0,4), P_p ve P_a ise birim ankraj uzunluğu için Rankine pasif ve aktif kuvvetleridir.



Şekil 12.1. *Ankraj Plaka ve Kirişlerinin Kum Zeminde Nihai Dayanımı*
Kaynak: *Das, 1984, s. 297*

Neeley, Stuart ve Graham'ım (1973) eşdeğer serbest yüzey metodunu kullanarak kumlarda ankraj çekme dayanımı için önerilen formüldeki göçme anında, Şekil 12.2'deki OX boyunca oluşan kayma gerilmesi aşağıdaki gibi verilmiştir (Das, 1984, s. 297 - 298).



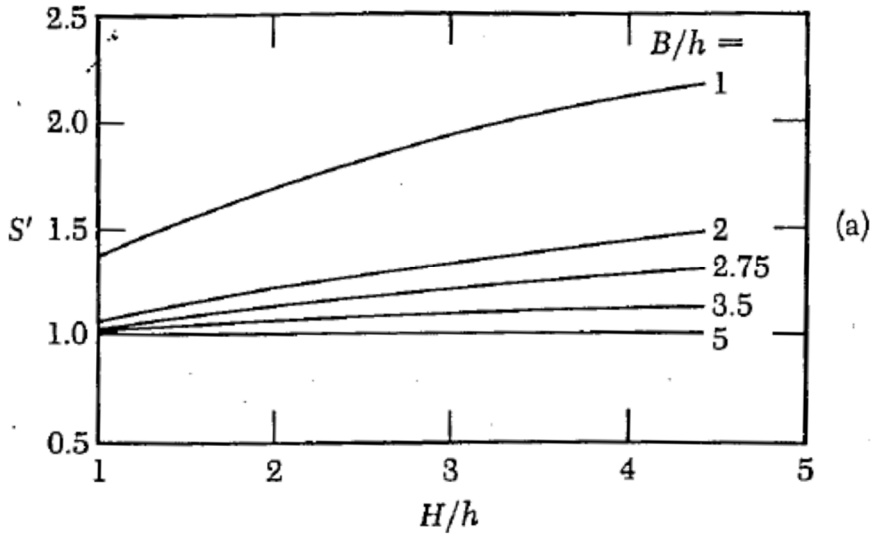
Şekil 12.2. *Kumlardaki Ankraj Plakaları ve Kirişleri için Kuvvet Katsayısı Değişimi, $M_{\gamma q}$ (Neeley vd., 1973'ten Sonra Tekrar Çizim)*
Kaynak: *Das, 1984, s. 299*

$$m = \frac{s_o}{\sigma_o tan\emptyset} \tag{12.5}$$

Burada; m kayma gerilmesi oluşturma faktörü, s_o ve σ_o ise sırasıyla göçme anındaki kayma gerilmesi ve normal gerilmedir (OX üzerinde). Basitleştirilmiş tasarımda, m sıfır alınabilir. Bu durumda Neeley vd.'nin yöntemine göre H/h değerinin yaklaşık 5'ten küçük olması durumunda ankraj kuvveti aşağıdaki gibidir.

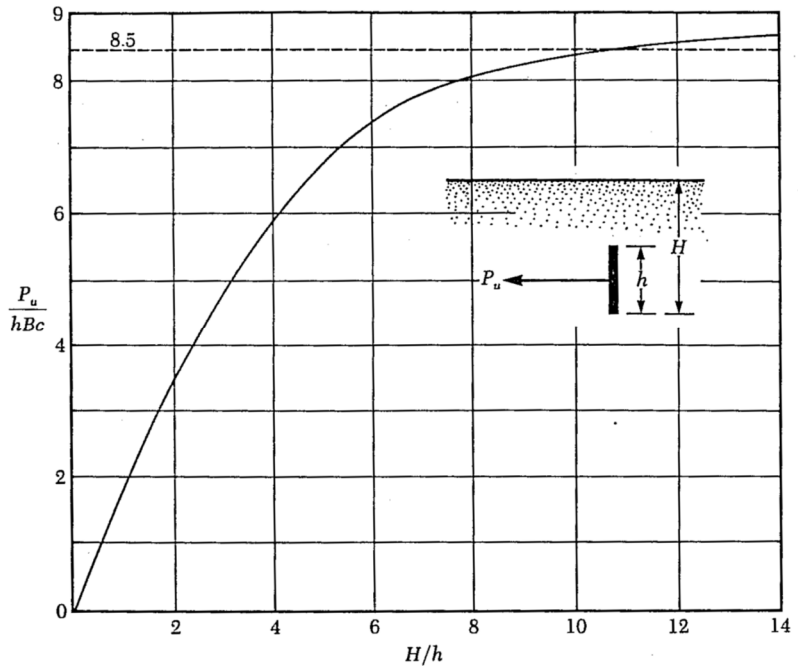
$$P_u = M_{\gamma q}(\gamma h^2)BS' \tag{12.6}$$

Burada; P_u nihai ankraj dayanımı, $M_{\gamma q}$ kuvvet katsayısı (Şekil 12.2) ve S' ise şekil faktörüdür (Şekil 12.3).



Şekil 12.3. *Düşey Ankraj Plakaları veya Kirişlerinde Şekil Faktörü (Neeley vd., 1973'ten Sonra Tekrar Çizim)*
Kaynak: *Das, 1984, s. 300*

Killerde ($\emptyset = 0$ durumu) ankraj plakaları ve kirişleri için nihai çekme dayanımını Mackenzie (1955) H/h değişimine bağlı olarak deneysel çalışma ile hesaplamıştır (Şekil 12.4). H/h değerinin 12'den büyük olması durumunda P_u/hBc yaklaşık sabit olup 8,5'e eşittir. Burada içsel sürtünme açısının 0 olması durumunda c drenajsız kohezyonu ifade etmektedir.



Şekil 12.4. *Ankraj Çekme Dayanımı İçin Killerde Mackenzie'nin Deneysel Sonuçları*
Kaynak: *Das, 1984, s. 301*

Kök bölgesinin hesabında da yine kum ve killerde iki ayrı durum söz konusudur. Kumlardaki kök bölgesi dayanımı aşağıda verilmiştir.

$$P_u = \pi d l \bar{\sigma}_v' K tan\emptyset \quad (12.7)$$

Burada; P_u nihai dayanım, $\emptyset$ zeminin içsel sürtünme açısı, $\bar{\sigma}_v'$ ortalama düşey efektif gerilme (kuru kumlarda birim hacim ağırlık ile kök bölgesi orta noktasının derinliği çarpılarak bulunur) ve K zemin basıncı katsayısıdır.

Killerde ise denklem 12.7 kullanılabilir.

$$P_u = \pi d l c_a \quad (12.7)$$

Burada; c_a adezyon değeri olmakla birlikte drenajsız kohezyon değerinin yaklaşık 2/3'ü alınabilir.

Alışılagelmiş ankraj kabulünde ankraj kök bölgesinde enjeksiyon oluşturulan beton silindirin, etrafındaki zemin ile yaptığı sürtünme göz önünde bulundurularak, ankraj çekme kuvveti hesaplanır. Hesaplamalarda çelik halatın çekme dayanımı kök bölgesi sürtünme dayanımının üzerinde tutacak şekilde eleman seçimi yapılır. Önerilen şemsiye ankraj sisteminde ise teorik hesap kabulünde Görsel 12.1'de verilen detay üzerinde kumlu ve killi zeminler için önerilen eşitlikler bulunmaktadır. Dairesel kompozit elemanın ön kısmında kazı yüzeyine kadar bulunan zeminin toptan göçmesini gerektiren bu kabulde, kritik yük değerinin kök bölgesinde teşkil edilen kompozit eleman veya çelik halat dayanımını sağlayan değeri aşamayacağı öngörülmektedir. Bir diğer önemli husus ise toptan göçme meydana gelmesi beklenen çevre zeminde, bu davranışı gösterecek yeteri dayanıma sahip olması gerekliliğidir.

Önerilen hesap yöntemi genel kabulünde zeminin toptan göçmesi için gereken ankraj çekme kuvveti; kayma yüzeyinde meydana gelen yüzey sürtünmesi ve toplam zemin ağırlığının pasif bileşeninin toplamının yenilmesi ile gerçekleşmektedir.

$$P_u = \text{Yüzey Sürtünmesi} + (\text{Zemin Hacmi}.\gamma_{zemin})K\cos\alpha \quad (12.1)$$

Burada; P_u göçme anındaki ankraj çekme kuvveti, γ zeminin birim hacim ağırlığı, K zemin basınç katsayısı ve α ise ankrajın yatayla yaptığı açıdır.

$$Yüzey\ Alanı = \pi(a+b)\sqrt{h^2+(b-a)^2} \quad (12.2)$$

$$Yüzey\ Alanı = \pi(a+b)l \quad (12.3)$$

$$Hacim = \frac{1}{3}\pi h(a^2+ab+b^2) \quad (12.4)$$

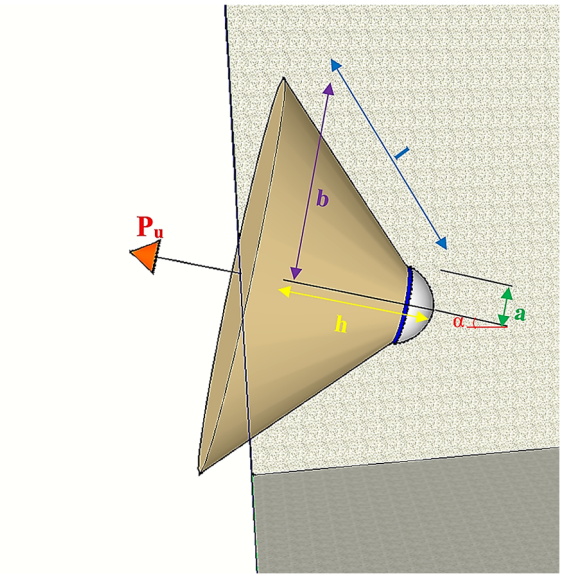
Bu durumda kumlu zeminlerde nihai ankraj çekme kuvveti:

$$P_u = \pi(a+b)l * \bar{\sigma}_0' * K * tan\emptyset' + \left\{\frac{1}{3}\pi h(a^2+ab+b^2) * \gamma_{zemin}\right\} K\cos\alpha \quad (12.5)$$

Killi zeminlerde ise nihai ankraj çekme kuvveti:

$$P_u = \pi(a+b)l * c_a + \left\{\frac{1}{3}\pi h(a^2+ab+b^2) * \gamma_{zemin}\right\} K\cos\alpha \quad (12.6)$$

Burada; $\emptyset'$ zeminin efektif içsel sürtünme açısı, $\bar{\sigma}_0'$ ortalama efektif düşey gerilme, K zemin basınç katsayısı, c_a adezyon, α ankrajın yatay ile yaptığı açı, a oluşan kayma konisinin taban yarıçapı, b oluşan kayma konisinin tavan yarıçapı, h kayma konisinin yüksekliği ve l ise kayma konisinin uygun açıdaki yüzey uzunluğu değeridir. Ankrajın pasif bölgeye sabitlenmesi durumunda zemin basınç katsayısı değerinin pasif; geçiş bölgesine sabitlenmesi durumunda ise sükunetteki değerinin alınması önerilmektedir.



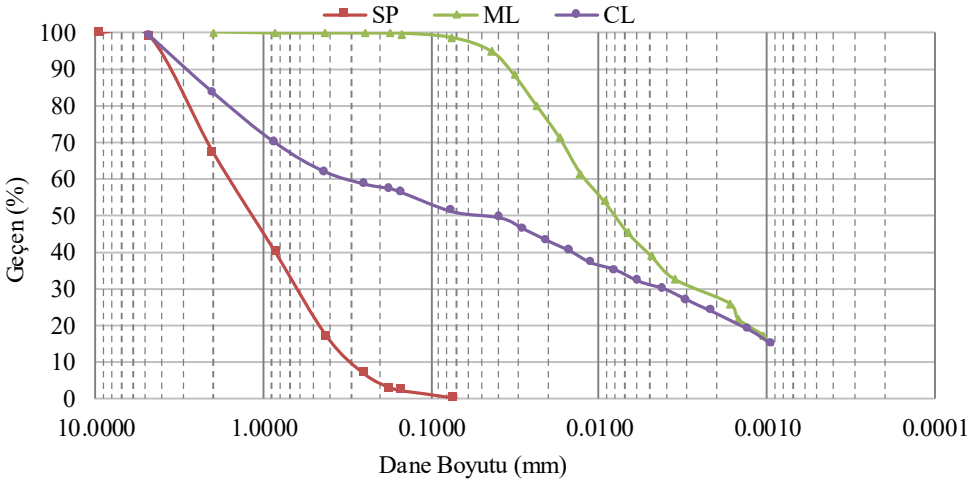
Görsel 12.1. *Şemsiye Ankraj Yönteminde Teorik Kayma Dayanımına Bağlı Çekme Kuvveti Kabulü*

Teorik hesapların tutarlılığının sağlanabilmesi için ankraj halatının kök bölgesi sayesinde zemine bağlanmasına ek olarak, halat ucunun kuyu çıkışındaki yapıya sabitlenmesi durumunda aşağıdaki şartların da sağlanması gerekmektedir (Hanna, 1982, s. 26)

- Halat üzerindeki yük merkezde olmalıdır.
- Halat yükü test edilebilmeli ve test sonrasında planlanan ön germe yükünde kilitlenmelidir.
- Ankraj sisteminin kuyu dışındaki bu kısmı güvenilir biçimde korozyona karşı korunmalıdır.
- Yapının halata göre göreceli hareketi, halatta aşırı ikincil gerilmeler oluşturmayacaktır.
- Çalışma ömrü boyunca gereken durumlarda ankraj tekrar gerilebilir olmalıdır.

12.2. Zemin Özelikleri

Kumlu numunede gerçekleştirilen ankraj çekme deneylerinde; pvc hücrenin doldurulması esnasında kum numunelerde farklı sıkılık değerlerini sağlayabilmek için iki farklı yükseklikten numune boşaltılmıştır. Dolayısıyla, 0 m yükseklikten (o anki zemin seviyesinden) boşaltılarak hazırlanan kumlu zemin numunesi gevşek kum, 1 m yükseklikten boşaltılarak hazırlanan numune ise sıkı kum olarak adlandırılmıştır. İnce daneli zeminlerdeki çekme deneylerinde ise silt ve %50 kum - % 50 kil karışımları kullanılmıştır. Numunelere ait dane boyut dağılımı eğrisi Şekil 12.5'te ve geoteknik parametreler ise Tablo 12.1'de verilmiştir. Deneylerde kuru numuneler kullanılmıştır.



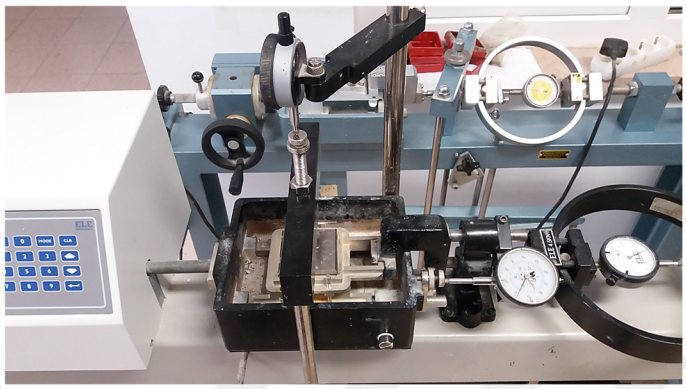
Şekil 12.5. *Kullanılan Zemin Numunelerine Ait Dane - Boyut Dağılımı Eğrileri*

Tablo 12.1. *Kullanılan Zeminlerin Özellikleri*

	Kum	**Silt**	**%50 Kil + %50 Kum Karışımı**
		Beyaz Zeolit	**Sarı Kaolin + Kum**
Özgül Ağırlık	2,58	2,37	2,68
Çakıl (%)	1,30	0,00	0,80
Kum (%)	98,30	1,50	48,10
Silt (%)	0,40	70,50	27,10
Kil (%)		28,00	24,00
D_{10}	0,30		
D_{30}	0,62		
D_{60}	1,60	-	-
C_u	5,33		
C_c	0,80		
Rötre Limiti (%)	-	21,10	13,20
Plastik Limit (%)	-	40,00	18,30
Likit Limit (%)	-	41,00	22,20
Plastisite İndisi (%)	-	1,00	3,90
Zemin Sınıfı (USCS)	SP	ML	CL
Su Muhtevası (%)	0,1	4,5	0,2

Öngörülen teorik yaklaşımdaki çekme kuvveti hesabının yapılabilmesi için numunelerin kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden her bir zemin numunesi için 3 kg ve 6 kg eksenel yük altında direkt kesme deneyleri yapılmıştır (Görsel 12.2). Kum numuneleri için sabit hacimdeki kalıp ile en

düşük, en yüksek ve sıkı kabul edilen 1 m düşü yüksekliği için boşluk oranları hesaplanmış olup (Görsel 12.3) kesme kutusu deneyleri ve çekme deneyleri, aynı yoğunluk ve sıkılıktaki numunelerle gerçekleştirilmiştir.



Görsel 12.2. *Kesme Kutusu Cihazı*

a. b.

Görsel 12.3. *Boşluk Oranı Hesabında Kullanılan Kalıp ve Numuneler; a. Gevşek Kum ve b. Sıkı Kum*

Kum numunesi için en düşük ve en yüksek boşluk oranları sırasıyla % 28,4 ve % 66,1 olarak hesaplanmıştır. En düşük boşluk oranı aynı zamanda 0 m düşü yüksekliğinden doldurulan ve deneylerde "gevşek kum" olarak adlandırılan numuneye karşılık gelmektedir. 1 m düşü yüksekliğinden doldurulan ve deneylerde "sıkı kum" olarak adlandırılan numunede ise % 49,4 boşluk oranı hesaplanmıştır. Rölatif sıkılık değerleri ise Denklem 12.7'ye göre gevşek kum için doğal olarak % 0 olmakla birlikte, sıkı kum için % 44 olarak hesaplanmıştır.

$$D_r = \frac{e_{mak} - e}{e_{mak} - e_{min}} \quad (12.7)$$

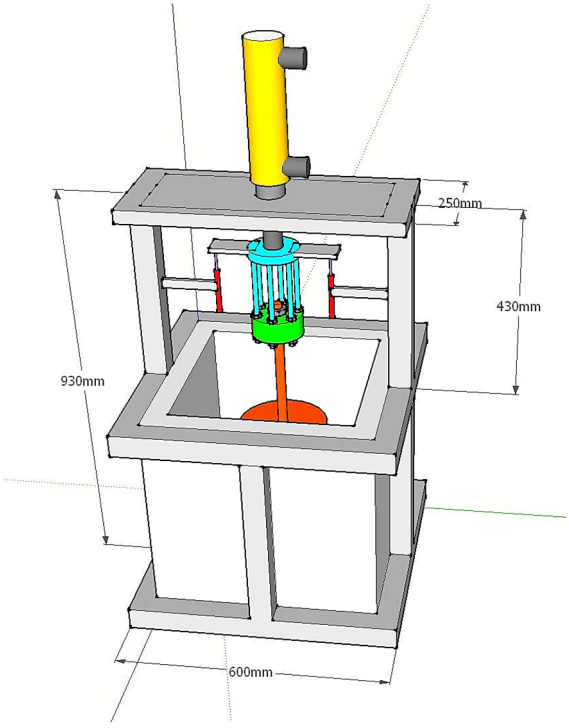
Burada; D_r rölatif sıkılık, e_{mak} en yüksek boşluk oranı, e_{min} en düşük boşluk oranı ve e ise zeminin o anki boşluk oranını belirtmektedir.

Kesme kutusu deneyleri sonucunda, göçme anındaki kayma gerilmesi (τ) ve eksenel gerilme (σ) değerleri kullanılarak Denklem 12.8'den kohezyon ve içsel sürtünme açısı parametreleri hesaplanmıştır. Gevşek kum, sıkı kum, silt ve kil numuneleri için içsel sürtünme açısı değerleri 6,8º, 8,0º, 3,4º ve 4,6º mertebelerinde hesaplanmıştır. Zeminler kuru olduğundan kohezyon değerleri sıfır civarında bulunmuştur.

$$\tau_f = c + \sigma tan\emptyset \quad (12.8)$$

12.3. Deney Düzeneği

Teorik kayma dayanımının doğrulanabilmesi amacıyla ölçekli sistem üzerinde çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. 500 mm boyutlarında numune hacmine sahip küp pvc hücre, dıştan çelik elemanlarla desteklenip çerçeve oluşturulmuştur (Görsel 12.4). Çerçevenin üst kısmından itibaren sırasıyla piston, çekme plakası, yük hücresi ve farklı çaptaki (5 cm, 10 cm, 15 cm ve 20 cm) ankraj elemanları monte edilmiştir.



Görsel 12.4. *Laboratuvarda Ankraj Çekme Sistemi İçin Ön Tasarım*

Karşılıklı olarak iki adet 50 mm kapasiteli yer değiştirme ölçer ve statik veri toplama cihazı ile yük - yer değiştirme verileri aynı anda toplanmıştır (Görsel 12.5). Farklı sıkılıktaki kum ile ince daneli zeminlerde 0,5, 1,0, 1,5 ve 2,0 ankraj çapı / derinlik oranlarında çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Görsel 12.5. Laboratuvarda Ankraj Çekme Sistemi

Gevşek ve sıkı kum ile ince daneli silt ile kil tipi kuru zeminlerde yapılan çekme deneylerinde zeminde meydana gelen kayma hareketine bağlı yüzeyde oluşan göçme durumları Ek-8, Ek-9 ve Ek-10'da verilmiştir.

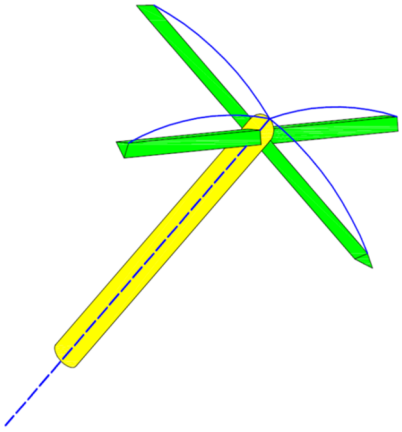
13. ŞEMSİYE ANKRAJ

13.1. Ankraj Tasarımı ve Üretimi

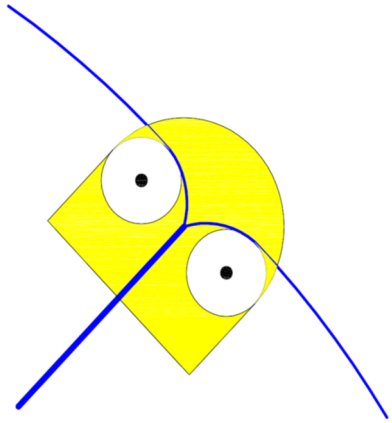
İnşaat mühendisliği sektöründe ciddi kazanımlar sağlayacağı düşünülen şemsiye ankraj yöntemi için tez başlangıcından itibaren farklı ankraj tipleri tasarlanmıştır. Uygulama ve maliyet açısından en yüksek verimliliğe sahip elemanlar modellenmiş ve deneme üretimleri yapılmıştır. Önerilen tüm detaylardaki uygulama mantığında; ankraj, açılan deliğe yerleştirildikten sonra ankrajın uç kısmında bulunan kesici kanatlar açılarak kilitlenecektir. Kanatlarda bulunan deliklerden enjeksiyon basılarak; hem çekme hem de basma dayanımına sahip kompozit elemanlar elde edilebilecektir. Fakat tez kapsamında şemsiye ankrajın sadece çekme davranışı değerlendirilmiştir.

13.1.1. Ön tasarımlar

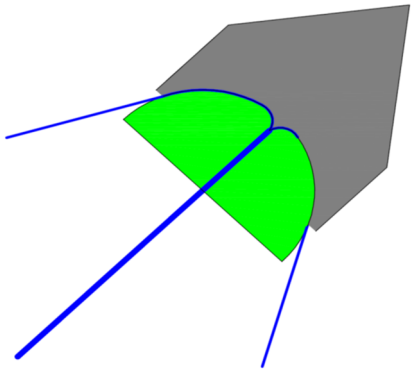
Ankrajların tasarım sürecinde ilk olarak makaralı sistem (Görsel 13.1a-b) yapılması öngörülmüştür. Kanatların açılması için ankraj ucunun iç bölümüne makara monte edilmesi düşünülen sistemin üretim aşamasında, her bir ankraj kanadına makara gerektirmesi ve bu makara pimlerinde meydana gelecek aşırı gerilmelerin kesitleri zorlayacağı düşünülmüştür. Bu yüzden tüm kanatları çekebilecek küresel makaralı sistemin (Görsel 13c) daha uygun olacağı kanaatine varılmıştır. Tasarlanan ankrajda tüm kanatlar uçlarından çelik halatlar ile bağlanarak ankraj ucunda oluşturulan küresel makara ile tek bir halatta birleşmektedir. Zemin yüzeyinden piston yardımıyla bu tek halat çekilip kanatların açılması sağlanmaktadır. Kanatlar üçgen biçiminde olup ön kesici yüzleri açılma yönüne doğru olmakla birlikte zemini keserek ilerlemektedir. Bu ankraj tipinin ucuna metal çarık monte edilerek, kuyuya yerleştirme esnasında rahatça ilerlemesi sağlanmaktadır. Sonraki tasarım ile karşılaştırıldığında bu sistemden de vazgeçilmiştir.



a.



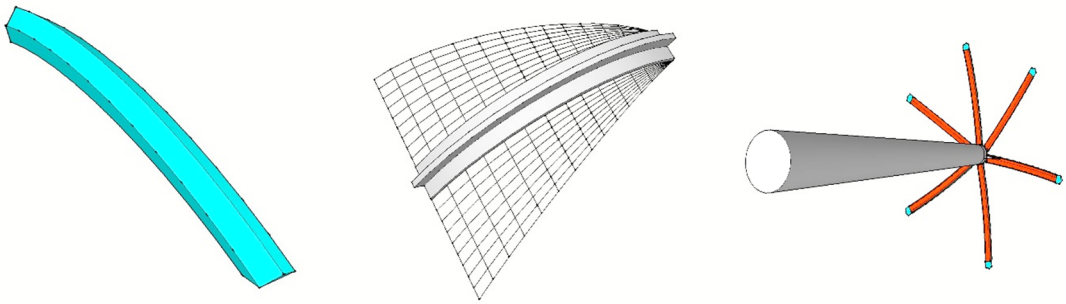
b.



c.

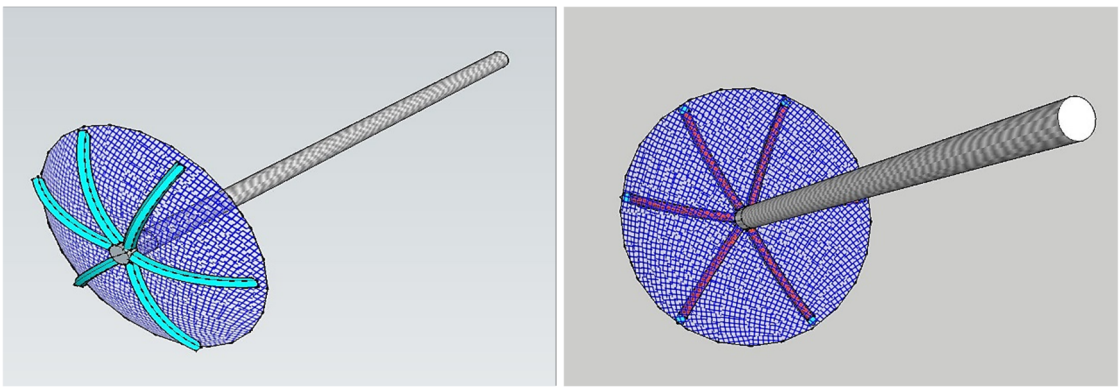
Görsel 13.1. *Birinci Tasarım - Makaralı Ankraj Sistemi, a. Makaralı Sistem, b. Tekil Makara Uç Detayı ve c. Küresel Makara Uç Detayı*

İkinci tasarımda ise öncelikle ankraj kanatlarının detaylandırılması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Hem kanatların rahatça açılmasını hem de zeminin kesilmesini sağlaması amacıyla ön kısmı ince, arka kısmı ise çelik hasır veya çelik elek monte edilebilmek için daha geniş tutulmuştur (Görsel 13.2).

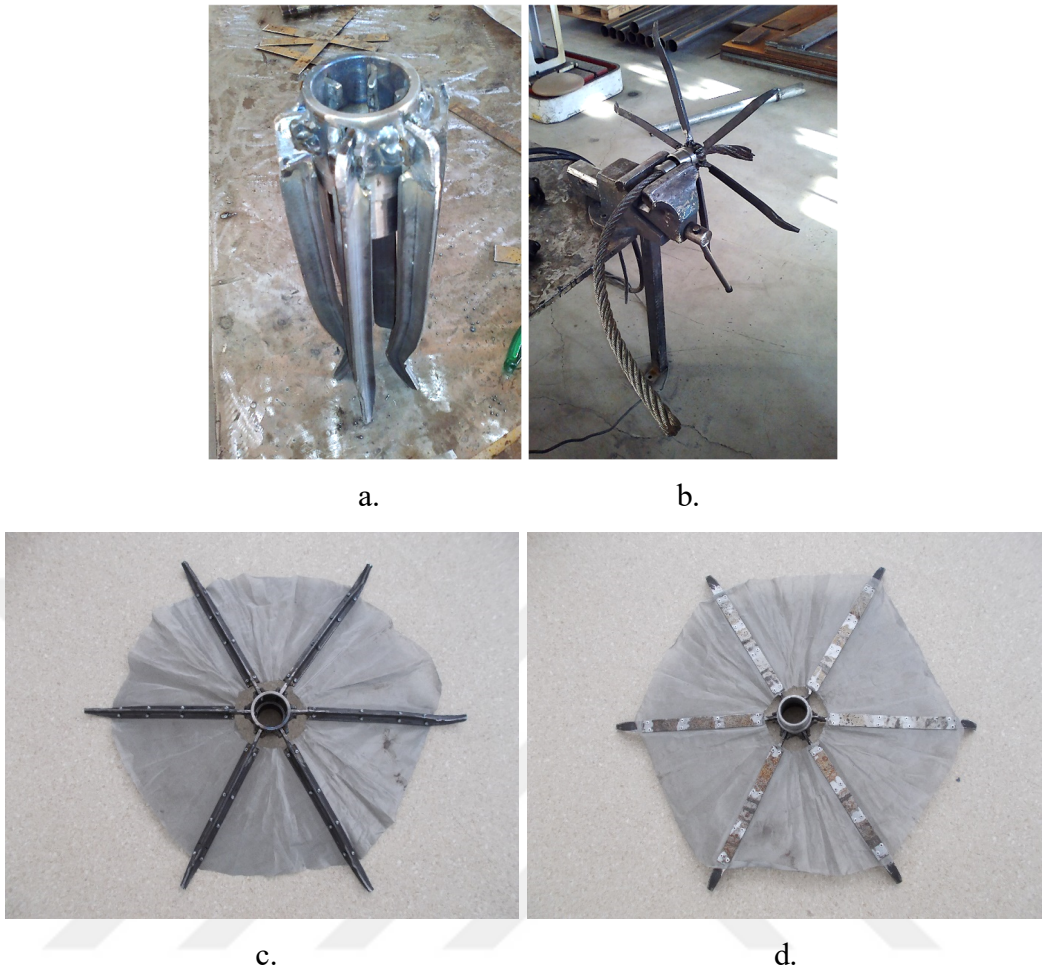


Görsel 13.2. *Ankraj Kanat Detayları*

Deneme ankrajlarının üretimi için yapılan detay çizimleri (Görsel 13.3) temel alınarak, atölyede üretimleri gerçekleştirilmiştir. İkinci tasarım olan bu sistem için kanatlar dökme demir "T" elemanlar kullanılarak açılan yuvalara pim yardımı ile sabitlenmiştir. Kapalı konumda iken ankraj kuyusuna girebilecek boyutta olan eleman, açıldığında 50 cm çapta dairesel kompozit eleman teşkil edebilecek şekilde tasarlanmıştır (Görsel 13.4). Ankraj elemanı istenilen derinliğe yerleştirildikten sonra, harici bir mille kilitlenen ankraj halatı ile gerilecektir. Mil, çapına uygun olarak tasarlanan yuvaya oturduğunda 6 adet kesici kanatın tamamen açılmasını sağlayacaktır. Kanatlar arasına metal elek sabitlenmiştir. Bu sayede enjeksiyon işlemini takiben betonarme kompozit yapının elde edilmesi planlanmıştır.



Görsel 13.3. *Genel Şemsiye Ankraj Detayı - Açık Konum*

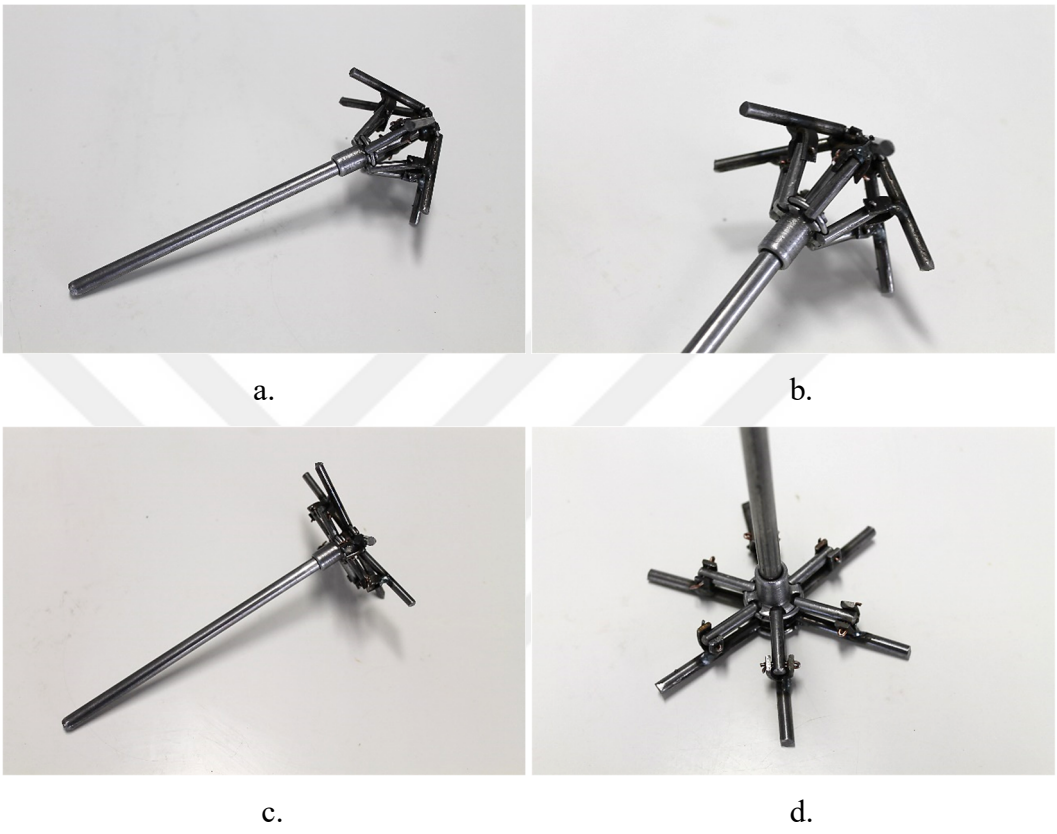


Görsel 13.4. *İkinci Tasarım Şemsiye Ankraj Üretim Aşamaları, a. Kanatların Pimler Yardımıyla Yuvalara Sabitlenmesi, b. Ankraj Halatının Sabitlenmesi, c. Çelik Elek Elemanının Sabitlenmesi ve d. Ankraj Üst Görünüş*

İkinci tasarımın ardından, ankraj üzerinde yapılan açma - kapama çalışmalarında; kanatların tam olarak açılabilmesi için çelik halatın uçtaki yuvaya nizami biçimde oturması gerekliliği bir dezavantaj olarak değerlendirilmiştir. Zira bu durumda kanatların uç kısımları aşırı gerilmelere maruz kalmakta ve pim kesitlerinin arttırılması yoluna gidilmesi gerekmektedir. Ayrıca döküm çelik kanatların ağır olması, çelik eleğin montaj aşamasında ve açma - kapama sürecinde kolaylıkla yırtılabilmesi ikinci tasarımın diğer olumsuz yönleri olarak değerlendirilmiş ve bu olumsuzlukları giderebilmek adına yeni bir tasarım yapılmıştır.

Üçüncü tasarımda; içi boş merkezi bir mil etrafında hareket edilebilen yüzük ile kanatların açılıp kapanması sağlanmıştır (Görsel 13.5). Bu tasarımda yüzüğün dış yüzeyine her bir kanat için lama profil kaynaklanmış ve kulak olarak adlandırılan bu elemanların orta kısmında açılan deliklere kanatlar içerisinden geçen cıvata ile

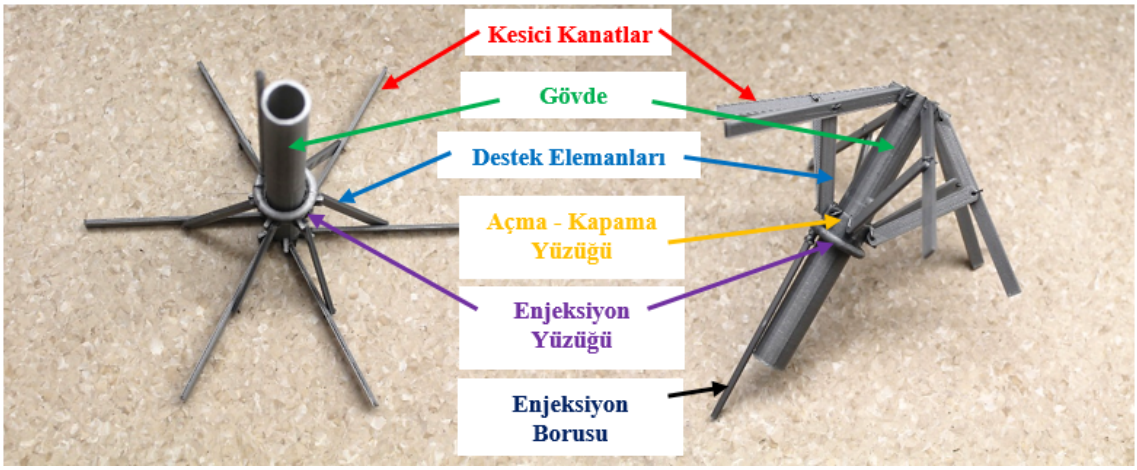
sabitlenmiştir. Kanat - ankraj ucu, kanat - destek elemanı ve destek elemanı - yüzük arasında olmak üzere her bir kanat için toplam 3 adet cıvatalı bağlantı kullanılmıştır. Uygulama için üretilecek olan üçüncü tip ankrajlarda, kanatlar ve destek elemanı lama profil, iç ve dış miller ise boru profilden üretilmiştir.



Görsel 13.5. *Üçüncü Tasarım Şemsiye Ankraj, a-b. Kapalı Konum ve c-d. Açık Konum*

Bu tasarımın arazi uygulamasında, uygun ön germe verildikten sonra ankraj halatı kilitlenip, kanatlar açılmış ve açık konumdaki ankrajın bir bütün halinde ileri ve geri hareketler yapması sağlanmıştır. Böylece ankrajın önünde bulunan zeminin kısmen boşaltılması sağlandıktan sonra, enjeksiyon deliklerinden enjeksiyon çıkışı ile şemsiye ankraj yönteminin uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Tüm tasarımlar göz önünde bulundurulduğunda; üçüncü tasarım temel ankraj olarak seçilmiştir. Gerçek boyutlu üretimlerden önce ankrajın üç boyutlu yazıcıdan çıktısı alınmıştır (Görsel 13.6). Gerek uygulama kolaylığı gerekse mekanik detayların efektif çalışma prensibine uygun olarak ihtiyaçları karşılamak üzere tasarlandığı bu ankraj modelinde, kanatların tam açılması prensibine odaklanılmıştır.



Görsel 13.6. *Üç Boyutlu Şemsiye Ankraj Çıktısı (Ölçek 1/3)*

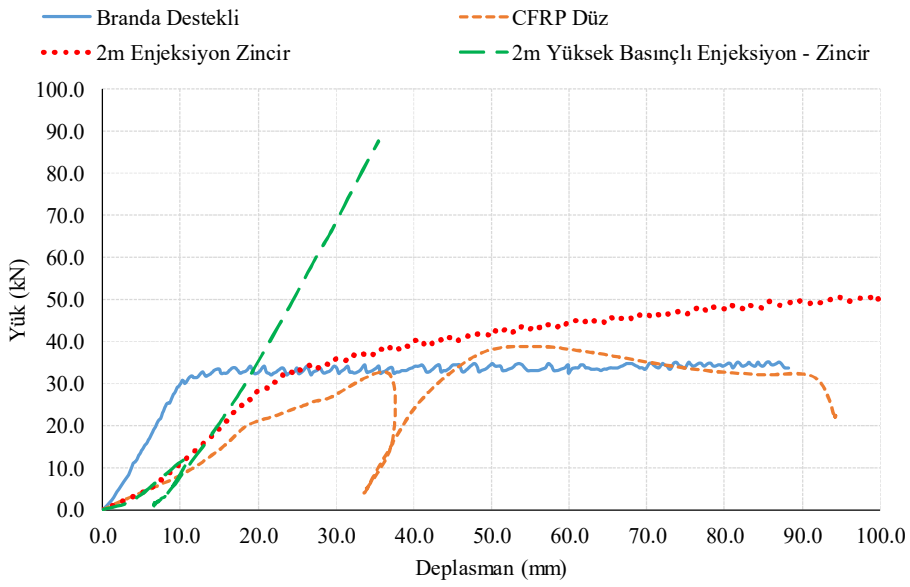
Tasarlanan detayın atölyede ön üretimi gerçekleştirilmiştir (Görsel 13.7). Kanatlar için 20 mm x 5 mm lama profil, gövde için 42 mm iç ve 48 mm dış çapa sahip çelik boru kullanılmıştır. Kanat ve destek elemanları gövdeye M6'lık somun ve cıvatalar ile yanal doğrultuda hareket payı bırakılarak sabitlenmiştir. 25 cm uzunluğunda üretilen ve 60 derece aralıklarla gövdeye sabitlenen 6 adet kanat açıldığında 55 cm çapında şemsiye meydana gelecektir. Metal detayların tamamlanmasının ardından gergi elemanları uygun bağlantılarla kanatlara sabitlenmiştir. Ankrajın boşta açılıp kapanması değerlendirildiğinde, tam kapasite çalıştığı görülmüştür.

Görsel 13.7. Ön Tasarım *Şemsiye Ankraj İskeleti*

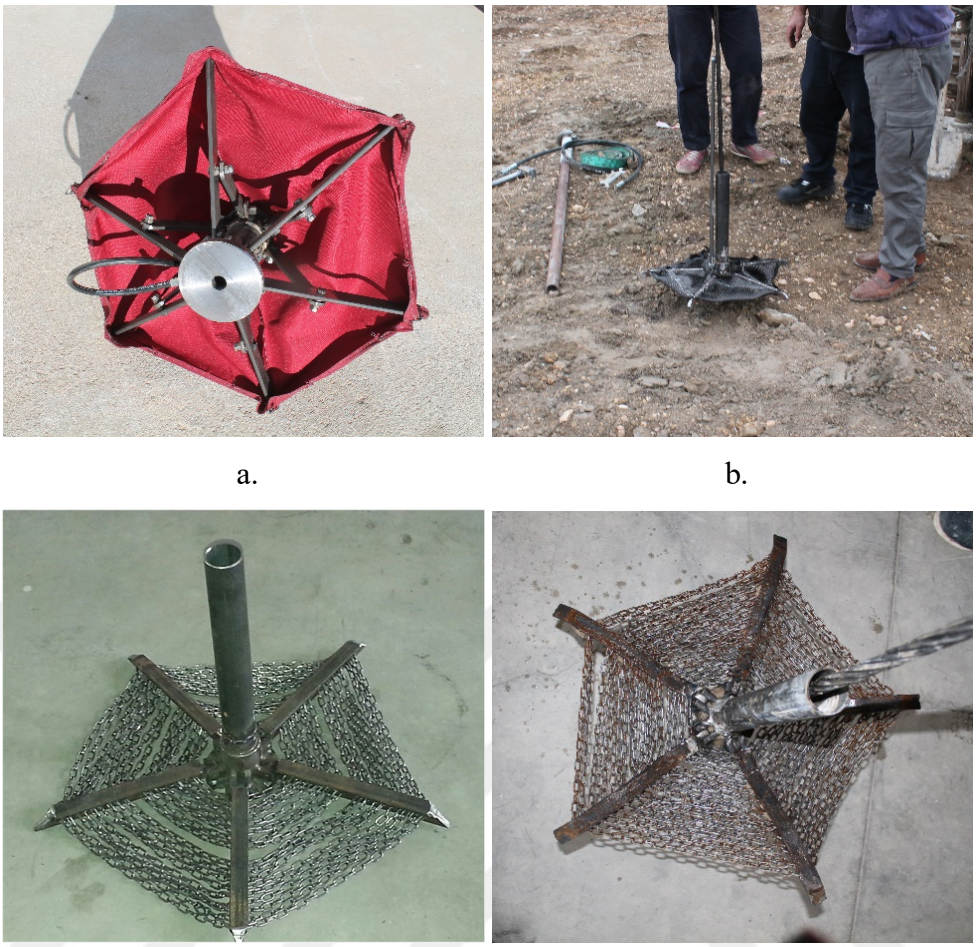
Kullanılacak gergi elemanının belirlenebilmesi için ankraj iskeletine farklı malzemelerden üretilen gergiler uygun bağlantı detayları ile monte edilmiştir (Görsel 13.8). Bu deneme ankrajları ile arazide ön uygulamalar yapılarak yöntemin uygulanabilirliği ve detaylarda ayrıntılı biçimde irdelenmiştir. Arazide;

- Branda gergili - destekli şemsiye ankraj,
- Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) gergili - desteksiz şemsiye ankraj,
- Enjeksiyon uygulamalı - zincirli desteksiz şemsiye ankraj,
- Yüksek basınçlı enjeksiyonlu - desteksiz şemsiye ankraj

olmak üzere 4 farklı ankrajın 2 metrelik kuyulara yerleştirme ve enjeksiyon işlemlerinin ardından 28 gün sonra çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu tiplerin haricinde bir de metal eleğin gergi malzemesi olarak kullanıldığı düz şemsiye ankraj uygulaması yapılmıştır. Fakat kuyuya indirmeden elekte meydana gelen yırtılmalar uygulamayı geçersiz kılmıştır. Deneylerden elde edilen yük - yer değiştirme eğrileri Şekil 13.1'de verilmiştir. En rijit ve dayanıklı uygulama yüksek basınçlı - zincirli detayda görülmüştür. Sadece gergi denemesi amaçlı olan bu tasarım tez kapsamında değerlendirilmemiş olup tamamen farklı detaylar gerektirmektedir. Diğer gergiler ise yaklaşık olarak benzer yük - yer değiştirme davranışları sergilemektedir. Fakat ankraj önündeki zeminin boşaltılması sürecinde bu gergi malzemelerinden verimli sonuç alınamamıştır. Dolayısıyla, dayanımı daha yüksek olan esnek bir kumaş türüne ihtiyaç duyulmuştur. Bu yüzden son tasarımlarda, piyasadaki en sağlam kumaş olan *aramid* kumaş kullanılmıştır.



Şekil 13.1. *Arazideki Deneme Ankrajlarının Çekme Deneyi Sonuçları*

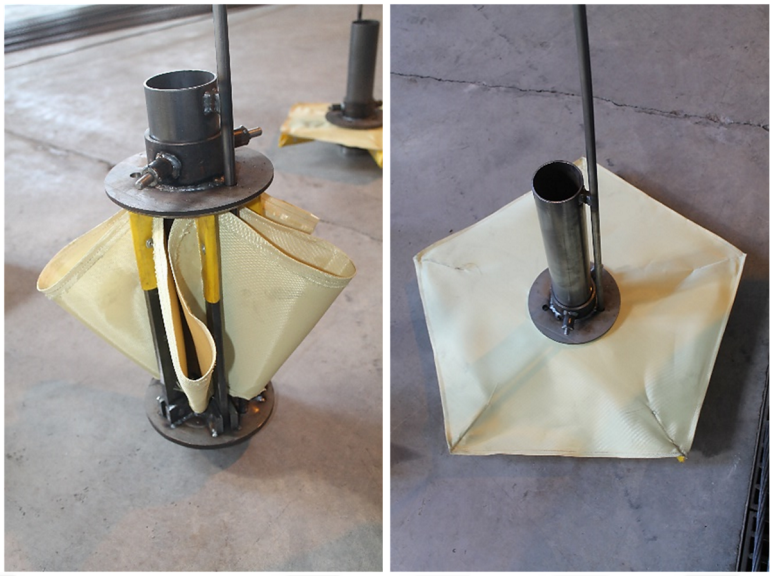


Görsel 13.8. *Deneme Ankrajları; a. Branda Gergili - Destekli Şemsiye Ankraj, b. CFRP Gergili - Desteksiz Şemsiye Ankraj ve c-d. Zincirli - Desteksiz Şemsiye Ankraj*

13.1.2. Düz şemsiye ankraj

Üçüncü tasarım şemsiye ankraj temel ankraj seçilmekle birlikte; deneme üretiminin ardından bazı değişiklikler yapılarak düz ve destekli olmak üzere iki farklı tipte nihai üretimlere geçilmiştir. Düz şemsiye ankraj (Görsel 13.9);

- Ankraj gövdesi,
- Kesici kanatlar,
- Açma - kapama plakası,
- Enjeksiyon yüzüğü,
- Gergi elemanı,
- Kılavuz boru ve
- Halat germe aparatından oluşmaktadır.



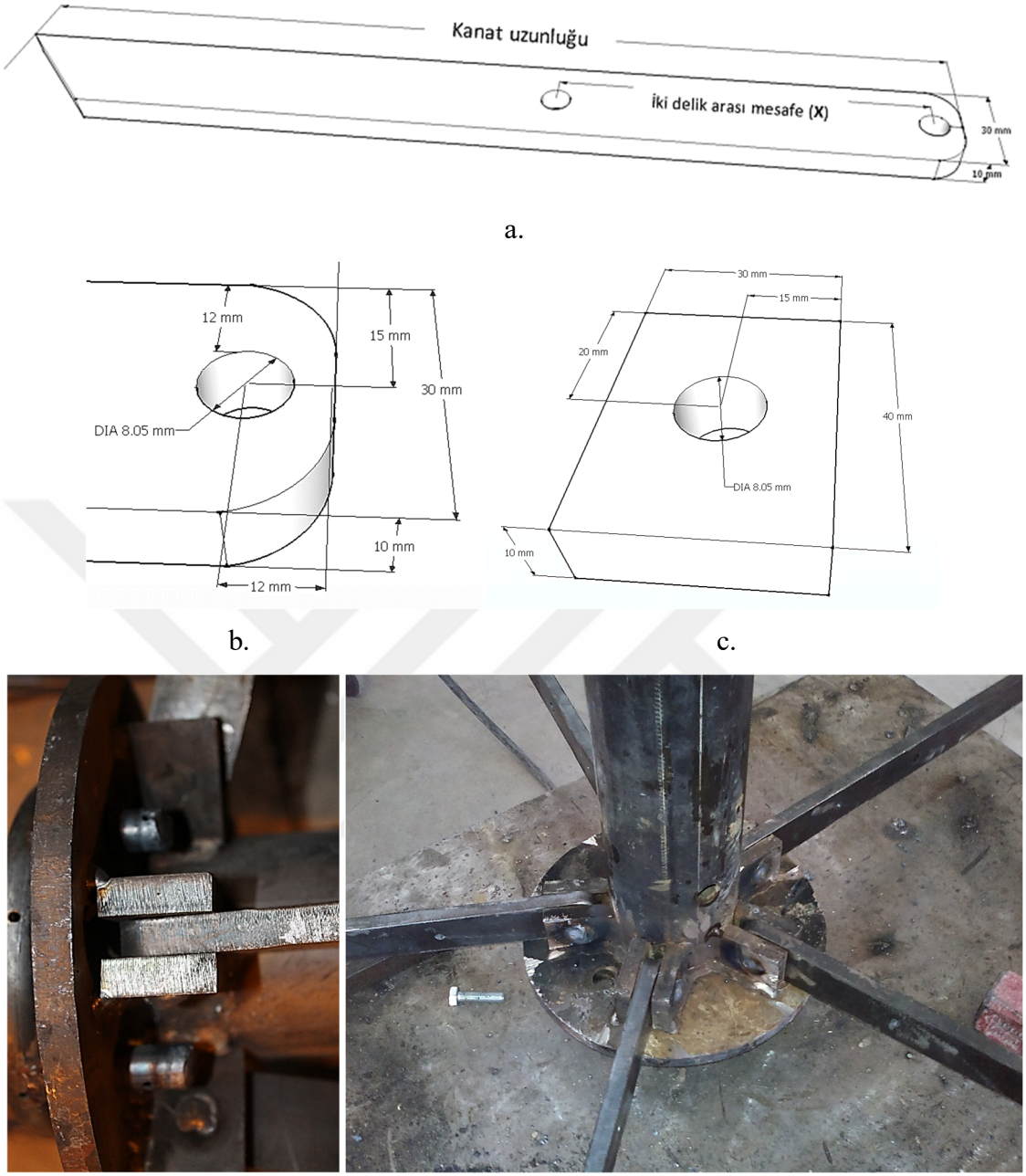
a. b.

