T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİNDE ELDE EDİLEN İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN LABORATUVAR ve ARAZİ ŞARTLARINDA BELİRLENMESİ

Fatma Tuğçe ÇINAR ÖZKAN

DANIŞMAN
Prof. Dr. İlknur BOZBEY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği, Doktora Programı

Aralık, 2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Fatma Tuğçe ÇINAR ÖZKAN tarafından, **Prof. Dr. İlknur BOZBEY** danışmanlığında hazırlanan **"DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİNDE ELDE EDİLEN İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN LABORATUVAR ve ARAZİ ŞARTLARINDA BELİRLENMESİ"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **21/12/2023** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Prof. Dr. İlknur BOZBEY İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Geoteknik Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Pelin ÖZENER Yıldız Teknik Üniversitesi Geoteknik Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Geoteknik Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Özer ÇİNİCİOĞLU Boğaziçi Üniversitesi Geoteknik Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Geoteknik Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depreminde hayatını kaybedenlere ve tüm depremzedelere…

BÜTÇE DESTEKLERİ

DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİNDE ELDE EDİLEN İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN LABORATUVAR ve ARAZİ ŞARTLARINDA BELİRLENMESİ

Bu tez çalışması, KGM-ARGE-2019-8 numaralı ve "Derin Karıştırma Yönteminde Elde Edilen İyileştirilmiş Zemin Özelliklerinin Laboratuvar ve Arazi Şartlarında Tayini ve Derin Karıştırma Şartnamesi Hazırlanması" başlıklı Ar-Ge Projesi Karayolları Genel Müdürlüğü Ar-Ge Dairesi Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje sonuçları Karayolları Genel Müdürlüğü'nün resmi görüşleri değildir.

TEŞEKKÜR

Sözlerime ilk olarak tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İknur BOZBEY'e teşekkür ederek başlamak istiyorum. Lisans eğitimimden doktora eğitimimin bitişine kadar bana kattığı bilgi birikimi için kendisine müteşekkirim. Devam edecek olan akademik hayatımda, hoca öğrenci ilişkisinin nasıl olması gerektiğini de bana öğrettiği için ayrıca minnettarım. Umarım ilerde kendisi gibi bir hoca olabilirim. Son olarak hocadan çok manevi annem gibi hissettirdiği için, her iyi ve kötü günümde yanımda olduğu için, rahatça dertleşip terapi havasında konuşmalar yapabildiğimiz için, birlikte eğlenip gülebildiğimiz için kendisine çok teşekkür ediyorum.

Tez izleme komitemde olan ve arazi çalışmalarında İlknur hocamla bizi yalnız bırakmayan hocam Sayın Doç. Dr. M. Kubilay KELEŞOĞLU'na çok teşekkür ediyorum. Gerek arazi çalışmalarındaki yardımları gerekse tez sürecimdeki destekleri için kendisine minnettarım. Tez izleme komitemde olan hocalarım Sayın Prof. Dr. Pelin TOHUMCU ÖZENER'e ve Doç. Dr. Saadet Arzu BERİLGEN'e tez sürecimdeki destekleri için teşekkür ederim.

Tez savunma sınavıma jüri üyesi olarak katılan Sayın Prof. Dr. Özer ÇİNİCİOĞLU'na katkılarından dolayı teşekkür ediyorum.

Bu tez sürecimin en güzel katkısı hayat arkadaşımı bulmam oldu. Tezimin arazi deneylerini yaparken tanıştığımız, eşim, can yoldaşım Ümit ÖZKAN'a çok teşekkür ediyorum. Uykusuz gecelerime katlandığı için, beni her daim anlayabildiği için kendisine minnettarım. Bir akademisyenle evli olmanın tüm zorluklarına göğüs gerebildin çok teşekkürler hayat arkadaşım.

Ailem, sizlerle nelerin üstesinden gelmedik ki biz, iyi ki varsınız. Her kararımda arkamda olduğunuz için beni bu günlere getirdiğiniz için çok teşekkür ederim. Hayatta gördüğüm en güçlü kadınlardan biri olan ve bunu bize aşılayan canım annem Sevim ÇINAR'a, sevgili babam Halil ÇINAR'a minnettarım. Yeri geldiğinde beni abla-anne şefkatiyle saran, tüm zorluklarda güç kaynağım olan, dert ortağım, en iyi arkadaşım, kardeşim Bilge ÇINAR'a çok teşekkür ediyorum. Ve evimizin neşesi canım yeğenim, oğlum Furkan ZARİFOĞLU'na ve canım ablam Tuğba ÇINAR'a varlıklarından dolayı minnettarım.

Lisans eğitimimden bu yana desteklerini ve bilgilerini hiçbir zaman eksik etmeyen hocalarım Sayın Prof. Dr. Sadık ÖZTOPRAK'a, Sayın Doç. Dr. Cihan ÖSER'e ve Sayın Araş. Gör. Dr. Sinan SARĞIN'a çok teşekkür ediyorum.

Tez sürecimin en yoğun döneminde yanımda olan, geç saatlere kadar benimle laboratuvarda kalan, desteklerini esirgemeyen can dostum Araş. Gör. Güldem KORKMAZ'a çok teşekkür ediyorum. Destekleri için Araş. Gör. Emirhan ALTINOK'a da teşekkür ediyorum.