Görsel 13.9. *Düz Şemsiye Ankraj; a. Kapalı Konum ve b. Açık Konum*

Ankraj gövdesi, diğer parçaların birleştiği ana elemandır. İçi boş boru profilden üretilmektedir. Son numunelerde 70 mm iç çap, 76 mm dış çap ve 3 mm cidar kalınlığına sahip içi boş boru profil gövde üretiminde kullanılmıştır. Gövde borusunun uzunluğu, kanatların açma - kapama mesafesi göz önünde bulundurularak yeterli uzunlukta üretilmelidir. Kapalı konumdaki kanatlar ve ankraj gövdenin birlikte oluşturduğu çap, kuyu çapından küçük olmalıdır. Gövdenin uç kısmına rijit metal plaka ve üzerine ankraj kafası kaynaklanarak gerekli sayıda çelik halatın kamalar yardımıyla buraya sabitlenmesi sağlanmaktadır. Rijit plakanın iç kısmına ise çelik lama profilden üretilen kulaklar kaynaklanır. Ortası delikli bu kulaklara kesici kanatlar sabitlenmektedir. Her bir kanat için iki adet kulak sabitlenir ve kanatlar bunların ortasına yerleştirilerek montajlanır. Gövde üzerinde açılan iki delik ise açma - kapama plakası veya yüzüğü üzerinde bulunan kilitlere ait yuvalardır. Yine gövde üzerinden geçen enjeksiyon borusu, gövdenin üst kısmında yardımcı bir metal parça ile kaynaklanarak sabitlenmektedir. Bu sayede hem enjeksiyon borusunun gereksiz hareketini önlemekte hem de gövde üzerindeki sabit kısım açma - kapama yüzüğüne kılavuzluk yapmaktadır. Rijit plaka üzerinde bulunan üç delik ise enjeksiyon yüzüğünün giriş ve çıkış delikleridir. (Görsel 13.10).

Görsel 13.10. *Şemsiye Ankraj Gövde Elemanı*

Kesici kanatlar, yeterli dayanıma sahip çelik lama profilden mamul hareketli elemanlardır. Küçük, orta ve büyük boy şemsiye ankrajlar için sırası ile lazer kesim 212, 338 mm ve 462 mm uzunluğunda ucu 45º pah kırılarak 10 mm kalınlığında lama profilden kanatlar üretilmiştir (Görsel 13.11a). Destekli şemsiye ankraj kanatlarının ortasında destek bağlantısı için ayrıca birer delik bulunmaktadır. Kanatların dairesel birleşim detayları (Görsel 13.11b) ve kulaklar (Görsel 13.11c) da lazer kesim ile standart ölçülerde üretilmiştir. Kanatlar; ankraj ucunda bulunan rijit plaka üzerindeki kulakların arasına geçirilerek, uygun çapta mil veya cıvata ile montajı yapılır (Görsel 13.11d). Kapalı konumda dik, açık konumda ise yatay pozisyonda sabitlenecek kanatların asli görevi zeminin kesilmesi ve gergi elemanının eş zamanlı açılmasını sağlamaktır. Bu sayede şemsiye ankraj önünde kalan zemin boşaltılmakta ve sonrasında bu bölüm enjeksiyon ile doldurulmaktadır. Kuyu çapını geçmemek ve eleman montajını engellememek şartı ile istenilen sayıda kanat monte edilebilmektedir. Diğer taraftan kanatların rijit plaka üzerine eşit açılarla sabitlenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde merkezden sapma meydana geleceğinden hem kuyuya sürme hem de açma süreçlerinde sorunlarla karşılaşılmaktadır. Kanat uzunluğu ise zemin tipi, uygulanacak çekme kuvveti ve malzeme dayanımına göre değişiklik göstermektedir. Arazi deneylerinde kullanılan son tasarımlarda kanatlar, gövde üzerindeki rijit plakaya 72º'lik eşit açılarla ile sabitlenmiştir (Görsel 13.11e).



Görsel 13.11. *a. Kesici Kanat Detayı, b. Dairesel Uç Detayı, c. Kulak Detayı, d. Kanat Montajı ve e. Simetrik Kanat Yerleşimi*

Açma - kapama plakası; şemsiye ankrajın kuyuya indirilmesinin ardından ankraj halatı ve kılavuz borunun entegre çalışması ile harekete geçerek, kanatların açılmasını sağlayan elemandır. Kanatların tamamen açılması ile açma - kapama plakası üzerinde bulunan iki adet kilit, gövde üzerindeki yuvalara oturarak kanatların tekrar kapanmasını engeller (Görsel 13.12a). Bu kilitler içerisinde bulunan yaylar vasıtası ile yuvaya gelen

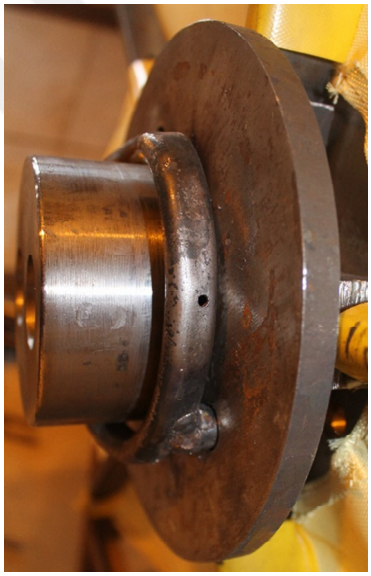
mil harekete geçer ve sistemi kilitlemiş olur. Üzerinde bulunan delikten enjeksiyon borusu geçerek açma - kapama plakasına kılavuzluk görevi görür (Görsel 13.12b). Diğerleri ise enjeksiyon borusunun çıkış delikleridir.

a. b.

Görsel 13.12. *a. Açma - Kapama Plakası ve b. Açma - Kapama Plakası İç Kılavuz Borusu*

Enjeksiyon yüzüğü; enjeksiyon makinesinden gelen çimento - su karışımının ankraj kök bölgesine iletilmesini sağlayan metal boru profildir (Görsel 13.13a-b). Kuyu çıkışındaki boru ucunda, basınçlı hortum ile boru arasında bağlantıyı sağlayacak bağlantı rekoru bulunmaktadır. Kuyu yüzeyinden şemsiye ankraj ucundaki ankraj kafasına kadar düz boru şeklinde gelen enjeksiyon borusu, ankraj kafasının çevresinde dairesel simit şeklinde bükülmektedir. Üzerinde bulunan deliklerden düşük basınçlı enjeksiyon püskürtülmektedir (Görsel 13.13c). Ankraj gövdesi boyunca sabitlenen kısım açma - kapama yüzüğü için iç kılavuz boru görevi görmektedir. Enjeksiyon borusu tek parça üretilip kuyuya sürülebileceği gibi 1,5 - 2,0 m boyutlarında parça parça üretilip kuyuya sürüldükçe birbirine de eklenebilir. Uygulamada kullanılan enjeksiyon yüzüğü 13 mm çaplı içi boş çelikten üretilmiştir.

a.



b. c.

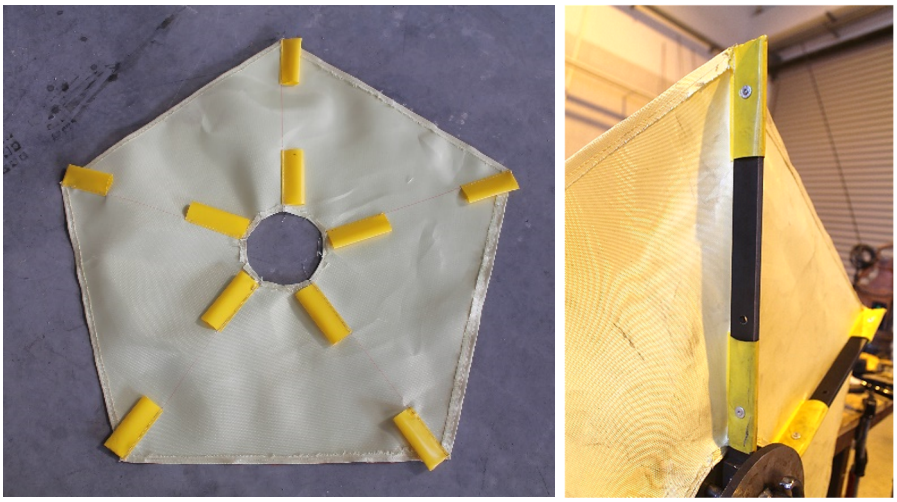
Görsel 13.13. *a. Enjeksiyon Yüzüğü Üretimi, b. Enjeksiyon Yüzüğü Montajı ile Devamında Enjeksiyon Borusu ve c. Püskürtme Deliği*

Gergi elemanı; kesici kanatların birbirleri ile bağlantısını sağlayan elemandır. Kanatların açılması sürecinde birlikte hareket etmelerini sağlamaktadır. Aynı zamanda kanatlara gelen yükü daha geniş alana dağıtarak gerilme yığılmalarının önüne geçmektedir. Üretim ve arazi denemelerinde; sırasıyla branda, karbon lifli polimer kumaş, çelik elek, zincir ve aramid kumaş (kevlar) kullanılmıştır. Bağlantı bölgelerinde

oluşan gerilme değerleri branda ve karbon lifli polimer malzemelerini yetersiz kılmıştır. Çelik elek ise yetersiz elastik davranışa sahip olduğundan kanatlar burkulmuştur. Arazideki deneme uygulamalarında gergi elemanı olarak branda, karbon lifli polimer (CFRP), çelik elek, zincir ve aramid kumaş kullanılmıştır (Görsel 13.14). Tasarlanan çalışma prensibi, zincir ve aramid kumaş kullanımı ile elde edilmiştir. Tez kapsamındaki arazi uygulamalarında üreticiler tarafından piyasadaki en sağlam kumaş olarak belirtilen çelik yelek kumaşı aramid (kevlar) kullanılmıştır. Aramid kumaşın kanatlara sabitleneceği bölgelere teflon kumaştan bağlantılar yapılmıştır. Kanatlar üzerinde gerekli deliklere perçin ile aramid kumaş sabitlenmiştir (Görsel 13.14f).

a. b. c. d.

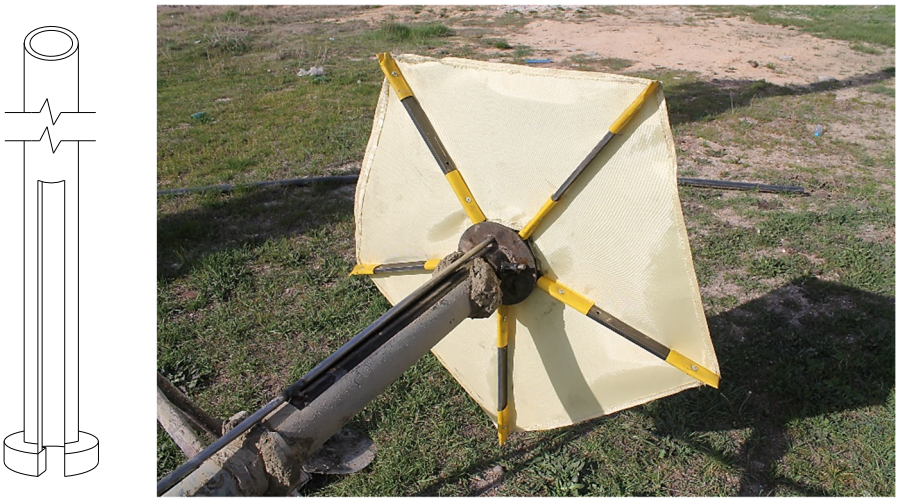
Görsel 13.14. *Deneme Uygulamalarında Kullanılan Gergi Elemanları; a. Branda, b. Karbon Lifli Polimer (CFRP), c. Metal Elek, d. Zincir, e. Aramid Kumaş ve f. Aramid Kumaşın Perçin ile Sabitlenmesi,*



e. f.

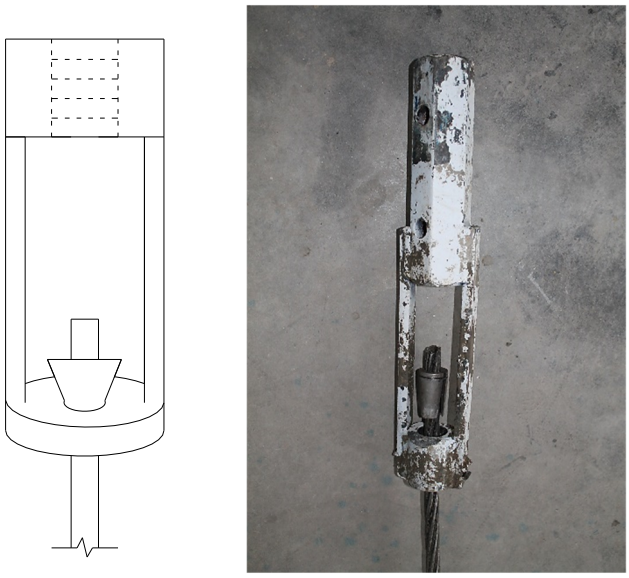
Görsel 13.14. (Devam) *Deneme Uygulamalarında Kullanılan Gergi Elemanları; a. Branda, b. Karbon Lifli Polimer (CFRP), c. Metal Elek, d. Zincir, e. Aramid Kumaş ve f. Aramid Kumaşın Perçin ile Sabitlenmesi*

Kılavuz boru; şemsiye ankrajın kuyuya indirilmesi sürecinde ankraj kuyu merkezinde hareket ettirerek ilerlemesini sağlayan içi boş borudan üretilmiş elemandır. Uç kısmında açma - kapama plakası veya yüzüğünü iterken burkulmasını önleyecek rijit plaka bulunmaktadır. İlk parçası açma - kapama aparatlarına kılavuzluk yapan gövde üzerine sabit enjeksiyon borusuna uyacak biçimde kesilmiştir (Görsel 13.15). Ankrajın kuyu tabanına ulaşmasından sonra, halat germe aparatı ile koordineli biçimde çalışarak kanatların eş zamanlı açılmasını sağlar. Kılavuz boru düz şemsiye ankrajda açma - kapama plakasına temas ederken, destekli şemsiye ankrajda ise açma - kapama yüzüğüne temas eder. Bu parçaları kuyu tabanına doğru hareket ettirerek kanatların açılmasını sağlar. Sondaj tiji mantığı ile 1,5 - 2,0 m parçalar halinde üretilerek istenilen derinliğe kadar ekleme yapılabilir.



Görsel 13.15. *Kılavuz Boru*

Halat germe aparatı; şemsiye ankrajın kuyuya indirilmesinden sonra kuyu dışında kalan ankraj halatı, halat germe aparatının uç kısmına kamalar yardımı ile sabitlenir (Görsel 13.16). Kuyu tabanından kuyu çıkışına kadar devam eden kılavuz boru ve entegre çalışan halat germe aparatı ile halat çekilir. Bu sayede başka bir hareket şansı tanınmayan açma - kapama plakası veya yüzüğü ankraj ucuna doğru hareket etmekte ve kanatları açmaktadır. Açma aparatları üzerinde bulunan kilitler, gövde üzerindeki yuvalara oturduğunda kanatlar tamamen açılmış ve kilitlenmiş olur.



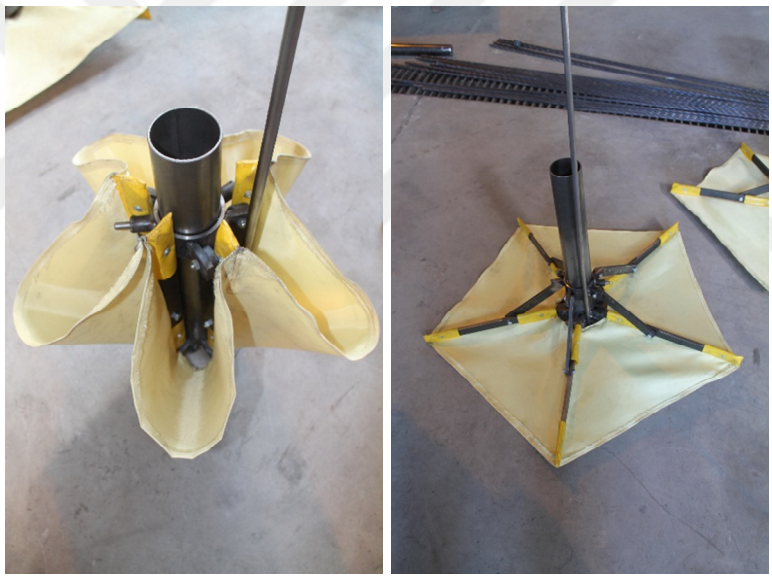
Görsel 13.16. *Halat Germe Aparatı*

13.1.3. Destekli şemsiye ankraj

Destekli şemsiye ankrajın alt bileşenlerini yine düz ankrajda kullanılan;

- Ankraj gövdesi,
- Kesici kanatlar,
- Enjeksiyon yüzüğü,
- Gergi elemanı,
- Kılavuz boru,
- Halat germe aparatı oluşturmaktadır.

Bunların haricinde düz ankrajda açma - kapama plakası bulunurken, destekli ankrajda *açma - kapama yüzüğü* bulunmaktadır. Ayrıca, destekli şemsiye ankrajda ek olarak *kanat destekleri* yer almaktadır (Görsel 13.17).



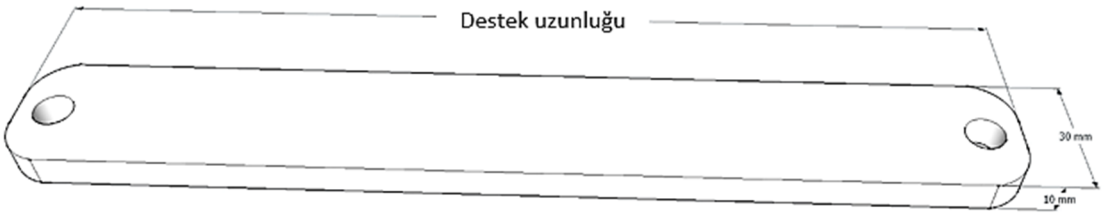
a. b.

Görsel 13.17. *Destekli Şemsiye Ankraj; a. Kapalı Konum ve b. Açık Konum*

Açma - kapama yüzüğü; düz şemsiye ankrajdaki açma - kapama plakası ile aynı amaçla kullanılmaktadır. Bu yüzük üzerinde desteklerin bir ucunun sabitlenebilmesi amacıyla her kanat için bir tane kulak bulunmaktadır. Yüzük, gövde borusu dışında rahatça hareket edebilecek çapta içi boş boru profilden üretilmektedir. Yine yüzük üzerinde kanatların geri kapanmasını önleyecek iki adet kilit bulunmaktadır (Görsel 13.18).

Görsel 13.18. *Açma - Kapama Yüzüğü Detayı*

Kanat desteği; bir ucu açma - kapama yüzüğüne diğer ucu da kesici kanat ortasına sabitlenen çelikten mamul elemandır (Görsel 13.19). Destek uzunluğu kesici kanat uzunluğunun yarısı kadardır. Destekler farklı uzunlukta olup yüzüğe sabitlendiğinden dolayı gövde üzerindeki hareket mesafeleri de değişkendir. Gövde uzunluğu bu mesafe göz önüne alınarak tasarlanmalıdır.

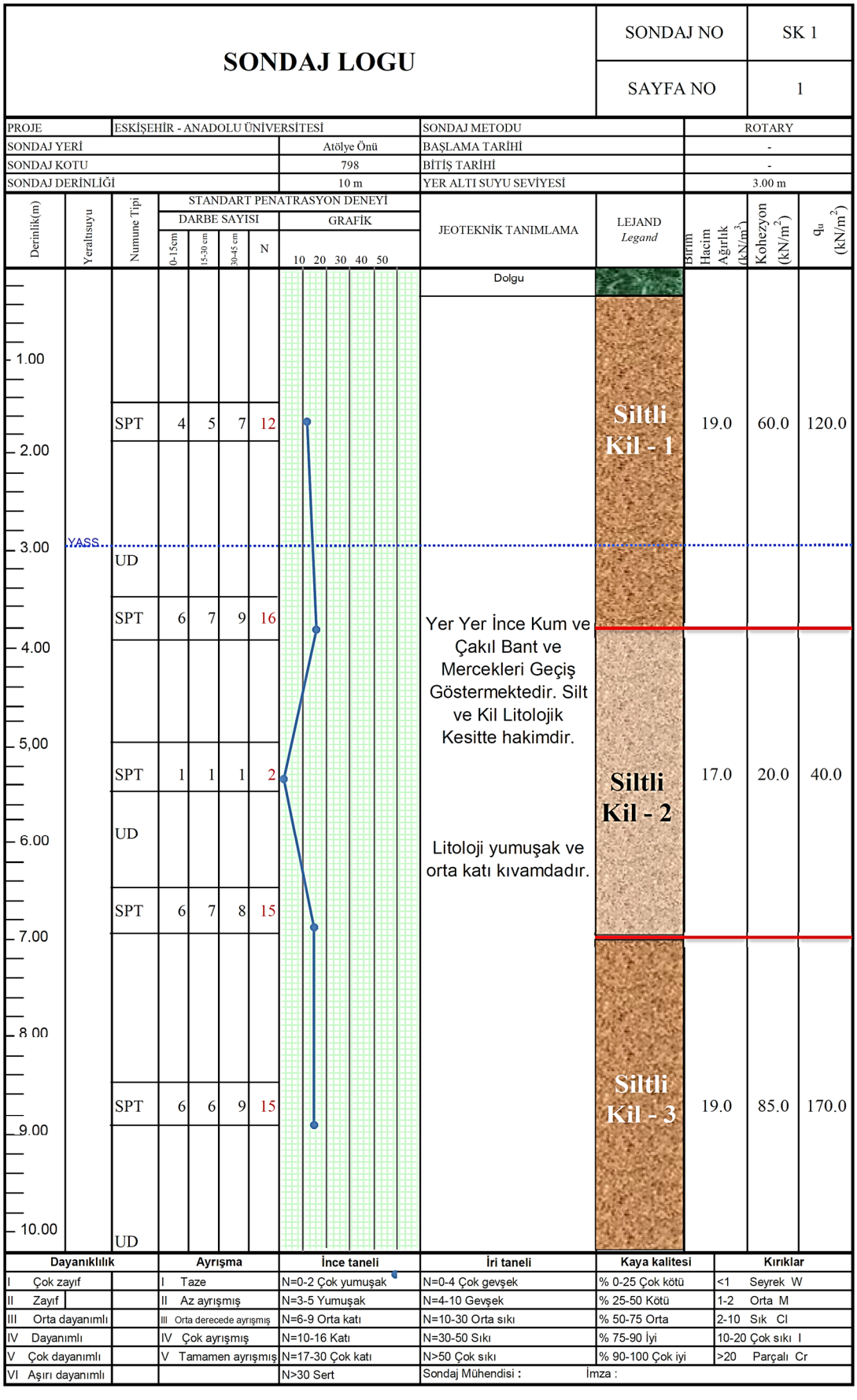


Görsel 13.19. *Kanat Destek Detayı*

14. ARAZİ UYGULAMASI

14.1. Sondaj Logu

Arazi uygulamalarının yapıldığı alana ait sondaj logu Görsel 14.1'de verilmiştir. Arazideki zeminin ilk 10 metrelik kısmında gerçekleştirilen sondajda; yer yer ince kum ve çakıl bant ve merceklerinin geçiş gösterdiği, yumuşak ve orta katı kıvamda siltli kil gözlenmiştir. Zemin yüzeyinden itibaren 3 m derinlikte yeraltı suyuna rastlanmıştır. Derinlik boyunca farklılık gösteren siltli kil üç farklı kısma ayrılmıştır. Öngörülen teorik hesapta kullanılmak üzere birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla 19, 17 ve 19 kN/m^3 olarak hesaplanırken; kohezyon değerleri de sırasıyla 60, 20 ve 85 kN/m^2 mertebelerindedir. İçsel sürtünme açısı ise derinlik boyunca sıfırdır.



Görsel 14.1. *Sondaj Logu*

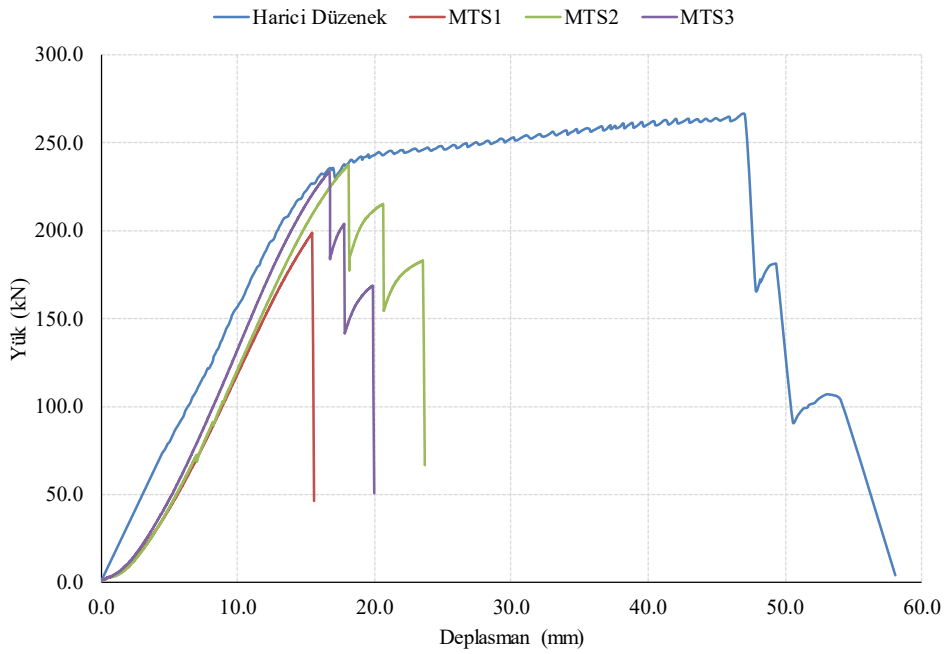
14.2. Halat Çekme Deneyi

Öncelikle şemsiye ankrajın germe sürecinde kullanılan ankraj halatının hem MTS çelik çekme aleti (Görsel 14.2a) ile hem de harici sistem ile çekme deneyi gerçekleştirilmiştir (Görsel 14.2b). Firmadan temin edilen 15,2 mm çap ve 140,05 mm^2 kesit alanına sahip 7 sarımlı tekli ankraj halatlarının üretici firmanın vermiş olduğu dayanım değerlerini sağladığı görülmüştür. Yer değiştirme değerlerinde ise sistem kaynaklı daha yüksek sünme değerleri elde edilmiştir.

a. b.

Görsel 14.2. *Halat Çekme Deneyleri; a. MTS ve b. Harici Düzenek*

Halat çekme deneylerinde MTS çelik çekme cihazı ile ortalama 160 MPa kopma dayanımı hesaplanmıştır. Harici düzenekte ise ortalama 190 MPa kopma dayanımı elde edilmiştir. (Şekil 14.1). MTS cihazında yükleme hızı 0,0007 MPa/s iken, harici düzenekte 0,014 MPa/s değeri ile deney gerçekleştirilmiştir. Değerler arasındaki fark yükleme hızları arasındaki yaklaşık 20 kat farktan kaynaklanmaktadır. Arazi yüklemelerinde de kullanılan harici düzenekten elde edilen değerlerin, halatlar için verilen minimum kopma dayanımı değerini sağladığı görülmektedir.



Şekil 14.1. *Ankraj Halatı Çekme Deneyi Sonuçları*

14.3. Enjeksiyon Basınç Deneyi

Enjeksiyon makinesinin çıkış basıncının gözlenebilmesi için su ile çalıştırılması esnasında, hortum ucunda 2 adet 2 mm püskürtme deliği kullanıldığında 60 bar; 4 adet 3,5 mm delik kullanıldığında ise 20 bar basınç değerlerine ulaşılmıştır (Görsel 14.3). 2 adet 2 mm delik çıkış alanı 6,28 mm^2, 4 adet 3,5 mm delik çıkış alanı ise 38,48 mm^2'dir. 50 cm çapındaki şemsiye ankraj için çıkış basıncında, su kullanımı sonucu elde edilen değerler yeterlidir. Viskozitesi daha yoğun olan çimento - su karışımında daha yüksek basınç değerleri elde edilmiştir.

a. b.

Görsel 14.3. *a. Su Kullanımı ile Enjeksiyon Basıncının Değerlendirilmesi, b. 4 Adet 3,5 mm'lik Püskürtme Deliği Bağlantısı ve c. 4 Adet Püskürtme Deliği Kullanımında Gözlenen Çıkış Basıncı*

c.

Görsel 14.3. (Devam) *a. Su Kullanımı ile Enjeksiyon Basıncının Değerlendirilmesi, b. 4 Adet 3,5 mm'lik Püskürtme Deliği Bağlantısı ve c. 4 Adet Püskürtme Deliği Kullanımında Gözlenen Çıkış Basıncı*

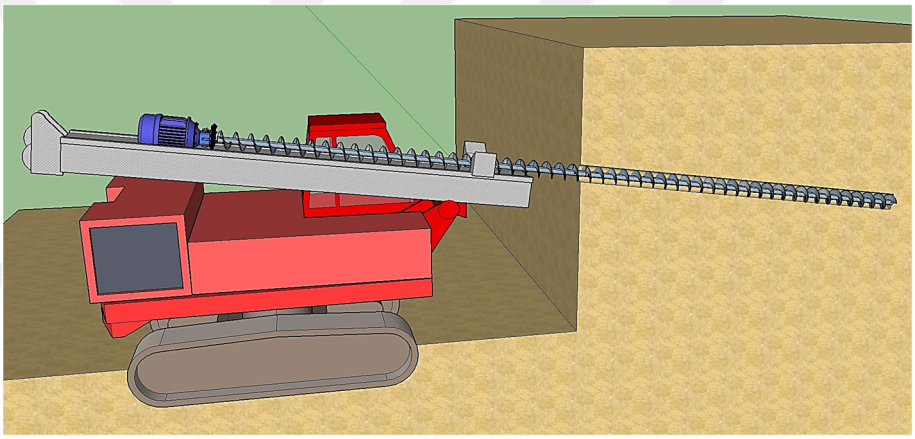
14.4. Uygulama Aşamaları

Tez kapsamında 12 adet destekli ve 12 adet düz olmak üzere toplamda 24 adet şemsiye ankraj için arazi uygulaması yapılmıştır (Görsel 14.4). Normal şartlarda yatay veya yatay ile 15º açı ile teşkil edilmesi gereken ankrajlar, uygulama kolaylığı göz önünde bulundurularak tez kapsamında düşey doğrultuda tatbik edilmiştir. Aksi halde büyük miktarda hafriyat, düşeyde açılan kazı alanının stabilite problemlerinin giderilmesi, ortamdaki suyun uzaklaştırılması ve göğüsleme kirişi gibi birçok ek uygulama gerekmektedir.

Görsel 14.4. *Arazi Uygulamasına Hazır Şemsiye Ankrajlar*

14.4.1. Delgi işlemi

Boart Longyear 540 tipi sondaj makinesi ile 180 mm çaplı delgi kullanılarak gerekli derinlikte sondaj kuyusu açılmıştır (Görsel 14.5). Uygulama alanında kil ağırlıklı zemin bulunmasından dolayı genel itibari ile aktif killer kuyuları sıvadığından göçmeler engellenmiştir. Aksi takdirde muhafaza borusu veya bentonit karışımı ile sıvama gerekliliği doğabilmektedir. 2 m, 4 m, 6 m ve 8 m derinliklerde sondaj kuyuları açılmıştır. Sondaj noktaları Görsel 14.6'daki haritada verilmiştir. Sondaj noktalarına ait bilgiler ise Tablo 14.1'de verilmiştir. Ankrajın isimlendirilmesi için ankraj tipi, ankraj çapı ve derinlik sıralaması kullanılmıştır. A50-2 isimlendirmesi; 50 cm çapında 2 m derinlikte uygulanan düz şemsiye ankrajı belirtmektedir. DA ibaresi ise destekli şemsiye ankrajı tanımlamaktadır.



a.

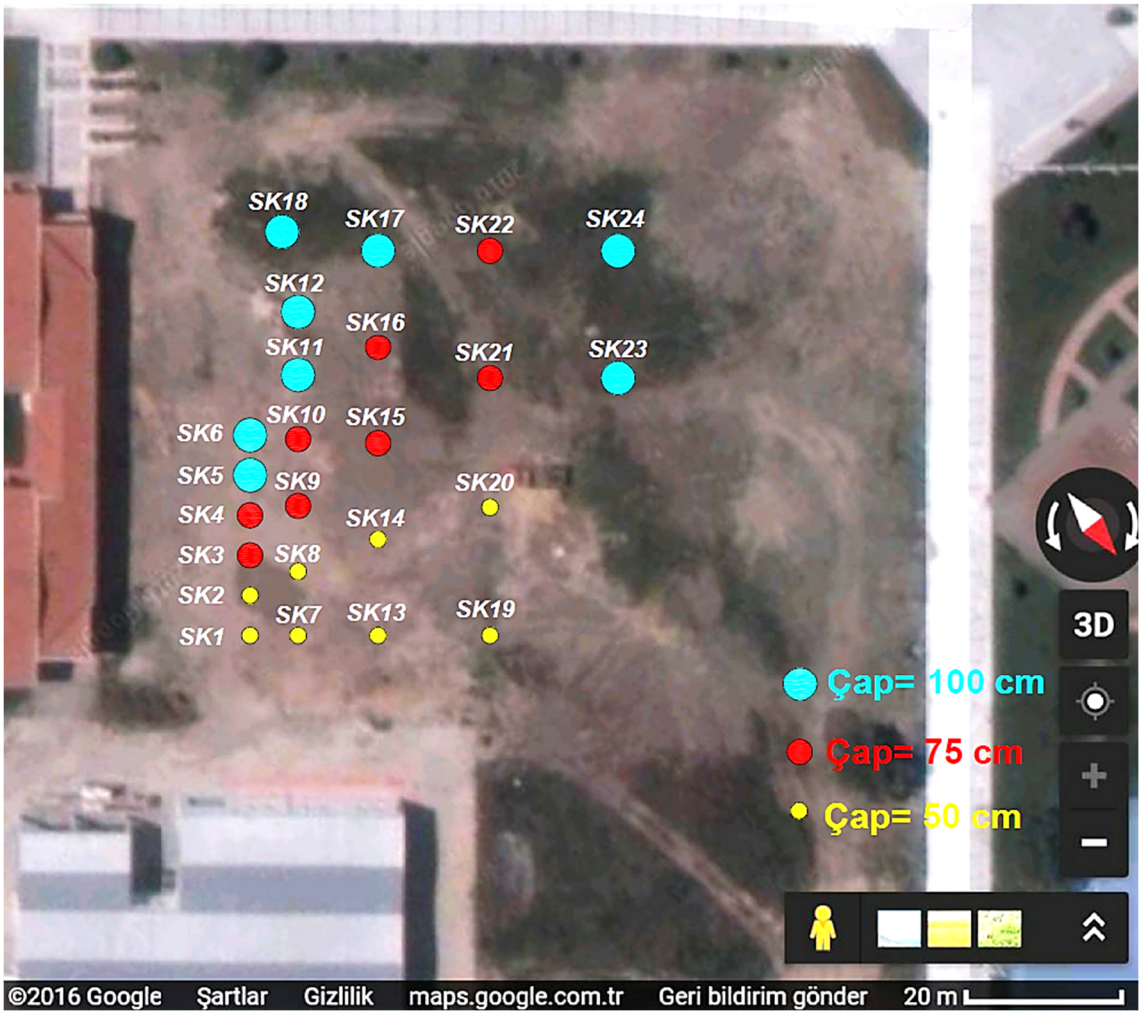
b. c.

Görsel 14.5. *Sondaj Makinesi ile Kuyuların Açılması; a. Şematik Gösterim ve b-c. Arazi Uygulaması*

Tablo 14.1. Sondaj Kuyularına Ait Bilgiler

Kuyu No	İsimlendirme	Şemsiye Ankraj Tipi	Şemsiye Ankraj Çapı (cm)	Derinlik (m)
1	A50-2	Düz	50	2
2	DA50-2	Destekli	50	2
3	A75-2	Düz	75	2
4	DA75-2	Destekli	75	2
5	A100-2	Düz	100	2
6	DA100-2	Destekli	100	2
7	A50-4	Düz	50	4
8	DA50-4	Destekli	50	4
9	A75-4	Düz	75	4
10	DA75-4	Destekli	75	4
11	A100-4	Düz	100	4
12	DA100-4	Destekli	100	4
13	A50-6	Düz	50	6
14	DA50-6	Destekli	50	6
15	A75-6	Düz	75	6
16	DA75-6	Destekli	75	6
17	A100-6	Düz	100	6
18	DA100-6	Destekli	100	6
19	A50-8	Düz	50	8
20	DA50-8	Destekli	50	8
21	A75-8	Düz	75	8
22	DA75-8	Destekli	75	8
23	A100-8	Düz	100	8
24	DA100-8	Destekli	100	8

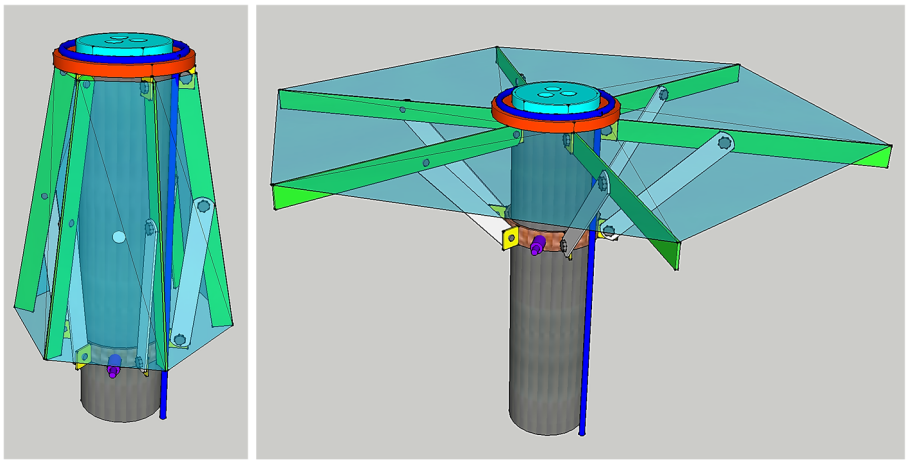
Teoride öngörülen süre ve işçilik gereksinimlerinin, pratik uygulamalarda gerçeği yansıtmadığı malumdur. Önerilen sistemde ankrajın açılması için harici bir vince ihtiyaç duyulmaktadır. Ek bir vincin kiralanarak araziye getirilmesi fazladan maliyet ve zaman kaybı yaşatacağından, delgi makinesi kulesinin bu amaçla kullanılmasına karar verilmiştir. Bu yüzden kulenin boşa çıkması için burgu ve tijler bir sonraki kuyuya bırakılarak, boş makine mevcut kuyuya tekrar getirilmiştir.



Görsel 14.6. *Sondaj Noktaları*

14.4.2. Şemsiye ankrajın hazırlanması

Germe işleminde öngörülen yüke karşı yeteri dayanımı sağlayacak sayıda ankraj halatı, ankraj kafasından geçirilerek ankraj kamaları ile sabitlenmiştir (Görsel 14.7a). Kuyu dışında germe işlemini gerçekleştirebilmek için, tüm halatlarda 1,5 m halat payı bırakılmıştır. Halatların birbirine değmesini engellemek için plastik ayırıcılar kullanılmıştır (Görsel 14.7b). Kuyu derinliklerinin az ve kuyu çapının geniş olmasından dolayı merkezleyicilere ihtiyaç duyulmamıştır. Ankrajların geçici olması yani korozyona mahal vermeden deneylerin uygulanacak olması göz önünde bulundurularak, koruma borusu kullanımı da gereksiz görülmüştür. Fakat uzun süreli deneylerin yapılması durumunda bu aparatların kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Ankraj detayına sabitlenen metal enjeksiyon borusunun bağlantı rekor girişleri bantla kapatılarak zemin girmesi engellenmiştir (Görsel 14.7c).



a. b.

c.

d.

Görsel 14.7. *Ankrajın Hazırlanması, a. Kapalı Konum Şematik Gösterim, b. Açık Konum Şematik Gösterim, c. Halatların Sabitlenmesi, d. Ayırıcının Sabitlenmesi ve e. Enjeksiyon Rekorunun Kapatılması*

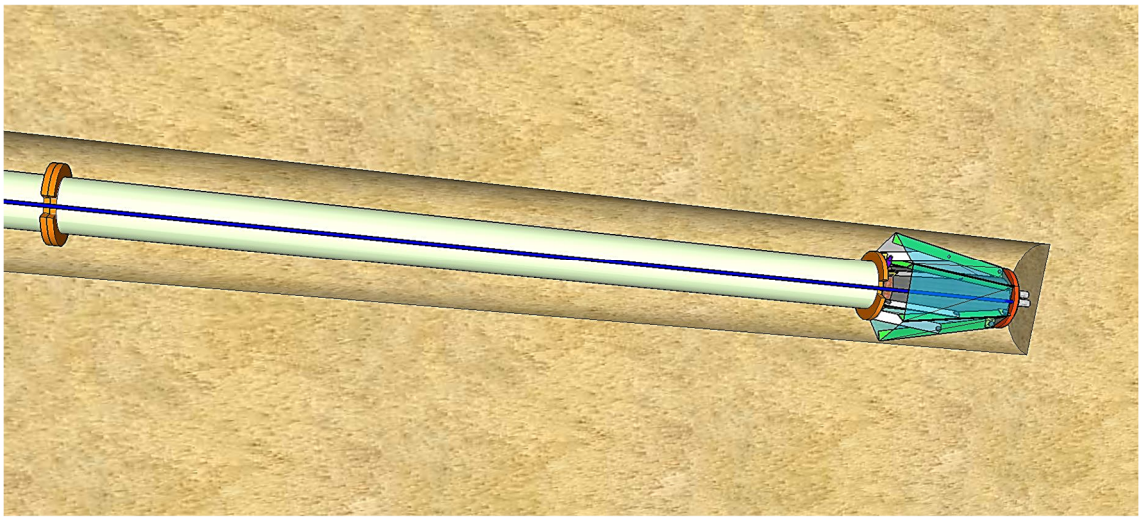
e.

Görsel 14.7. (Devam) *Ankrajın Hazırlanması, a. Kapalı Konum Şematik Gösterim, b. Açık Konum Şematik Gösterim, c. Halatların Sabitlenmesi, d. Ayırıcının Sabitlenmesi ve e. Enjeksiyon Rekorunun Kapatılması*

14.4.3. Ankrajın kuyuya yerleştirilmesi

Ankraj detayına uygun ve yeterli uzunluktaki kılavuz boru, şemsiye ankraja geçirildikten sonra makine vinci ile kapalı konumda kuyu tabanına indirilmiştir (Görsel 14.8). Kılavuz boru ankrajın yerleştirilmesi sürecinde kuyu merkezinde kalmasını sağlarken aynı zamanda kanatların açılması aşamasında destek görevi görmektedir. Kılavuzun parçalar halinde yapılması ile birleşim yerlerinde kullanılan rijit dairesel plakalar burkulmaya karşı dayanımını arttırmaktadır.

Arazi uygulaması yapılan alanda yumuşak kil ağırlıklı zemin olduğundan, delgi işlemi sırasında kuyu yüzeyi sıvanarak göçmeler önlenmiştir. Fakat yatay veya açılı uygulama sırasında kuyu göçmelerinin engellenebilmesi için muhafaza borusu kullanımı ön plana çıkmaktadır. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken husus, kılavuz boru ile ankrajın birlikte kuyuya indirilmesidir. Aksi halde iki eleman farklı hareket ederek ya kılavuz borunun gövdeden tamamen çıkmasına ya da istenilen derinliğe ulaşılamadan kanatların açılmasına neden olmaktadır.



a.

b. c.

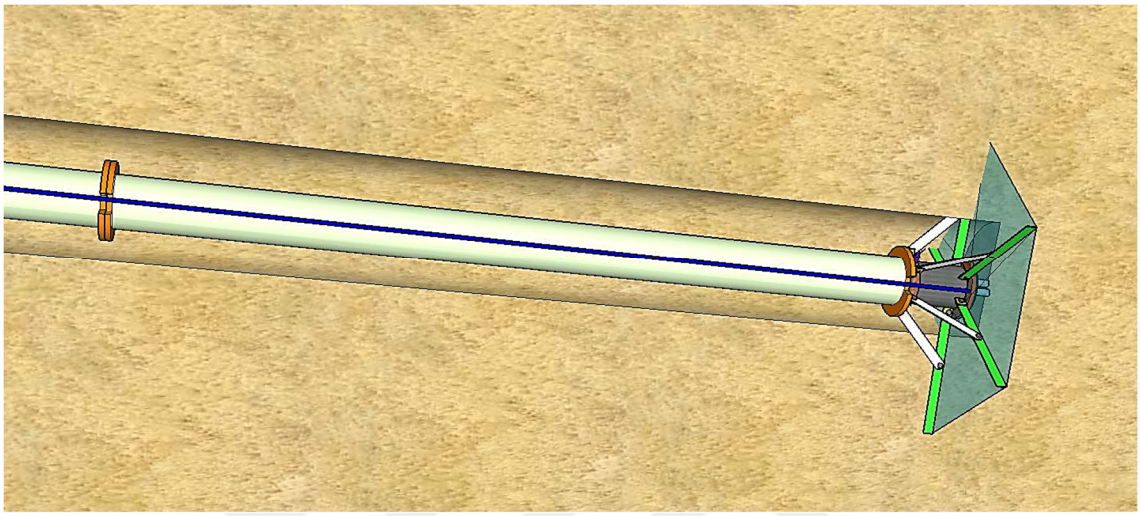
Görsel 14.8. *Ankrajın Kuyuya Yerleştirilmesi; a. Şematik Gösterim, b. Vinç ile Kaldırma İşlemi ve c. Kapalı Konumda Kuyuya Sürme İşlemi*

14.4.4. Kanatların açılması

Şemsiye ankraj yöntemindeki en önemli aşamanın kanatların açılması aşaması olduğu belirtilebilir. Çünkü tasarlanan çapta kompozit bir kök bölgesi üretilebilmesi için kanatların tam olarak açılması ve yeterli enjeksiyonun yapılması gerek ve yeter şartlardır. Aksi halde klasik ankraj kök bölgesi uygulamasından herhangi bir farkı olmamaktadır.

Kanatların açılması aşamasında; kılavuz boru, halat çekme aparatı ve halatlar birlikte çalışmaktadır (Görsel 14.9). Destekli ankrajlarda kılavuz borunun açma - kapama yüzüğüne sabitlenmesinden sonra halat gerilerek, düz ankrajlarda ise kılavuz borunun açma - kapama plakasına temasının ardından halat boşluğu alındıktan sonra ankraj komple çekilerek kesici kanatlar açılmaktadır. Bu aşamada kılavuz boru basma kuvvetine maruz kalırken, halat çekme aparatı ve halatlar ise çekme kuvvetine karşı çalışmaktadır. Ankraj kuyuya indirilmeden açılma payı not edilir. Halat açılma payı kadar çekildikten

sonra kilitler yuvalarına oturur ve bu sayede kanatlar tamamen açılacaktır. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken husus, kanatların açıldıktan sonra halatların daha fazla çekilmemesi gerekliliğidir. Aksi halde, ya kılavuz boru burkulmakta ya da yüksek kuvvetlerde halatlar kopabilmektedir.



a.

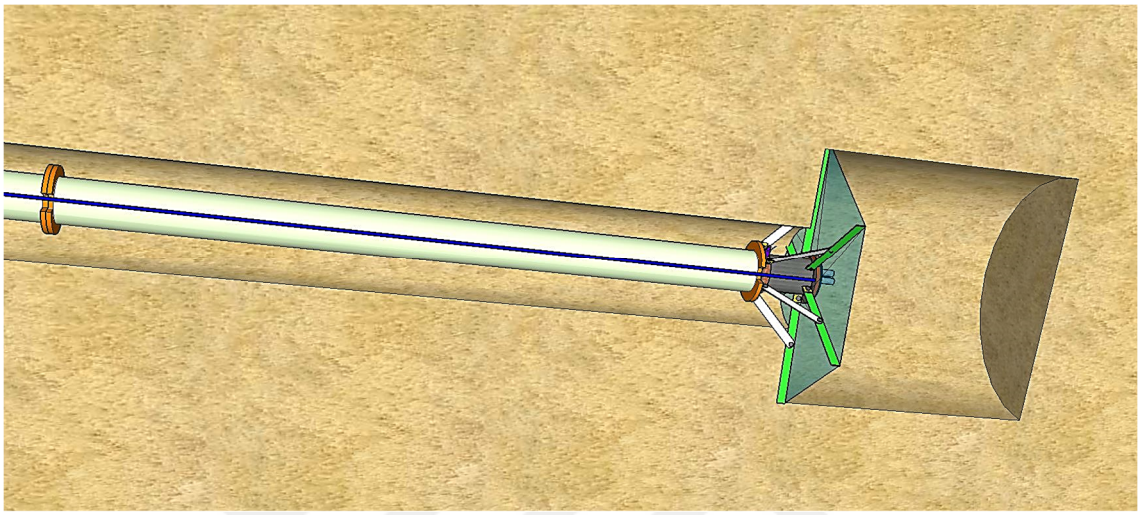
b. c. d.

Görsel 14.9. *Kesici Kanatların Açılması; a. Şematik Gösterim, b. Halat Payının Ölçümü, c. Açma Sonrası Halat Payı Ölçümü ve d. Kuyu İçerisinde Açılmış Şemsiye Ankraj*

14.4.5. Zeminin boşaltılması

Ankraj önünde ne kadarlık bir beton kütlesi oluşturmak isteniliyorsa, o kadar hacmin enjeksiyon ile doldurulabilmesi için zeminin boşaltılması veya en azından gevşetilmesi gerekmektedir (Görsel 14.10). Kanatlar tamamen açıldıktan sonra ankraj ve kılavuz boru delgi makinesinin çenesine kilitlenerek tamamen yukarı ve aşağı doğru hareket ettirilip boşaltma işlemi gerçekleştirilir. Arazi uygulamasında kanatların

kilitlenmesinin ardından her kuyuda ankrajlar üçer kez yukarı aşağı hareket ettirilerek ön kısmı yaklaşık 50 cm boşaltılmıştır. Bu aşamada yeterli dayanıma sahip gergi elemanı kullanılmadığı takdirde henüz zemin boşaltma işleminde gergi parçalanmaktadır. Bu durumda istenilen performans karşılanamamaktadır.



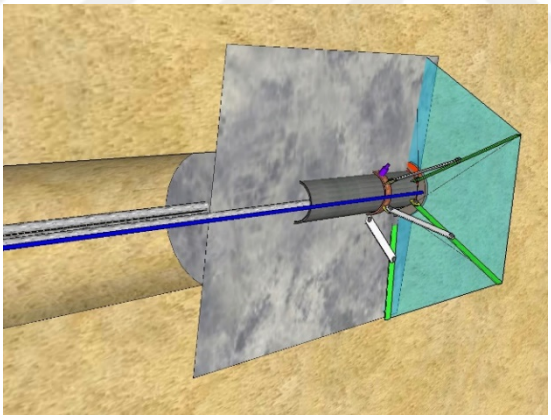
a.

b.

Görsel 14.10. *Zeminin Boşaltılması İşlemi; a. Şematik Gösterim ve b. Arazi Uygulaması*

14.4.6. Enjeksiyon işlemi

Enjeksiyon, ankrajlı destek sistemleri için vazgeçilmez adımlardandır. Kök bölgesinin oluşturulması için kullanılan ve "patlatma" olarak adlandırılan düşük basınçlı enjeksiyon işleminin yapılmaması durumunda, ankrajı sabitleyecek herhangi bir kütle bulunamayacağından ankraj uygulanamamaktadır. Arazi uygulamasında eşit oranda su ve çimento ile enjeksiyon karışımı hazırlanmıştır. Karışım 7,5 kW-1400 devirli mikserde karıştırıldıktan sonra 4,5 kW-1400 devirli dinlendirme ünitesinde beklemeye bırakılmıştır. Ankrajın ön kısmında bulunan zeminin boşaltılmasının ardından ortalama 60 bar basınç ile enjeksiyon şerbeti basılmıştır (Görsel 14.11). Enjeksiyonun kuyudan çıkışı gözlenene kadar derinlik ve ankraj çapına göre uygun pompa sayısı ile enjeksiyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Sistemden her pompajda 1,5 lt şerbet iletildiği göz önünde bulundurulursa kuyular için kullanılan yaklaşık enjeksiyon miktarları Tablo 14.2'de verilmiştir.



a.

b.

Görsel 14.11. *Enjeksiyon İşlemi, a. Şematik Gösterim, b. Enjeksiyon Makinesinde Çimento - Su Karışımının Hazırlanması, c. Enjeksiyon Deliklerinden Püskürtme İşlemi ve d. Enjeksiyon İşlemi Bitmiş Kuyu*

c.

d.

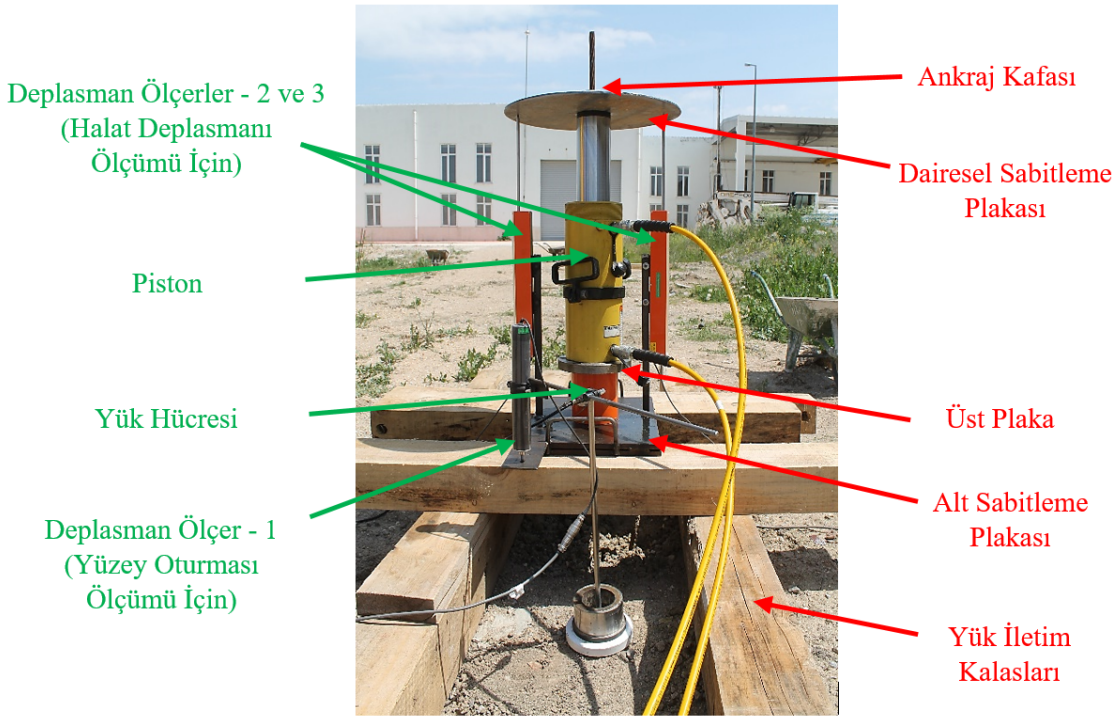
Görsel 14.11. (Devam) *Enjeksiyon İşlemi, a. Şematik Gösterim, b. Enjeksiyon Makinesinde Çimento - Su Karışımının Hazırlanması, c. Enjeksiyon Deliklerinden Püskürtme İşlemi ve d. Enjeksiyon İşlemi Bitmiş Kuyu*

Tablo 14.2. *Kuyulara Basılan Yaklaşık Enjeksiyon Miktarları (litre)*

Derinlik (m)	**Çap (cm)**		
	50	**75**	**100**
2	30,0	37,5	45,0
4	37,5	45,0	52,5
6	60,0	60,0	75,0
8	82,5	90,0	97,5

14.5. Deney Düzeneği

Ankraj kanatlarının öngörülen derinliklerde açılıp enjeksiyon işleminin tamamlanmasının ardından, beton prizini alması için 28 gün beklenmiştir. Sonrasında arazide ankraj çekme deneylerine başlanmıştır. Ankraj çekme sistemi; çift tesirli 30 t Enerpac piston, 100 t kapasiteli TML yük hücresi ve 3 adet yer değiştirme ölçerden (LVDT) oluşmaktadır. Daha yüksek dayanım beklenen ve derin kuyularda uygulanan büyük çaplı ankrajlarda ise 100 ton kapasiteli piston ve 200 ton kapasiteli yük hücresi kullanılmıştır. Sistemde sırası ile yük iletim kalasları, alt sabitleme tablası, yük hücresi, üst plaka, piston, dairesel sabitleme plakası ve ankraj kafası bulunmaktadır (Görsel 14.12). Ankraj halatlarının içi boş pistondan geçirilmesinin ardından, halatlar pistonun üst kısmına yerleştirilen ankraj kafasına kamalar yardımı ile sabitlenmiştir. Teorik hesaba uygun olarak beklenilen çekme yüküne yeterli sayıdaki ankraj halatına uygun biçimde; şemsiye ucunda olduğu gibi tek, çift ve üçlü kafalar kullanılmıştır. +z ekseninde düşey yönde hareket verilerek halatlar çekme kuvvetine maruz bırakılmıştır. 2 adet 300 mm kapasiteli LVDT ile halatlarda meydana gelen yer değiştirme değerleri, 1 adet 100 mm kapasiteli LVDT ile de zemin yüzeyinde meydana gelen oturma değerleri yük verileri ile eş zamanlı toplanmıştır. Arazi deneylerine ait çekme sonu fotoğrafları EK-11'de verilmiştir.



Görsel 14.12. *Arazide Ankraj Çekme Deneyi Düzeneği*

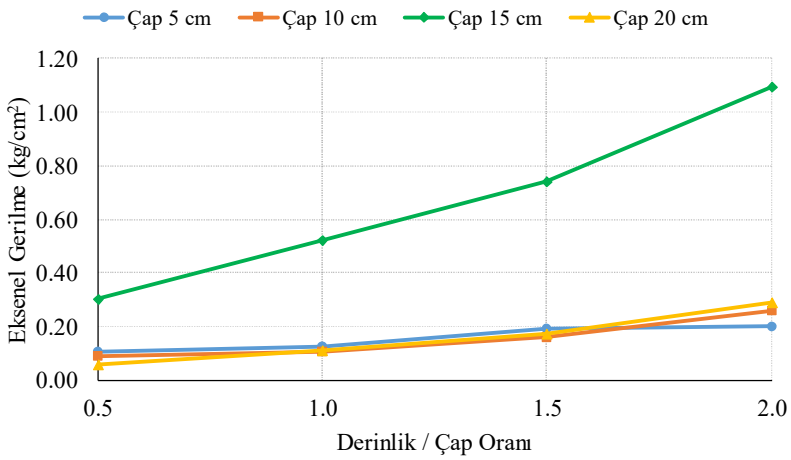
15. DENEY SONUÇLARI

15.1. Laboratuvar Çekme Deneyleri

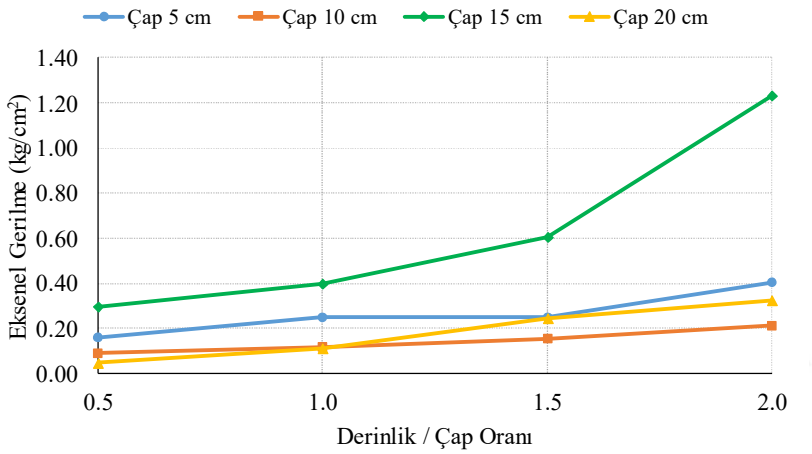
Sıkı kum, gevşek kum ve ince daneli zeminlerde gerçekleştirilen çekme deneyleri sonucunda elde edilen yük - yer değiştirme grafikleri Ek-12'de verilmiştir. Eğrilerin isimlendirilmesinde çap ve derinlik parametrelerinin kısaltması olarak D ve H harfleri kullanılmıştır. Örneğin "D5H2.5Kum" isimlendirmesi 5 cm çapında ankraj ile 2,5 cm derinlikte kum numunede yapılan çekme deneyini belirtmektedir. Tüm durumlarda çap ve derinlik artışı ile çekme kuvveti artmaktadır. Fakat bu artış oranları zemin tipi ve zeminin rölatif sıkılık değerlerine göre farklılık göstermektedir. Ayrıca, numunelerin kuru halde olması özellikle ince daneli zeminlerde kohezyon oluşmasına müsaade etmediği için çekme dayanımları göreceli olarak düşük çıkmaktadır.

Deneylerden elde edilen nihai çekme kuvvetlerinin, dairesel plaka alanlarına bölünmesi ile eksenel gerilme değerleri elde edilmiştir (Şekil 15.1). Her ne kadar tüm zemin tiplerinde en yüksek çekme kuvveti 20 cm çaplı plakada gözlenmiş olsa da değerler gerilme cinsinden incelendiğinde, odaklanılan derinlik / çap oranları kapsamında en yüksek dayanım 15 cm çaplı plakada gözlenmiştir. Dolayısıyla, bu gerilmeye karşı koyan pasif gerilme plaka üzerinde kalan zeminlerin taşıma kapasitesinden kaynaklandığından, taşıma kapasitesini oluşturan maksimum kayma dayanımı da yine 15 cm çaplı plakalarda elde edilmiştir. Diğer taraftan, genel itibariyle derinlik / çap oranının artması ile eksenel gerilme artsa da bazı durumlarda azalma meydana gelmiştir. Bu azalma üst kısımda kalan zeminin yenilmesinden kaynaklanmaktadır.

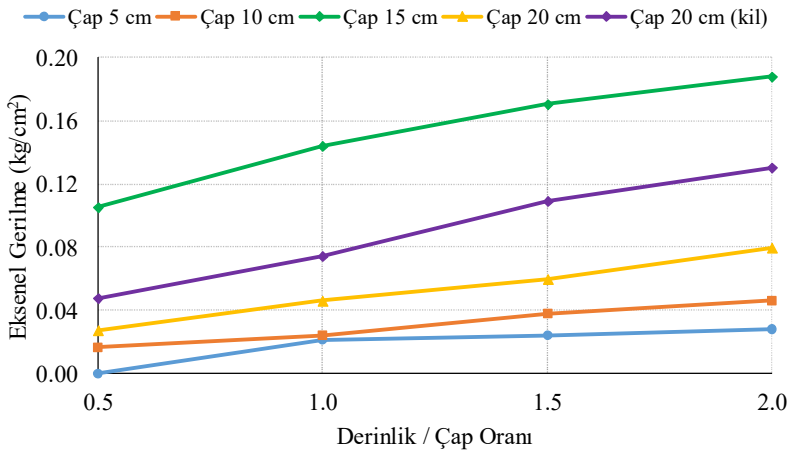
Zemin numunelerinin içsel sürtünme açısı değerleri göz önünde bulundurularak, tez kapsamında şemsiye ankraj için geliştirilen teorik hesaba göre (Denklem 12.5) laboratuvar uygulamasındaki çekme kuvvetleri hesaplanmıştır. Derinlik / çap oranına bağlı olarak teorik (T) ve deneysel (D) çekme kuvveti sonuçları Şekil 15.2 'de karşılaştırmalı grafiklerle verilmiştir. Teorik hesaplarda koninin iç çapı 5 derece gibi küçük bir değer alınarak, formüllerin tutarlılığı değerlendirilmiştir. Teorik ve deneysel veriler arasındaki farklar göz önüne alındığında, derinlik / çap oranının artması ile çekme kuvveti doğrultusunda zeminde oluşan kayma kaması çapının yani ankraj plakası ile konik kayma yüzeyi arasındaki açının kritik oranı kadar arttığı sonrasında ise azaldığı görülmüştür. Bu kritik oran, içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri ile zemin sıkılığına göre değişiklik göstermektedir. Çekme kuvvetinin ulaşabileceği en yüksek dayanım, zeminin taşıma kapasitesi ile sınırlanmaktadır.



a.

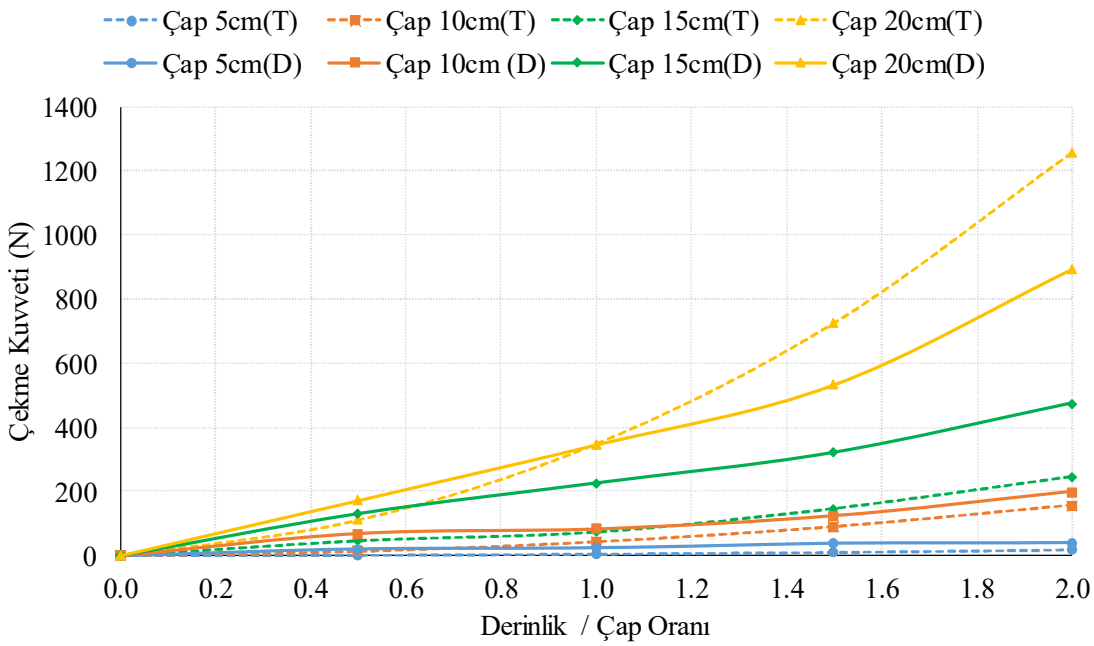


b.

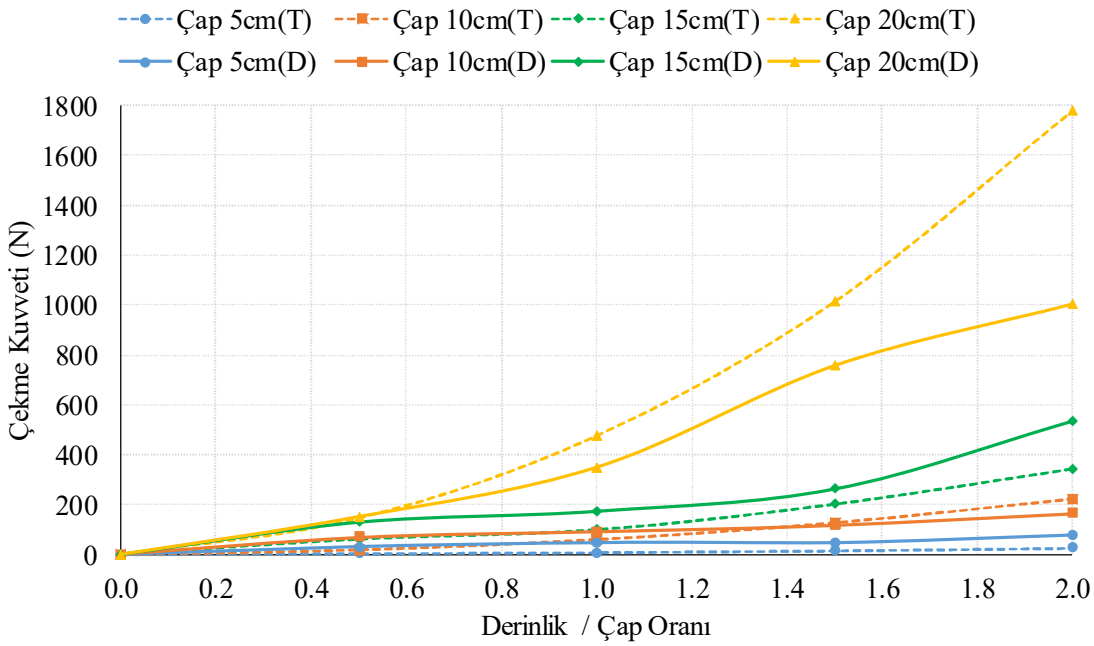


c.

Şekil 15.1. *Laboratuvar Çekme Deneylerinden Elde Edilen Derinlik / Çap Oranına Bağlı Eksenel Gerilme Değerleri; a. Gevşek Kum, b. Sıkı Kum ve c. Silt ile Kil*

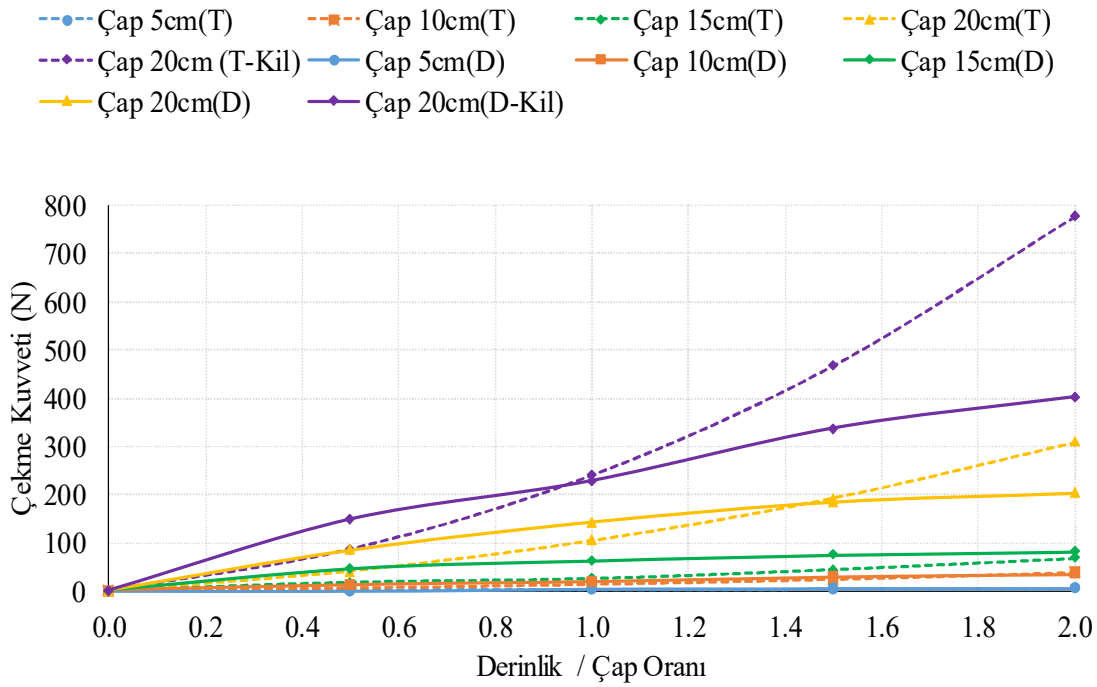


a.



b.

Şekil 15.2. *Karşılaştırmalı Teorik (T) ve Deneysel (D) Çekme Kuvveti Değerleri; a. Gevşek Kum, b. Sıkı Kum ve c. Silt ile Kil*



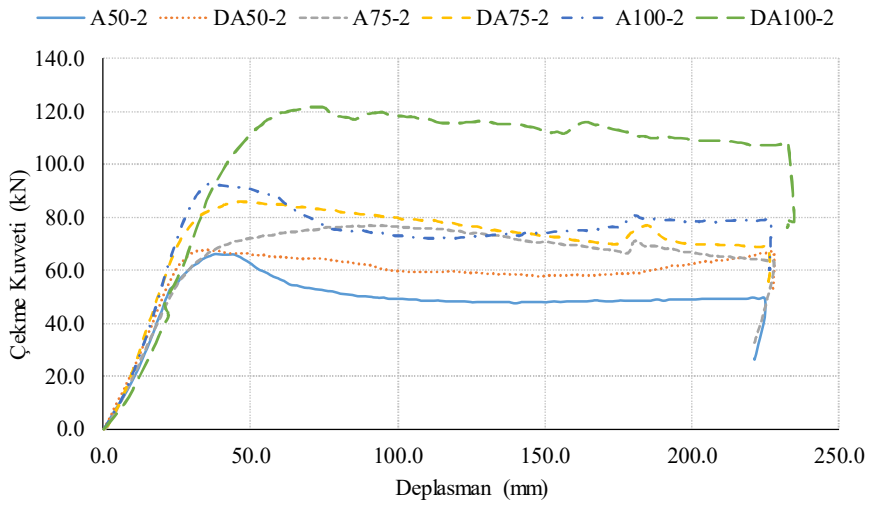
c.

Şekil 15.2. (Devam) *Karşılaştırmalı Teorik (T) ve Deneysel (D) Çekme Kuvveti Değerleri; a. Gevşek Kum, b. Sıkı Kum ve c. Silt ile Kil*

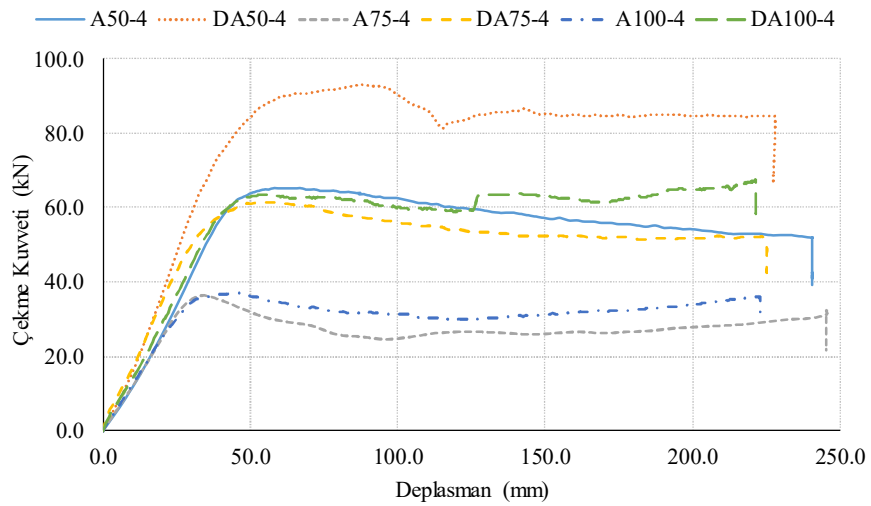
15.2. Arazi Çekme Deneyleri

Arazi uygulamasında toplamda 24 adet gerçekleştirilen çekme deneylerine ait yük - yer değiştirme sonuçları Şekil 15.3'te verilmiştir. Her bir grafikte sondaj kuyuları olarak verilen 6 bileşen sırasıyla, 50 cm çapında düz ve destekli, 75 cm çapında düz ve destekli, 100 cm çapında düz ve destekli şemsiye ankraj sonuçlarını belirtmektedir. Genel olarak destekli şemsiye ankrajlarda düz şemsiye ankrajlara oranla daha yüksek çekme dayanımları elde edilmiştir. Bu farkın destekler yardımıyla kesici kanatların daha rahat açılması veya yine destekler sebebi ile enjeksiyonlu bölgede kalan donatı yoğunluğunun daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Destekli şemsiye ankrajdaki bir diğer avantaj ise çekme sırasında kesici kanatlara gelen yüklerin bir kısmının bu destekler tarafından karşılanmasıdır. Şemsiye ankrajlarda çekme kuvvetlerinin nihai değere ulaşmasının ardından ani bir düşüşle karşılaşılmamıştır. Bu durum şemsiye ankrajın tasarlanan çalışma prensibine uygun davranış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Aksi takdirde kompozit bölgenin çevre zemininden tamamen sıyrılması sonucunda yük değerlerinde ani ve ciddi oranlarda azalma meydana gelmesi kaçınılmaz bir sonuç olarak

karşımıza çıkmaktadır. Diğer taraftan ankrajın üst kısmında kalan zeminin çekme işlemi sonucunda sıkışmasına bağlı olarak da kısmi bir dayanım artışı olduğu belirtilebilir. Nihai yükte gözlenen yer değiştirme değerleri ise ankraj tipi, derinlik ve çap parametrelerine göre farklılık göstermekle birlikte genel itibariyle 100 mm'nin altında kalmıştır. Şekil 15.3d'de verilen 8 m derinlikte 75 cm çaplı düz ankraja ait çekme kuvveti incelendiğinde iki 50 mm ve 100 mm yer değiştirme seviyelerinde iki kez ani azalma ile karşılaşılmaktadır. Yükteki bu keskin azalmalar kesici kanatların koptuğu veya burkulma maruz kaldığını göstermektedir.

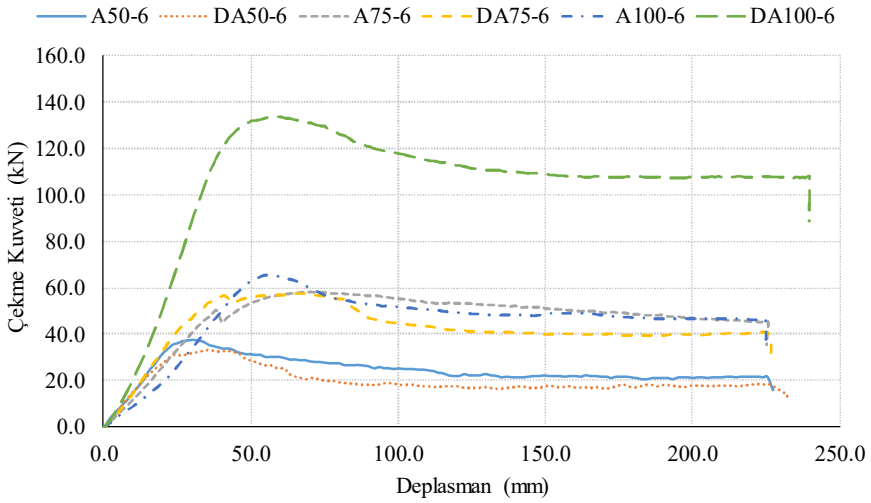


a.

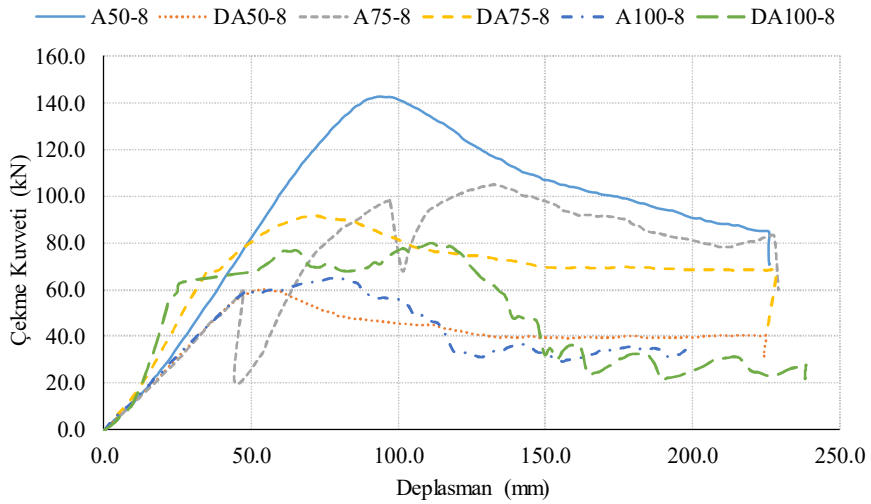


b.

Şekil 15.3. *Arazi Deneylerinden Elde Edilen Düz Şemsiye Ankrajlar (A) ve Destekli Şemsiye Ankrajlara (DA) Yük - Yer Değiştirme Grafikleri; a. 2 m Derinlik, b. 4 m Derinlik, c. 6 m Derinlik ve d. 8 m Derinlik*



c

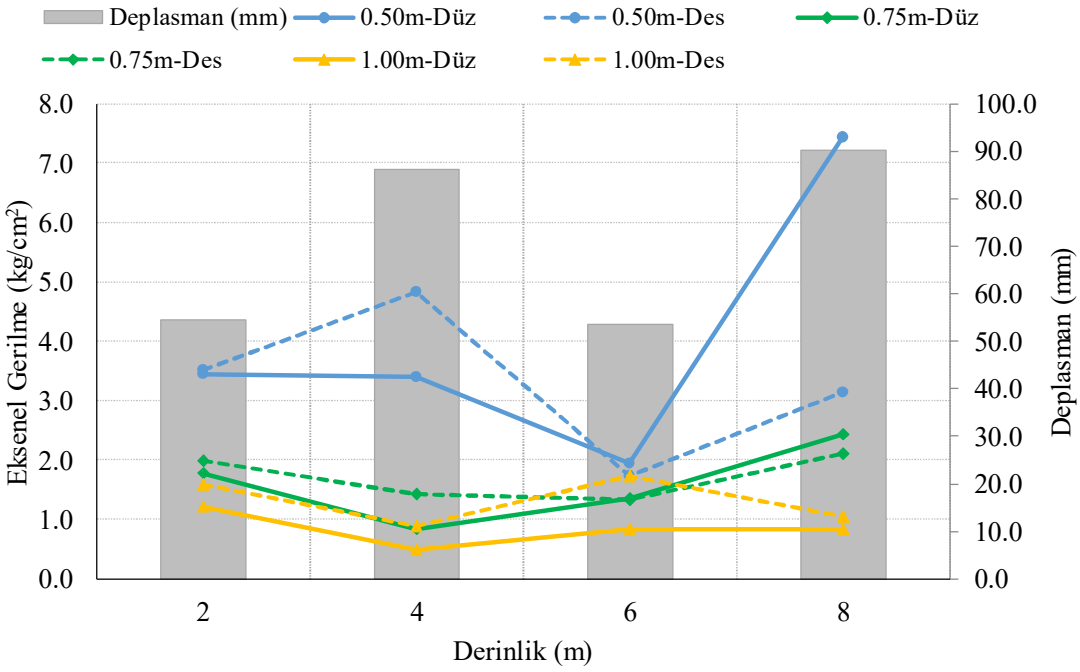


d.

Şekil 15.3. (Devam) *Arazi Deneylerinden Elde Edilen Düz Şemsiye Ankrajlar (A) ve Destekli Şemsiye Ankrajlara (DA)Yük - Yer Değiştirme Grafikleri; a. 2 m Derinlik, b. 4 m Derinlik, c. 6 m Derinlik ve d. 8 m Derinlik*

Arazi deneylerinde elde edilen çekme kuvvetlerinin uç kısımda oluşturulan ankraj alanına bölünmesi ile eksenel gerilme değerleri elde edilmiştir (Şekil 15.4). Bu değerler beton ve çelik elemandan üretilmiş olan kompozit kesitin yapısal tasarımında ve çelik kalınlıkları ile bağlantı detaylarının hesabında kullanılabilecektir. Ankrajın uygulandığı killi zemin yapısı dikkate alındığında, sondaj logundaki en düşük taşıma kapasitesine sahip 6 m derinlikte uygulanan 50 cm ve 75 cm çaplı ankrajların gerilme değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Ayrıca Şekil 15.4'te derinliğe bağlı ortalama yer değiştirme

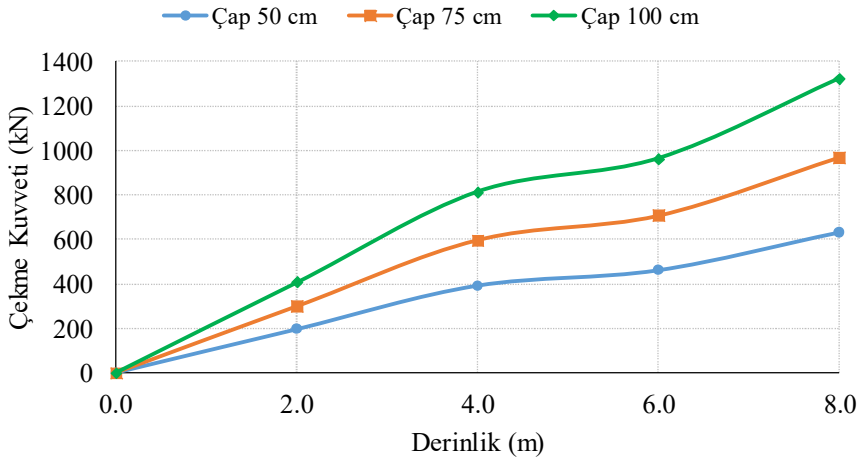
değerleri de sunulmuştur. 2 m ve 4 m derinlikte nihai dayanıma karşılık gözlenen yer değiştirme değerleri 50 mm civarında olmakla birlikte 4 m ve 6 m derinlikteki uygulamalarda 90 mm seviyelerine yükselmiştir. Arazi uygulamasındaki çekme kuvveti, eksenel gerilme ve yer değiştirme değerleri; kesit ve birleşim detayları yeterli dayanıma sahip olarak tasarlanmış şemsiye ankrajlarda zemin taşıma kapasitesinin ankraj çekme kapasitesini belirleyen birincil unsur olduğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 15.4. *Arazi Deneylerinde Şemsiye Ankraj Uç Bölgesine Etkiyen Gerilme Değerleri ve Derinliğe Bağlı Yer Değiştirmeler*

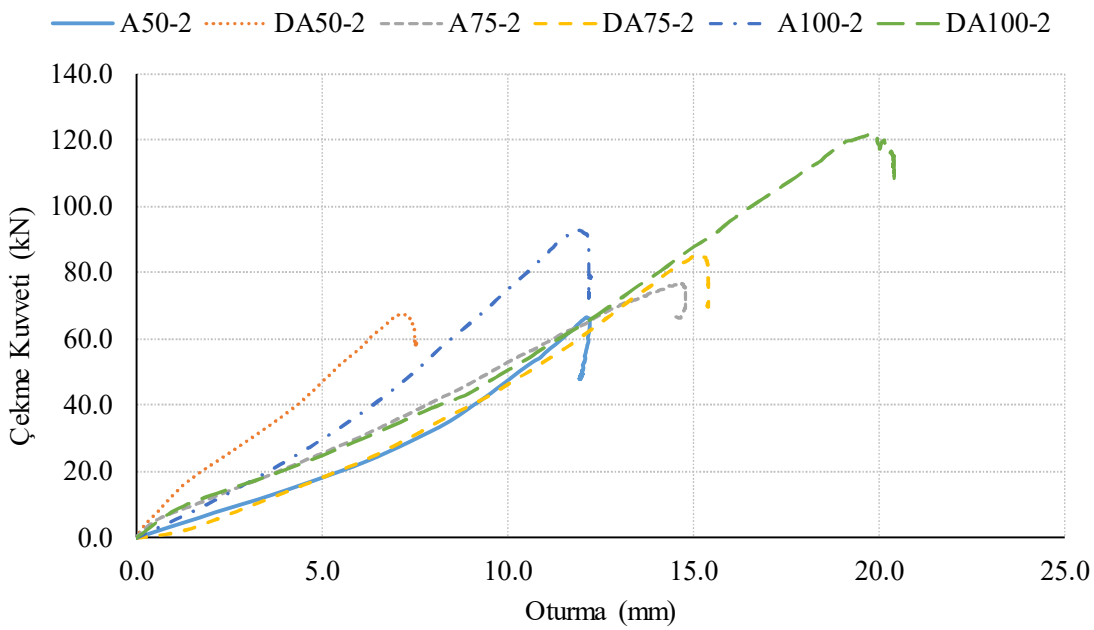
Deneylerin uygulandığı zemine ait parametreler göz önünde bulundurularak, tez kapsamında şemsiye ankraj için geliştirilen teorik hesaba göre (Denklem 12.6) arazi uygulamasındaki çekme kuvvetleri ankraj çapı ve derinliğe bağlı olarak hesaplanmıştır (Şekil 15.5). Teorik hesaplarda koninin iç çapı alt limit olan 0 derece kabul edilerek, formüllerin tutarlılığı değerlendirilmiştir. Normalde yanal kazı destek unsuru olarak tasarlanan ve teorik yaklaşımı yatay doğrulta gerçekleştirilen şemsiye ankraj elemanın düşeyde uygulanması ile öngörülen kayma konisinin hacmi, derinliğe bağlı olarak yüksek mertebelere ulaşmıştır. Dolayısıyla düşey uygulamada zemin kütlesinin tamamı teorik olarak ankraj doğrultusuna ters yönde çalışmaktadır. Bu yüzden teorik hesapta çekme kuvveti değerleri olması gerekenden daha yüksek çıkmaktadır. Fakat gerek laboratuvar deneyleri gerekse arazi deneylerinde görüldüğü gibi nihai çekme kuvvetini belirleyen

birincil parametre zemin taşıma kapasitesi olmuştur. Yanal kazı destekleme sürecinde şemsiye ankrajın yatay veya yatay yakın açılı biçimde uygulanması ile zemin ağırlığının sadece ankraj çekme doğrultusundaki kısmının pasif kuvvet olarak karşı koyacağı düşünüldüğünde, kazı destek uygulamasında bu sorunla karşılaşılmayacaktır. Diğer taraftan denklemdeki sürtünmeye bağlı bölüm zemin parametrelerinden kaynaklandığı için düşey veya yatayda uygulanması hesaplamalarda ciddi bir değişikliğe neden olmamaktadır.

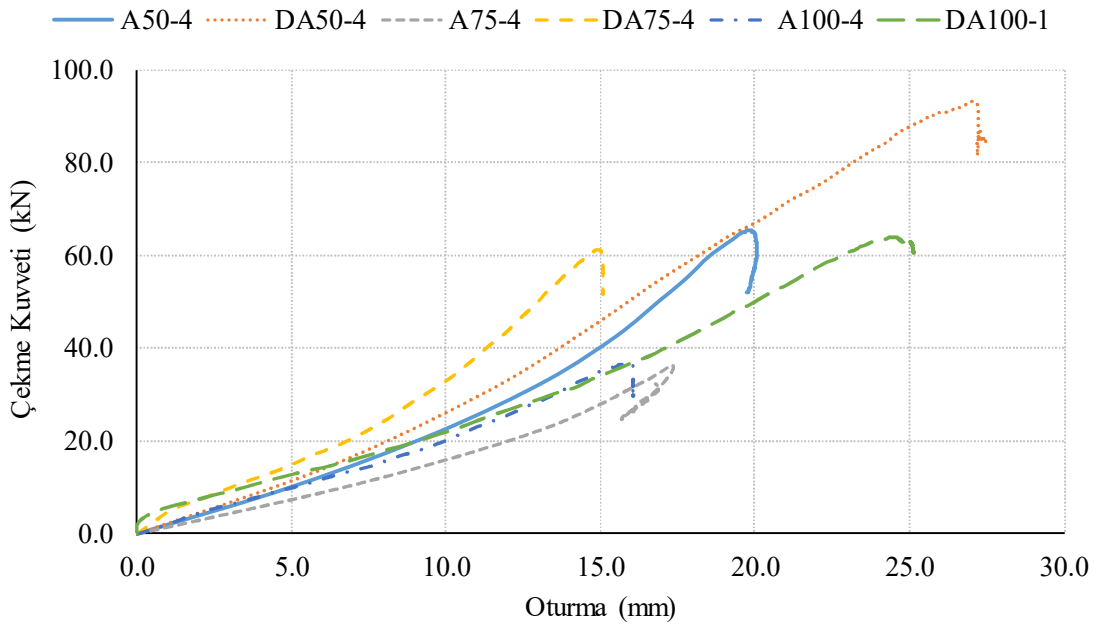


Şekil 15.5. *Arazi Deneyleri İçin Yapılan Teorik Hesap Göre Derinliğe Bağlı Çekme Kuvveti Değerleri*

Arazideki çekme deneylerinden elde edilen bir diğer parametre ise yük değişimine bağlı yüzey oturması değeridir. Ankraj çekme deney düzeneğinin sabitlendiği alt plakanın oturma değerleri Şekil 15.6'da verilmiştir. Buradan elde edilen değerler plaka yükleme deneyinde olduğu gibi üst zemin tabakasının taşıma kapasitesinin belirlenmesinde de kullanılabilecektir.

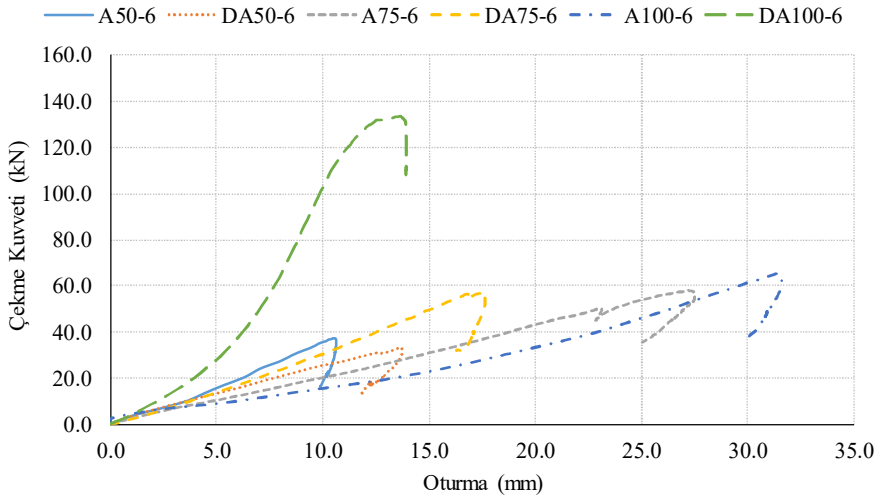


a.

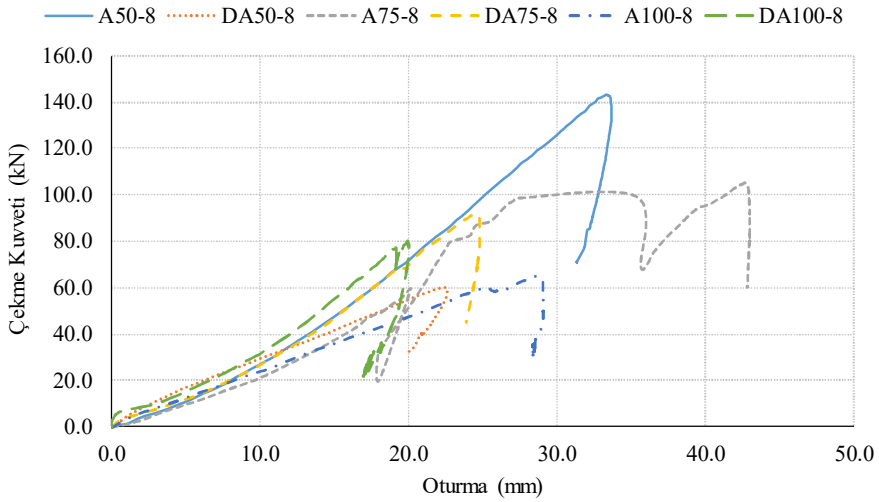


b.

Şekil 15.6. *Arazi Deneylerinden Elde Edilen Yük – Yüzey Oturması Grafikleri; a. 2 m Derinlik, b. 4 m Derinlik, c. 6 m Derinlik ve d. 8 m Derinlik*



c.



d.

Şekil 15.6. (Devam) *Arazi Deneylerinden Elde Edilen Yük – Yüzey Oturması Grafikleri; a. 2 m Derinlik, b. 4 m Derinlik, c. 6 m Derinlik ve d. 8 m Derinlik*

15.3. Göçme Modları

Bağlantı hataları, malzeme kusurları, işçilik hataları, simetrinin bozulması, yerleştirme esnasında veya enjeksiyon işleminde meydana gelen sorunlar bazı göçme durumlarını tetikleyebilir. Tasarımdaki esas beklenti beton - çelik kompozit elemanı biçiminde teşkil edilen kök bölgesinin zeminde toptan göçme oluşturarak (12 numaralı göçme durumu) en yüksek çekme dayanımı değerine çıkılmasıdır. Fakat aşağıda verilen diğer 11 farklı göçme durumunun meydana gelmesi halinde dayanım, sistemdeki bir parça veya malzeme dayanımı ile sınırlanmaktadır. Öngörülen bu göçme kriterlerine göre

yeterli dayanımda tasarım yapılmadan önce şemsiye ankrajın uygulanacağı zeminin taşıma kapasitesi üst limit olarak alınmalıdır. Aksi takdirde tasarımın zemin taşıma kapasitesini aşması durumunda, aşırı tasarım olarak nitelenen gereksiz oranda büyük kesitler kullanılmış olacaktır. Bu durum; işçilik, maliyet ve uygulama süresinden ciddi kayılar yaşanmasına neden olacaktır.

1. Kanat bağlantı cıvatalarının kesme dayanımının yetersiz olması durumu: Ankrajın gerilmesi sırasında kanatların gerek ankraj uç plakasına gerekse destekler ile açma - kapama yüzüğüne bağlantısını sağlayan cıvata veya millerin çapının gereken dayanımı sağlayamaması durumunda, bu elemanlardan kaynaklanan göçme durumu görülebilir. Bu sorunun çözümü için kesitler uygun hale getirilebilir.
2. Destek bağlantılarının dayanımının yetersiz olması durumu: Destekli ankrajlarda destek bağlantılarının yapımı sırasında yeterli kalınlıkta pul kullanılarak boşluk verilmesi ve bağlantıların simetrik yapılması gerekmektedir. Aksi halde kanat ve gövde arasında sıkışan destek elemanı bireysel dayanımını yitirerek, tüm sistem içinde stabilitenin bozulmasına yol açmaktadır.
3. Desteklerin basma veya çekme dayanımının yetersiz olması durumu: Hem kanatların açılması hem de germe işleminin uygulaması sürecinde ön plana çıkmaktadır. Yeterli kalınlıkta lama profil kullanımı ile bu sorun çözülebilir.
4. Kanat kulakları ile gövde arasındaki kaynak dayanımının yetersiz olması durumu: Ankraj iskeletini oluşturan metal parçalardan, özellikle kanat kulaklarını gövdeye sabitleyen kaynak dayanımının yetersiz oluşu, kulakların koparak ayrılmasına ve dolayısıyla kanatların boşa çıkması ile göçmeye neden olabilir. Bu sorunun çözümü için alın kaynağı yerine küt kaynağı yapılabilir.
5. Kanatların eğilmeye karşı dayanımının yetersiz olması durumu: Kuyu içerisinde kanatların açılması veya germe işlemi sırasında kanatlarda oluşan eğilme momentinin karşılanamaması durumunda, gerilmelerin yoğunlaştığı kısımlardan kanatlar eğilmekte veya kopmaktadır. Bu sorunun çözümü için kanatlarda daha kalın lama profil veya atalet momenti daha yüksek olan "T" profil kullanılabilir.
6. Kılavuz borunun burkulma ve ezilmeye karşı dayanımının yetersiz olması durumu: Açma - kapama plakası veya yüzüğüne temas ederek kanatları açan kılavuz boru narin yapısından dolayı uygun kalınlık ve yerel güçlendirmelerle tasarlanmazsa burkulmaya maruz kalmaktadır. Kılavuz boruda burkulma meydana geldiğinde hem ankraj kuyu merkezinden sapmaktadır ve hem de

kanatların istenilen biçimde açılması engellenmiş olur. Bu sorunun çözümü için açma plakasına temas ettiği uç bölgesine rijit metal plaka kaynaklanarak ezilmeye karşı direnci arttırılmıştır. Diğer taraftan tek boy malzemeden üretmek yerine, 1,5 - 2,0 m boyunda parçalar halinde üretilmiş ve bu parçaların iki ucuna da yine rijit metal plakalar sabitlenmiştir. Bu plakalar hem yerel dayanımı arttırmakta hem de parçaların daha rahat birleştirilmesini sağlamaktadır.

7. Açma - kapama yüzüğü veya plakası dayanımının yetersiz olması durumu: Kanatların açılması sürecinde çekme kuvvetinin tamamını kanatlara ileten ara parça konumundaki bu elemanların zarar görmesi kanatların açılmasını imkansız hale getirmektedir. Hatta zarar görmesi bir tarafa, merkez eksenden kayması durumunda bile genel sistemin çalışmasını engelleyebilmektedir.
8. Halat çekme dayanımının aşılması durumu: Halihazırda ankraj tasarımlarındaki proje yük değerleri çelik ankraj halatlarının dayanım değerine oranla daha yüksek tutulduğundan pek karşılaşılmayan bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Fakat malzeme kusurları ve uygulama hataları dolayısıyla her zaman meydana gelme ihtimali bulunmaktadır.
9. Halatın ankraj kafasından sıyrılma durumu: Şemsiye ankrajın uç kısmında ankraj gövdesine kaynaklanan ankraj kafası içerisinden halatlar geçirilerek kama ile sabitlenmektedir. Halatların kama dışında kaynak veya diğer mekanik bağlantılar ile sabitlenmesi durumunda halat ankraj kafasından sıyrılabilmektedir.
10. Çelik iskeletin betondan sıyrılma durumu: Zemin koşulları, tabakalaşma durumu, yeraltı suyunun içeriği, özellikleri ve akış hızı gibi sebeplerle kalitesiz enjeksiyon yapılması durumunda, çekme yükünü direkt karşılayan kanatlar ve gövdeden oluşan çelik iskeletin bu yetersiz beton bloktan ayrılması ile meydana gelmektedir. Çözüm için basınçlı enjeksiyon yapılması önerilmektedir.
11. Gergi elemanının dayanımının yetersiz olması durumu: Zayıf gergi elemanı kullanılması durumunda henüz kanatlar açılmadan veya kanatlar açıldıktan sonra ankrajın ön kısmında bulunan zeminin boşaltma işlemi esnasında gergi yırtılmaktadır. Bundan sonraki süreçte kanatların tamamen açılamaması ve dolayısıyla yeterli enjeksiyon yapılamamasına bağlı olarak, ankraj dayanımı ciddi oranda düşmektedir.
12. Toptan göçme durumu: Şemsiye ankraj çekme kapasitesi bakımından en yüksek limit değerin sağlandığı bu durum, zemin içerisinde oluşan kayma kamasının

mümkün olan en geniş açı ile oluşması sonucunda meydana gelmektedir. Bu oranda geniş kapasiteli bir kama oluşmasına izin vermeyen yumuşak killerde ve gevşek kumlarda yerel göçme oluşmakta ve dayanım düşmektedir. Taşıma kapasitesi daha yüksek olan zeminlerde veya kaya - kayaçlara sabitlenen ankrajlarda göreceli dayanım ciddi oranda yükselecektir.

Deneme uygulamalarında kuyudan tamamen çıkarılan ankrajlarda aşağıda verilen göçme durumları gözlenmiştir.

- Destekli şemsiye ankrajda branda elemanı kullanıldığında yaklaşık 3,5 ton civarında, açma kapama sürecinde kanatlarda meydana gelen içsel gerilmeler sebebi ile bazı kanatların açılmadığı bazılarının ise burkulduğu ve branda malzemesinin yırtıldığı görülmüştür (Görsel 15.1). Bu yüzden esas numunelerde bağlantı detayları gevşetilmiş ve kanatların simetrik olmasına özen gösterilmiştir. Dolayısıyla sistemin rahat açılması sağlanmıştır.

Görsel 15.1. *Kanatların Burkulması ve Gergi Elemanın Yırtılması Durumu*

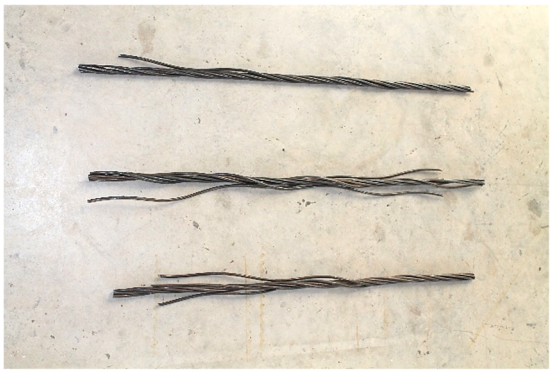
- Düz şemsiye ankrajda karbon lifli polimer donatı (CFRP) elemanı kullanıldığında ise yaklaşık 4 ton civarında kanatların terse dönerek, çeliğin yenilerek koptuğu görülmüştür (Görsel 15.2). Sorunun çözümü için daha sağlam bir branda elemanı kaplanarak, kanatların birlikte hareket etmesi sağlanmıştır.

Görsel 15.2. *Kanatların Kopması Durumu*

- Düz şemsiye ankrajda zincir kullanımında yaklaşık 9 ton civarında, halatın ankraj kafasına kaynaklanan bölümden sıyrıldığı görülmüştür (Görsel 15.3). Sorunun çözümü için şemsiye detayının uç kısmında ankraj kaması kullanımı gerekliliği doğmuştur.

Görsel 15.3. *Ankraj Halatının Sıyrılması Durumu*

- Harici çekme deneylerinde ise üretici firmanın da belirttiği üzere yaklaşık 25 ton değerinde ankraj halatının koptuğu görülmüştür (Görsel 15.4).
- Denemelerde ankraj detaylarının bazı bölümleri yeteri dayanımı sağlayamadığı için komple sıyrılmalar meydana gelmiş ve göreceli olarak düşük dayanım değerleri elde edilmiştir. Esas numunelerde bu sorunlar çözülmüştür.
- Esas numunelerle gerçekleştirilen arazi deneyleri sonucunda ise ankraj çekme kuvvetinin üst limitinin zemin taşıma kapasitesi ile sınırlandırıldığı gözlenmiştir.



Görsel 15.4. *Ankraj Halatının Kopması Durumu*

16. PATENT BAŞVURUSU - 2: "ŞEMSİYE ANKRAJ"

1407F353 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi ile desteklenen bu tezin ikinci bölümü kapsamında tasarlanan ve "Şemsiye Ankraj" olarak adlandırılan buluş için 2016 yılı içerisinde Anadolu Üniversitesi adına patent başvurusunda bulunulmuştur (Tuncan vd., 2016, Türkiye Patent Enstitüsü, Referans No: 15602/22). Bu bölümde buluş ile ilgili kısa bir açıklama yapılmıştır.

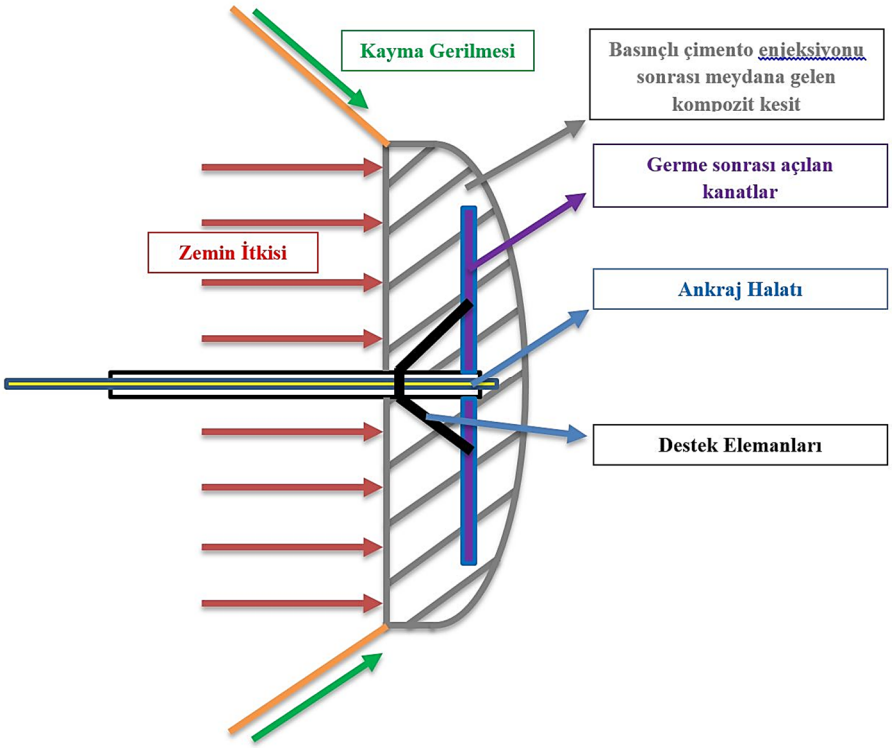
Buluşun ilgili olduğu teknik alan: Buluş, inşaat mühendisliği alanında özellikle kazı destekleme ve şev stabilitesi uygulamalarında kullanılan ankraj sistemi ile ilgilidir.

Tekniğin bilinen durumu: Mevcut ankraj uygulama tekniğinde, arazide projeye uygun delgi yapıldıktan sonra, yeterli sayıda çelik halat kuyuya yerleştirilir. Kuyunun son kısmında patlatma adı verilen çimento ve su enjeksiyonu yapılarak, kök bölgesi oluşturulur. Kök bölgesinin donatıdan yoksun olması ve çapının düşük olmasından dolayı yeterli sürtünme kuvveti, kök bölgesinin uzunluğu arttırılarak sağlanmaya çalışılır. Bunun sonucu olarak da mevcut zemin şartlarının zamana bağlı değişimi sonucunda (yeraltı su seviyesinin yükselmesi gibi) ankraj sıyrılma problemi ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden istinat yapısı göçmeleri, maden ve tünel yapılarında göçmeler sonucu ciddi sorunlar olmakta ve can kayıpları meydana gelmektedir.

Buluşun amacı: Önerilen buluş, İnşaat Mühendisliği alanında halihazırda şev stabilitesi ve iksa tasarımında kullanılan zemin destekleme metotlarına alternatif oluşturmaktadır. Buluşun amacı, ankraj tasarımında ve uygulanmasında yapılan değişikliklerle, ankraj dayanımını arttırarak ankrajın betondan sıyrılmasını engellemek, olası çökmeleri ve can kayıplarının önüne geçmektir. Buluşun bir diğer amacı standart elemanlarda delgi, geçirimsizliğin sağlanması, patlatma ile kök bölgesi oluşturulması, ankrajların yerleştirilmesi, germe aşamaları yerine delgi, elemanın yerleştirilmesi, kesici kanatların açılması ve enjeksiyon aşamaları izlenerek işçilik ve zaman bakımından yüksek oranda fayda sağlamaktır. Buluşun bir diğer amacı ankraj boyunda ve sayısında azalma sağlayarak ankraj içeren iksa sistemlerinde önemli ölçüde maddi tasarruf sağlamaktır. Buluşun bir diğer amacı, beklenmedik göçmelere sebep olan sıyrılma hesabı yerine, bilindik mukavemet hesaplarının kullanılmasını sağlayarak daha güvenli istinat yapıları elde etmektir.

Önerilen şemsiye ankraj buluşu, süregelen ankraj uygulamalarındaki "sürtünme ile" çalışma prensibini tamamen değiştirerek zeminde meydana gelen çekme gerilmesi ile kayma kamasını oluşturmasını müteakip genel göçme prensibine göre çalışmaktadır.

Kolaylıkla “dead man” olarak adlandırılan sabitleme elemanını oluşturmaktadır. Klasik yöntem bu çalışma prensibini oluşturacak çapa erişememektir. Şemsiye ankraj uygulanması ile kompozit kesitin zemin itkisine karşı oluşturacağı dayanım, hem genel göçme prensibi hem de sürtünme davranışından kaynaklı çalışma prensibi Şekil 16.1’de basitçe belirtilmiştir.



Şekil 16.1. *Buluş Konusu Sistemin Çalışma Mekanizması*

16.1. Detaylar

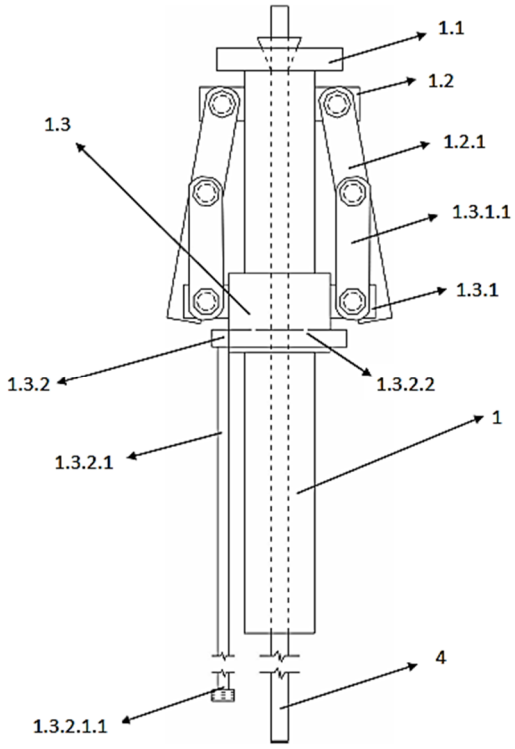
Söz konusu şemsiye ankraj; ankraj gövdesi (1), kesici kanatlar (1.2.1), destek elemanları (1.3.1.1), açma-kapama halkası (1.3), gergi elemanı ve enjeksiyon sisteminden (1.3.2) meydana gelmektedir. Şekil 16.2 ve Şekil 16.3’teki çizimlerde sırasıyla kapalı ve açık konumları verilen buluş konusu sisteme ait referans numaralarının tanımları ve detayları aşağıda sıralanmıştır.

- **Ankraj Gövdesi (1):** Ankraj gövdesi, çelik malzemeden mamul, silindirik yapıdadır. Ankraj gövdesi, diğer şemsiye ankraj elemanları için destek görevi görür. Üst kısmında, ortasından ankraj halatı (4) geçebilecek boşluğa sahip, gövdenin ucundan, dışarıya beton akışını engelleyen sabit ankraj başlığı (1.1) bulunur. Ankraj başlığının altında, en az iki adet, ankraj gövdesine dik olarak

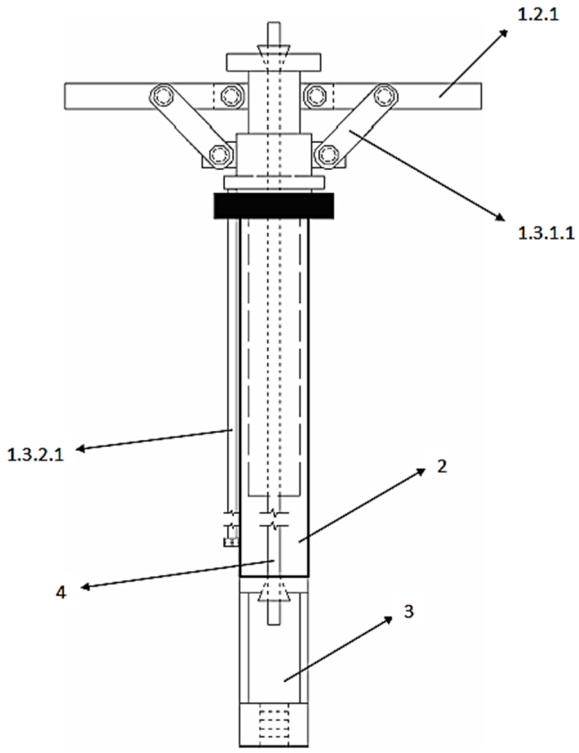
konumlanmış, kesici kanatların (1.2.1) bağlantısının yapılacağı ve üzerinde pim boşlukları bulunan üst bağlantı kulakları (1.2) yer almaktadır. Üst bağlantı kulakları, ankraj gövdesine dik olarak konumlanmış, destek elemanlarının (1.3.1.1) bağlantısının yapılacağı çıkıntılardır.

- **Açma - Kapama Halkası (1.3):** Ankraj gövdesinin orta bölümünde, ankraj gövdesini saran, halka şeklinde rijit çelik eleman olan açma-kapama halkası konumlandırılmıştır. Açma-kapama halkası üzerinde, en az iki adet alt bağlantı kulakları (1.3.1) ile enjeksiyon yüzüğü (1.3.2) bulunmaktadır. Açma-kapama halkası, ankraj gövdesi boyunca ankraj başlığına kadar hareket ederek, destek elemanlarının hareket etmesini sağlayan ve kesici kanatları açan rijit çelik elemandır. Açma-kapama halkası üzerinde en az iki adet, açma-kapama halkasına dik olarak konumlanmış, üzerinde bulunan yuvarlak pim boşluklarına destek elemanlarının montajlanacağı alt bağlantı kulakları bulunur. Alt bağlantı kulakları, açma-kapama halkasına dik olarak konumlanmış, destek elemanlarının bağlantısının yapılacağı çıkıntılardır.
- **Kesici Kanatlar (1.2.1):** Ankraj gövdesinin üst kısmında, en az iki adet üst bağlantı kulakları ile ankraj gövdesine sabitlenmiş kesici kanatlar bulunur. Kesici kanatlar, destek elemanlarından daha uzun dikdörtgen şeklinde ve zemin tipine göre istenilen boyutlarda olup uzatılmaya müsait şekilde tasarlanmış çelik malzemeden mamul parçalardır. Kesici kanatların üzerinde herhangi bir yerde, kesici elemanların destek elemanlarına montajının yapılacağı pim boşlukları ve pimler bulunur. Kesici kanatların, şemsiye ankrajın kapalı konumundan açık konumuna getirilmesi veya tam tersi durumunda, üst bağlantı kulakları ile sürtünmesini en aza indirmek amacıyla üst bağlantı kulakları ile montajlanan uçları keskin olmayan bir yapıya sahiptir. Diğer ucu ise zemine kolay itilebilmesi için pah kırılmıştır. Kesici kanatlar, şemsiye ankraj kapalı konumdayken, yer düzlemi ile dar açı yapacak şekilde konumlandırılmıştır. Kesici kanatlar, ankraj gövdesi ile dik bir açı yaparak açık konuma gelebilir. Açma-kapama halkasının, ankraj başlığına doğru ittirilmesi ile destek elemanlarının da aynı yönde hareket etmesi sağlanır. Bu şekilde destek elemanlarına bağlı olan kesici kanatlar gövdeye dik olacak şekilde açılır.

- **Destek Elemanları (1.3.1.1):** Kesici kanatların üzerinde alt bağlantı kulakları ile açma-kapama halkasına sabitlenmiş kesici kanat sayısı kadar destek elemanı bulunur.
- **Enjeksiyon Sistemi (1.3.2):** Açma-kapama halkasının üzerinde, alt kısımda konumlandırılmış, kuyuya çimento su enjeksiyonu gerçekleştirilerek kesici kanatlar ile çimento şerbeti arasında kompozit yapı oluşmasını sağlayan enjeksiyon sistemi bulunur. Enjeksiyon sistemi; açma-kapama halkasından daha büyük çapta, yuvarlak, halka şeklinde tasarlanmıştır. Açma-kapama halkası üzerine sabitlenmiş enjeksiyon yüzüğü (1.3.2) ve enjeksiyon yüzüğü üzerinde herhangi bir yerde konumlandırılmış, enjeksiyon yüzüğünden başlayıp kuyu çıkışına kadar uzanan, içi boş ve ucunda enjeksiyon rekoru (1.3.2.1.1) bulunan sabit enjeksiyon borusundan (1.3.2.1) oluşur. Enjeksiyon borusu üzerinde konumlandırılmış, basınçlı çimento su karışımı püskürterek, hem çekme hem de basma dayanımına sahip kompozit eleman oluşumunu sağlayan, yuvarlak püskürtme delikleri (nozül) (1.3.2.2) bulunur.
- **Gergi Elemanı:** Kesici kanatların üzerinde, kesici kanatların birbirleri ile bağlantısını sağlayan kumaştan mamul ve kanatların üstünü şemsiye brandası gibi kapatacak şekilde konumlandırılmış gergi elemanı bulunur. Gergi elemanı, kesici kanatların açılması sürecinde bütün kesici kanatların birlikte hareket etmelerini sağlamakla beraber kesici kanatlara gelen yükü daha geniş alana dağıtır, aralarda kalan zeminin boşaltılmasını sağlayarak enjeksiyona olanak tanır ve sistemin verimli çalışmasını sağlar.



Şekil 16.2. *Şemsiye Ankraj Kapalı Konum Detayı*
Kaynak: *Tuncan vd., 2016, Türkiye Patent Enstitüsü, Referans No: 15602/22, Şekil 1*



Şekil 16.3. *Şemsiye Ankraj Açık Konum Detayı*
Kaynak: *Tuncan vd., 2016, Türkiye Patent Enstitüsü, Referans No: 15602/22, Şekil 2*

16.2. Uygulama Aşamaları

Şemsiye ankrajın uygulamasında, öncelikle auger ile ankraj uygulanacak derinliğe kadar delik açılır. Delik açma işleminin ardından şemsiye ankraj, kılavuz boru (2) yardımı ile istenilen derinliğe kadar kesici kanatlar (1.2.1) kapalı bir şekilde sürülür ve yerleştirilir. Şemsiye ankraj, deliğe yerleştikten sonra kılavuz boru, açma-kapama halkasına (1.3) sabitlenir ve şemsiye ankrajın ucuna halat kilitleme aparatı (3) yerleştirilir. Kılavuz boru; şemsiye ankrajın ilk açılması esnasında ankraj halatının (4), merkezde kalmasını sağlar.

Ankraj halatı, halat kilitleme aparatının içinden geçirilir ve açma-kapama halkası, ankraj gövdesi (1) boyunca ankraj başlığı (1.1) yönünde itilerek ankraj halatı gerilir ve destek elemanları (1.3.1.1) ankraj gövdesinden uzaklaşacak şekilde açılır. Buna bağlı olarak kesici kanatların da ankraj gövdesine dik bir konuma gelerek açılması sağlanır. Daha sonra enjeksiyon sistemi (1.3.2) kullanılarak enjeksiyon borusu (1.3.2.1) üzerindeki püskürtme deliklerinden (1.3.2.2), kuyuya çimento su karışımı gönderilir. Betonun priz alması beklenir. Betonun dayanımını almasından sonra çelik tendonlar gerilerek art germe verilir. Tendonlar göğüsleme kirişlerine klipsler yardımıyla sabitlenerek stabil bir sistem elde edilir. Böylece ankrajın uç kısmında beton blok oluşturulur.

17. SONUÇLAR VE ÖNERİLER: ŞEMSİYE ANKRAJ YÖNTEMİ

Tezin ikinci bölümü kapsamında; geoteknik mühendisliğinde süregelen standart ankraj uygulaması geliştirilerek hem teorik açıdan hem de uygulama açısından yeni bir yaklaşım olan "Şemsiye Ankraj Yöntemi" sunulmuştur. Yöntem için tasarım ve patent başvurusunda bulunulmuştur. Ankraj detaylarının tasarımı ve üretiminin ardından arazide gerçek boyutlu uygulaması gerçekleştirilmiştir. Benzer işlem prototip sistem üzerinde kum, kil ve silt ağırlıklı zeminlerde laboratuvar ortamında da değerlendirilmiştir.

Standart ankraj yönteminde kök bölgesindeki beton ile zemin arasındaki sürtünmeye bağlı davranışı etkileyen birçok faktörün bulunması belirsizlikleri arttırmaktadır. "Şemsiye Ankraj" sisteminde ise ankraj kanatları ve beton enjeksiyonu arasında oluşturulan kompozit yapının daha mukavemetli malzeme özellikleri sayesinde, ankrajın yenilip sıyrılması için toptan göçme durumunu sağlanması gerekmektedir. Bu yüzden düşük güvenlik sayısı kullanımına olanak sağlamaktadır.

Şemsiye ankraj yöntemi kapsamındaki tüm hesaplamalarda güvenlik sayısı "1" olarak alınarak teori ile deneysel çalışmalar arasındaki doğruluk ispatlanmıştır. Normal şartlar altında ankraj hesaplarında güvenlik sayısının en az 2 alınması önerildiği düşünülecek olursa, can güvenliğini ön planda tutan geoteknik tasarımlarda şemsiye ankraj yönteminin ekonomik, hızlı ve güvenli bir çözüm sunacağı aşikardır.

17.1. Nihai Ankraj Çekme Kuvveti Hesabı

Şemsiye ankraj yönteminde hem kumlu zeminler hem de killi zeminler için aşağıda verilen teorik hesap önerilmiştir.

Kumlu zeminlerde nihai ankraj çekme kuvveti:

$$P_u = \pi(a+b)l * \bar{\sigma}_0' * K * tan\emptyset' + \left\{\frac{1}{3}\pi h(a^2+ab+b^2) * \gamma_{zemin}\right\} K \sin\alpha \quad (17.1)$$

Killi zeminlerde ise nihai ankraj çekme kuvveti:

$$P_u = \pi(a+b)l * c_a + \left\{\frac{1}{3}\pi h(a^2+ab+b^2) * \gamma_{zemin}\right\} K \sin\alpha \quad (12.6)$$

Burada; $\emptyset'$ zeminin efektif içsel sürtünme açısı, $\bar{\sigma}_0'$ ortalama efektif düşey gerilme, K zemin basınç katsayısı, c_a adezyon, α ankrajın yatay ile yaptığı açı, a oluşan kayma konisinin taban yarıçapı, b oluşan kayma konisinin tavan yarıçapı, h kayma konisinin yüksekliği ve l ise kayma konisinin uygun açıdaki yüzey uzunluğu değeridir. Ankrajın

pasif bölgeye sabitlenmesi durumunda zemin basınç katsayısı değerinin pasif; geçiş bölgesine sabitlenmesi durumunda ise sükunetteki değerinin alınması önerilmektedir.

- Teorik hesap laboratuvar ve arazi uygulamaları ile karşılaştırılarak, teorik kabul doğrulanmıştır.
- Şemsiye ankrajın uygulandığı zeminde çekme kuvvetine karşı oluşan zemin kayma açısı ve bunu meydana getiren zemin taşıma kapasitesinin nihai çekme kuvvetini belirleyen en önemli etkenler olduğu kanaatine varılmıştır.

17.2. Laboratuvar Uygulaması Sonuçları

Laboratuvar ortamında sadece içsel sürtünme açısına sahip zeminlerde farklı derinlik ve çaplardaki ankrajlar için çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Teorik ve deneysel veriler arasındaki farklar göz önüne alındığında, derinlik / çap oranının artması ile çekme kuvveti doğrultusunda zeminde oluşan kayma kaması çapının yani ankraj plakası ile konik kayma yüzeyi arasındaki açının kritik orana kadar arttığı sonrasında ise azaldığı görülmüştür. Bu kritik oran, içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri ile zemin sıkılığına göre değişiklik göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, kompozit uç bölgesinde oluşan eksenel gerilmeyi ifade eden bu değer, üst kısımda kalan zeminlerin taşıma kapasitesinden kaynaklandığından, taşıma kapasitesini oluşturan maksimum kayma dayanımına karşılık gelmektedir.
- Laboratuvar deneyleri sonucunda kuru zeminlerde 1,5 çap / derinlik oranına kadar gerilme artmış olup sonrasında azalmıştır.
- En yüksek eksenel gerilme değerleri 15 cm çaplı ankraj plakalarında görülmüştür.

17.3. Arazi Uygulaması Sonuçları

Şemsiye ankrajın gerçek boyutlu tasarım, üretim ve arazi uygulaması öngörülen kıstaslar doğrultusunda başarı ile gerçekleştirilmiştir. Bu aşamadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir

- Uygulama kolaylığı açısından şemsiye ankrajın düşey doğrultuda inşası, teorik hesaptaki koni hacmi içerisinde kalan zemin kütlesinden kaynaklanan yükün ankraj çekme kapasitesine direkt etkimesi sonucunda aşırı gerilmeler öngörülmesine yol açmıştır. Fakat şemsiye ankrajın esas kullanım yeri olan yanal

destek uygulamalarında zeminin ankraj çekme ekseni doğrultusundaki bileşeni pasif kuvvet olarak etkiyeceğinden çekme kuvvetleri kabul edilebilir seviyelerde hesaplanabilecektir.

- Arazide ise çap / derinlik oranı kesin bir sınırla belirlenmemekte olup esas belirleyici faktör zemin dayanımıdır.
- Hem laboratuvar deneylerinde hem de arazi çekme deneylerinde çekme davranışına karşı yeteri dayanıma sahip zemin tabakalarına soketlenen şemsiye ankrajların teorik yaklaşımı doğruladığı görülmüştür.
- Arazi uygulamalarında diğer tabakalara oranla daha yüksek taşıma kapasitesine sahip zeminlerde çekme kuvvetinin yaklaşık 2 kat yüksek çıktığı görülmüştür. Fakat arazi uygulamasının gerçekleştirildiği zeminin çok düşük taşıma kapasitesine sahip olması teorik yaklaşımdaki yük değerine çıkamadan zeminin yenilmesine neden olmuştur. Bu yüzden, ankraj detayları, halat ve diğer bağlantıların yeteri dayanıma sahip olması durumunda bile, çevre zemininin dayanımı ankraj yükünü belirleyen birincil parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.
- Şemsiye ankrajlarda çekme kuvvetlerinin nihai değere ulaşmasının ardından ani bir düşüşle karşılaşılmamıştır. Bu durum şemsiye ankrajın tasarlanan çalışma prensibine uygun davranış sergilediğini ortaya koymaktadır. Aksi takdirde kompozit bölgenin çevre zemininden tamamen sıyrılması sonucunda yük değerlerinde ani ve ciddi oranlarda azalma meydana gelmesi kaçınılmaz bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır.
- Diğer taraftan ankrajın üst kısmında kalan zeminin çekme işlemi sonucunda sıkışmasına bağlı olarak da kısmi bir dayanım artışı olduğu belirtilebilir. Nihai yükte gözlenen yer değiştirme değerleri ise ankraj tipi, derinlik ve çap parametrelerine göre farklılık göstermekle birlikte genel itibariyle 100 mm'nin altında kalmıştır.
- Arazideki çekme deneylerinden elde edilen bir diğer parametre ise yük değişimine bağlı yüzey oturması değeridir. Buradaki veriler plaka yükleme deneyinde olduğu gibi hem üst zemin tabakasının hem de ankraj ucunun sabitlendiği tabakanın taşıma kapasitesinin belirlenmesinde de kullanılabilecektir.
- Yeraltı su seviyesinin varlığı hem ankraj çevresindeki zemin dayanımını hem de enjeksiyon işlemini olumsuz etkilemektedir.

- Düşük enjeksiyon basınçlarında teorik yaklaşımdaki soketleme çapı elde edilememektedir. Bu yüzden zemin tipine uygun enjeksiyon basıncı ve sistemi seçilerek ankraj önünde yeterli kalınlığa sahip beton kütle üretilmelidir.
- Arazide yapılan gerçek boyutlu deneme deneylerinden elde edilen göçme modlarının kanatların burkulması, şemsiye brandasının yırtılması, halatın sıyrılması, ankrajın komple sıyrılarak gelmesi gibi sebeplerle meydana geldiği gözlenmiştir.

17.4. Öneriler

Yöntemin hesap, üretim ve uygulama adımları tez kapsamında ön görülen ihtiyaçları karşılamakla birlikte sonrasında daha verimli tasarımlar yapabilmek adına geliştirilmeye açıktır.

İksa projeleri ve şev uygulamalarında şemsiye ankraj tasarımı yapılırken, sağlam zeminin ankraj delgisine yakın olması durumunda kompozit uç bölgesi sağlam zemin ardına sabitlendiği takdirde pratikte teoriye en yakın ve en yüksek çekme dayanımı elde edilebilecektir. Bu durumun arazide değerlendirilerek yükün hangi mertebelere çıkabildiği incelenmelidir.

Zincir ve jet enjeksiyonun birlikte kullanımı sonucunda ortaya çıkacak olan yüksek kapasiteli şemsiye ankraj kullanımı ile çok daha yüksek yük mertebelerine çıkılabilecektir.

Gelecek çalışmalarda, şemsiye ankrajın farklı zeminlerde gerçekleştirilen iksa çalışmalarında, yatay veya yataya yakın olarak uygulanması ile sistemin verimliliğinin değerlendirilmesi önerilmektedir.

Ayrıca farklı zemin tiplerinde oluşan kayma kaması taban açısının tam olarak belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu doğrultuda yapılacak çalışmalar özellikle teorik yaklaşımın diğer zemin tipleri için de doğrulanmasında kullanılabilecektir.

KAYNAKÇA

Aggelis, D.G., Kleitsa, D., Iwamoto, K. and Shiotani, T. (2012). Elastic wave simulation in ground anchors for the estimation of pre-stress. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 30, 55-63.

Akgün, H. and Koçkar, M.K. (2004). Design of anchorage and assessment of the stability of openings in silty, sandy limestone: a case study in Turkey. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41, 37-49.

Akyurt, M., Zaki, G. and Habeebullah, B. (2002). Freezing phenomena in ice-water systems. *Energy Conversion and Management*, 43, 1773-1789.

Andersland, O.B. and Ladanyi, B. (2004). *Frozen ground engineering*. (Second edition). New York: John Wiley & Sons, Inc.

Becker, B.R. and Fricke, B.A. (1997). *Effects of saturation and dry density on soil thermal conductivity*, Report, Department of Mechanical and Aerospace Engineering University of Missouri, Kansas City, U.S.A.

Bing, H. and Ma, W. (2011). Laboratory investigation of the freezing point of saline soil. *Cold Regions Science and Technology*, 67, 79-88.

CDF Freeze- Thaw Testing Machine User Manual, Schleibinger Geräte.

Celep Z. ve Kumbasar N. (2005). *Betonarme yapılar*. (Dördüncü baskı), İstanbul: Beta Dağıtım.

Chalhoub, M., Bernier, M., Coquet, Y. and Philippe, M. (2017). A simple heat and moisture transfer model to predict ground temperature for shallow ground heat exchangers. *Renewable Energy*, 103, 295-307.

Chen, H., Ding, H., Liu, S., Chen, X., Wu, W. and Wang, Q. (2014). Experimental study on heat and moisture transfer in soil during soil heat charging for solar-soil source heat pump compound system. *Applied Thermal Engineering*, 70, 1018-1024.

Chen, H., Ding, H., Liu, S., Wu, W. and Zhang, L. (2015). Comparative study on heat and moisture transfer in soil heat charging at high temperature for various soils. *Energy Procedia*, 75, 3148-3153.

Coduto, D.P. (2001). Temel tasarımı ilkeler ve uygulamalar. İkinci baskı. (Çev: M. Mollamahmutoğlu ve K. Kayabalı), Amerika Birleşik Devletleri: Prentice Hall.

Craig, R.F. (1997). *Soil mechanics*. (Sixth edition). United Kingdom: E & FN Spon.

Çetin, Z. (2012). *Derin kazı yüzeyi desteklenmesinin sonlu eleman modelleriyle analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.

Das, B.M. (1984). *Principles of Foundation Engineering*. Monterey, California: Brooks / Cole Engineering Division.

de Vries, D.A. (1963). *The thermal properties of soils*, in: R.W. van Wijk (Ed.), Physics of Plant Environment, North Holland, Amsterdam, 210-235 cited in Chalhoub, M., Bernier, M., Coquet, Y. and Philippe, M. (2017). A simple heat and moisture transfer model to predict ground temperature for shallow ground heat exchangers. Renewable Energy, 103, 295-307.

Duan, X. and Naterer, G.F. (2010). Heat transfer in a tower foundation with ground surface insulation and periodic freezing and thawing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 2369-2376.

Eslami-nejad, P. and Bernier, M. (2012). Freezing of geothermal borehole surroundings: A numerical and experimental assessment with applications. *Applied Energy*, 98, 333-345.

Ergun, M.U. (2008). Deep excavations. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Bouquet 08, 1-34.

Evirgen, B. (2009). *Kazıklı temel tasarımı zemin dondurma*. Lisans Tezi, Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.

Evirgen, B. ve Yaman, G. (2010). *Kızılırmak kışlası migyem tesisleri atış poligonu heyelanı çivili iksa projesi raporu*. Toker Sondaj ve İnşaat Tic. Ltd. Şti.

Evirgen, B., Tuncan, A. ve Tuncan, M. (2015). Yapay zemin dondurma yöntemi ile örnek modelleme çalışması. *6. Geoteknik Sempozyumu*, Adana: Çukurova Üniversitesi, s. 75.

Evirgen, B., Tuncan, M. and Tuncan, A. (2015). Stress - strain characteristics of frozen silty and clayey soils. *Proceedings of the 25th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Hawaii, USA, June 21-26, vol. 1, pp. 1798-1802.

Evirgen, B., Tuncan, M. ve Tuncan, A. (2016). Yapay zemin dondurma yönteminde sıcaklık değişiminin zemin dayanımına etkisi. *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi*, Erzurum: Atatürk Üniversitesi, s. 1045-1054.

Evirgen, B., Tuncan, M. ve Tuncan, A. (2016), Granüler zeminler için örselenmemiş numune alıcı. Türkiye Patent Enstitüsü, Başvuru Referans No: 15602/55.

Evirgen, B., Onur, M.İ., Tuncan, M. and Tuncan, A. (2015). Determination of the freezing effect on unconfined compression strength and permeability of saturated granular soils. *International Journal of GEOMATE Geotechnique, Construction Materials and Environment*, 8 (2), 1283-1287.

Hanna, T.H. (1982). *Foundation in tension, ground anchors*. (First edition). United States of Amerika: Co-Publication by, Trans Tech Publications and McGraw-Hill Book Company.

Harris, J.S. (1993), Chapter 7: Ground freezing. Thorburn S. and Littlejohn G.S.P (Eds.) *Underpinning and retention* inside (p. 220 - 241). New Delhi: Thomson Press (India) Ltd.

http://www.anteppress.com/yagmur-bir-tek-onlari-uzdu (Erişim tarihi: 07.12.2016)

https://www.emlakwebtv.com/uskudar-daki-duvar-neden-coktu/15637 (Erişim tarihi: 07.12.2016)

http://www.haberler.com/istinat-duvari-coktu-cevresindeki-3-apartman-5380552-haberi (Erişim tarihi: 07.12.2016)

http://www.haber7.com/guncel/haber/1177618-33-milyon-avroluk-makina-5-yildir-toprak-altinda (Erişim tarihi: 07.12.2016)

http://www.hurriyet.com.tr/maltepede-istinat-duvari-coktu-40297027 (Erişim tarihi: 07.12.2016)

http://www.internethaber.com/ermenek-son-durum-madencilere-ulasildi-mi736364h.htm (Erişim tarihi: 07.12.2016)

http://www.kanalb.com.tr/haber.php?HaberNo=47823 (Erişim tarihi: 07.12.2016)

http://www.sabah.com.tr/galeri/yasam/sirnakta-hali-saha-istinat-duvarinin-coktu (Erişim tarihi: 07.12.2016)

http://www.sabah.com.tr/gundem/2014/10/31/30-kisinin-oldugu-karadon-maden-faciasinda-karar (Erişim tarihi: 07.12.2016)

http://www.soguksuhaber.com/guncel/somada-maden-faciasi-h2129.html (Erişim tarihi: 07.12.2016)

http://www.superhaber.tv/yasam/istanbulda-tehlikeli-anlar-devasa-istinat-duvari-boyle-coktu-video/haber-21078 (Erişim tarihi: 07.12.2016)

Johansen, Ø. (1977), *Thermal conductivity of soils*. (Translator: R. Stone, for Corps of Engineers U.S. Army, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New - Hampshire). Master Thesis: Institute for Cold Technology, Norwegian Institute of Technology.

Kang, Y., Liu, Q., Cheng, Y. and Liu, X. (2016). Combined freeze-sealing and New Tubular Roof construction methods for seaside urban tunnel in soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 58, 1-10.

Kersten, M.S. (1949). *Thermal properties of soil*. University Of Minnesota, Institute Of Technology Engineering Experiment Station, Bulletin No: 28, No: 21.

Klein, J. and Gerthold, A. (1979), Die fliessbedingung von drucker / prager im vergleich zu anderen bruchkriterien bei der bemessung von gefrierschächten, *Bautechnik*, 11, 368-375 cited in Andersland, O.B. and Ladanyi, B. (2004). Frozen ground engineering. (Second edition). New York: John Wiley & Sons, Inc.

Li, S., Lai, Y., Zhang, M. and Zhang, S. (2006). Minimum ground pre-freezing time before excavation of Guangzhou subway tunnel. *Cold Regions Science and Technology*, 46, 181-191.

Li, N., Chen, F., Xu, B. and Swoboda, G. (2008). Theoretical modeling framework for an unsaturated freezing soil. *Cold Regions Science and Technology*, 54, 19-35.

Liu, J., Cui, Y., Wang, P. and Lv, P. (2014). Design and validation of a new dynamic direct shear apparatus for frozen soil. *Cold Regions Science and Technology*, 106-107, 207-215.

Liu, X., Chen, C. and Zheng, Y. (2012). Optimum arrangement of prestressed cables in rock anchorage. *Procedia Earth and Planetary Science*, 5, 76-82.

Marwan, A., Zhou, M-M., Abdelrehim, M.Z. and Meschke, G. (2016). Optimization of artificial ground freezing in tunneling in the presence of seepage flow. *Computers and Geotechnics*, 75, 112-125.

Mitchell, J.K. and Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior*. (Third edition). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.

Murthy, V.N.S. (2003). *Geotechnical engineering principles and practices of soil mechanics and foundation engineering*. United States of America: Marcel Dekker Inc.

Nikitenko, M., Boiko, I., Sernov, V., Chernoshey, N. and Sikorae, N. (2013). Anchorage of retaining walls and antilandslide structures. *Procedia Engineering*, 57, 808-813.

Ono T. (2002). Lateral deformation of freezing clay under triaxial stress condition using laser-measuring device. *Cold Regions Science and Technology*, 35, 45-54.

Osgoui, R.R. and Ünal, E. (2009). An empirical method for design of grouted bolts in rock tunnels based on the Geological Strength Index (GSI). Engineering Geology, 107, 154-166.

Perazzelli, P. and Anagnostou, G. (2013). Stress analysis of reinforced tunnel faces and comparison with the limit equilibrium method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 87-98.

Pimentel, E., Papakonstantinou, S. and Anagnostou, G. (2012). Numerical interpretation of temperature distributions from three ground freezing applications in urban tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 57-69.

Poetsch, F.H. (1884). Method of and apparatus for sinking shafts through quicksand. U.S. Patent, No: 300891.

Russo, G., Corbo, A., Cavuoto, F. and Autuori, S. (2015). Artificial ground freezing to excavate a tunnel in sandy soil. Measurements and back analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 50, 226-238.

Sanger, F.J. (1968). Ground freezing in construction. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE*, 94(SM1), 131-158 cited in Andersland, O.B. and Ladanyi, B. (2004). Frozen ground engineering. (Second edition). New York: John Wiley & Sons, Inc.

Song, W., Zhang, Y., Li, B. and Fan, X. (2016). A lattice Boltzmann model for heat and mass transfer phenomena with phase transformations in unsaturated soil during freezing process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 94, 29-38.

Sterpi, D., Rizzo, F. Renda, D., Aguglia, F. and Zenti, C.L. (2013). Soil nailing at the tunnel face in difficult conditions: A case study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 129-139.

Sun, X-m., Cai, F., Yang, J. and Cao, W-f. (2009). Numerical simulation of the effect of coupling support of bolt-mesh-anchor in deep tunnel. *Mining Science and Technology*, 19, 0352-0357.

Tuncan, M., Evirgen, B., Tuncan, A. ve Onur M.İ. (2016), Şemsiye ankraj. Türkiye Patent Enstitüsü, Başvuru Referans No: 15602/22.

Uzuner, B.A. (2011). *Temel mühendisliğine giriş*. (Dördüncü basım). Trabzon: Derya Kitabevi.

Vialov, S.S. (1962). *The strength and creep of frozen soils and calculations for ice-soil retaining structures*. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory Translation, SIPRE TL 76 cited in Andersland, O.B. and Ladanyi, B. (2004). Frozen ground engineering. (Second edition). New York: John Wiley & Sons, Inc.

Vitel, M., Rouabhi, A., Tijani, M. and Guérin, F. (2016). Modeling heat and mass transfer during ground freezing subjected to high seepage velocities. *Computers and Geotechnics*, 73, 1-15.

Vitel, M., Rouabhi, A., Tijani, M. and Guérin, F. (2016). Thermo-hydraulic modeling of artificial ground freezing: Application to an underground mine in fractured sandstone. *Computers and Geotechnics*, 75, 80-92.

Van Rooyen, M. and Winterkorn, H.F. (1957). Structural and textural influences on thermal conductivity of soils. *Highway Research Board Proceedings*, 39, 576-621 cited in Becker, B.R. and Fricke, B.A. (1997). *Effects of saturation and dry density on soil thermal conductivity*, Report, Department of Mechanical and Aerospace Engineering University of Missouri, Kansas City, U.S.A.

Wang, Z., Wang, F., Ma, Z., Wang, X. and Wu, X. (2016). Research of heat and moisture transfer influence on the characteristics of the ground heat pump exchangers in unsaturated soil. *Energy and Buildings*, 130, 140-149.

Wu, T., Wang, Q., Zhao, L., Batkhishig, O. and Watanabe, M. (2011). Observed trends in surface freezing/thawing index over the period 1987-2005 in Mongolia. *Cold Regions Science and Technology*, 69, 105-111.

Wu, D., Lai, Y. and Zhang, M. (2015). Heat and mass transfer effects of ice growth mechanisms in a fully saturated soil. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86, 699-709.

Wu, Y., Mao, X., Huang, J., Sun, F. and Yao, B. (2010). Action mechanism of a mechanical end-anchorage bolt. *Mining Science and Technology*, 20 (4), 0625-0628.

Yamamoto, Y. and Springman, S.M. (2017). Three- and four-point bending tests on artificial frozen soil samples at temperatures close to 0 °C. *Cold Regions Science and Technology*, 134, 20-32.

Yang, M., Zhao, Y. and Zhang, N. (2014). Creep behavior of epoxy-bonded anchor system. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 67, 96-103.

Yang, P., Ke, J-M., Wang, J.G., Chow, Y.K. and Zhu, F-B. (2006). Numerical simulation of frost heave with coupled water freezing, temperature and stress fields in tunnel excavation. *Computers and Geotechnics*, 33, 330-340.

Zhao, X., Zhou, G. and Wang, J. (2013). Deformation and strength behaviors of frozen clay with thermal gradient under uniaxial compression. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 550-558.

Zhao, Y., Yu, B., Yu, G. and Li, W. (2014). Study on the water-heat coupled phenomena in thawing frozen soil around a buried oil pipeline. *Applied Thermal Engineering*, 73, 1477-1488.

Zhao, D.-j., Liu, Y.-m., Sun, Y.-h., Zhao, Y. and Bai, F.-t. (2015). Experiments and simulations of underground artificial freezing with the use of natural cold resources in cold regions. *Building and Environment*, 87, 224-233.

Zhou, M.M. and Meschke, G. (2013). A three-phase thermo-hydro-mechanical finite element model for freezing soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37, 3173-3193.

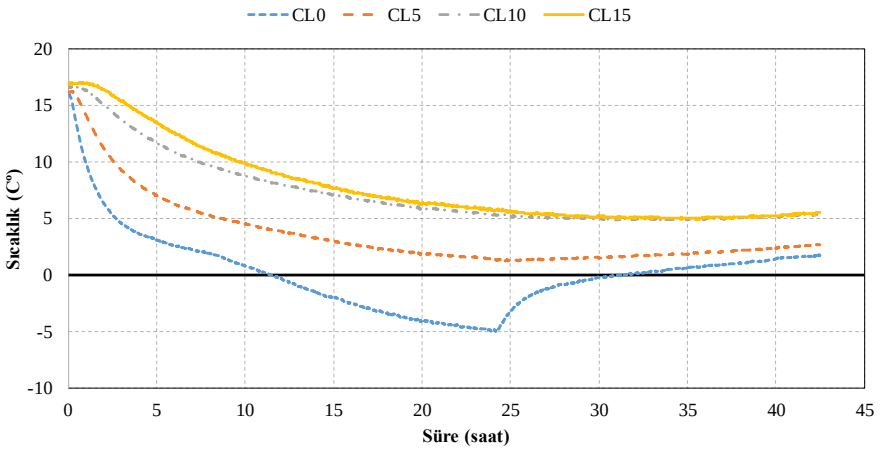
Zhou, J. and Tang, Y. (2015). Artificial ground freezing of fully saturated mucky clay: Thawing problem by centrifuge modeling. *Cold Regions Science and Technology*, 17, 1-11.

Zhou, J. and Tang, Y. (2015). Centrifuge experimental study of thaw settlement characteristics of mucky clay after artificial ground freezing. *Engineering Geology*, 190, 98-108.

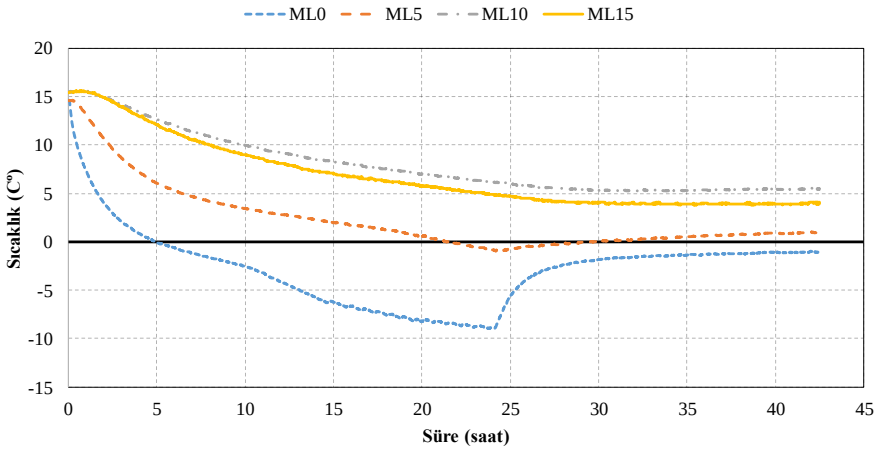
Zong, Y., Han, L., Qu, T. and Yang, S. (2014). Mechanical properties and failure characteristics of fractured sandstone with grouting and anchorage. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24, 165-170.

EK - 1

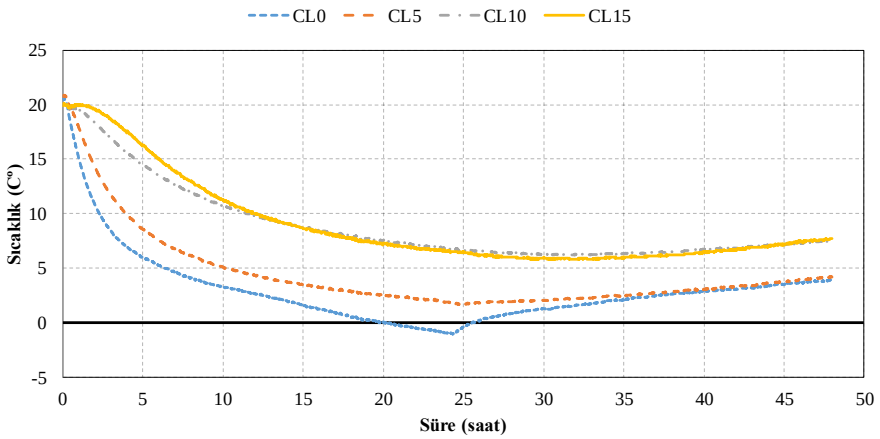
Paslanmaz Çelik Borulama Sisteminin Süreye Bağlı Sıcaklık Değişimi Grafikleri (SERİ 1)



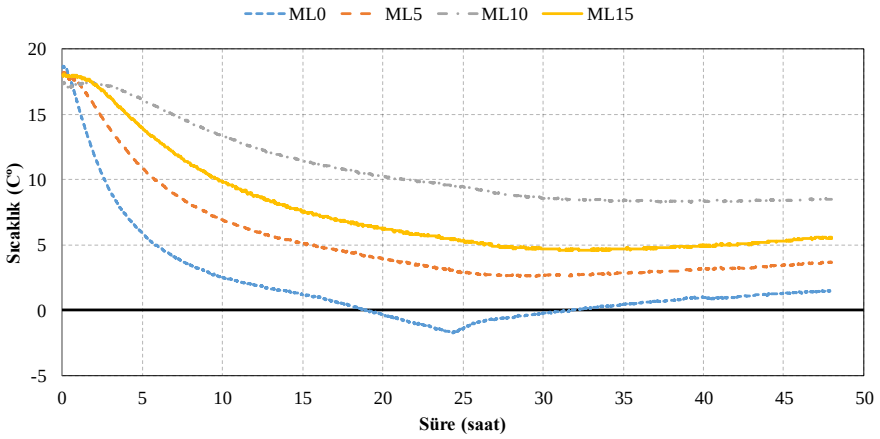
Şekil E1.1. *CL Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Büyük Boy Boru*



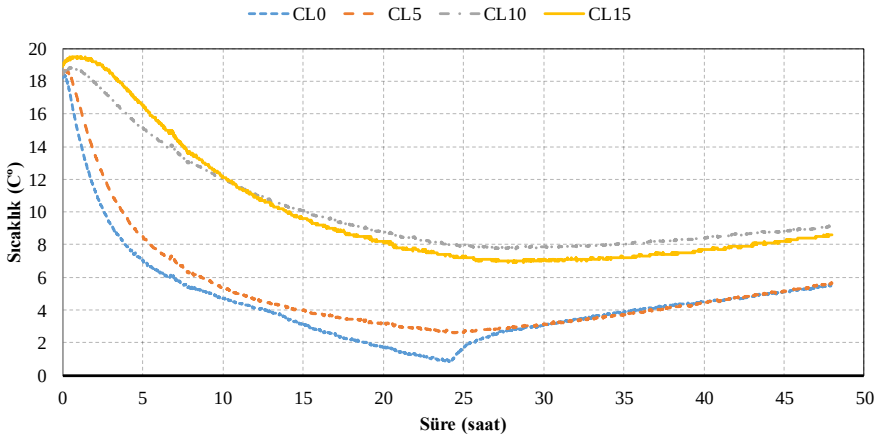
Şekil E1.2. *ML Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Büyük Boy Boru*



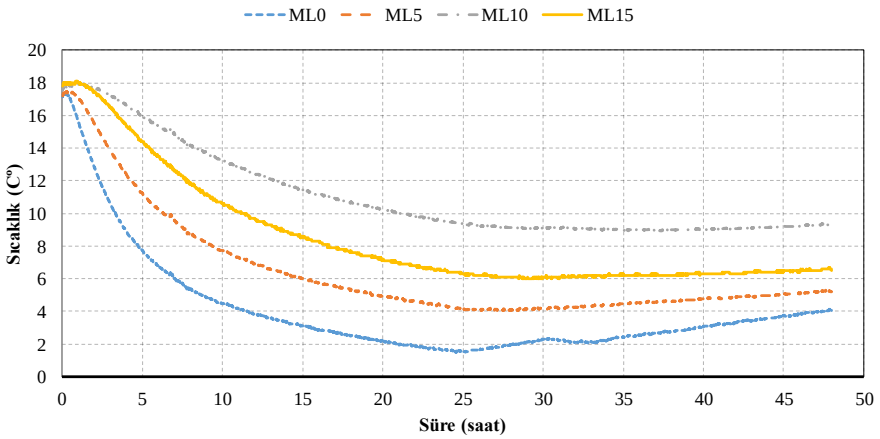
Şekil E1.3. *CL Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Orta Boy Boru*



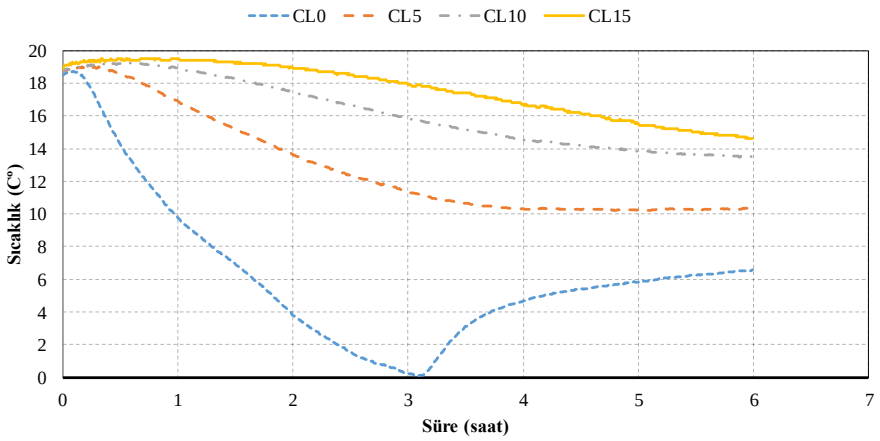
Şekil E1.4. *ML Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Orta Boy Boru*



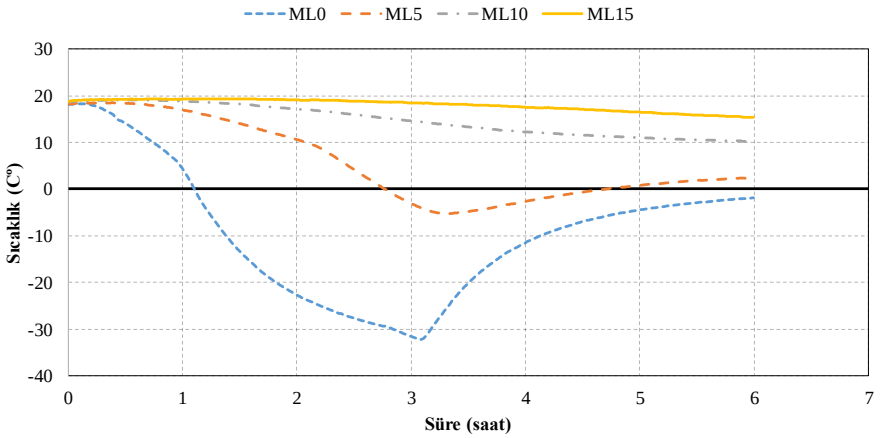
Şekil E1.5. *CL Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Küçük Boy Boru*



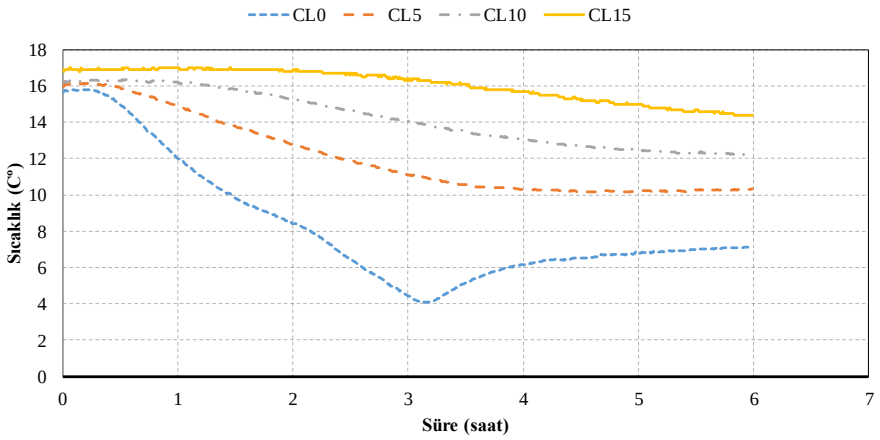
Şekil E1.6. *ML Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Küçük Boy Boru*



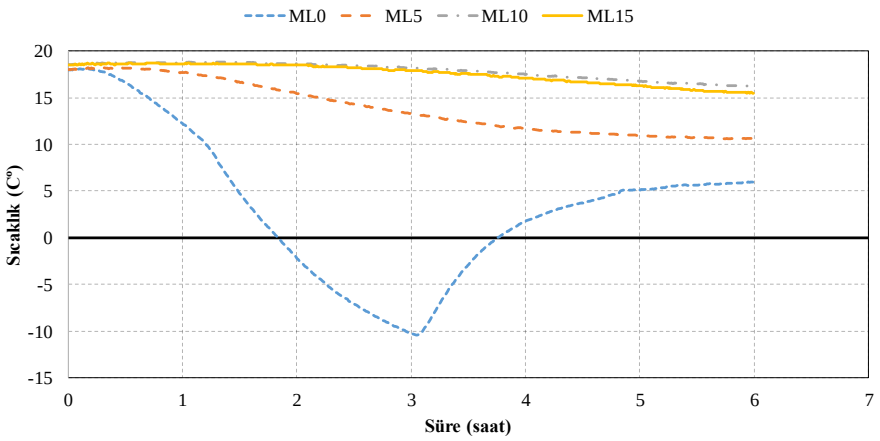
Şekil E1.7. *CL Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Büyük Boy Boru*



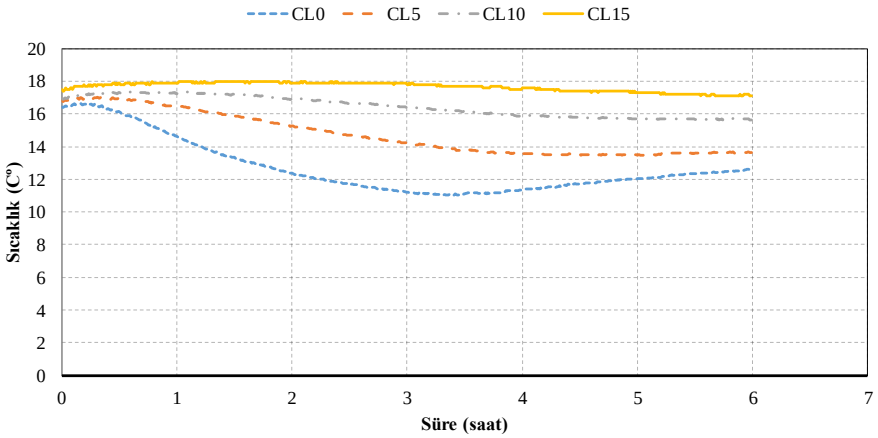
Şekil E1.8. *ML Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Büyük Boy Boru*



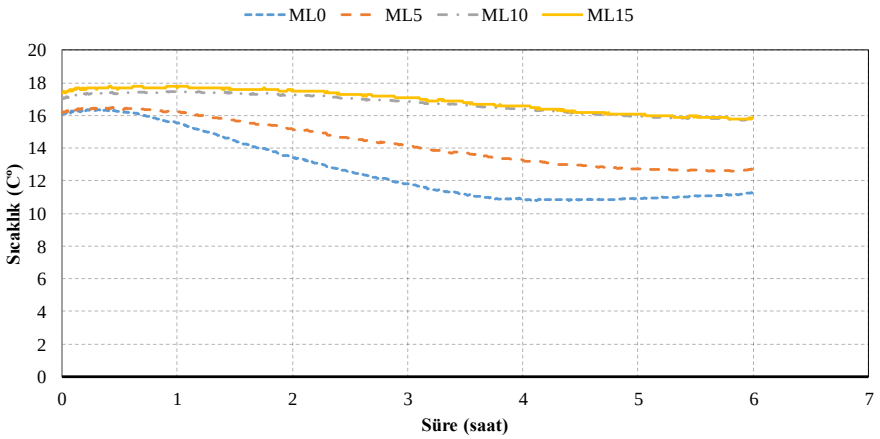
Şekil E1.9. *CL Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Orta Boy Boru*



Şekil E1.10. *ML Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Orta Boy Boru*



Şekil E1.11. *CL Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Küçük Boy Boru*

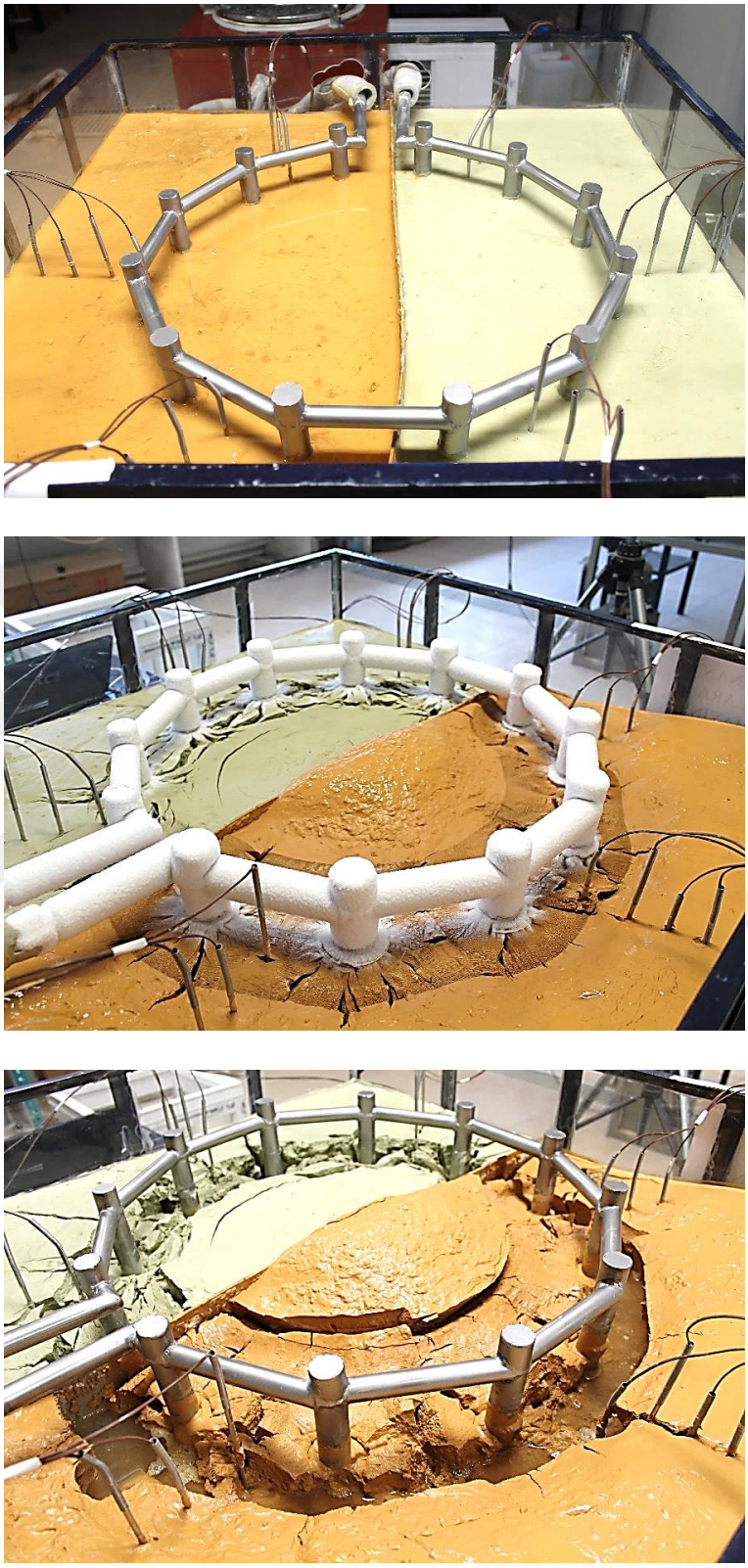


Şekil E1.12. *ML Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Küçük Boy Boru*

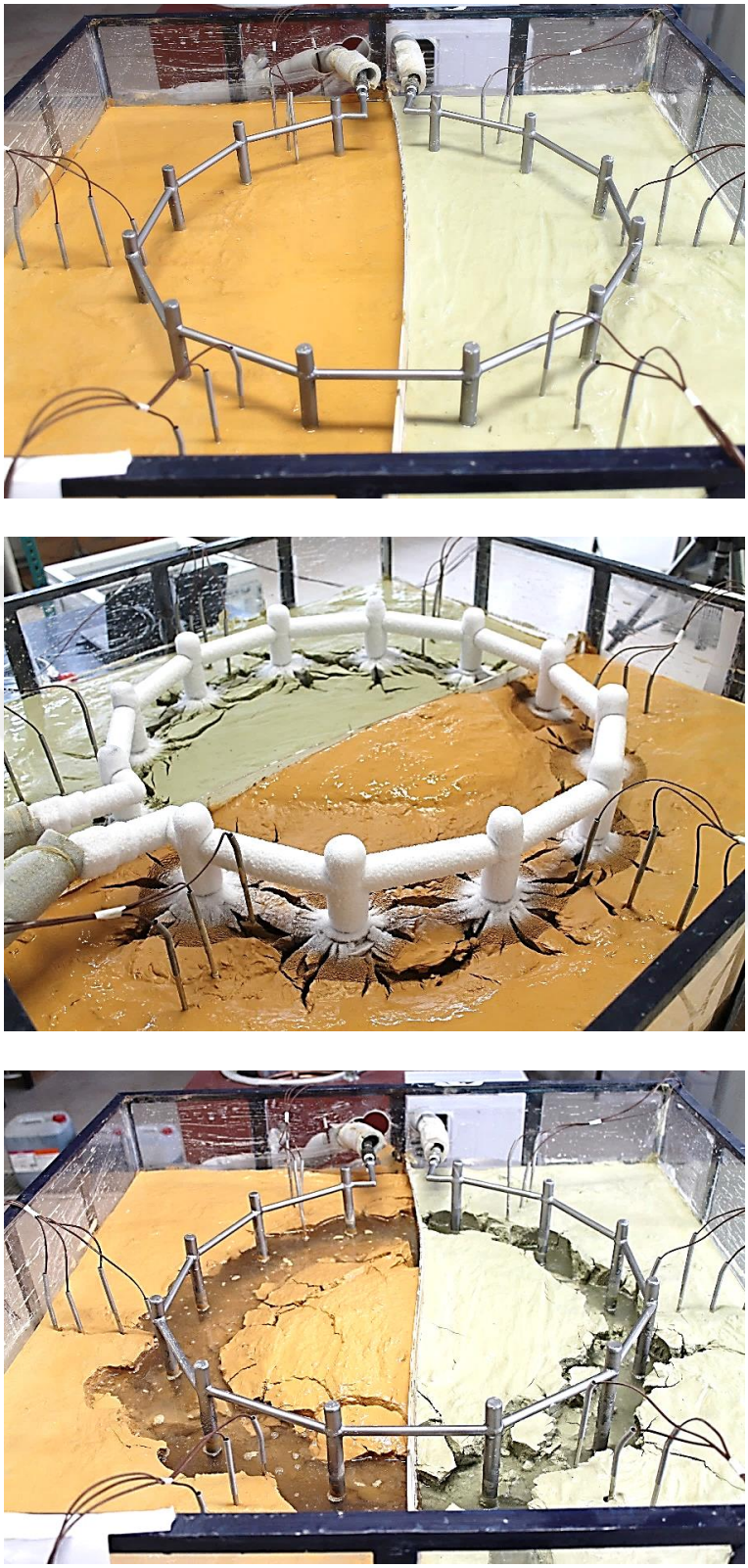
EK - 2

Paslanmaz Çelik Borulama Sistemindeki Donma – Çözülme Aşamaları (SERİ 1)

Görsel E2.1. *Antifriz Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Büyük Boy Paslanmaz Çelik Boru*

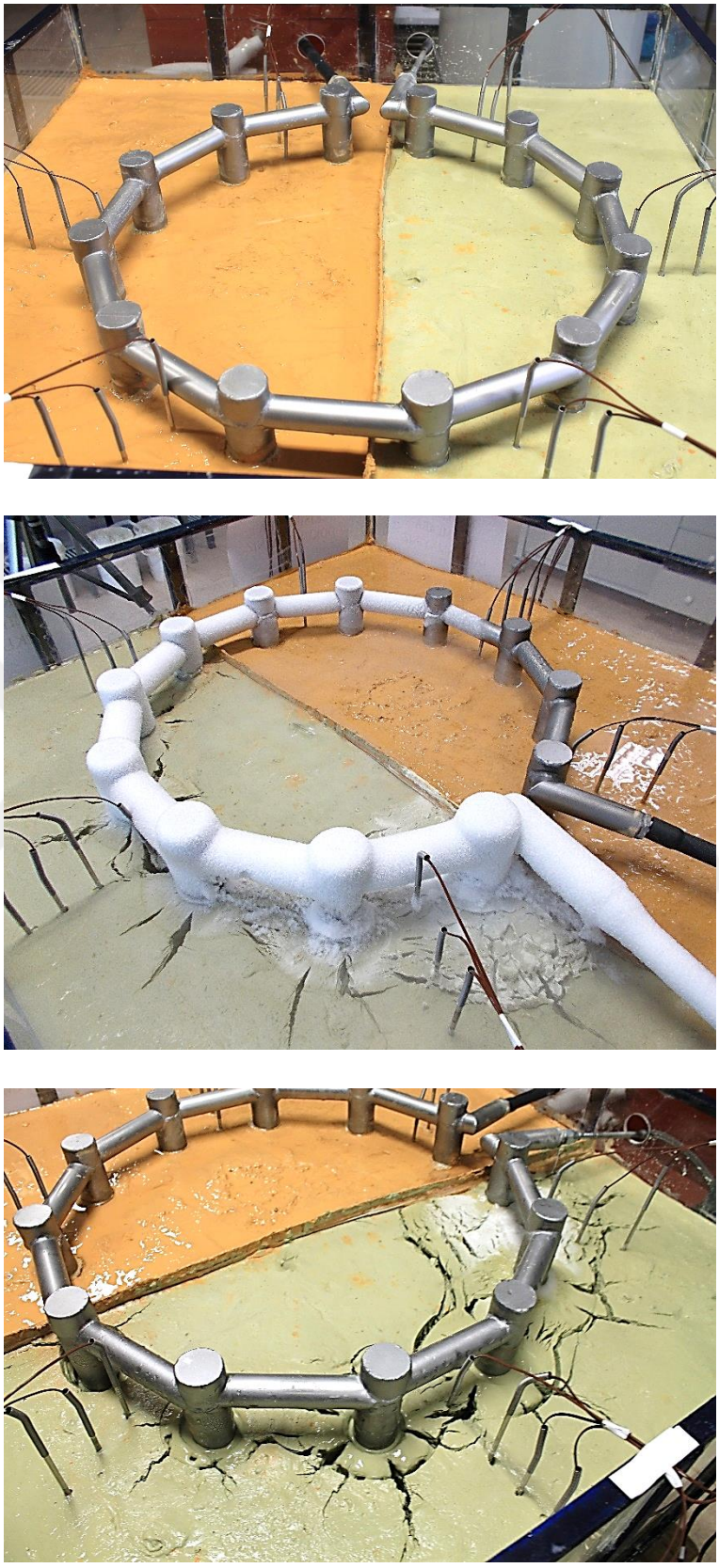


Görsel E2.2. *Antifriz Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Orta Boy Paslanmaz Çelik Boru*



Görsel E2.3. *Antifriz Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Küçük Boy Paslanmaz Çelik Boru*

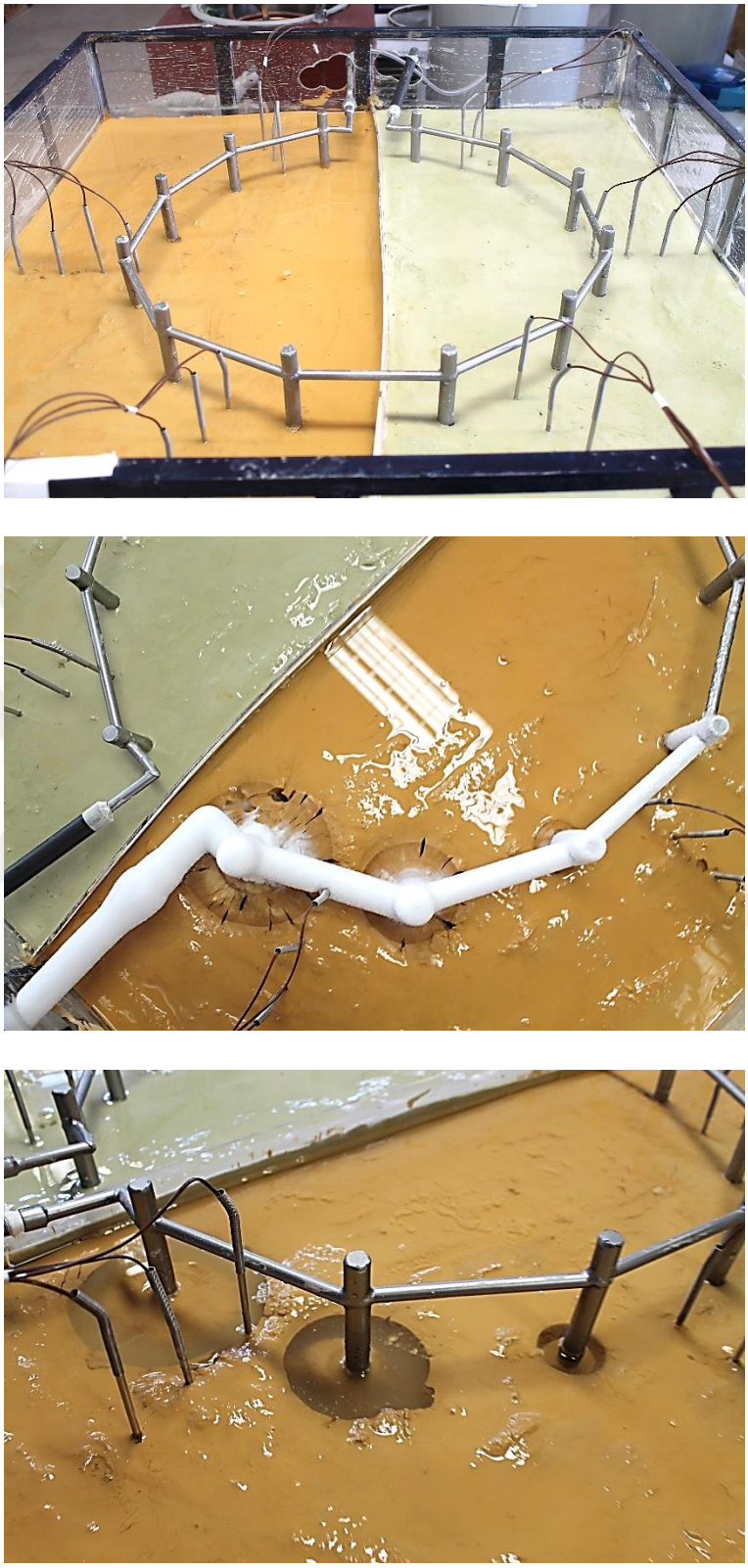
Görsel E2.4. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Büyük Boy Paslanmaz Çelik Boru – CL Tipi Numune*



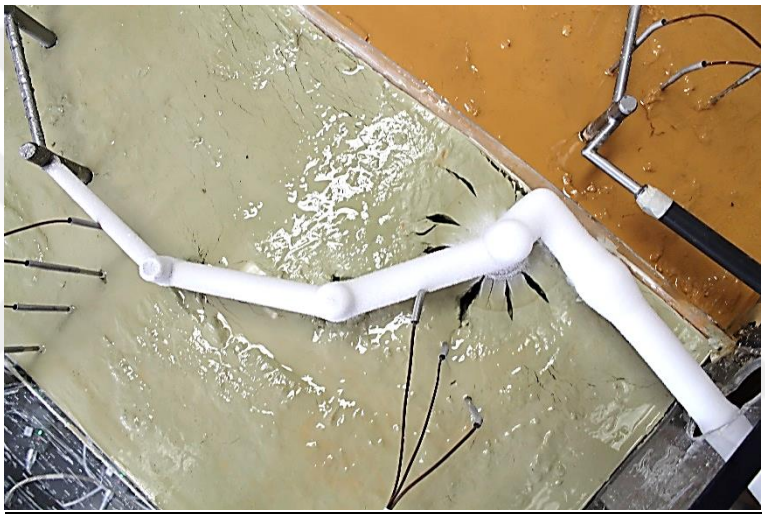
Görsel E2.5. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Büyük Boy Paslanmaz Çelik Boru – ML Tipi Numune*

Görsel E2.6. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Orta Boy Paslanmaz Çelik Boru – CL Tipi Numune*

Görsel E2.7. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Orta Boy Paslanmaz Çelik Boru – ML Tipi Numune*



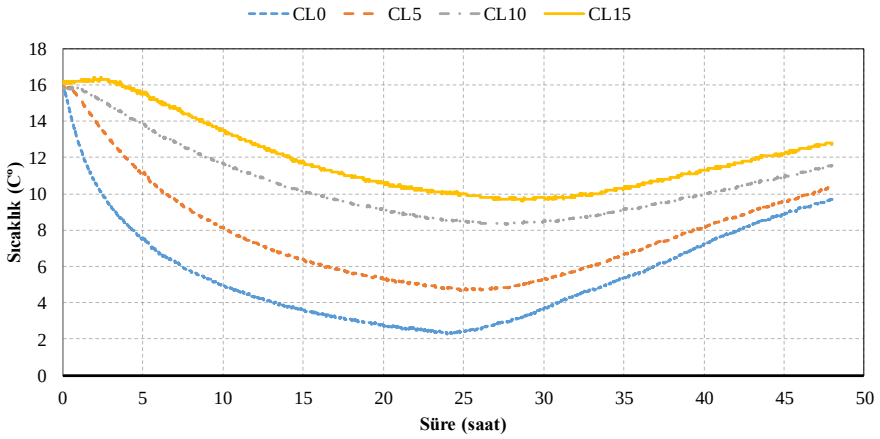
Görsel E2.8. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Küçük Boy Paslanmaz Çelik Boru – CL Tipi Numune*



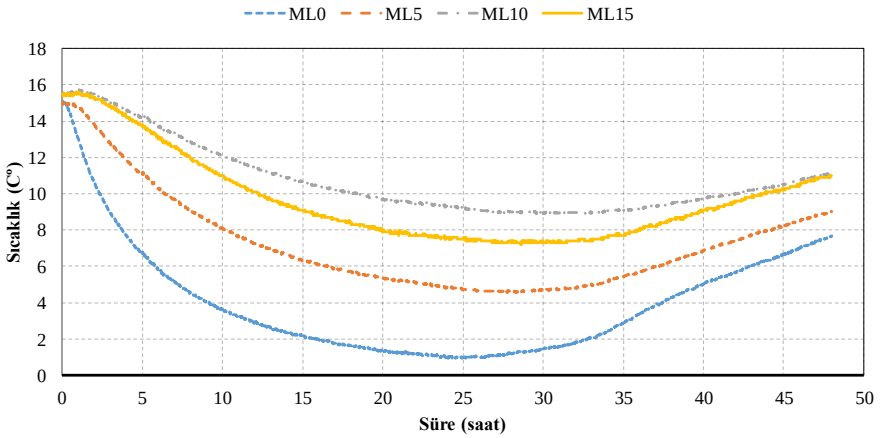
Görsel E2.9. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Küçük Boy Paslanmaz Çelik Boru – ML Tipi Numune*

EK - 3

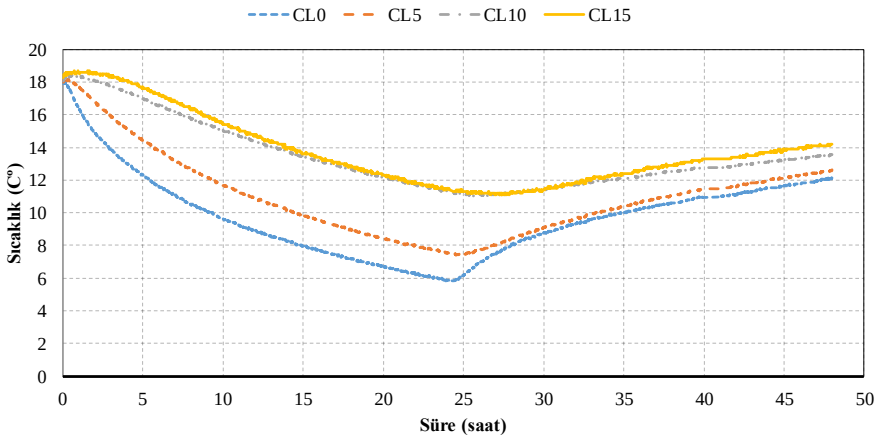
Alüminyum Borulama Sisteminin Süreye Bağlı Sıcaklık Değişimi Grafikleri (SERİ 2)



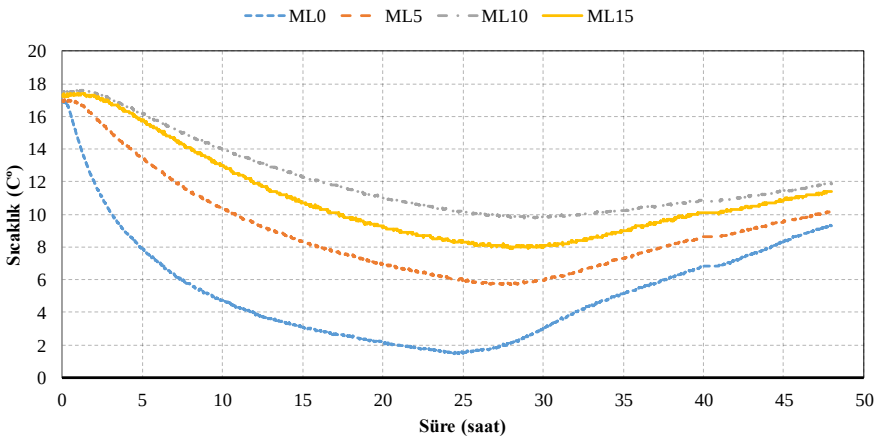
Şekil E3.1. *CL Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Büyük Boy Boru*



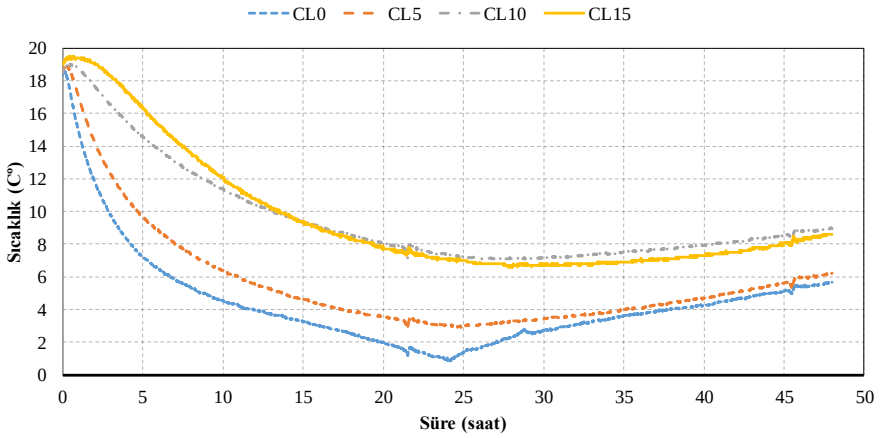
Şekil E3.2. *ML Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Büyük Boy Boru*



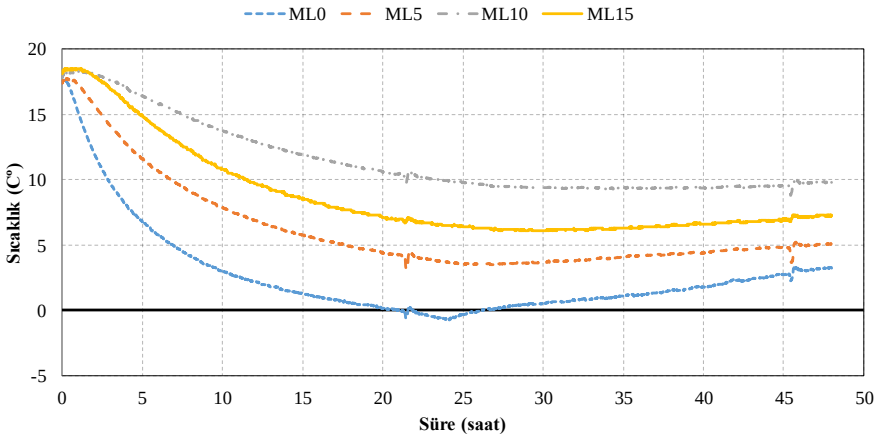
Şekil E3.3. *CL Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Orta Boy Boru*



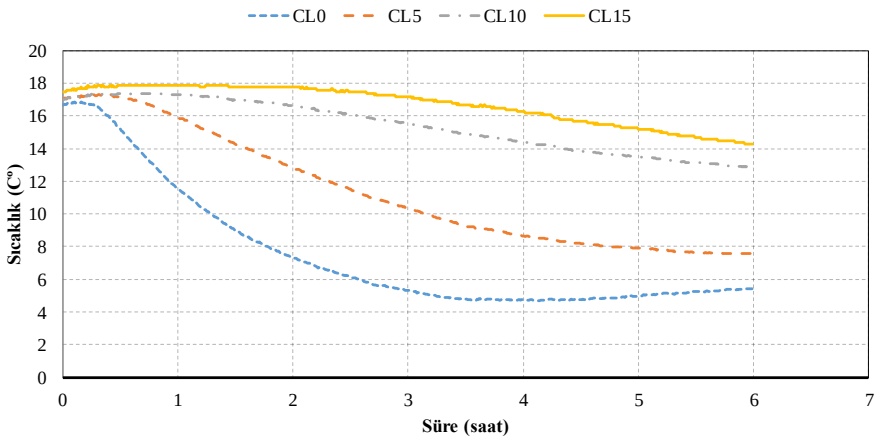
Şekil E3.4. *ML Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Orta Boy Boru*



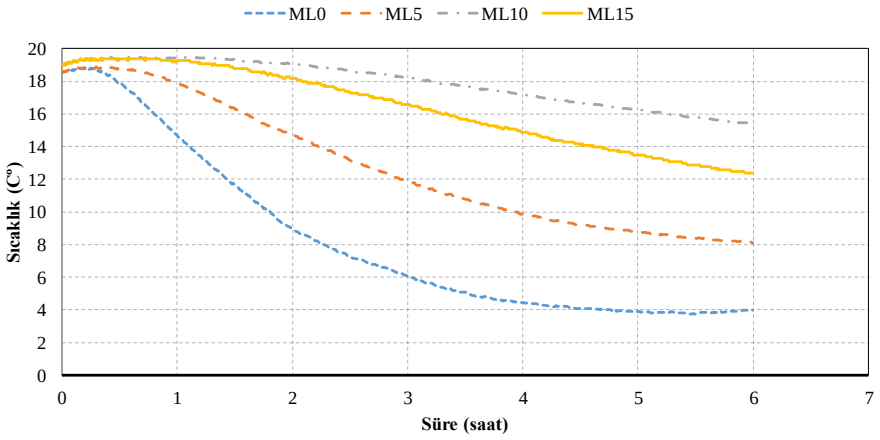
Şekil E3.5. *CL Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Küçük Boy Boru*



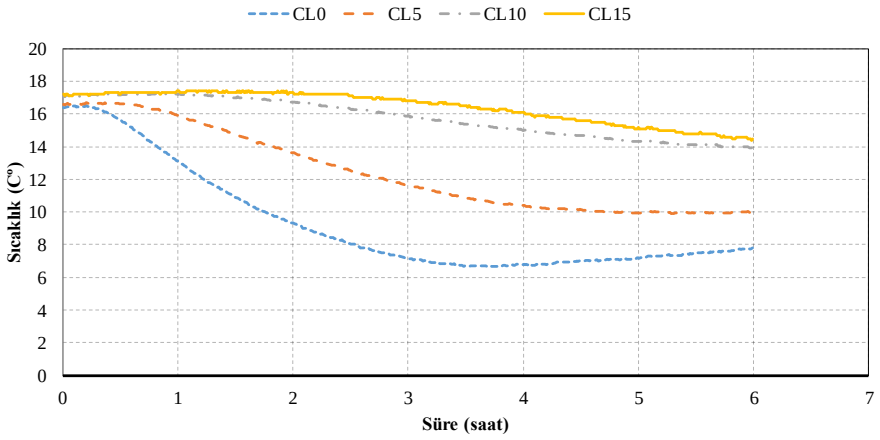
Şekil E3.6. *ML Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Küçük Boy Boru*



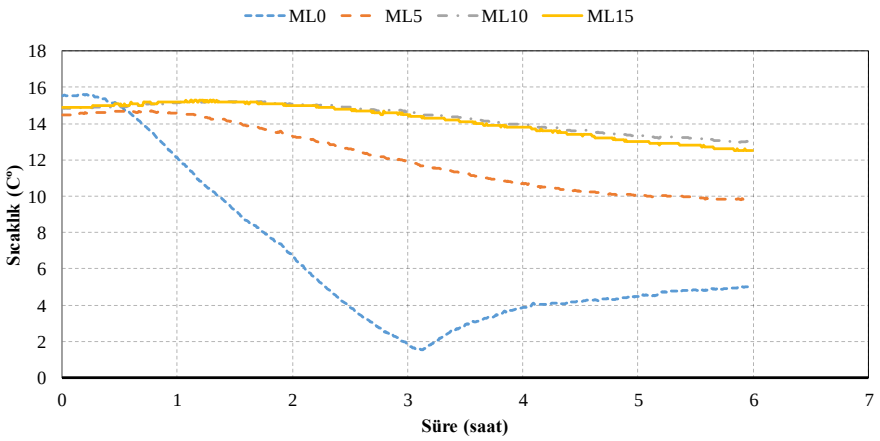
Şekil E3.7. *CL Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Büyük Boy Boru*



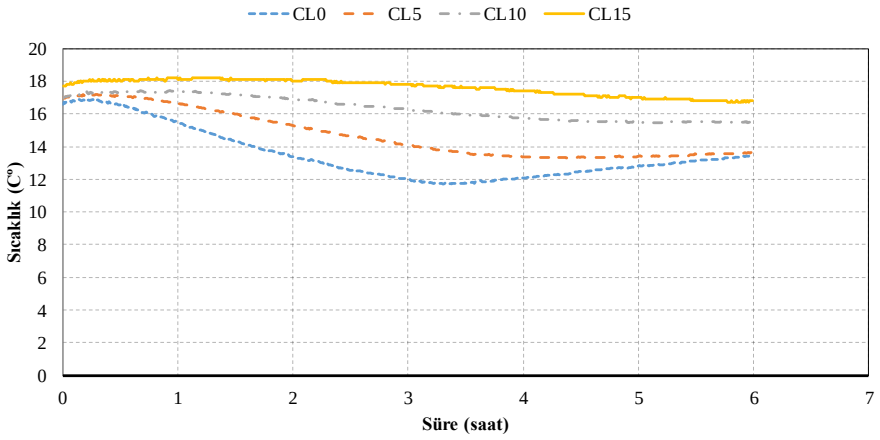
Şekil E3.8. *ML Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Büyük Boy Boru*



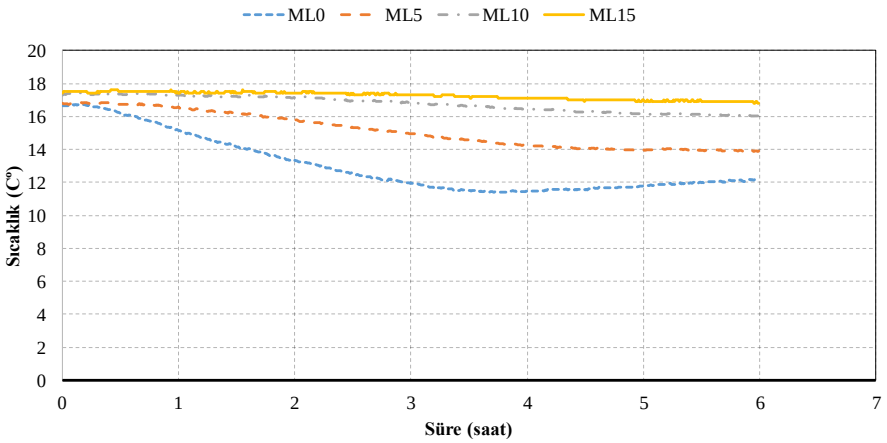
Şekil E3.9. *CL Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Orta Boy Boru*



Şekil E3.10. *ML Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Orta Boy Boru*



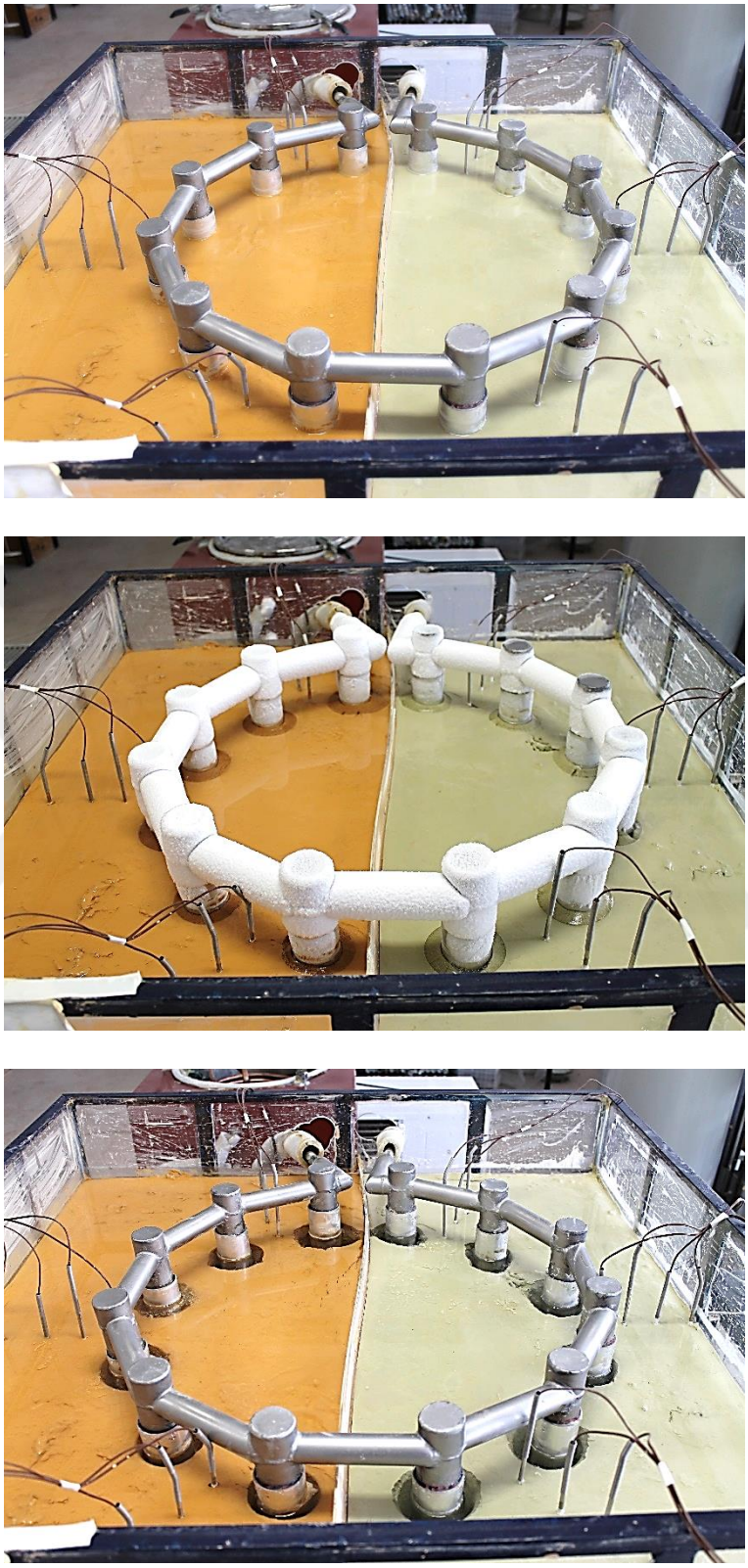
Şekil E3.11. *CL Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Küçük Boy Boru*



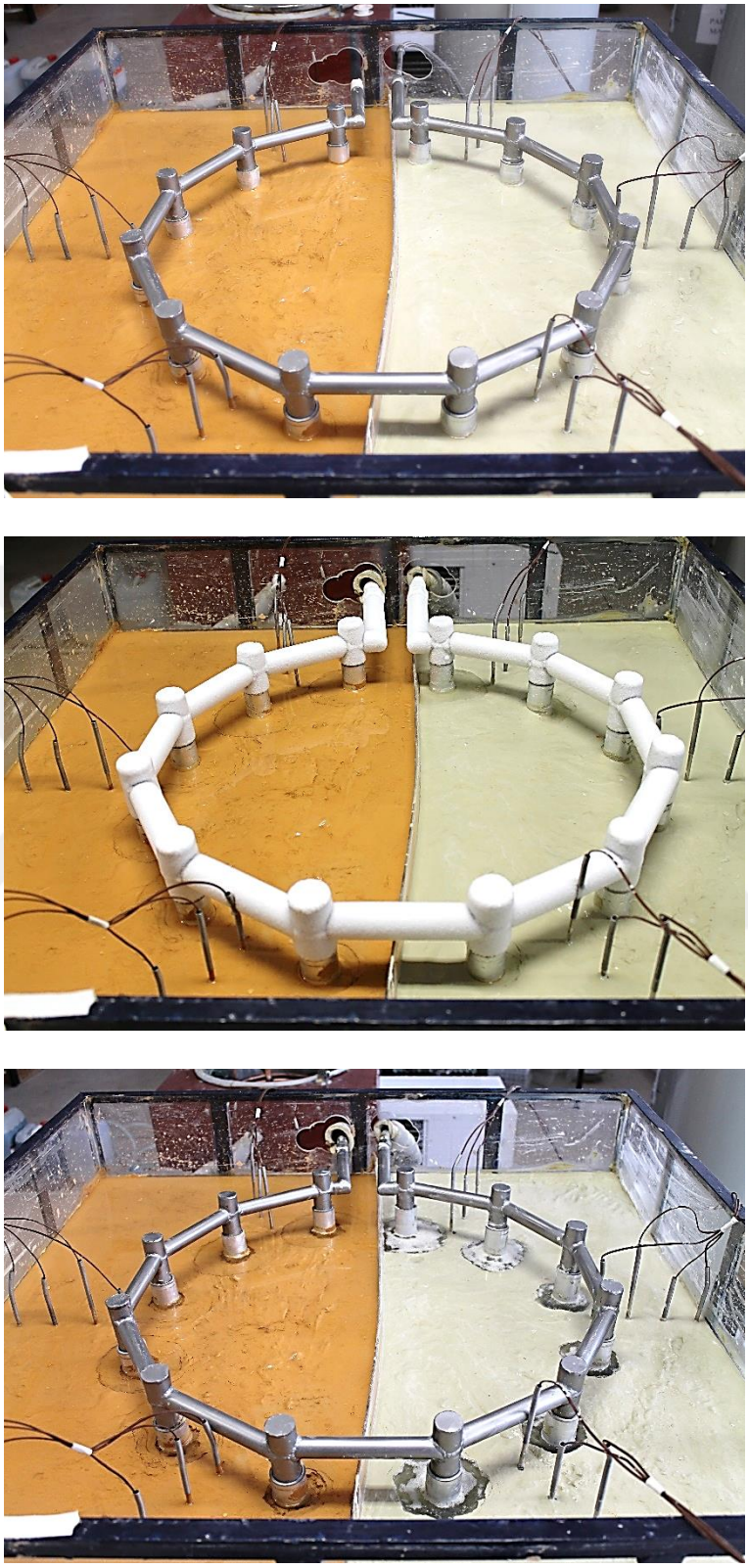
Şekil E3.12. *ML Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Küçük Boy Boru*

EK - 4

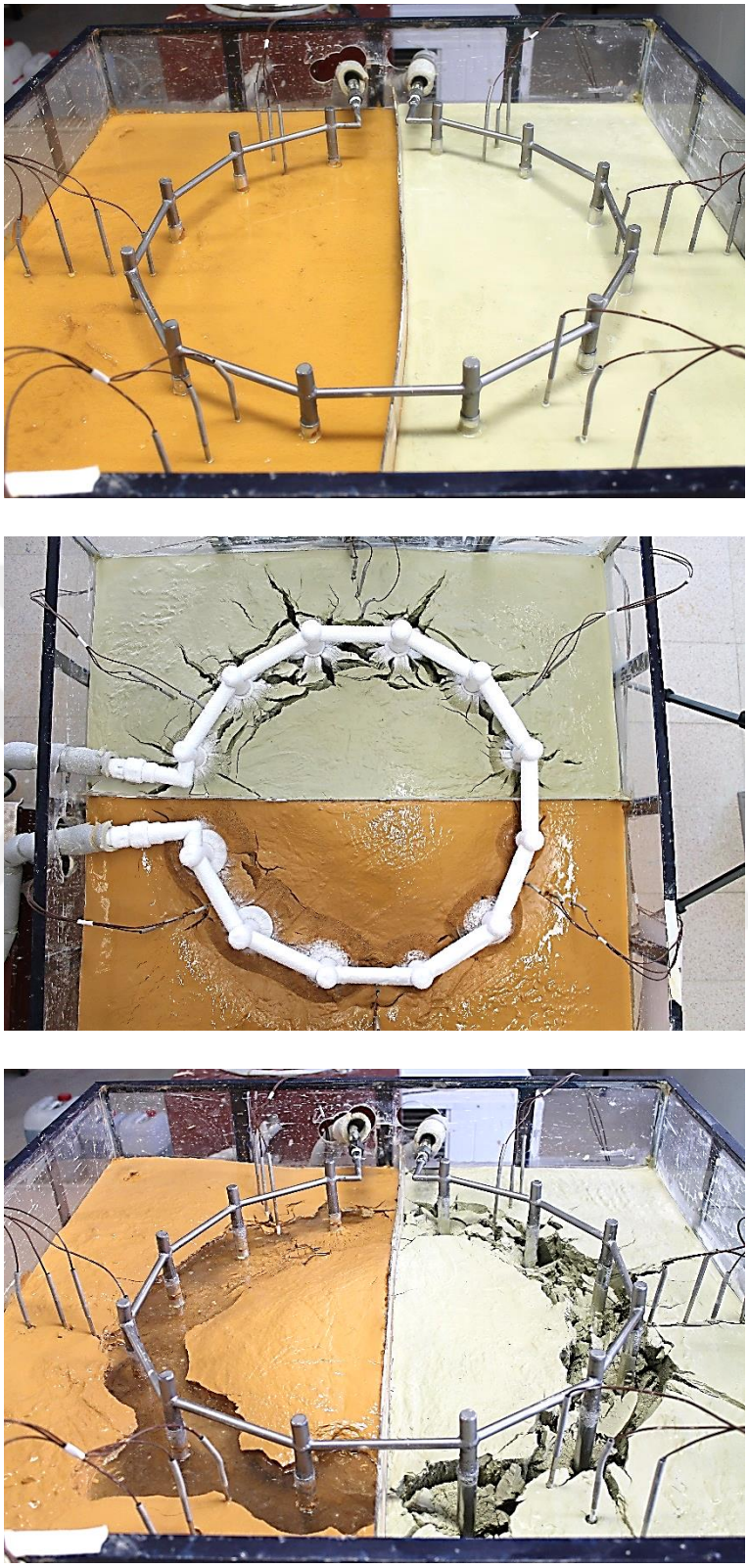
Alüminyum Borulama Sistemindeki Donma – Çözülme Aşamaları (SERİ 2)



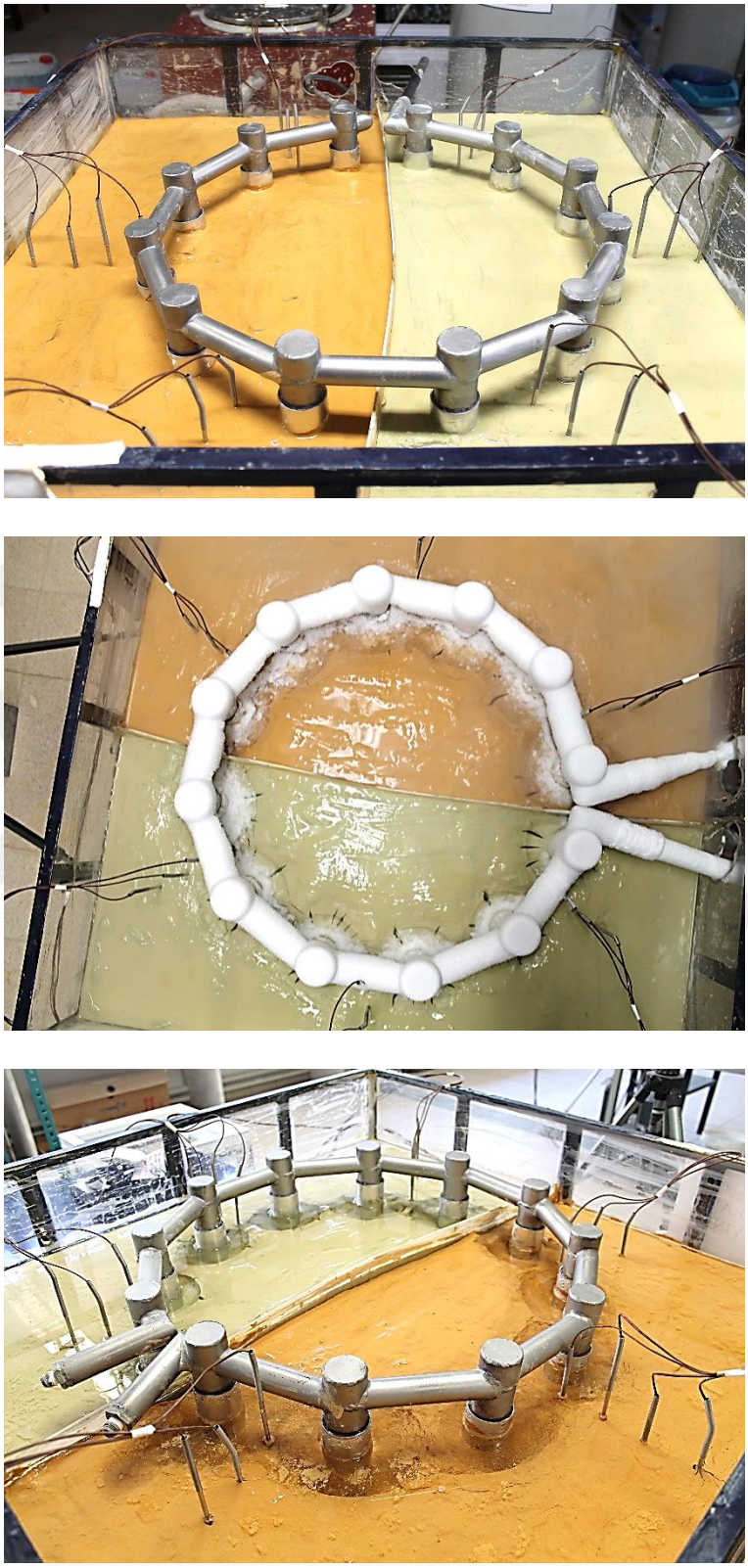
Görsel E4.1. *Antifriz Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Büyük Boy Alüminyum Boru*



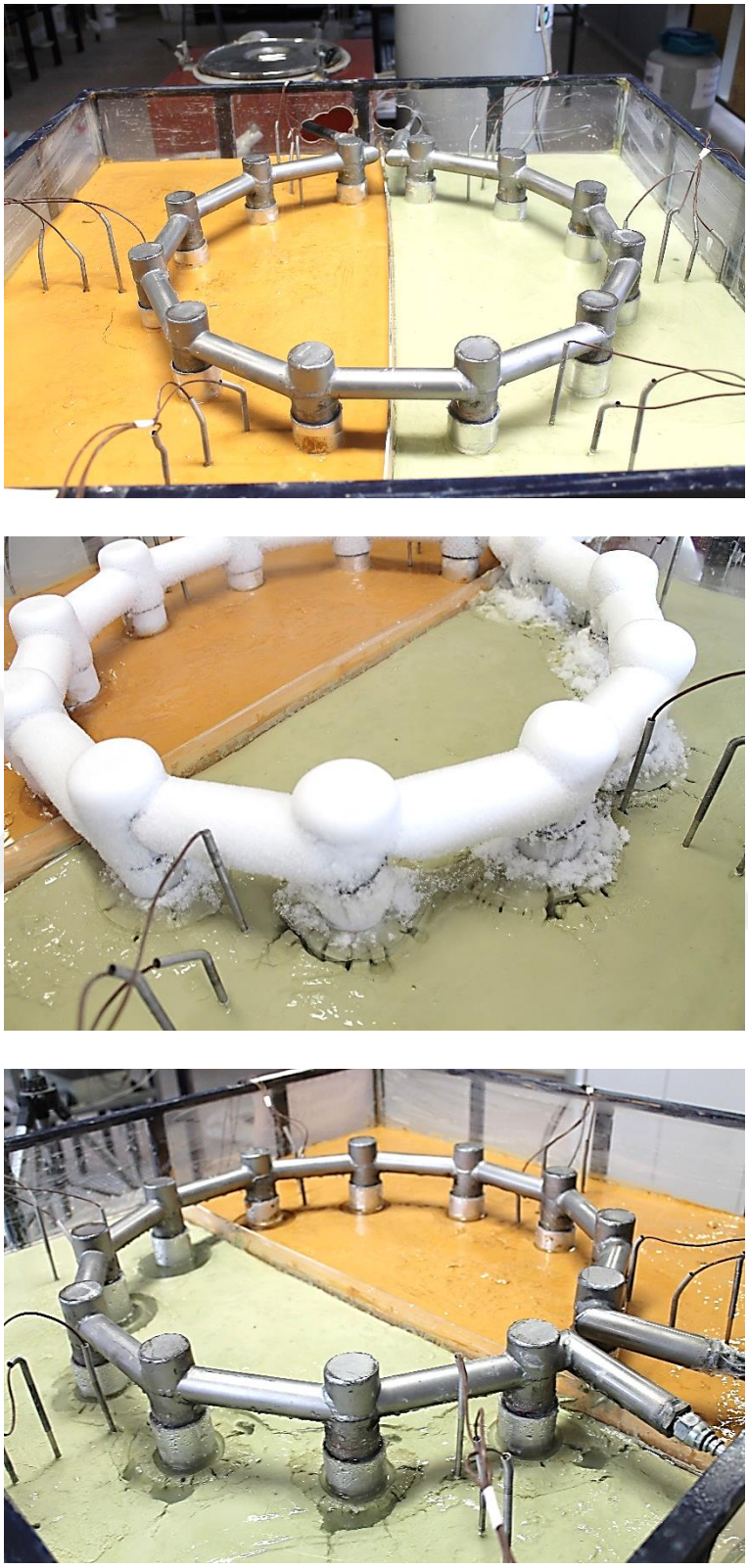
Görsel E4.2. *Antifriz Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Orta Boy Alüminyum Boru*



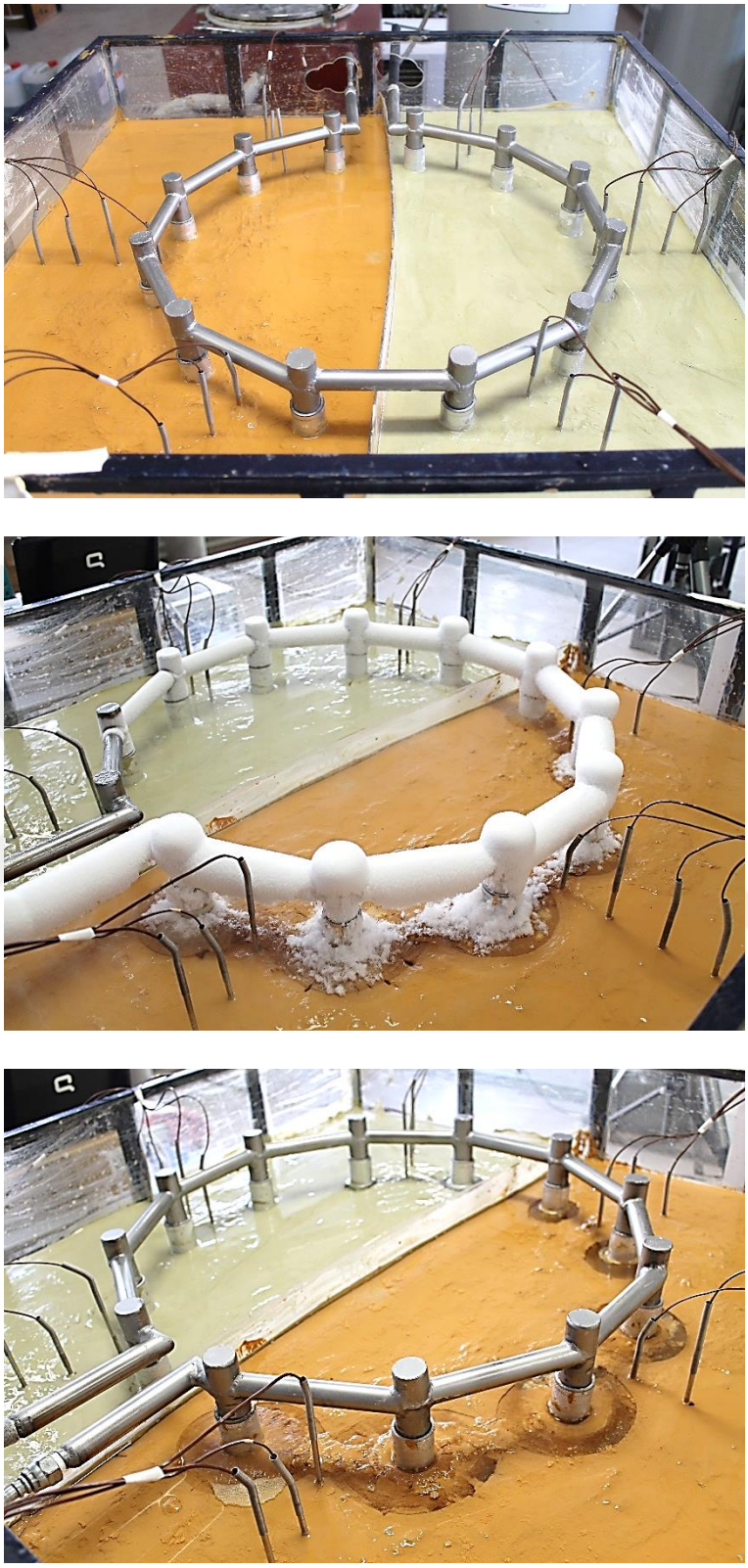
Görsel E4.3. *Antifriz Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Küçük Boy Alüminyum Boru*



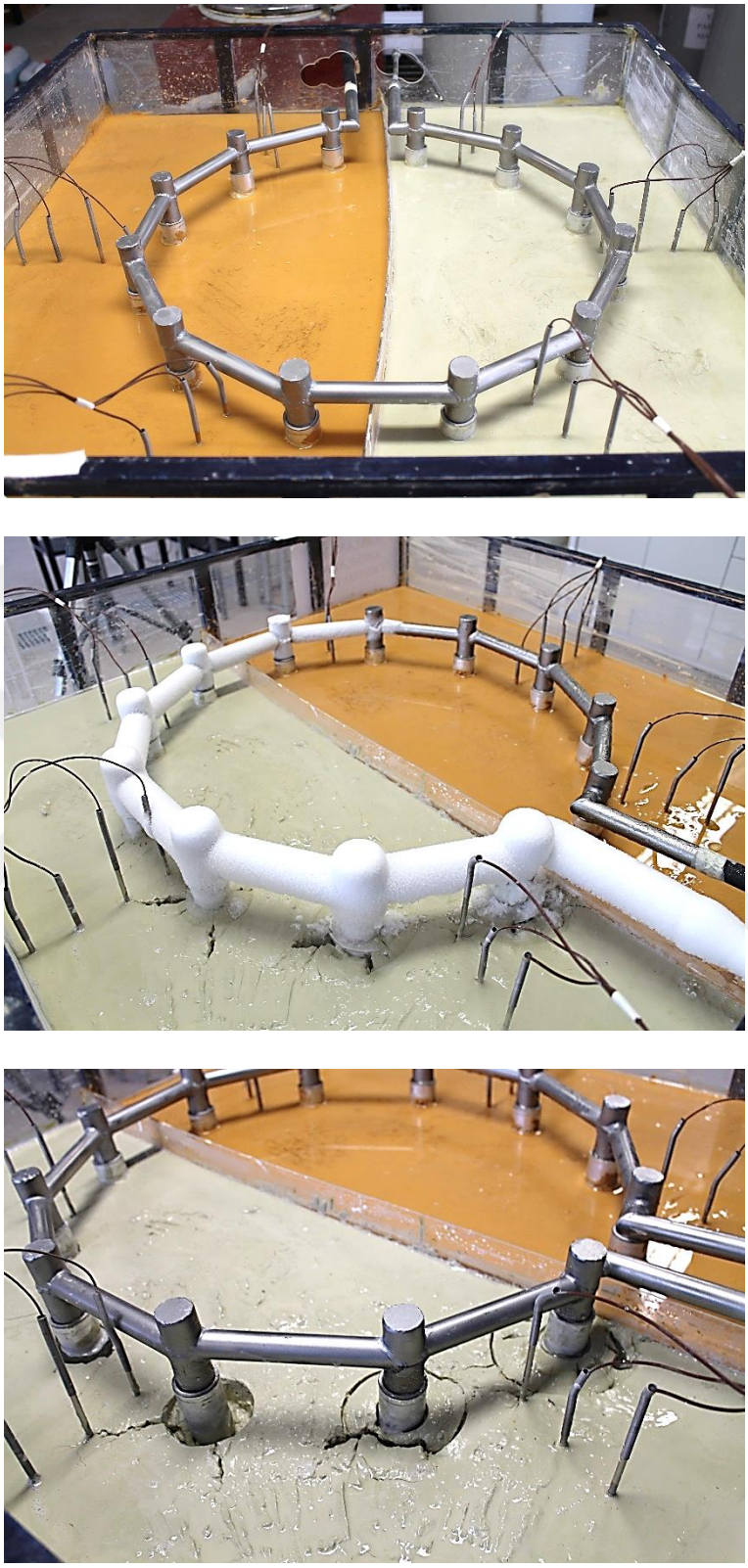
Görsel E4.4. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Büyük Boy Alüminyum Boru – CL Tipi Numune*



Görsel E4.5. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Büyük Boy Alüminyum Boru – ML Tipi Numune*

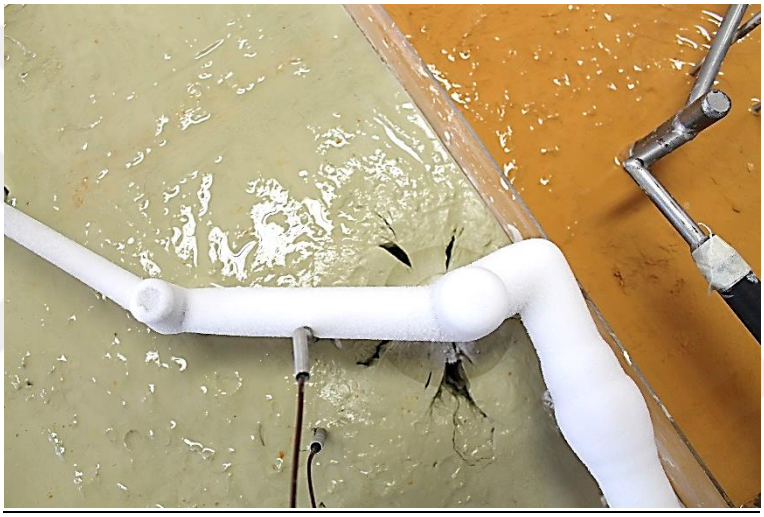


Görsel E4.6. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Orta Boy Alüminyum Boru – CL Tipi Numune*



Görsel E4.7. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Orta Boy Alüminyum Boru – ML Tipi Numune*

Görsel E4.8. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Küçük Boy Alüminyum Boru – CL Tipi Numune*

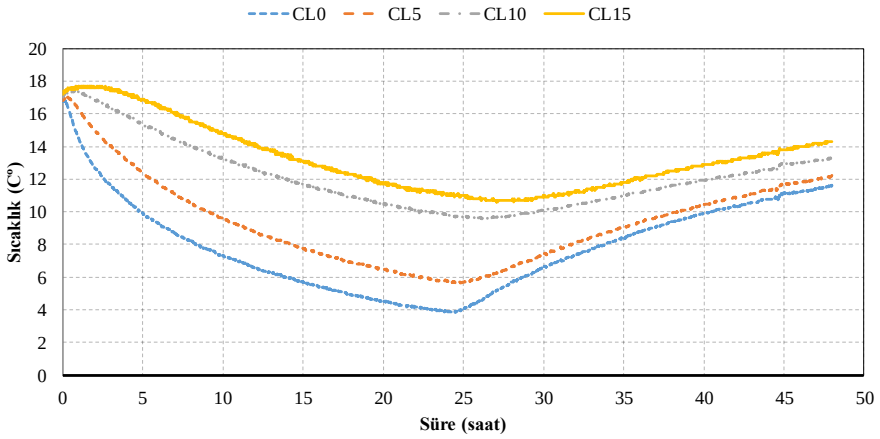


Görsel E4.9. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Küçük Boy Alüminyum Boru – ML Tipi Numune*

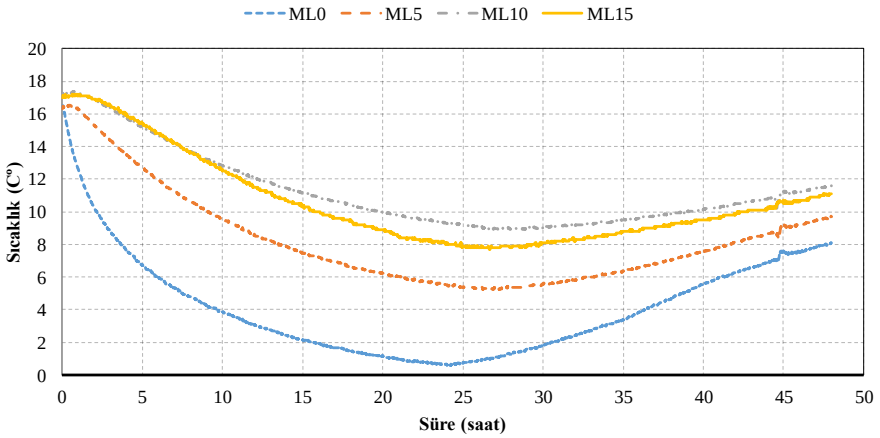
EK - 5

Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) Borulama Sisteminin Süreye Bağlı Sıcaklık Değişimi Grafikleri

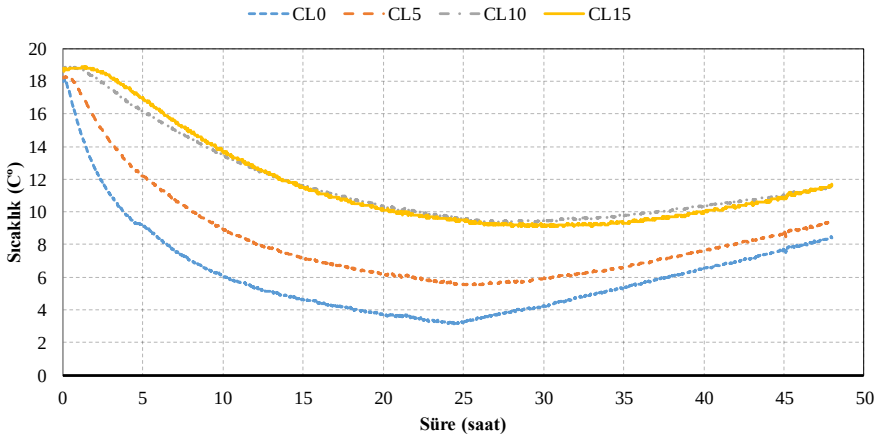
(SERİ 3)



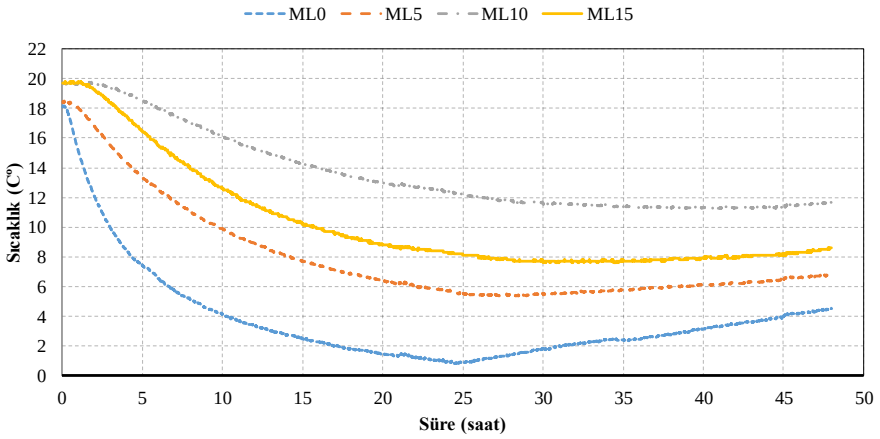
Şekil E5.1. *CL Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Büyük Boy Boru*



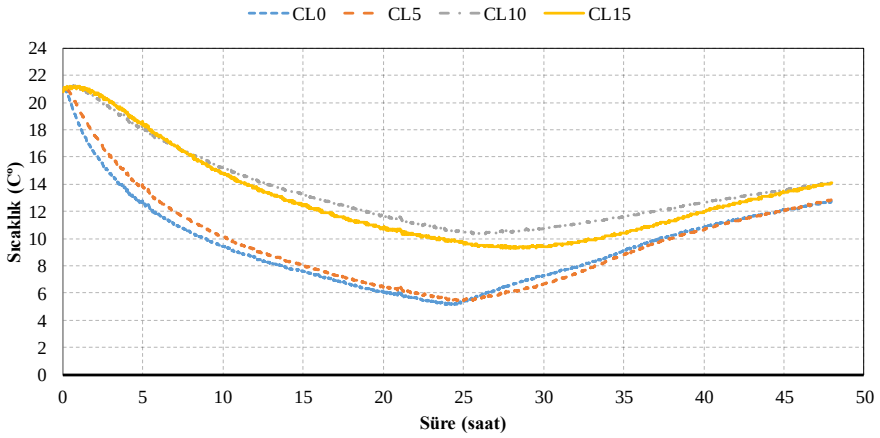
Şekil E5.2. *ML Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Büyük Boy Boru*



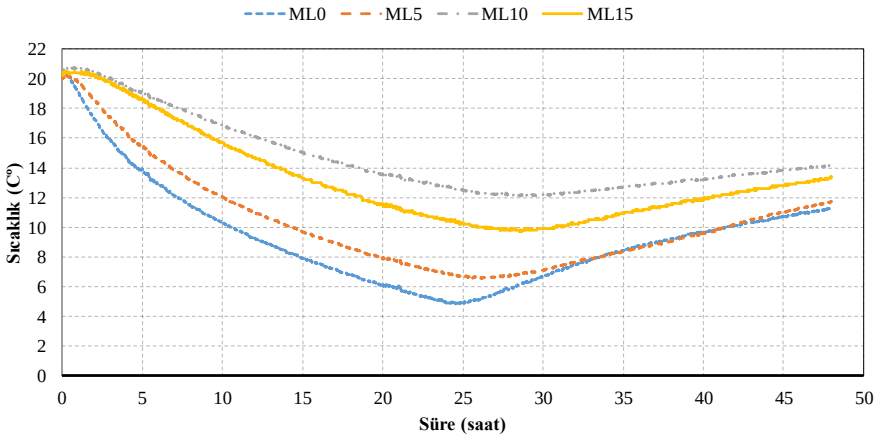
Şekil E5.3. *CL Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Orta Boy Boru*



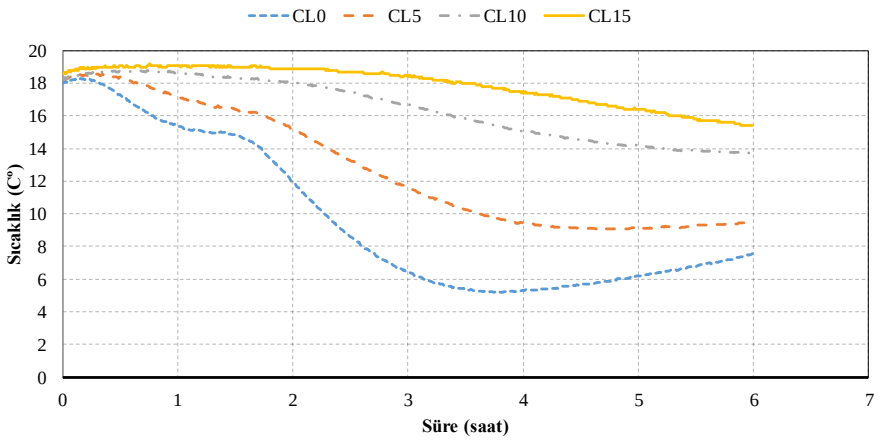
Şekil E5.4. *ML Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Orta Boy Boru*



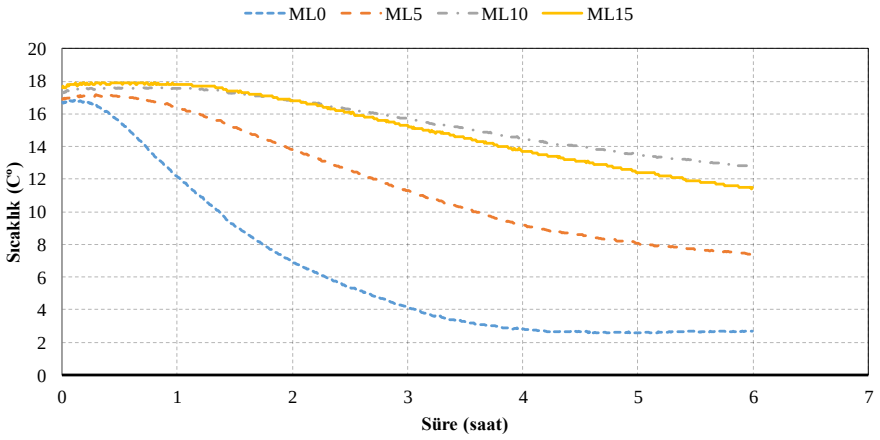
Şekil E5.5. *CL Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Küçük Boy Boru*



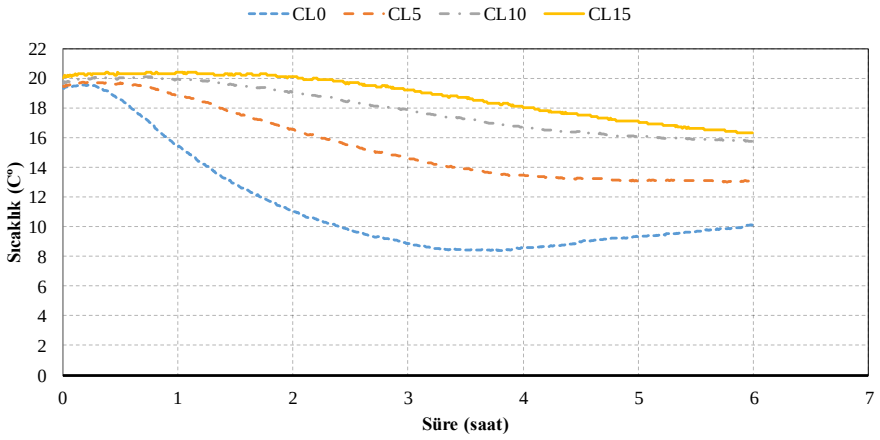
Şekil E5.6. *ML Tipi Zeminde Antifriz Dolaşımı İle YZD – Küçük Boy Boru*



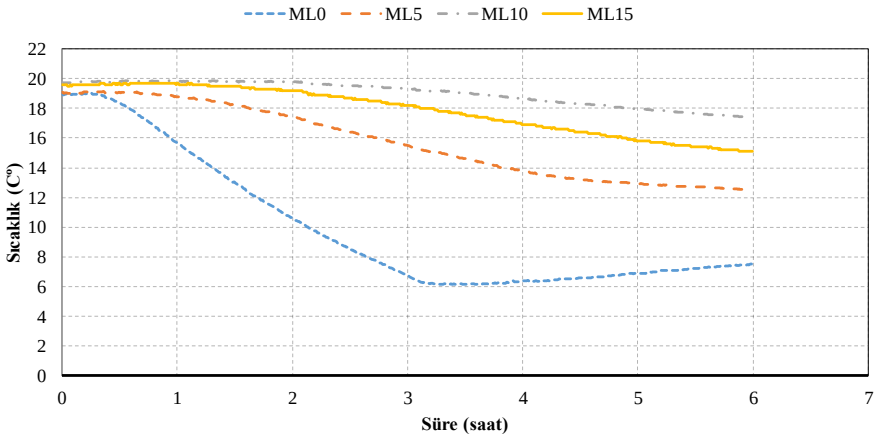
Şekil E5.7. *CL Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Büyük Boy Boru*



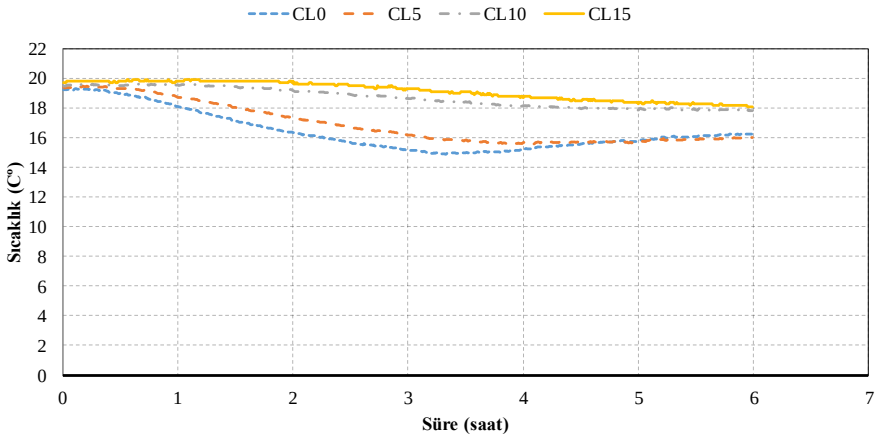
Şekil E5.8. *ML Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Büyük Boy Boru*



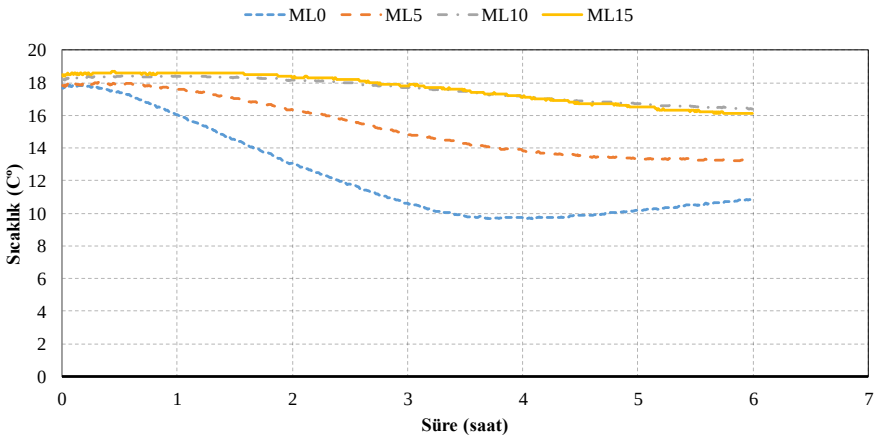
Şekil E5.9. *CL Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Orta Boy Boru*



Şekil E5.10. *ML Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Orta Boy Boru*



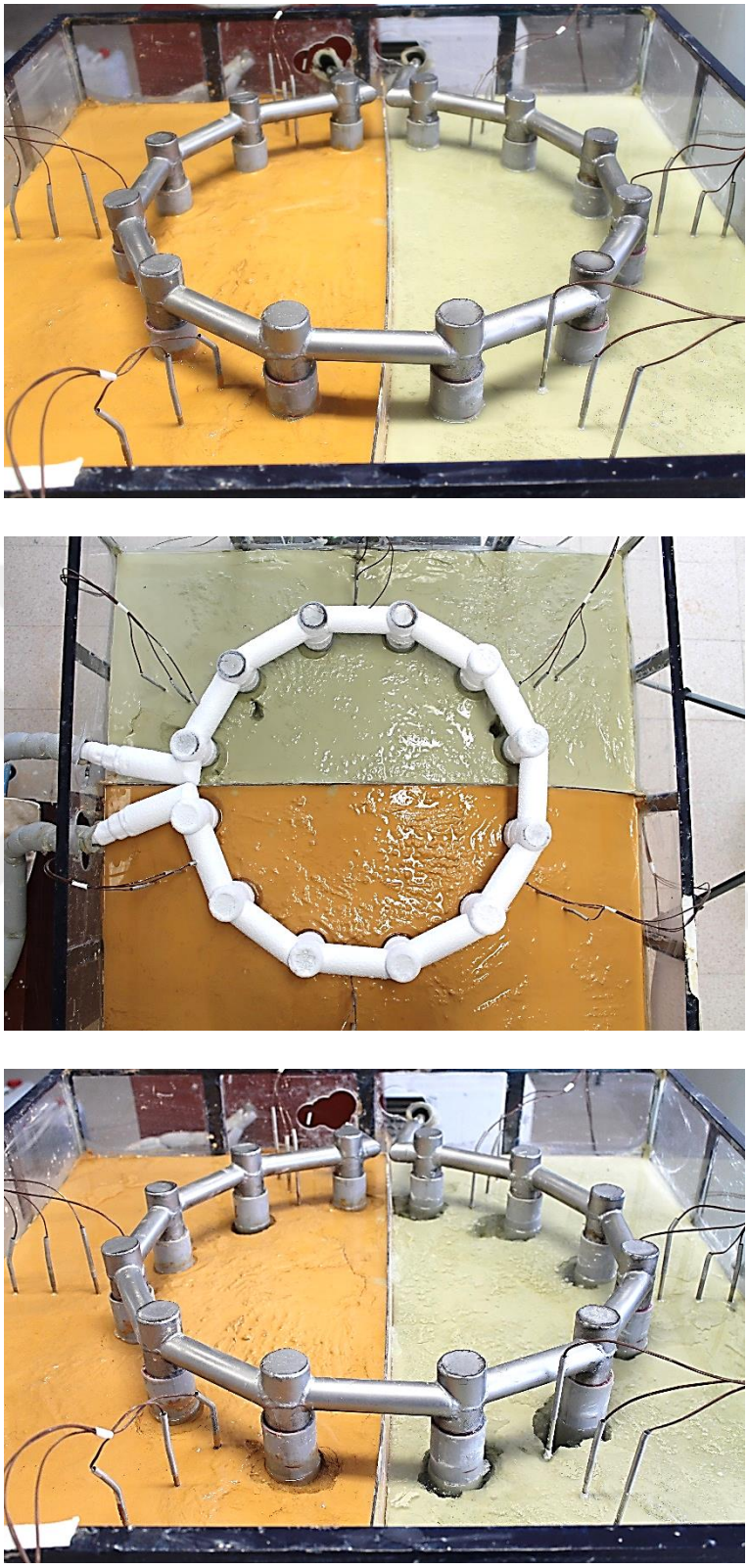
Şekil E5.11. *CL Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Küçük Boy Boru*



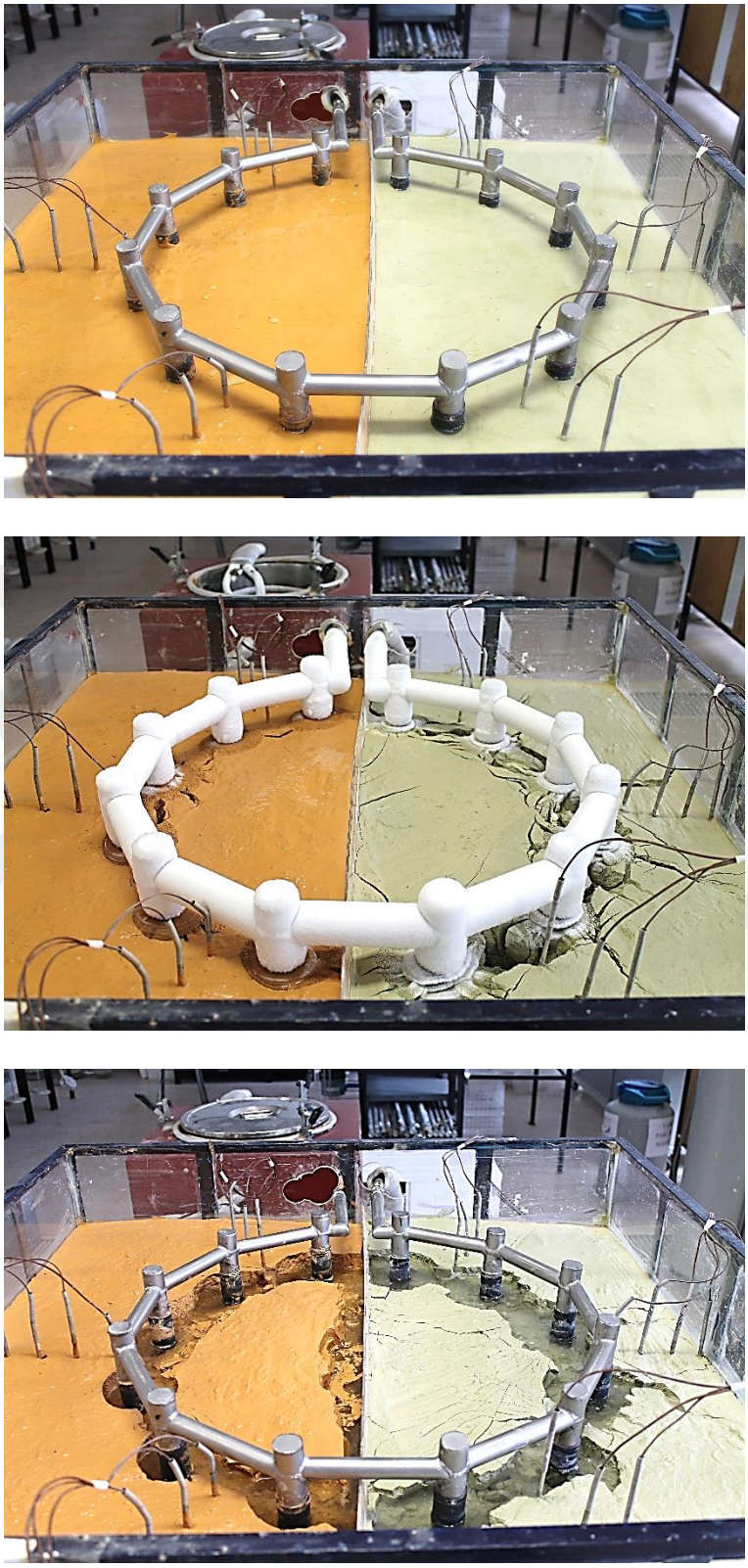
Şekil E5.12. *ML Tipi Zeminde Sıvı Azot Dolaşımı İle YZD – Küçük Boy Boru*

EK - 6

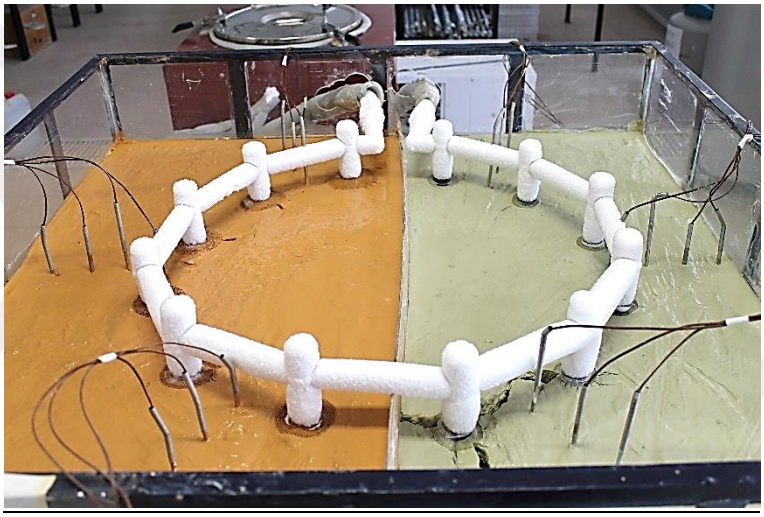
Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) Borulama Sistemindeki Donma – Çözülme Aşamaları (SERİ 3)



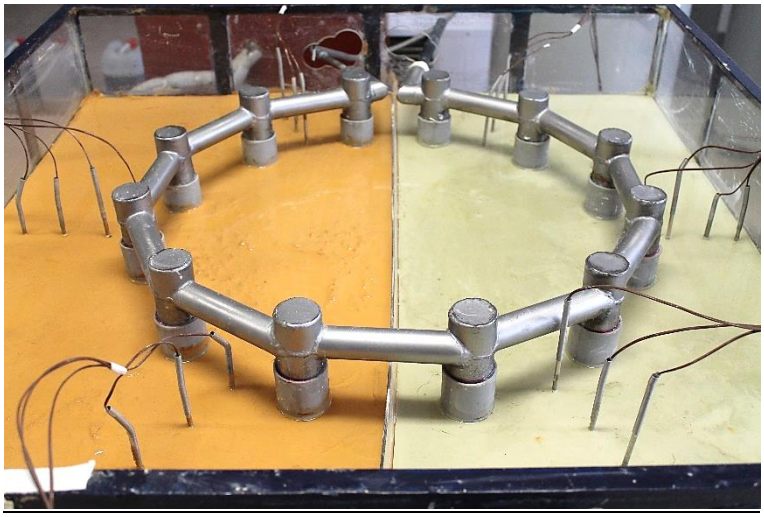
Görsel E6.1. *Antifriz Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Büyük Boy HDPE Boru*

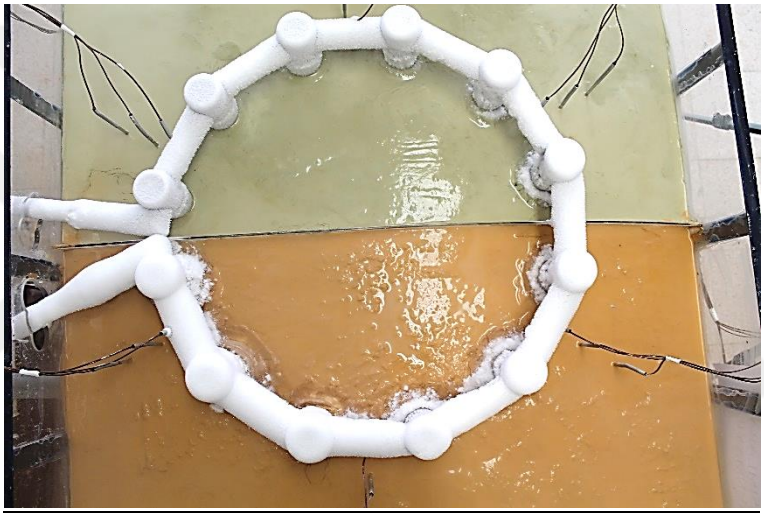


Görsel E6.2. *Antifriz Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Orta Boy HDPE Boru*

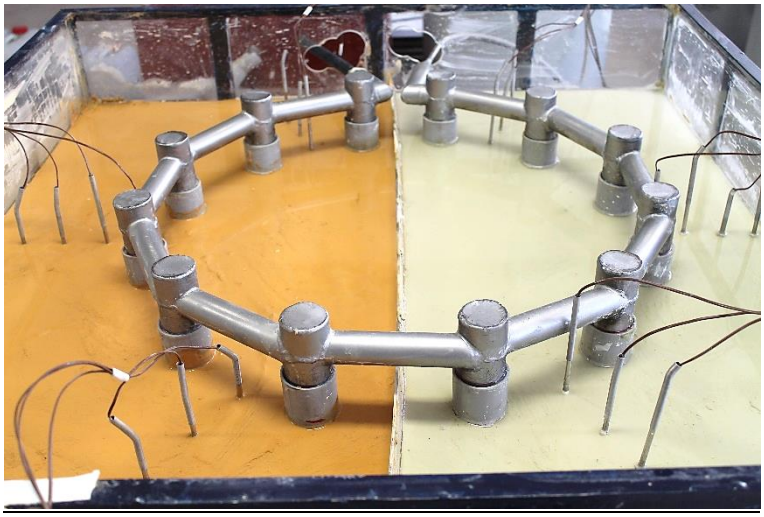


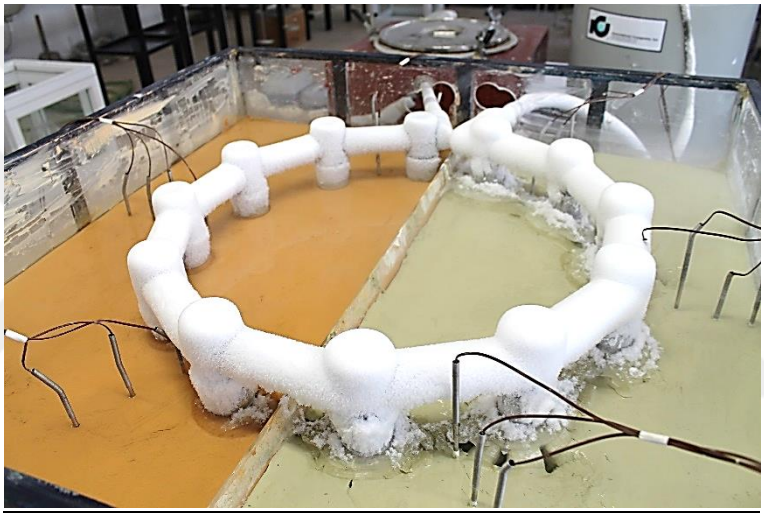
Görsel E6.3. *Antifriz Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Küçük Boy HDPE Boru*



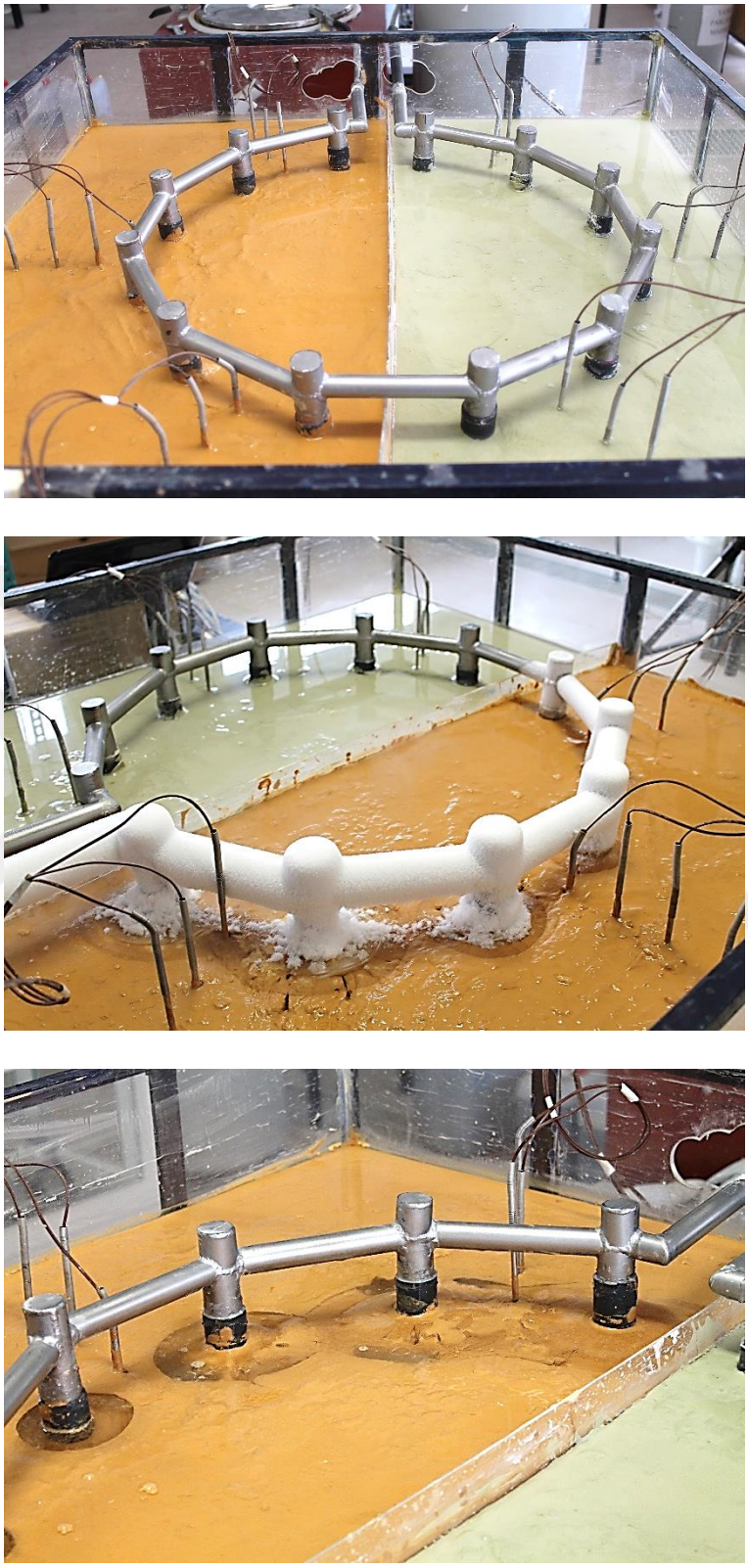


Görsel E6.4. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Büyük Boy HDPE Boru – CL Tipi Numune*

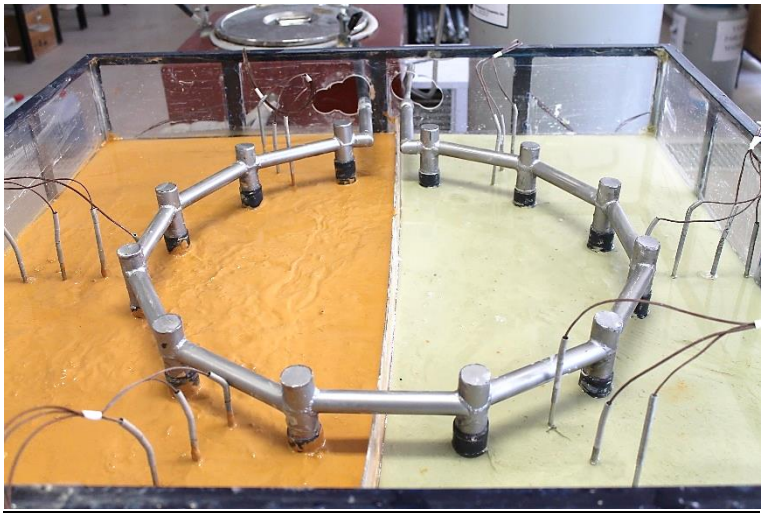




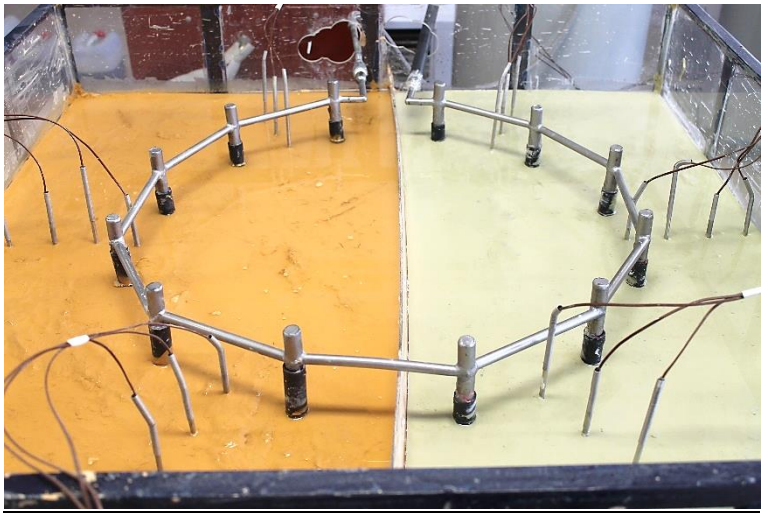
Görsel E6.5. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Büyük Boy HDPE Boru – ML Tipi Numune*

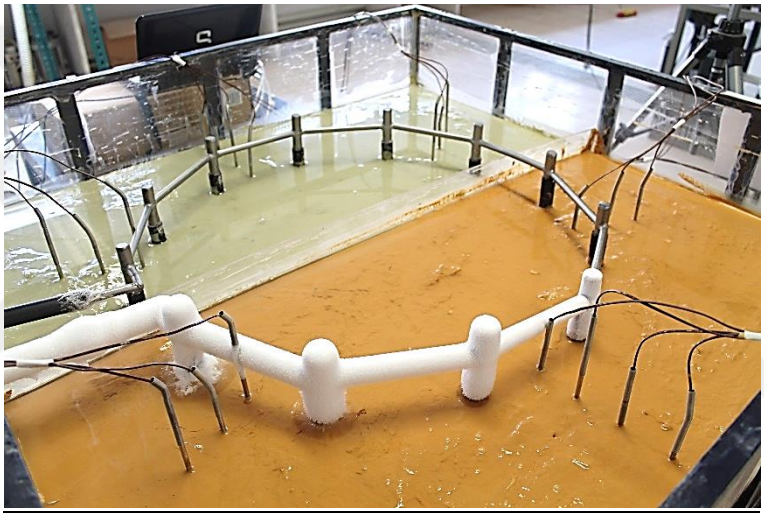


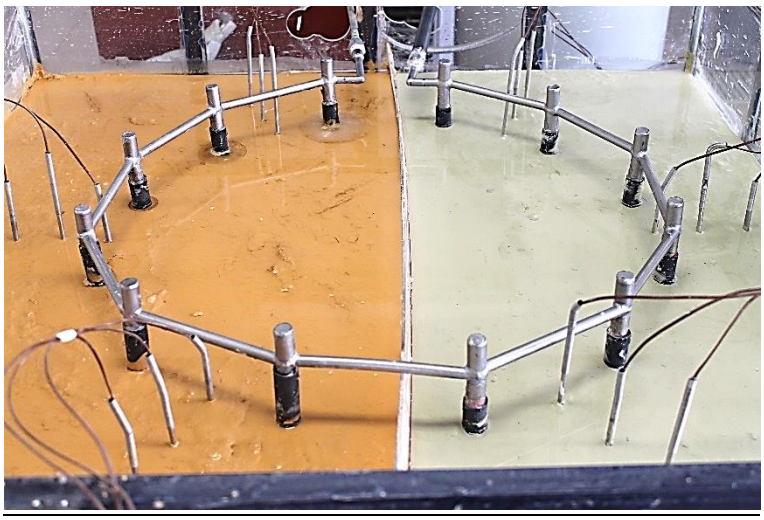
Görsel E6.6. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Orta Boy HDPE Boru – CL Tipi Numune*



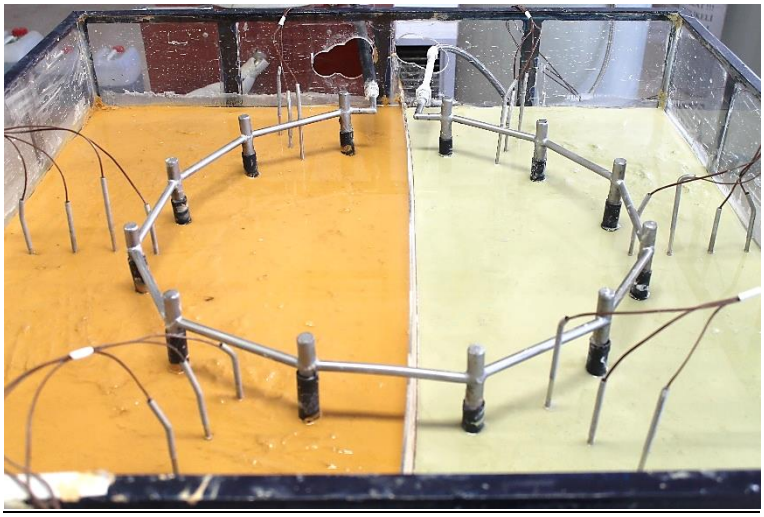
Görsel E6.7. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Orta Boy HDPE Boru – ML Tipi Numune*

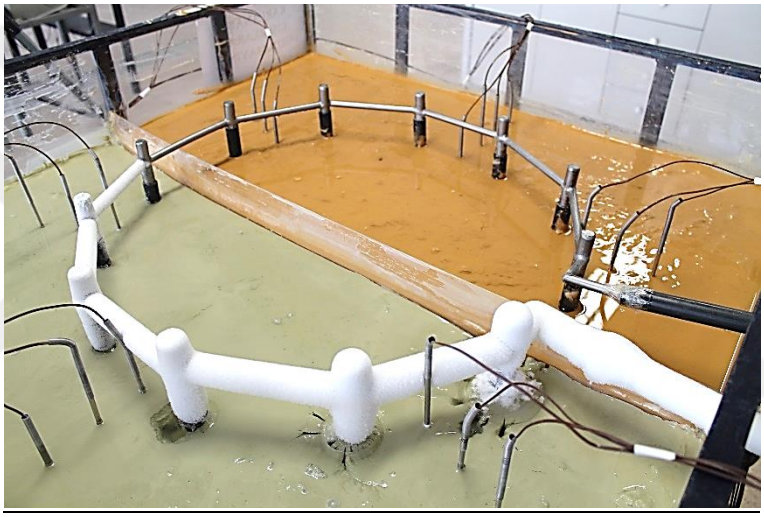






Görsel E6.8. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Küçük Boy HDPE Boru – CL Tipi Numune*

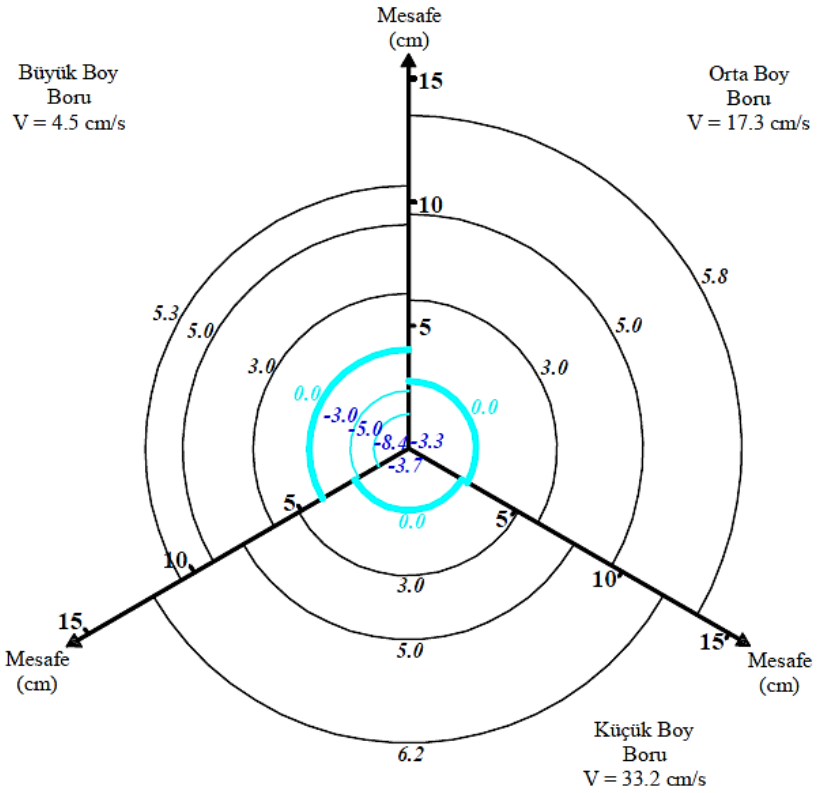




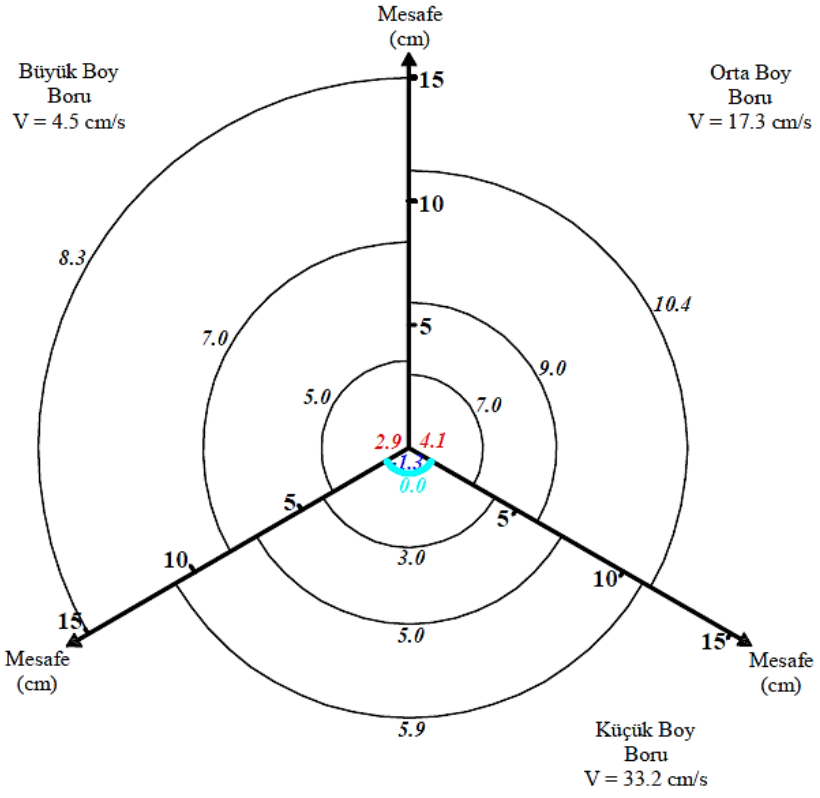
Görsel E6.9. *Sıvı Azot Dolaşımı ile YZD; Sırasıyla Donma Öncesi, Donma Sonu ve Çözülme Sonu – Küçük Boy HDPE Boru – ML Tipi Numune*

EK - 7

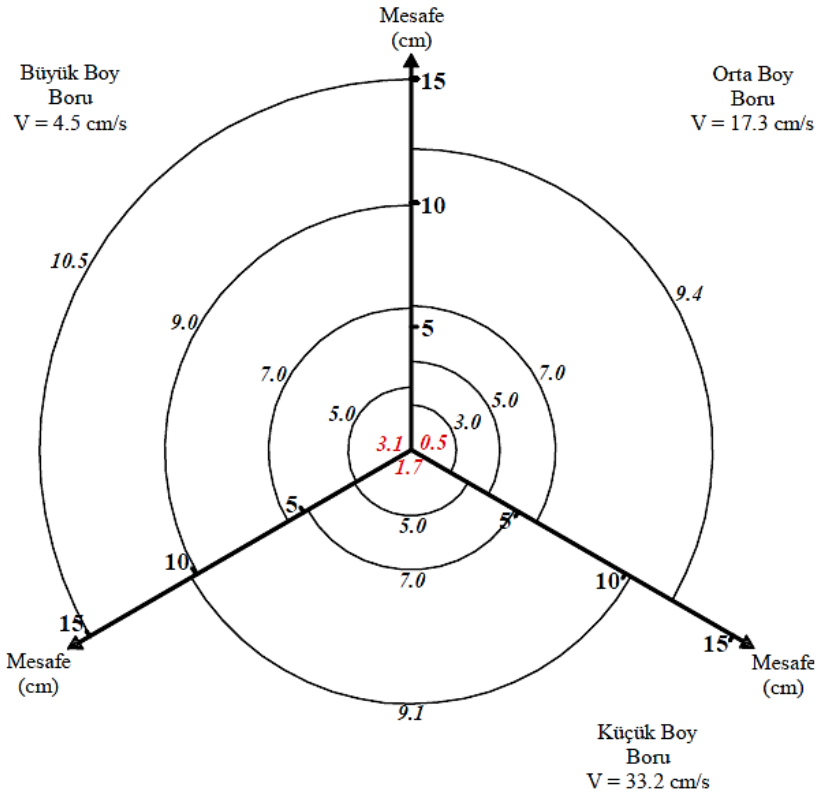
Isıl Eğriler



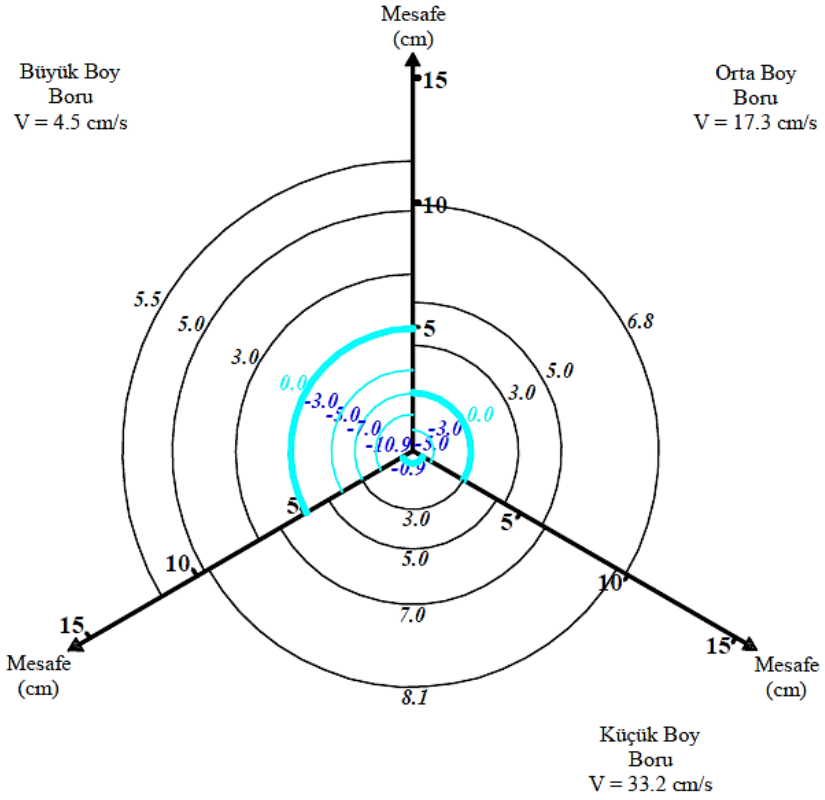
Şekil E7.1. *CL Zeminde, Paslanmaz Çelik Borudan, Antifriz Dolaşımı Sonucunda*



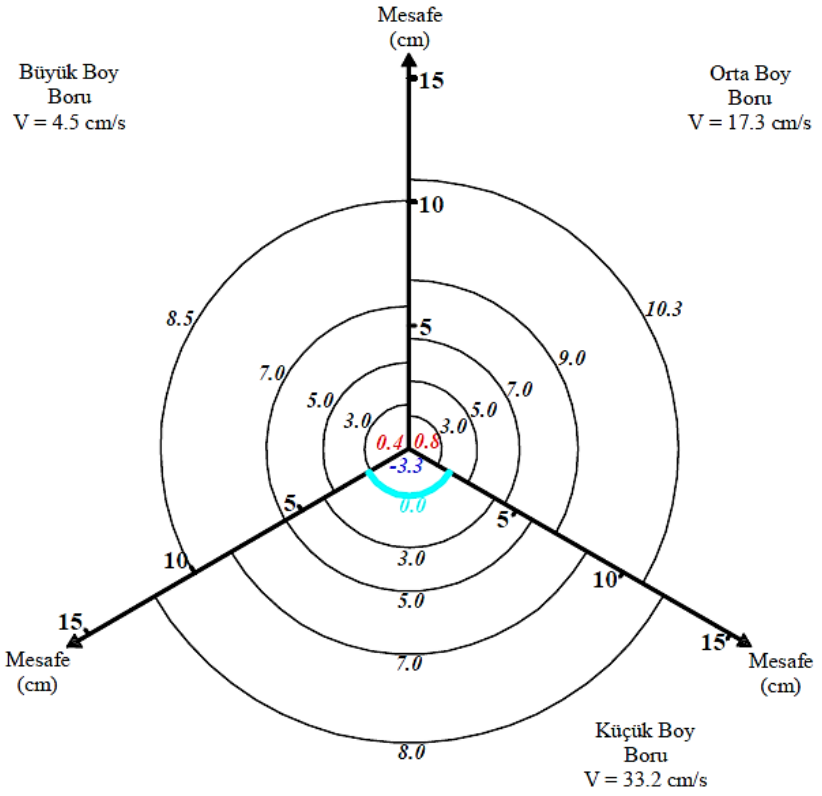
Şekil E7.2. *CL Zeminde, Alüminyum Borudan, Antifriz Dolaşımı Sonucu*



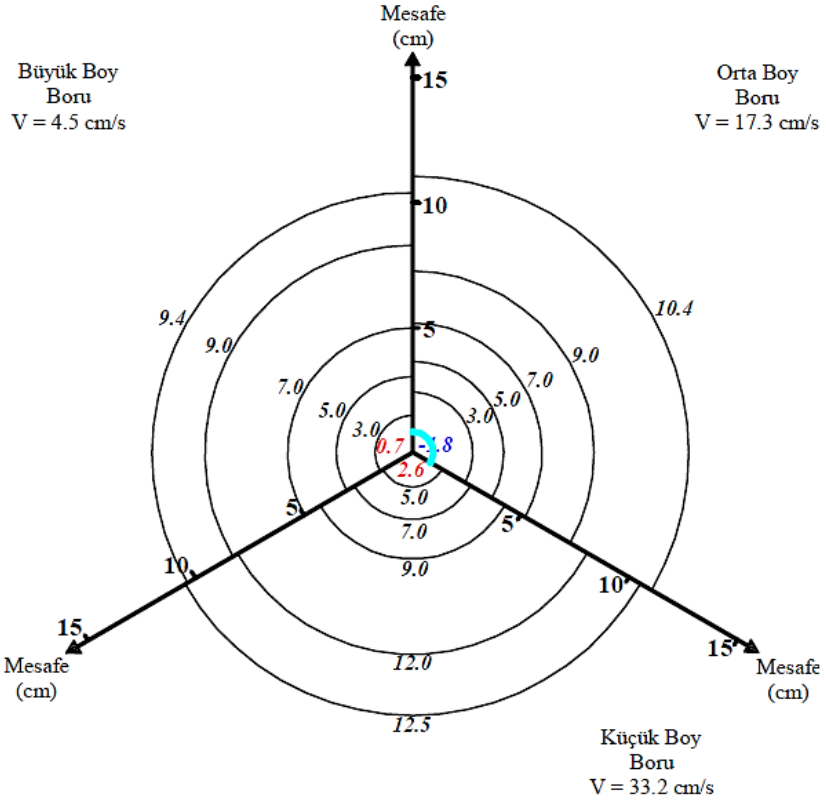
Şekil E7.3. *CL Zeminde, Hdpe Borudan, Antifriz Dolaşımı Sonucu*



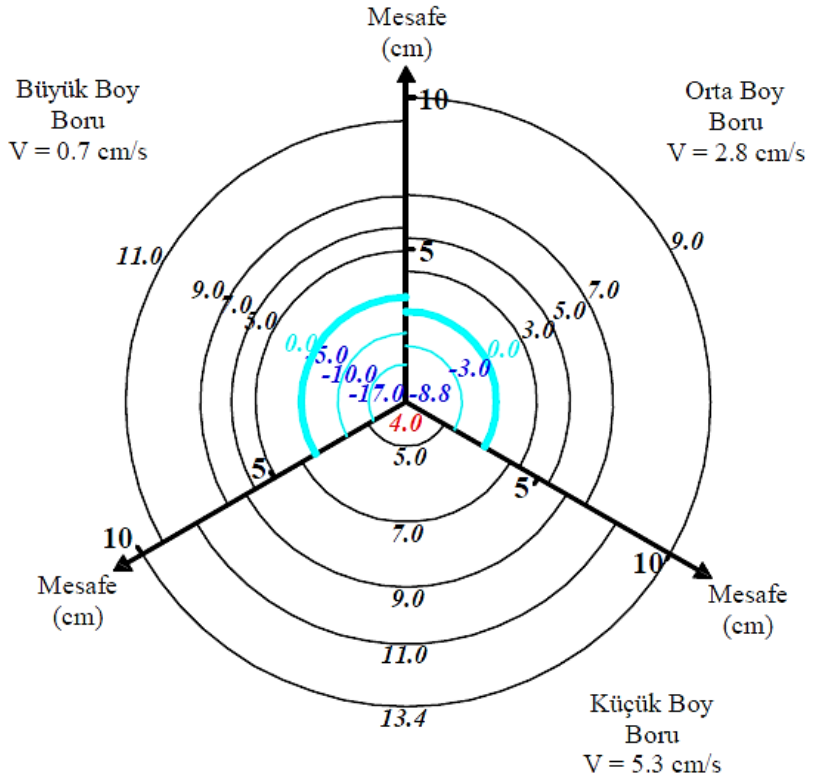
Şekil E7.4. *ML Zeminde, Paslanmaz Çelik Borudan, Antifriz Dolaşımı Sonucu*



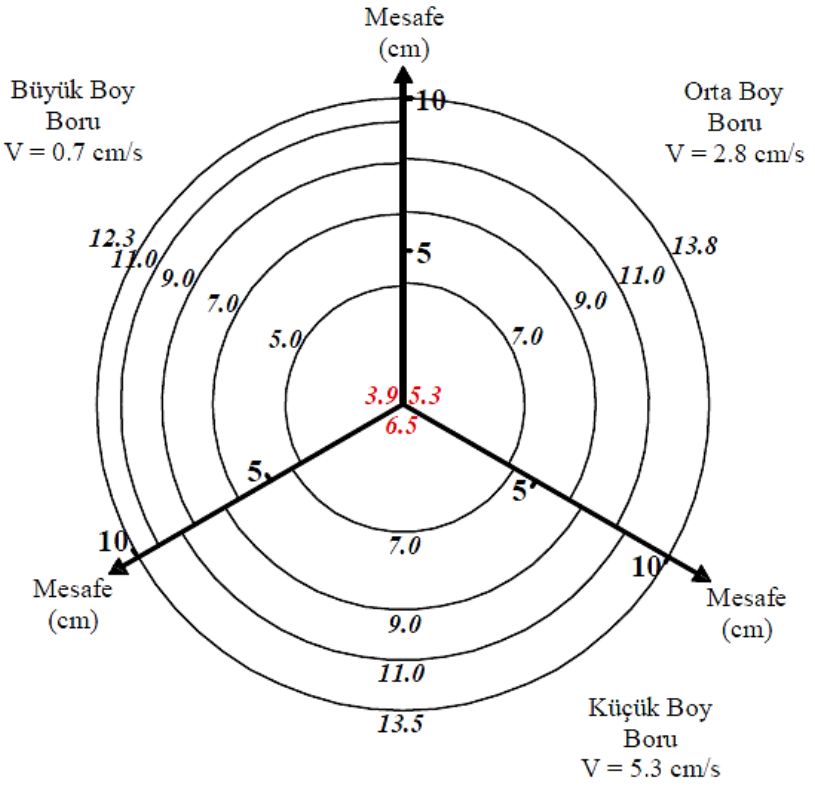
Şekil E7.5. *ML Zeminde, Alüminyum Borudan, Antifriz Dolaşımı Sonucu*



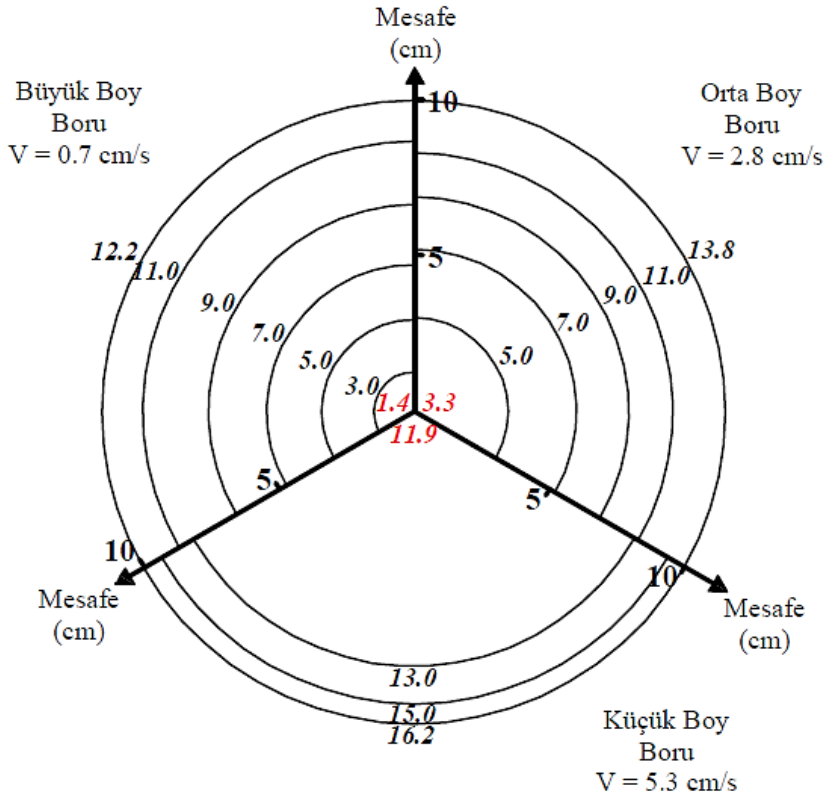
Şekil E7.6. *ML Zeminde, Hdpe Borudan, Antifriz Dolaşımı Sonucu*



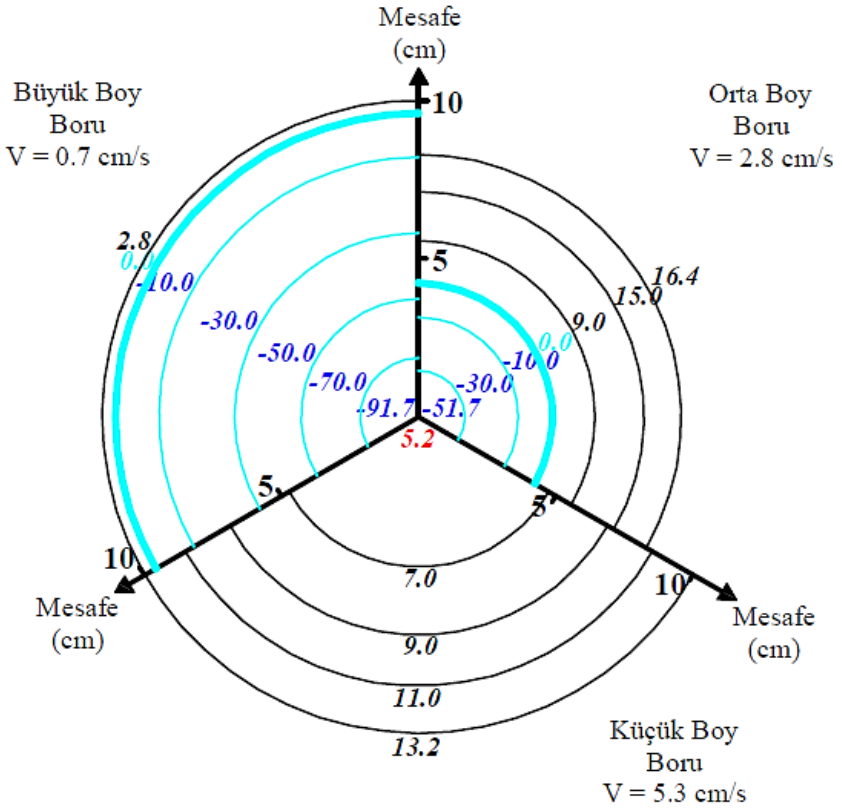
Şekil E7.7. *CL Zeminde, Paslanmaz Çelik Borudan, Sıvı Azot Dolaşımı Sonucu*



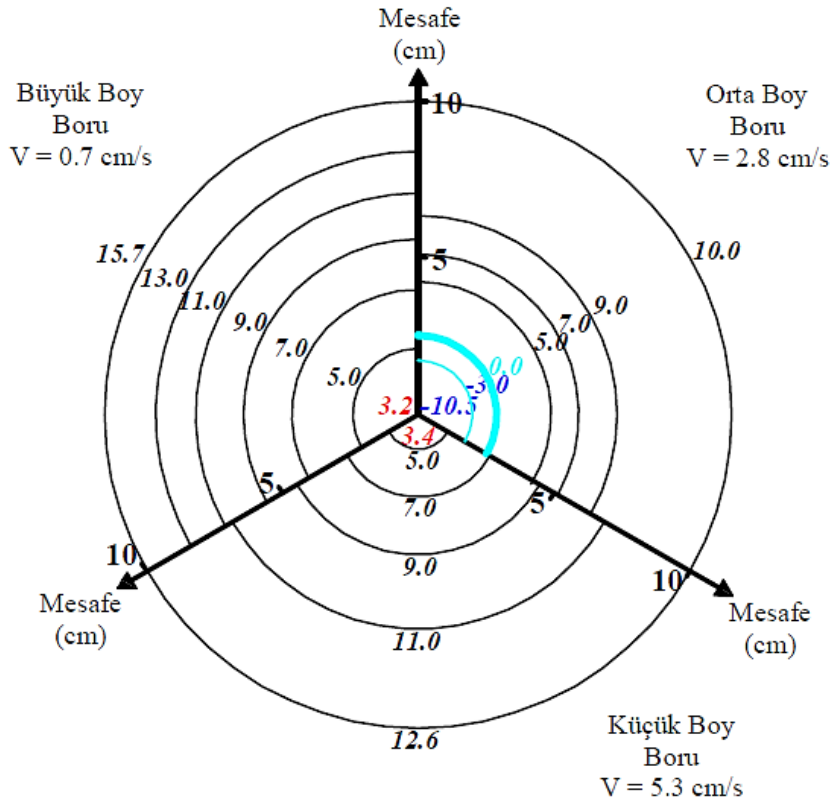
Şekil E7.8. *CL Zeminde, Alüminyum Borudan, Sıvı Azot Dolaşımı Sonucu*



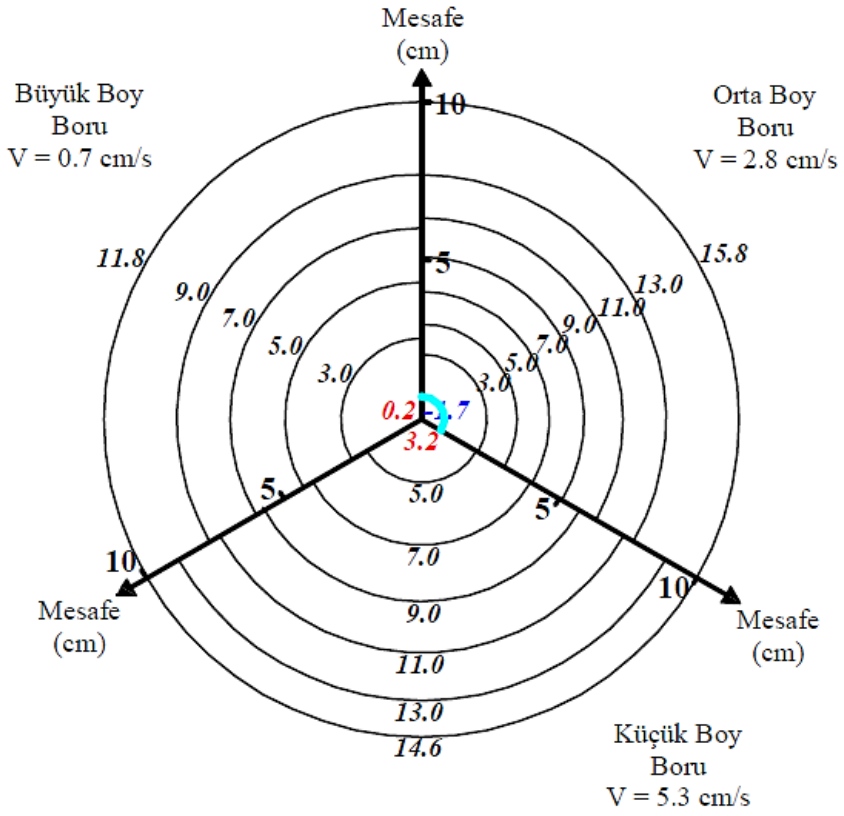
Şekil E7.9. *CL Zeminde, Hdpe Borudan, Sıvı Azot Dolaşımı Sonucu*



Şekil E7.10. *ML Zeminde, Paslanmaz Çelik Borudan, Sıvı Azot Dolaşımı Sonucu*



Şekil E7.11. *ML Zeminde, Alüminyum Borudan, Sıvı Azot Dolaşımı Sonucu*

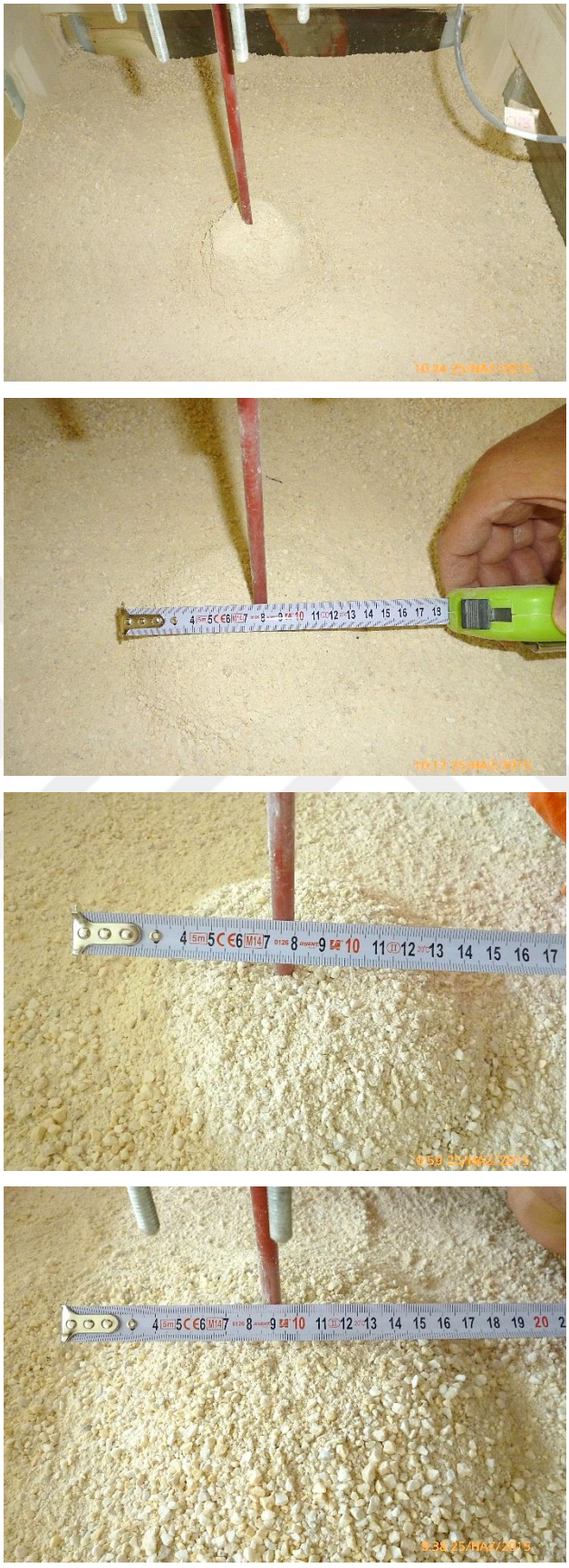


Şekil E7.12. *ML Zeminde, Hdpe Borudan, Sıvı Azot Dolaşımı Sonucu*

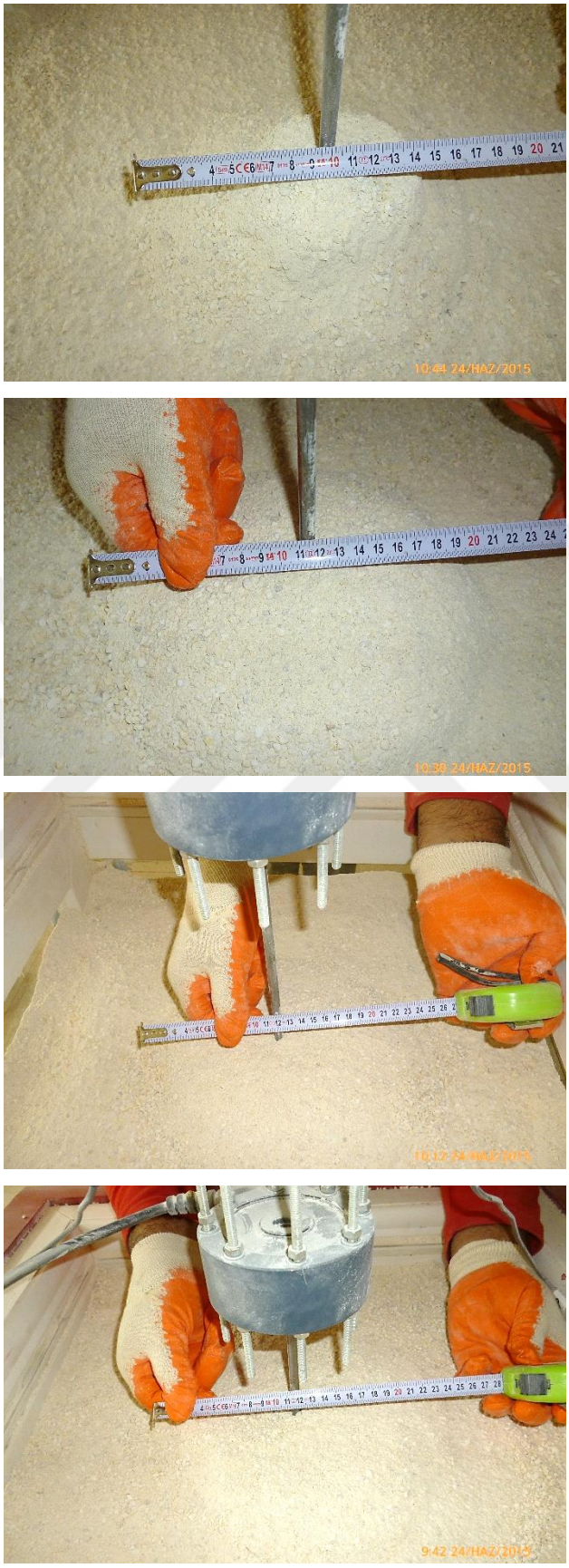
EK - 8

Gevşek Kumda Kaymaya Bağlı Yüzeyde Gözlenen Göçme Durumları (Laboratuvar)

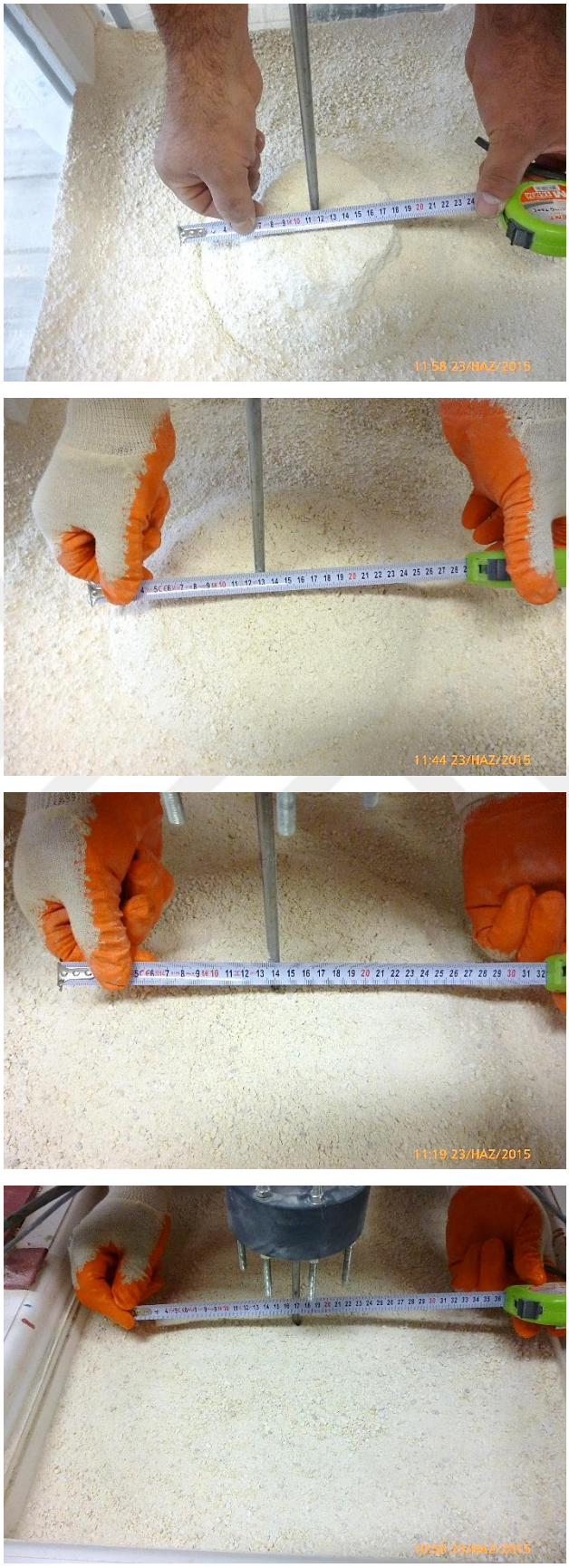
Görsel E8.1. *Gevşek Kuru Kumda 5 cm Çap İçin Sırasıyla 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 Ankraj Derinliği / Ankraj Çapı Oranlarında Yüzeydeki Göçme Durumları*



Görsel E8.2. *Gevşek Kuru Kumda 10 cm Çap İçin Sırasıyla 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 Ankraj Derinliği / Ankraj Çapı Oranlarında Yüzeydeki Göçme Durumları*



Görsel E8.3. *Gevşek Kuru Kumda 15 cm Çap İçin Sırasıyla 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 Ankraj Derinliği / Ankraj Çapı Oranlarında Yüzeydeki Göçme Durumları*



Görsel E8.4. *Gevşek Kuru Kumda 20 cm Çap İçin Sırasıyla 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 Ankraj Derinliği / Ankraj Çapı Oranlarında Yüzeydeki Göçme Durumları*

EK - 9

Sıkı Kuru Kumda Kaymaya Bağlı Yüzeyde Gözlenen Göçme Durumları (Laboratuvar)

Görsel E9.1. *Sıkı Kuru Kumda 5 cm Çap İçin Sırasıyla 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 Ankraj Derinliği / Ankraj Çapı Oranlarında Yüzeydeki Göçme Durumları*

Görsel E9.2. *Sıkı Kuru Kumda 10 cm Çap İçin Sırasıyla 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 Ankraj Derinliği / Ankraj Çapı Oranlarında Yüzeydeki Göçme Durumları*

Görsel E9.3. *Sıkı Kuru Kumda 15 cm Çap İçin Sırasıyla 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 Ankraj Derinliği / Ankraj Çapı Oranlarında Yüzeydeki Göçme Durumları*

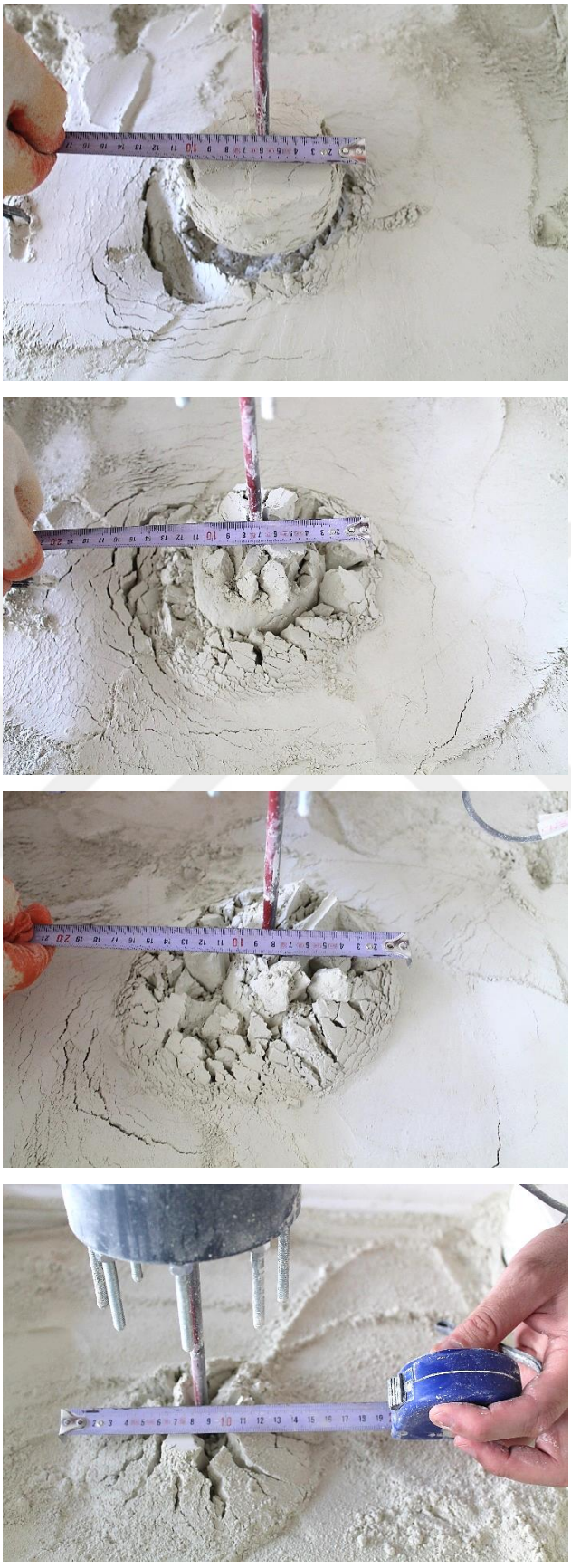
Görsel E9.4. *Sıkı Kuru Kumda 20 cm Çap İçin Sırasıyla 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 Ankraj Derinliği / Ankraj Çapı Oranlarında Yüzeydeki Göçme Durumları*

EK - 10

Kuru İnce Daneli Zeminlerde Kaymaya Bağlı Yüzeyde Gözlenen Göçme Durumları

(Laboratuvar)

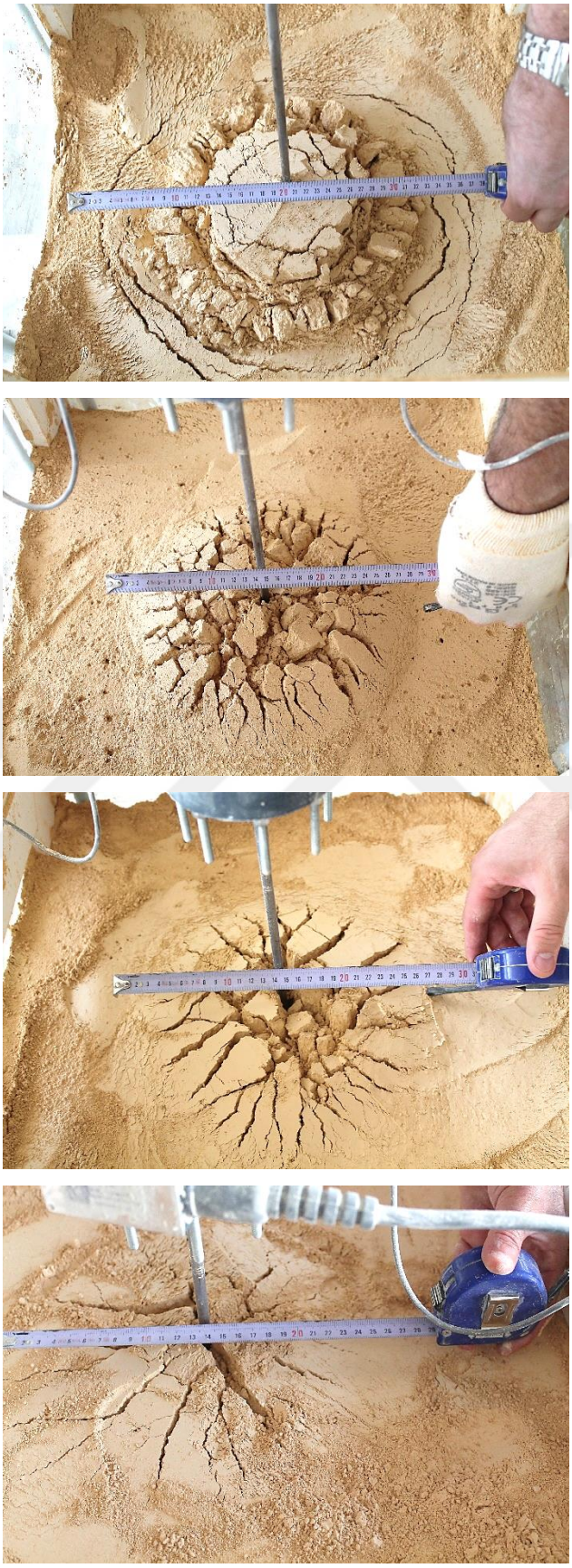
Görsel E10.1. *Kuru Siltte 5 cm Çap İçin Sırasıyla 1.0, 1.5 ve 2.0 Ankraj Derinliği / Ankraj Çapı Oranlarında Yüzeydeki Göçme Durumları*



Görsel E10.2. *Kuru Siltte 10 cm Çap İçin Sırasıyla 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 Ankraj Derinliği / Ankraj Çapı Oranlarında Yüzeydeki Göçme Durumları*

Görsel E10.3. *Kuru Siltte 15 cm Çap İçin Sırasıyla 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 Ankraj Derinliği / Ankraj Çapı Oranlarında Yüzeydeki Göçme Durumları*

Görsel E10.4. *Kuru Siltte 20 cm Çap İçin Sırasıyla 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 Ankraj Derinliği / Ankraj Çapı Oranlarında Yüzeydeki Göçme Durumları*



Görsel E10.5. *Kuru Kilde 20 cm Çap İçin Sırasıyla 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 Ankraj Derinliği / Ankraj Çapı Oranlarında Yüzeydeki Göçme Durumları*

EK - 11

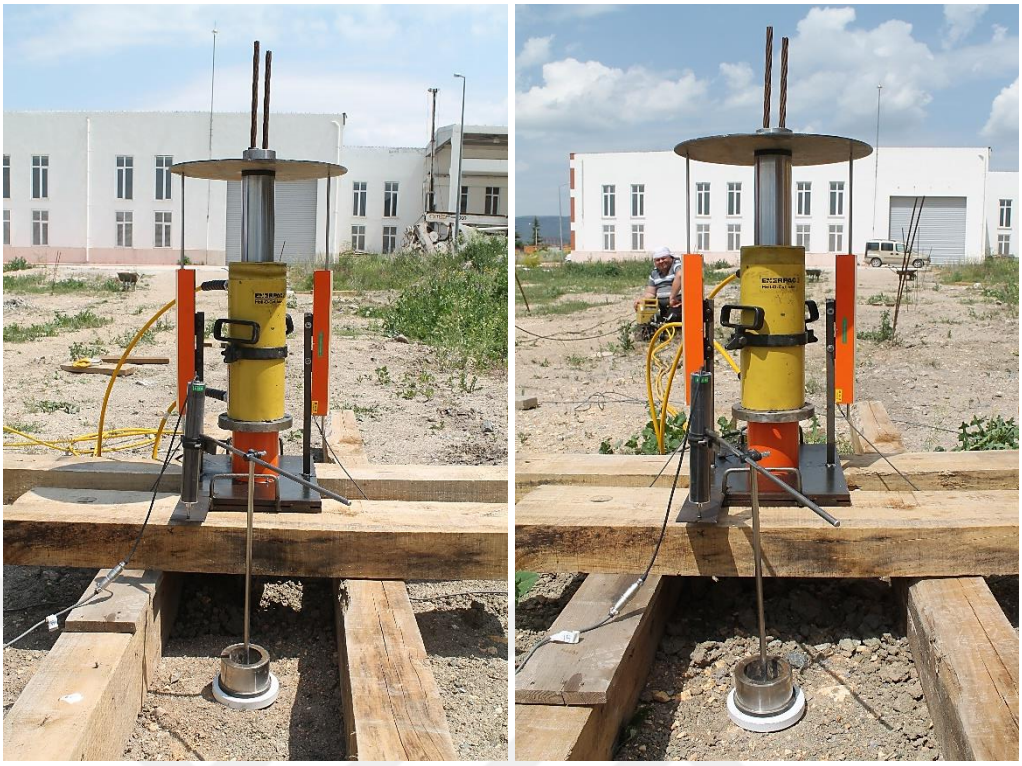
Arazi Çekme Deneyleri Uygulama Sonu Fotoğrafları

a. SK-1 **b. SK-2**

Görsel E11.1. *Çap: 50 cm, Derinlik: 2 m, a. Düz Ankraj ve b. Destekli Ankraj*

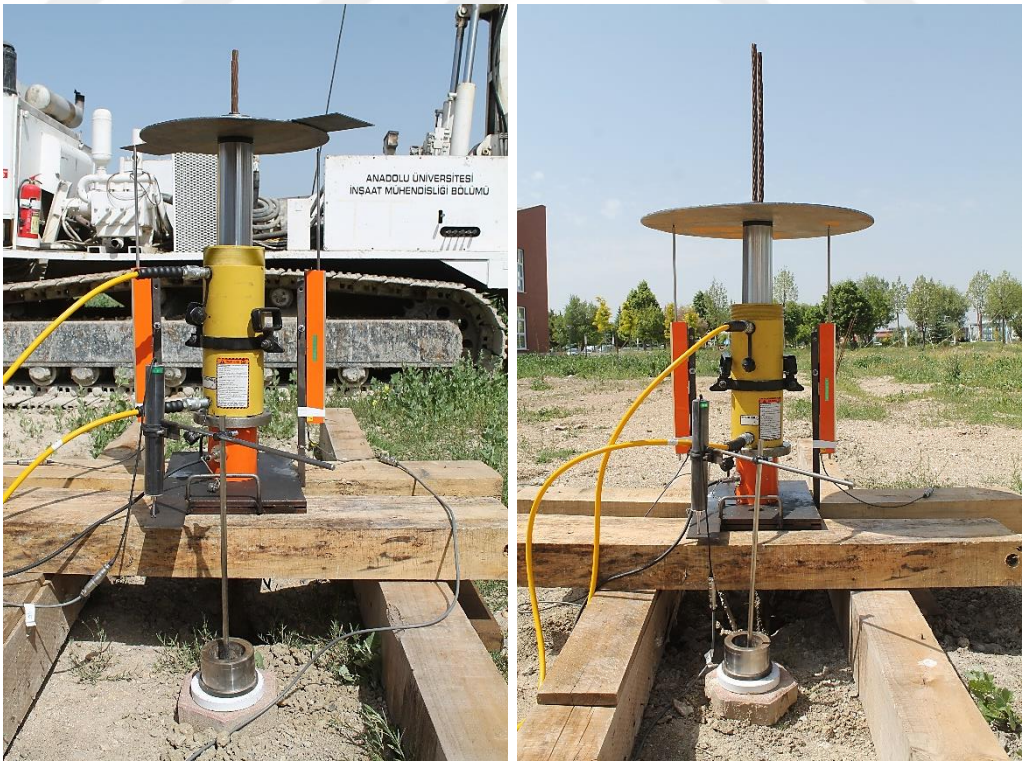
a. SK-3 **b. SK-4**

Görsel E11.2. *Çap: 75 cm, Derinlik: 2 m, a. Düz Ankraj ve b. Destekli Ankraj*



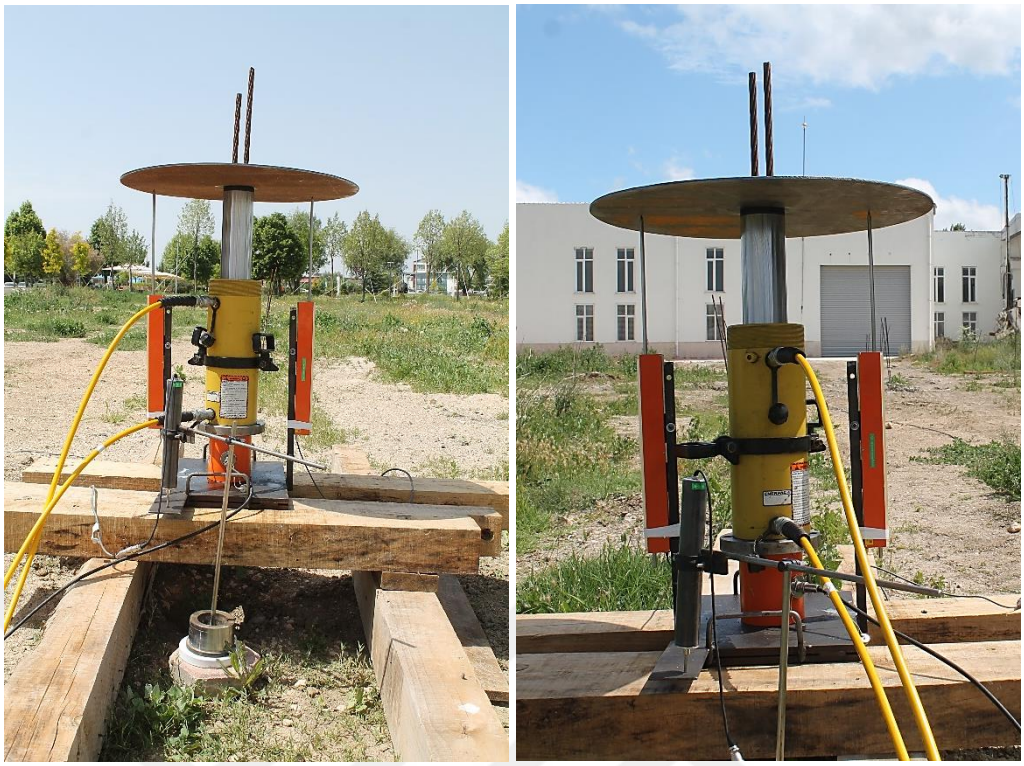
a. SK-5 **b. SK-6**

Görsel E11.3. *Çap: 100 cm, Derinlik: 2 m, a. Düz Ankraj ve b. Destekli Ankraj*



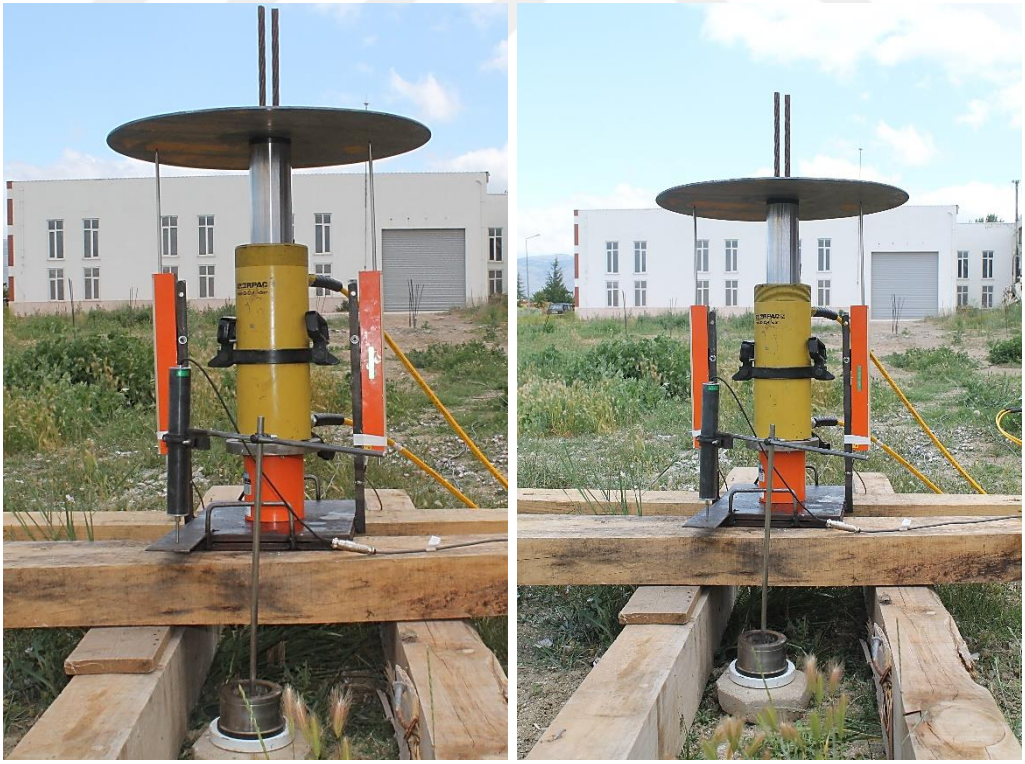
a. SK-7 **b. SK-8**

Görsel E11.4. *Çap: 50 cm, Derinlik: 4 m, a. Düz Ankraj ve b. Destekli Ankraj*



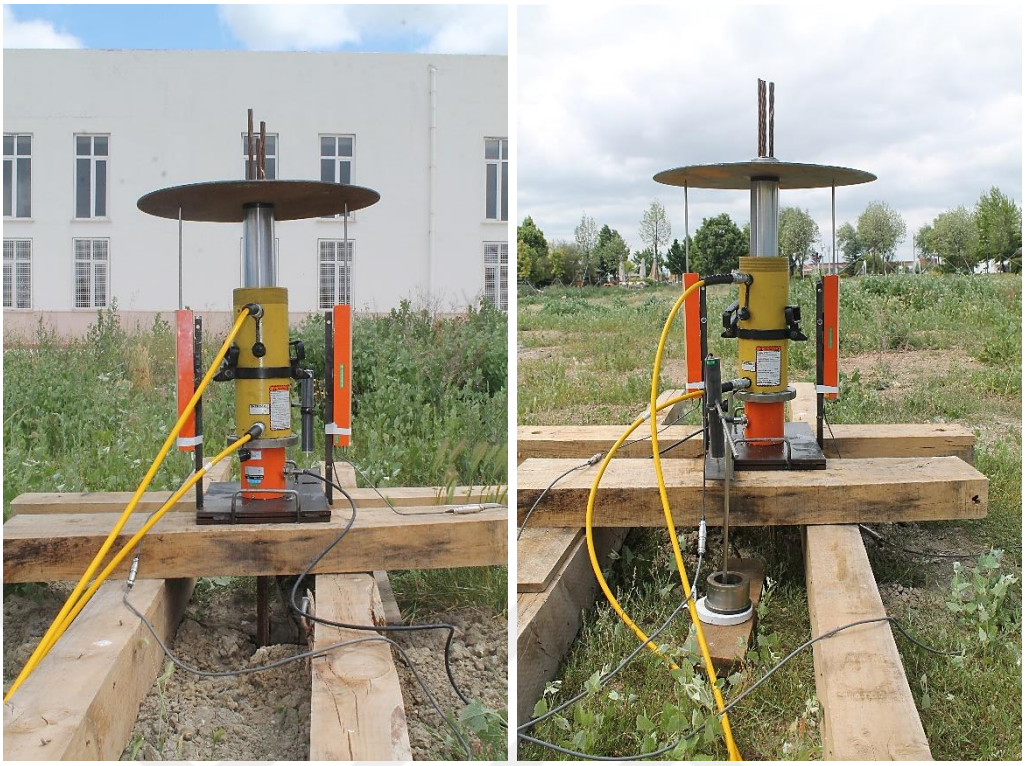
a. SK-9 **b. SK-10**

Görsel E11.5. *Çap: 75 cm, Derinlik: 4 m, a. Düz Ankraj ve b. Destekli Ankraj*



a. SK-11 **b. SK-12**

Görsel E11.6. *Çap: 100 cm, Derinlik: 4 m, a. Düz Ankraj ve b. Destekli Ankraj*



a. SK-13 **b. SK-14**

Görsel E11.7. *Çap: 50 cm, Derinlik: 6 m, a. Düz Ankraj ve b. Destekli Ankraj*

a. SK-15 **b. SK-16**

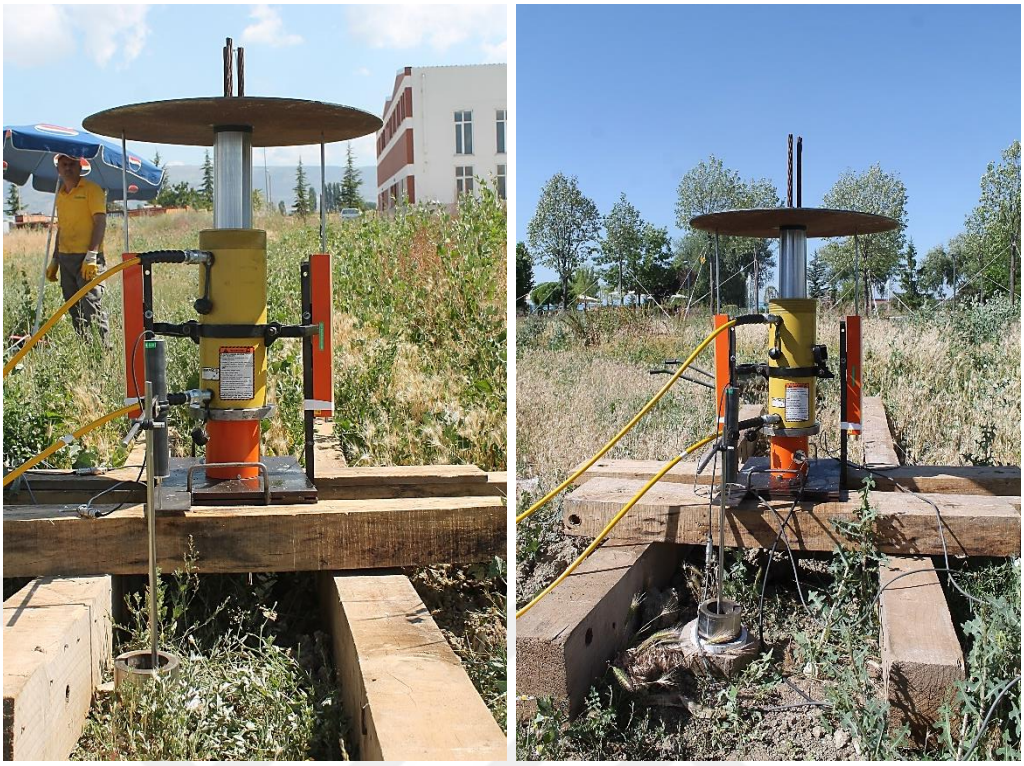
Görsel E11.8. *Çap: 75 cm, Derinlik: 6 m, a. Düz Ankraj ve b. Destekli Ankraj*

a. SK-17 **b. SK-18**

Görsel E11.9. *Çap: 100 cm, Derinlik: 6 m, a. Düz Ankraj ve b. Destekli Ankraj*

a. SK-19 **b. SK-20**

Görsel E11.10. *Çap: 50 cm, Derinlik: 8 m, a. Düz Ankraj ve b. Destekli Ankraj*



a. SK-21 **b. SK-22**

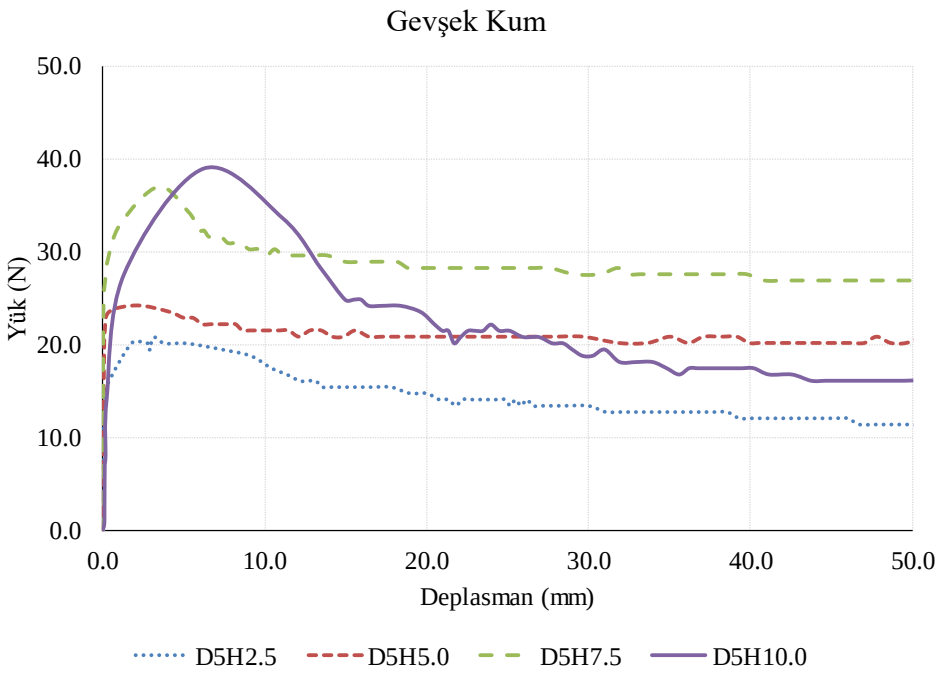
Görsel E11.11. *Çap: 75 cm, Derinlik: 8 m, a. Düz Ankraj ve b. Destekli Ankraj*

a. SK-23 **b. SK-24**

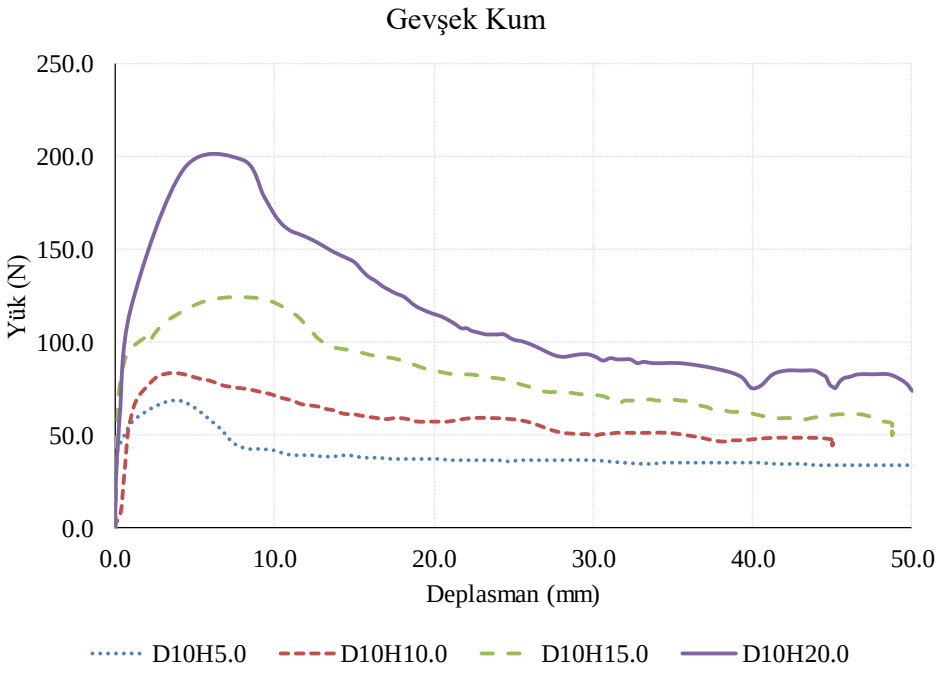
Görsel E11.12. *Çap: 100 cm, Derinlik: 8 m, a. Düz Ankraj ve b. Destekli Ankraj*

EK - 12

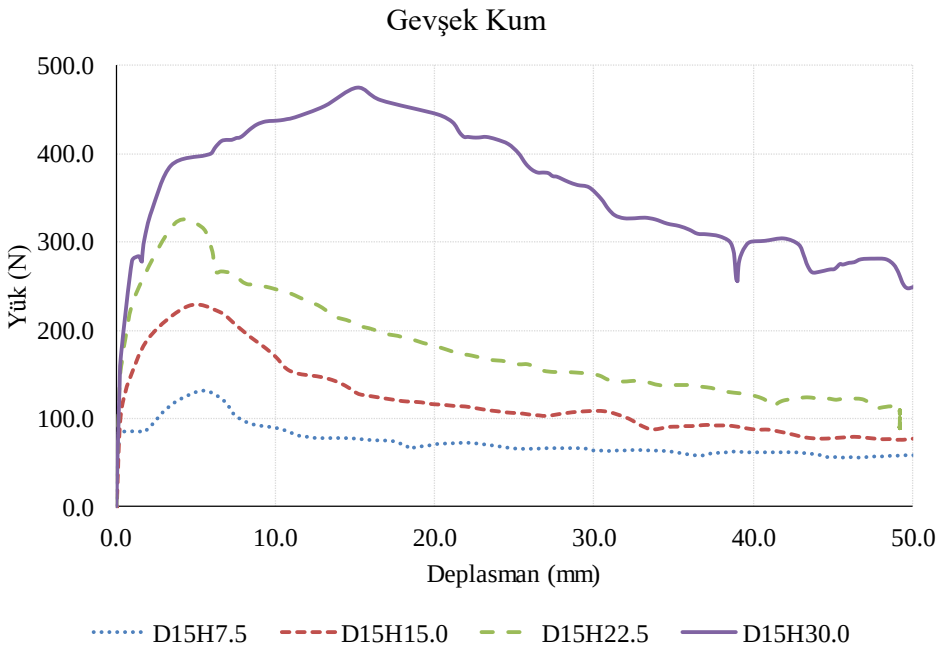
Laboratuvar Çekme Deneylerine Ait Yük - Şekil Değiştirme Grafikleri



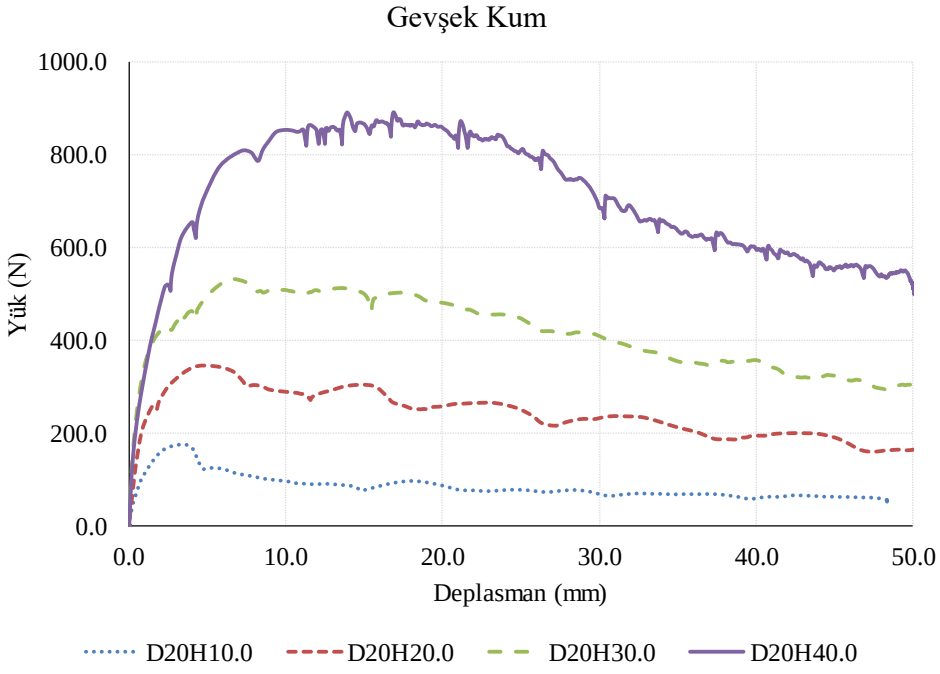
Şekil E12.1. *Gevşek Kumlu Zeminde 5 cm Çaplı Ankraj ile Yapılan Ankraj Çekme Deneyine Ait Yük - Şekil Değiştirme Grafiği*



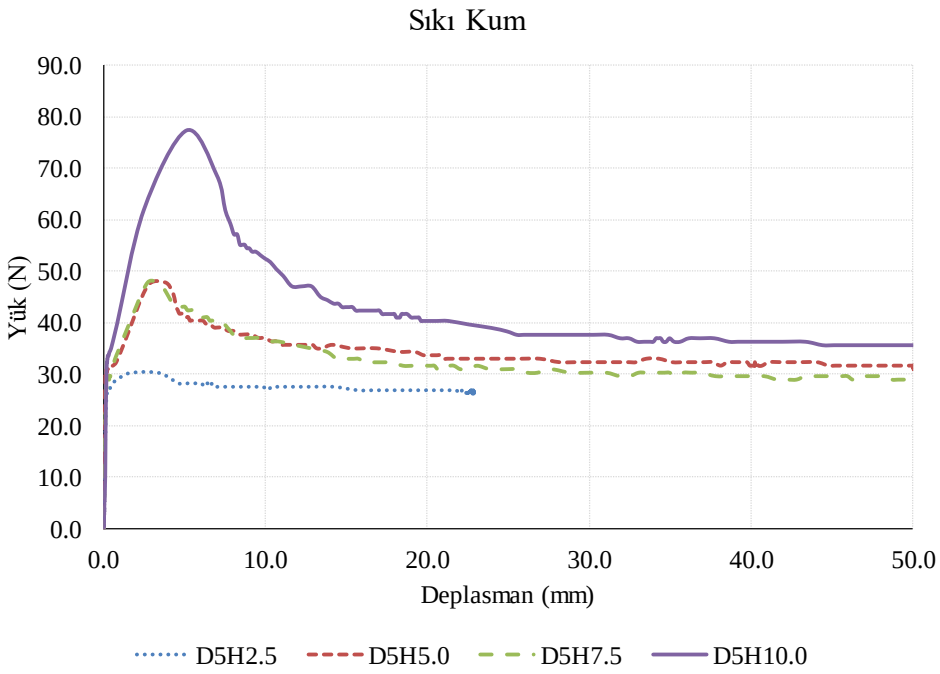
Şekil E12.2. *Gevşek Kumlu Zeminde 10 cm Çaplı Ankraj ile Yapılan Ankraj Çekme Deneyine Ait Yük - Şekil Değiştirme Grafiği*



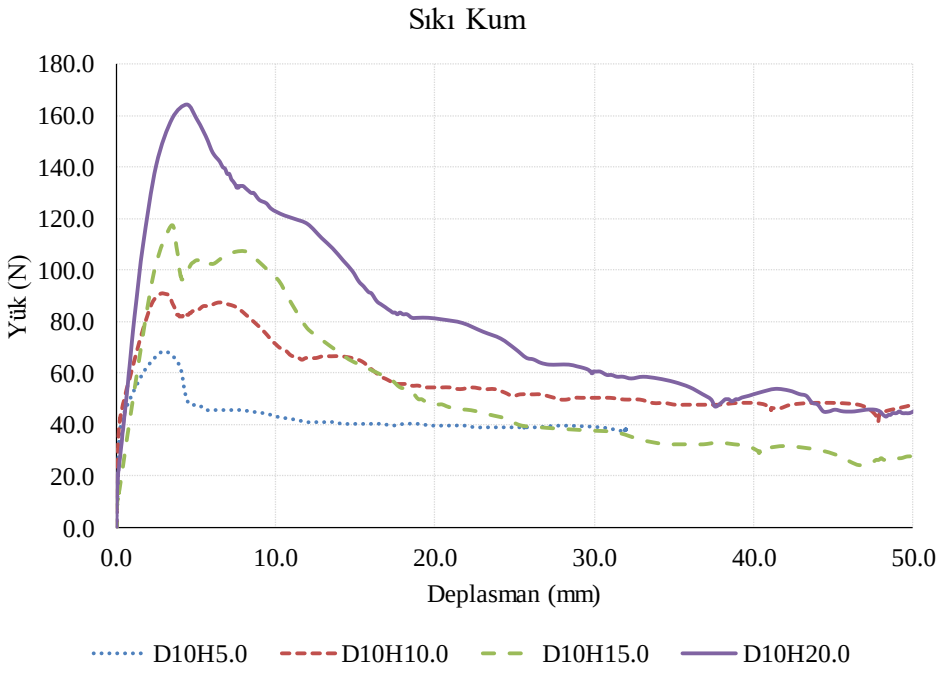
Şekil E12.3. *Gevşek Kumlu Zeminde 15 cm Çaplı Ankraj ile Yapılan Ankraj Çekme Deneyine Ait Yük - Şekil Değiştirme Grafiği*



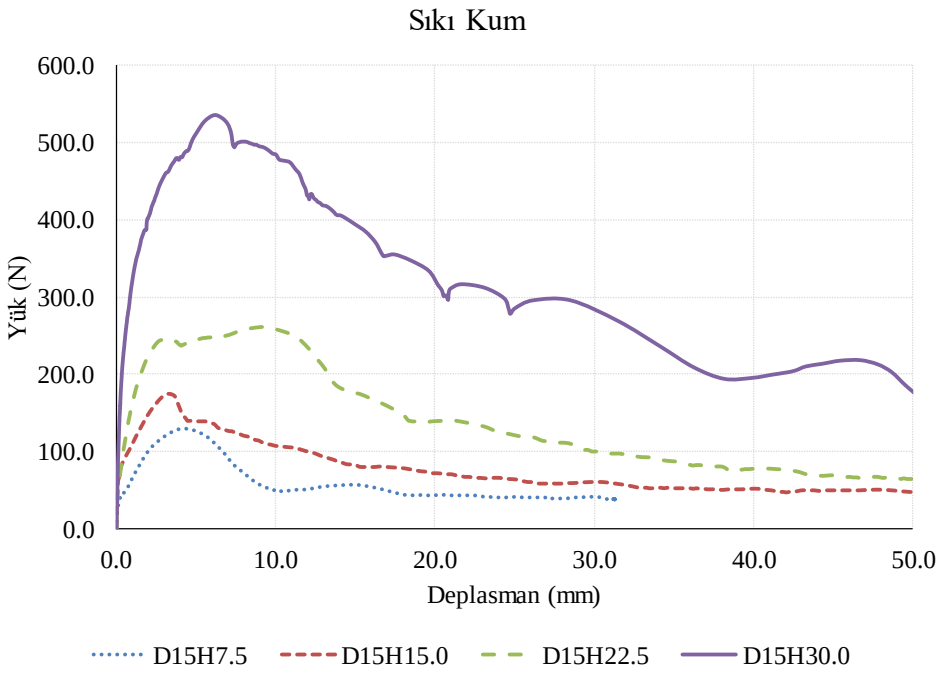
Şekil E12.4. *Gevşek Kum Zeminde 20 cm Çaplı Ankraj ile Yapılan Ankraj Çekme Deneyine Ait Yük - Şekil Değiştirme Grafiği*



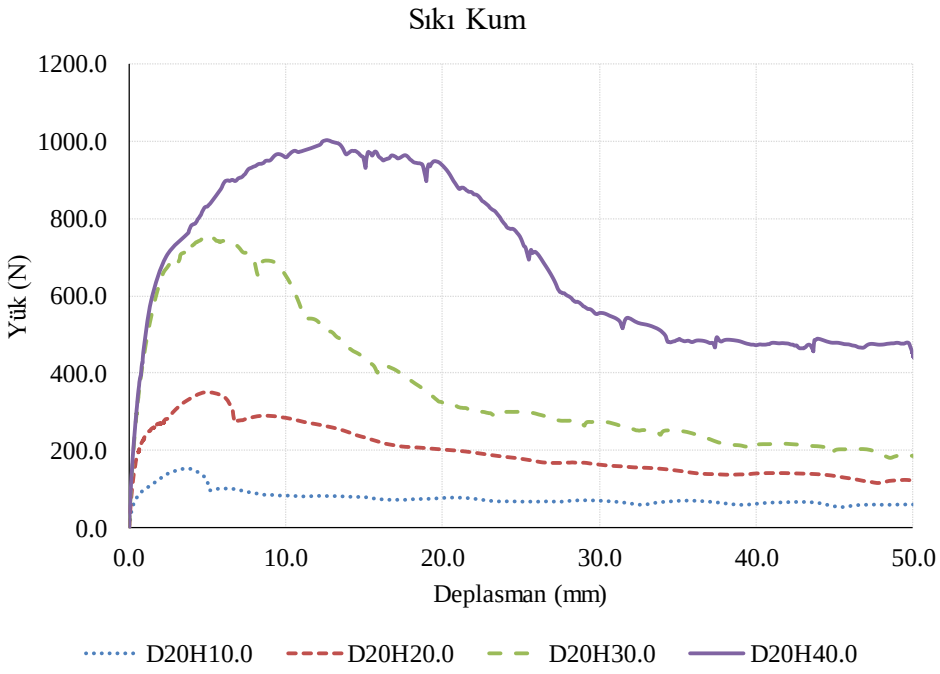
Şekil E12.5. *Sıkı Kumlu Zeminde 5 cm Çaplı Ankraj ile Yapılan Ankraj Çekme Deneyine Ait Yük - Şekil Değiştirme Grafiği*



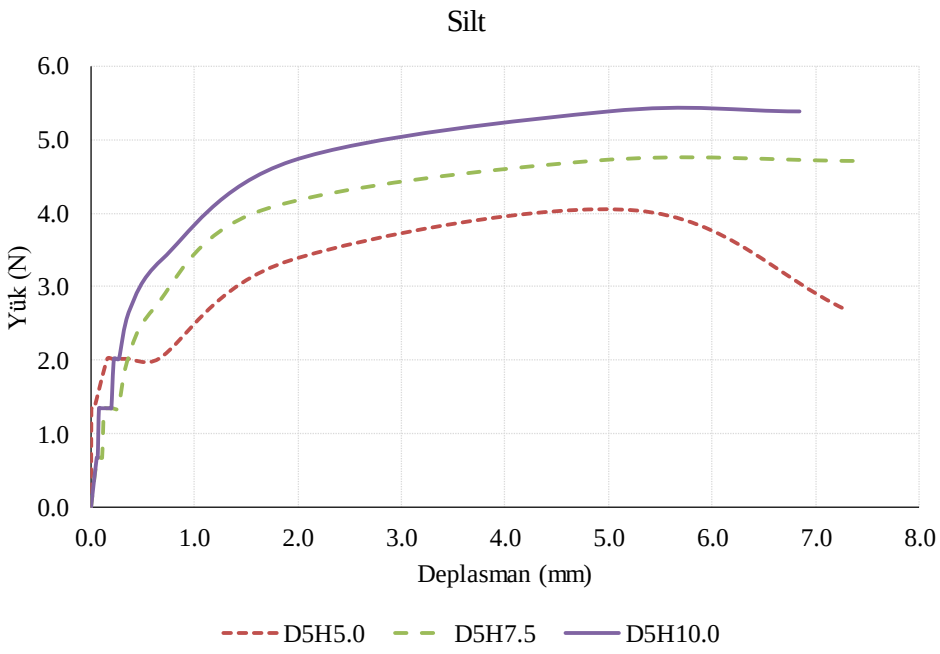
Şekil E12.6. *Sıkı Kumlu Zeminde 10 cm Çaplı Ankraj ile Yapılan Ankraj Çekme Deneyine Ait Yük - Şekil Değiştirme Grafiği*



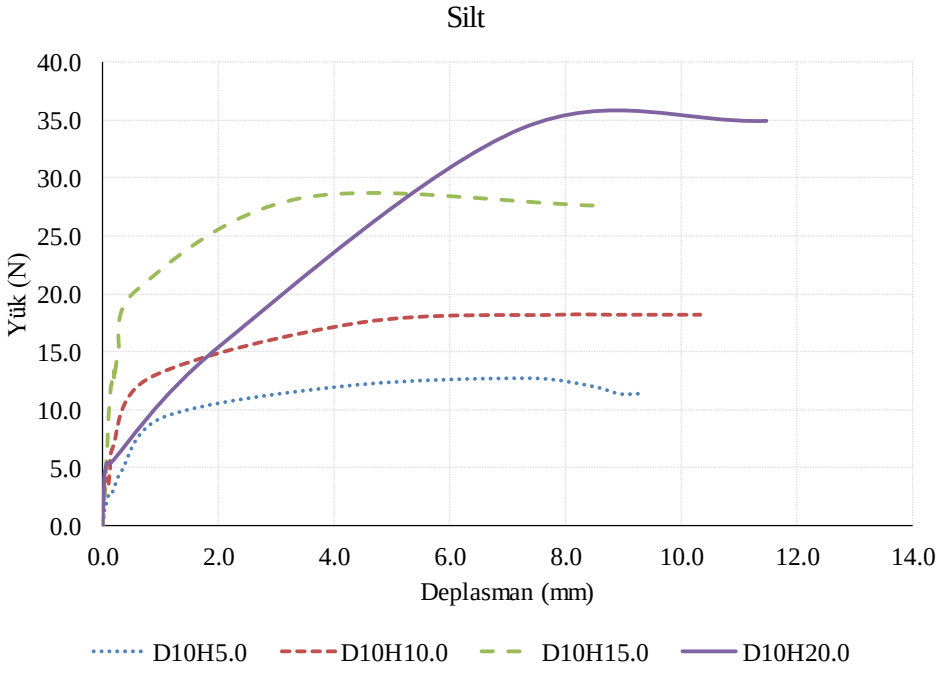
Şekil E12.7. *Sıkı Kumlu Zeminde 15 cm Çaplı Ankraj ile Yapılan Ankraj Çekme Deneyine Ait Yük - Şekil Değiştirme Grafiği*



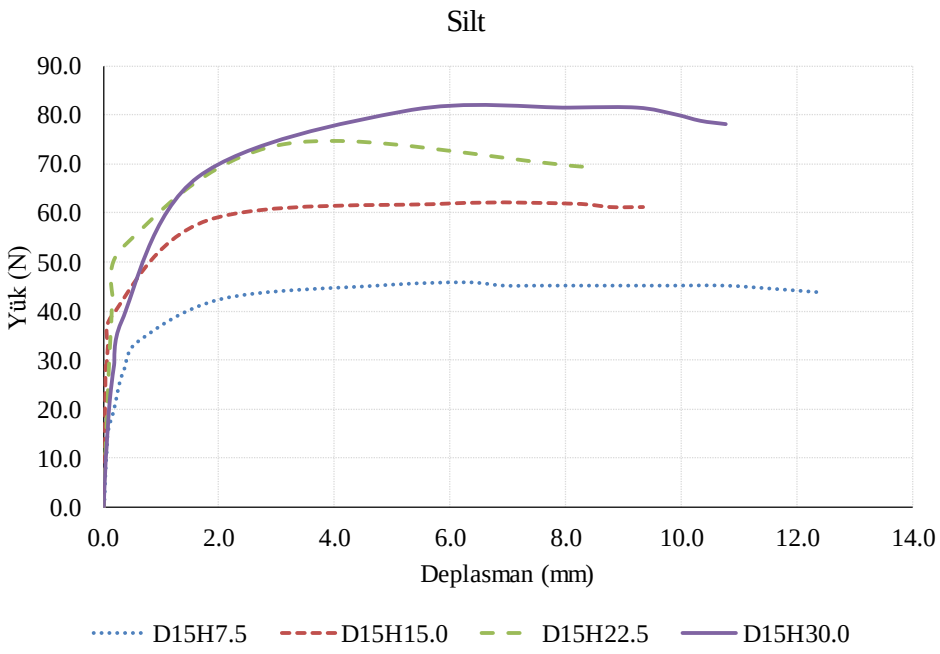
Şekil E12.8. *Sıkı Kumlu Zeminde 20 cm Çaplı Ankraj ile Yapılan Ankraj Çekme Deneyine Ait Yük - Şekil Değiştirme Grafiği*



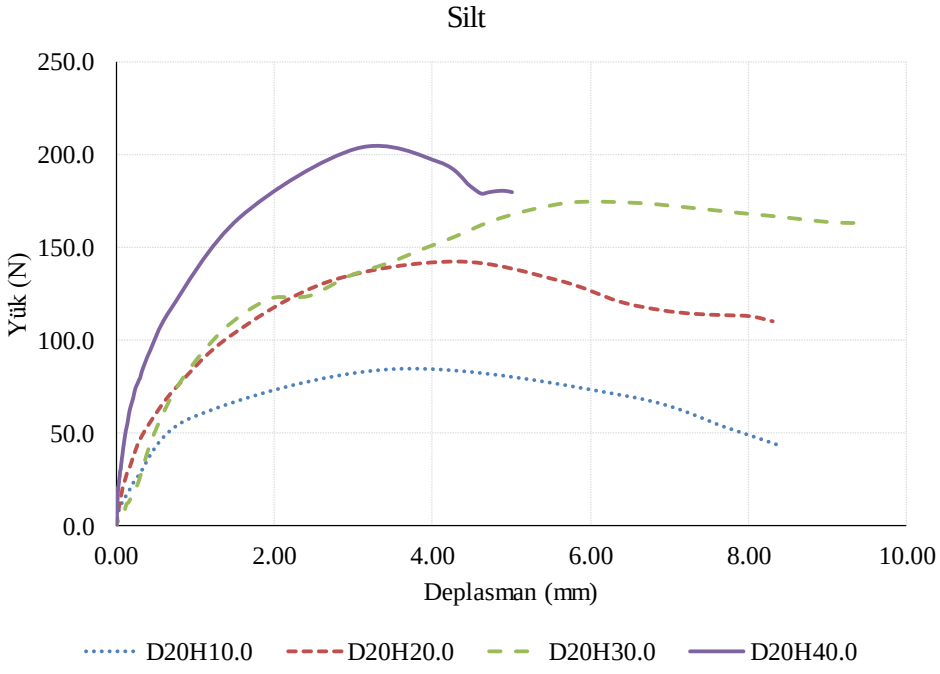
Şekil E12.9. *Siltli Zeminde 5 cm Çaplı Ankraj ile Yapılan Ankraj Çekme Deneyine Ait Yük - Şekil Değiştirme Grafiği*



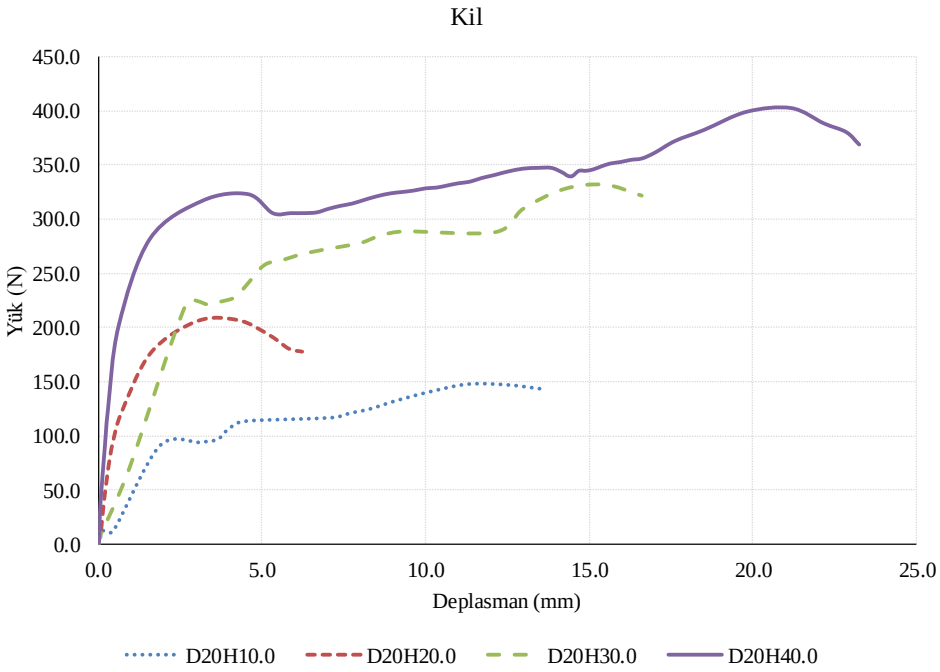
Şekil E12.10. *Siltli Zeminde 10 cm Çaplı Ankraj ile Yapılan Ankraj Çekme Deneyine Ait Yük - Şekil Değiştirme Grafiği*



Şekil E12.11. *Siltli Zeminde 15 cm Çaplı Ankraj ile Yapılan Ankraj Çekme Deneyine Ait Yük - Şekil Değiştirme Grafiği*



Şekil E12.12. *Siltli Zeminde 20 cm Çaplı Ankraj ile Yapılan Ankraj Çekme Deneyine Ait Yük - Şekil Değiştirme Grafiği*



Şekil E12.13. *Killi Zeminde 20 cm Çaplı Ankraj ile Yapılan Ankraj Çekme Deneyine Ait Yük - Şekil Değiştirme Grafiği*

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Burak EVİRGEN

Yabancı Dil : İngilizce

Doğum Yeri ve Yılı : Ankara / 1987

E-Posta : burakevirgen@anadolu.edu.tr

EĞİTİM GEÇMİŞİ:

- *Doktora:* 2017, Anadolu Üniversitesi (Eskişehir), Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı (3.96/4.00), Tez Konusu: Geoteknik Mühendisliği Açısından Taşıma Kapasitesi ve Kayma Potansiyelinin Yeni Nesil Uygulamalarla Değerlendirilmesi).
- *Yüksek Lisans:* 2012, Anadolu Üniversitesi (Eskişehir), Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı (3.61/4.00), Tez Konusu: Soğukta Şekil Verilmiş İnce Cidarlı Çelik Malzemeden Üretilen Tüp Kesitli (CFST) Yapı Elemanlarının Eksenel Basınç Altındaki Davranışı (Deneysel ve Analitik).
- *Lisans:* 2010, Anadolu Üniversitesi (Eskişehir), İşletme Fakültesi, İşletme Bölümü.
- *Lisans:* 2009, Anadolu Üniversitesi (Eskişehir), Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü (3.31/4.00 Onur Öğrencisi – Bölüm İkincisi), Tez Konusu: Kazıklı Radye Temeller – Zemin Dondurma.
- *Lise:* 2005, Aydınlıkevler Süper Lisesi (Ankara).

ERASMUS DENEYİMİ:

- *08.2014:* Erasmus Personel Değişim Programı, University of Minho, Portekiz.
- *07.2011 - 08.2011*: Erasmus Personel Değişim Programı, Liverpool John Moores University, Birleşik Krallık.

MESLEKİ GEÇMİŞİ:

- *08.2010 - 2017:* Araştırma Görevlisi, Anadolu Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Anabilim Dalı.
- *04.2010 - 08.2010*: Geoteknik Mühendisi, TOKER Sondaj ve İnş. Tic. Ltd. Şti.
- *12.2009 - 02.2010:* İnşaat Mühendisi, GÜRİŞ İnşaat ve Mühendislik A.Ş.
- *08.2008:* Stajyer Mühendis, Türkerler - Limak Ortaklığı, Ulus – Keçiören Metro İnşaatı.
- *08. 2007:* Stajyer Mühendis, Toplu Konut – Büyükşehir Belediyesi İnşaat Emlak Proje A.Ş.(TOBAŞ), Kuzey Ankara Girişi Kentsel Dönüşüm Projesi.

YAYINLARI VE BİLİMSEL FAALİYETLERİ:

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler:

- Onur, M.İ., Tuncan, M., Evirgen, B., Özdemir, B., Tuncan, A., "Behavior of Soil Reinforcements in Slopes", Procedia Engineering /Advances in Transportation Geotechnics 3 - The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), Vol: 143, pp. 483-489, ISSN: 1877-7058, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.061, 13/07/2016.
- Evirgen B., Onur, M. İ., Tuncan, M., Tuncan, A., "Determination Of The Freezing Effect On Unconfined Compression Strength And Permeability Of Saturated Granular Soils" International Journal of GEOMATE Geotechnique, Construction Materials and Environment, Vol. 8, No. 2, pp. 1283-1287, ISSN:2186-2982(P), 2186-2990(O), Japan, 06/2015.
- Onur, M. İ., Evirgen B., Tuncan, A., Tuncan, M., "Modelling of Shear Strength Parameters of Saturated Clayey Soils" International Journal of GEOMATE Geotechnique, Construction Materials and Environment, Vol. 7, No. 2(Sl No.14), pp. 1107-1110, ISSN:2186-2982(P), 2186-2990(O), Japan, 12/2014.
- Evirgen B., Tuncan A., Taskin K., "Structural behavior of concrete filled steel tubular sections (CFT/CFSt) under axial compression", Thin-Walled Structures, 80, 46-56, July 2014.

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Basılan Bildiriler:

- Onur, M.İ., Tuncan, A., Evirgen B., Tuncan, M., Isık T.M., "Reuse of Spilled Bitumen in Asphalt Construction Industry", 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016), pp. 104-112, e-ISBN 978-975-7537-12-31), Adana, 26/10/2016.
- Onur, M.İ., Tuncan, M., Evirgen B., Tuncan, A., "Improving The Learning Behavior by Designing Prototype Method at Geotechnical Engineering Education", International Conference on Education in Mathematics, Science & Technology (ICEMST-2016), Özet sf No: 91, Bodrum, 19/05/2016.
- Evirgen B., Tuncan M., Tuncan A., "Stress - Strain Characteristics of Frozen Silty and Clayey Soils", Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE2015), vol. 1, pp. 1798-1802, Kona, USA, 25.06.2015.
- Onur, M.İ., Evirgen B., Tuncan, M., Tuncan, A., "Importance of Application and Visuality at Civil Engineering Education", 3rd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES-2015), pp. 998-1006, Valencia, Spain, 03/06/2015.
- Evirgen B., Onur, M. İ., Tuncan, M., Tuncan, A., "Determination of The Freezing Effect on Unconfined Compression Strentgh and Permeability of Saturated Granular Soils" Fourth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment (GEOMATE2014), pp. 300-304, ISBN:978-4-9905958-3-8 C3051, Brisbane, Australia, 21/11/2014.
- Onur, M. İ., Evirgen B., Tuncan, A., Tuncan, M., "Modelling of Shear Strength Parameters of Saturated Clayey Soils" Fourth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment (GEOMATE2014), pp. 296-299, ISBN:978-4-9905958-3-8 C3051, Brisbane, Australia, 21/11/2014.
- Evirgen B., Tuncan A., "Determination Of Frictional Behaviour Between Concrete and Steel Tube Interaction", Eurosteel 2014: The Seventh Edition of The European Conference on Steel and Composite Structures,pp. 521-522, Naples, Italy, 10-12/09/2014.

Ulusal Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler:

- Dan-Ali, F.M., Tuncan, A., Onur, M. İ., Evirgen B., Tuncan, M., "Investigation of Hydrated Lime Effect in Asphalt Pavements" Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt:2, Sayı: 2, ISSN: 2458-7575, pp. 25-34, 12/2015.

Ulusal Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitaplarında Basılan Bildiriler:

- Evirgen, B., Tuncan, M., Tuncan, A."Yapay Zemin Dondurma Yönteminde Sıcaklık Değişiminin Zemin Dayanımına Etkisi", Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 16. Ulusal Kongresi, 1045-1054, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 14/10/2016.
- Özdemir, B., Evirgen, B., Tuncan, A., Onur, M.İ., Tuncan, M., "Zemin Donatıları ile Güçlendirilmiş Şevlerin Değerlendirilmesi", 6. Geoteknik Sempozyumu, s. 105, Adana, 26.11.2015. (DOI: 10.5505/2015geoteknik.S105).
- Evirgen, B., Tuncan, M., Tuncan, A., "Yapay Zemin Dondurma Yöntemi ile Örnek Modelleme Çalışması", 6. Geoteknik Sempozyumu, s. 75, Adana, 27.11.2015. (DOI: 10.5505/2015geoteknik.S75).
- Tunaboyu O., Evirgen B., Avsar O., "Kısa Kolon Hasarı Oluşmuş Betonarme Kolonların CFRP ile Yapısal Onarımı", 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı (TDMSK 2015), İzmir., 14/10/2015.
- Evirgen, B., Yurdakul, Ö., Tunaboyu, O., Avşar, Ö "Beton Dolu Çelik Tüplerin Eksenel Basınç Altındaki Davranışı", Ulusal Yapı Mekaniği Laboratuvarları 5. Toplantısı, pp 23-24, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 29/05/2015.
- Yavan, O., Evirgen, B., Onur, M. İ., Tuncan, A., "Suya Doygun Kil Zeminlerde İnşa Edilen Betonarme Konsol İstinat Duvarın Statik ve Dinamik Yükler Altındaki Davranışı", Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 2. Özel Konulu Sempozyumu Teori ve Uygulamada Zemin Yapı Etkileşimi Sempozyumu (ZMYE-2014), sf. 95-100, Antalya, 24/04/2014.

Diğer Yayınlar:

- Evirgen B., "Simulating the Experimental Result of Cold Formed Hollow Steel Tubes with Finite Element Models", 2014 Simulia Community Conference, Rhode Island USA, 22/05/2014.

Ulusal ve Uluslararası Projeler:

- Prototip Spudcan Temel Tasarımı, Bilimsel Araştırma Projesi, 1605F403, 01/06/2016 - 01/06/2017.
- Üç Boyutlu Eleman Tarama Çalışması, Bilimsel Araştırma Projesi, 1605F336, 01/06/2016 - 01/06/2017.
- TÜBİTAK-1005 Projesi, MAG215M788, Geri Dönüşüm Camlardan Elde Edilen Yerli Üretim Cam Köpüğünün Yalıtım Malzemesi ve Estetik Yapısal Unsurlar Olarak Kullanımı, Araştırmacı, 01/05/2016 - 01/11/2017.
- Üç Boyutlu Prototip Eleman Modelleme Çalışması, Bilimsel Araştırma Projesi, 1505F178, 03.06.2015 - 03.06.2016.
- Şemsiye Ankraj Uygulaması, Bilimsel Araştırma Projesi, 1407F353, 10/10/2014 - 10.04.2016.
- Çelik Lif, Polipropilen Lif, Lastik Parçaları ve Karbon Lifli Polimer Donatı Elemanlarının Beton Dolu Çelik Tüplere Etkileri, Bilimsel Araştırma Projesi, 1407F354, 10/10/2014 - 01.07.2016.
- Antifriz (Mono Etilen Glikol) ve Sıvı Azot (Nitrojen) Kullanılarak Yapay Zemin Dondurma Sistemlerinin Karşılaştırılması, Bilimsel Araştırma Projesi, 1403F079, 02/05/2014 - 25/12/2015.
- Soğukta Şekil Verilmiş İnce Cidarlı Çelik Malzemeden Üretilen Tüp Kesitli (CFST) Yapı Elemanlarının Eksenel Basınç Altındaki Davranışı (Deneysel ve Analitik). Bilimsel Araştırma Projesi. 1109F143, 15/08/2012.

ÖDÜLLERİ:

- *2014:* Mansiyon Ödülü, 2014 Simulia Topluluğu Konferansı Akademik Poster Yarışması, "Soğukta Şekil Verilmiş Boş Çelik Tüplerin Deneysel Sonuçlarının Sonlu Elemanlar Modeli ile Benzeştirilmesi".

PATENT ve TASARIM BAŞVURULARI:

- *2017:* Tuncan, M., Evirgen, B., Tuncan, A. ve Onur M.İ., "Şemsiye ankraj". Türkiye Patent Enstitüsü, Tasarım Başvuru Referans No: 15602/72.
- *2016:* Evirgen, B., Tuncan, M. ve Tuncan, A., "Granüler zeminler için örselenmemiş numune alıcı". Türkiye Patent Enstitüsü, Patent Başvuru Referans No: 15602/55.

- *2016:* Tuncan, M., Evirgen, B., Tuncan, A. ve Onur M.İ., "Şemsiye ankraj". Türkiye Patent Enstitüsü, Patent Başvuru Referans No: 15602/22.
- *2016:* Evirgen, B., Tuncan, M. ve Tuncan, A., "Yüksek mukavemetli jet ankraj". Türkiye Patent Enstitüsü, Patent Başvuru Referans No: 15602/67.

ÜYELİKLER:

- *2015 - Halen:* Uluslararası Kıyı ve Kutup Mühendisleri Topluluğu (ISOPE).
- *2009 - Halen:* İnşaat Mühendisleri Odası.