Her daim yanımda olan ve hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen sevgili arkadaşlarım Bahar Giryan BULUT'a, Ayşe Nurmen AKIN'a, Faik AKIN'a, Cansu BİRİN'e, Zeynep

SALKIM’a, Çağrı SALKIM’a, Ali ŞAHİN’e, Ezgi ŞAHİN’e ve diğer tüm arkadaşlarıma çok teşekkür ediyorum.

Laboratuvar teknisyenlerimiz Oğuz FİRİDİN’e ve Ramazan ÖZDEMİR’e desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bu tez çalışması Karayolları Genel Müdürlüğü Ar-Ge Dairesi Başkanlığı tarafından desteklenen Ar-Ge projesi kapsamında yapılmıştır. Proje sürecinde çalışmalarımıza destek olan Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı’na minnettarım. Destekleri için Araştırma Geliştirme Dairesi Şubesi Müdürü Sayın Şenol ALTINOK ve ekibine, Jeolojik Hizmetler Şubesi Müdürü Sayın Aydın DURUKAN ve ekibine, Kalite Yönetim ve Ar-Ge Şubesi Müdürü Sayın Ahmet SAĞLIK ve ekibine, Sayın Ruhan HACIOĞLU’na ve Araştırma Baş Mühendisi Sayın Mehmet TOKGÖZ’e tüm süreç boyunca verdikleri destek için çok teşekkür ederim. Ayrıca desteklerinden dolayı Sayın Sina KİZİROĞLU’na da teşekkür ederim. DSM konusundaki bilgi ve birikimini tez başlangıcında bizimle paylaşan Sayın İnş. Yük. Müh. Alp GÖKALP’e çok teşekkür ediyorum.

Arazi çalışmalarımızdaki desteklerinden ötürü, Sayın Eylem ÖZER’e, Sayın Murat ÇELİKBAĞ’a, Sayın Oğuz AVCI’ya, Sayın Nihat BEYAZ’a ve Sayın Barış ÖNEN’e çok teşekkür ediyorum. Tez ve proje süresince bilgi ve tecrübelerinden yararlandığımız tüm meslektaşlarımıza teşekkür ediyorum.

Karot numunelerinin hazırlanmasındaki destekleri için Sayın Prof. Dr. Namık AYSAL'a ve Ersin KAYGISIZ’a çok teşekkür ediyorum.

Tez sürecim boyunca yardımlarından dolayı Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümündeki tüm hocalarıma, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi ÖYP Koordinatörlüğü personellerine ve İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa ÖYP Koordinatörlüğü personellerine teşekkürlerimi sunuyorum.

Aralık 2023 Fatma Tuğçe ÇINAR ÖZKAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **viii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xii**
TABLO LİSTESİ ..... **xxiii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xxiv**
ÖZET ..... **xxvi**
ABSTRACT ..... **xxviii**
1. GİRİŞ **1**
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **5**
2.1. DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ (DSM) HAKKINDA GENEL BİLGİLER 5
2.2. DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ (DSM) UYGULAMALARI 6
2.3. BAĞLAYICI TÜRLERİ VE DİĞER ETKİLER 8
2.4. DSM ile İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ 9
2.4.1. Mukavemet 10
2.4.2. Elastisite Modülü (Young Modülü) 15
2.4.3. Poisson Oranı 16
2.4.4. Permeabilite (Hidrolik Geçirgeclik) 16
2.4.5. Birim Hacim Ağırlık 16
2.4.6. Dinamik Yükler Altındaki Özellikler 16
2.5. LABORATUVARDA NUMUNE HAZIRLAMA YÖNTEMLERİ 17
2.5.1. Laboratuvar Numuneleri için Tasarım Karışımı Hesabı 20
2.6. DERİN KARIŞTIRMA ile İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERİN LABORATUVAR ve ARAZİ ŞARTLARINDA MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ 24
2.7. DSM UYGULAMALARINDA ARAZİ ÇALIŞMALARI 25
2.7.1. DSM İmalatı 26
2.7.2. DSM Makinelerinde Güç, Tork ve Devir Değerleri 27

2.7.3. DSM Makineleri için Enjeksiyon Pompası 28
2.7.4. Kuru Derin Karıştırma Yöntemi 28
2.7.5. Islak Karıştırma Uygulamasında Zemini Karıştırmanın Önemi 29
2.7.6. İmalat Detayları-Bıçak Dönüş Sayısı (BRN) 30
2.7.7. Tipik İniş, Çıkış ve Dönme Hızları 31
2.7.8. Arazide Yapılacak Olan Kalite Kontrol Çalışmaları 32
2.8. ORGANİK ZEMİNLER için DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN HUSUSLAR 33
3. YÖNTEM 34
3.1. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI 34
3.1.1. Numune Hazırlama Yöntemi 35
3.1.2. Bağlayıcı Türleri 37
3.1.3. Kategori 1: Deneme Deneyleri Kapsamında Hazırlanan Numuneler 39
3.1.3.1. Organik Zemin (Turba) 40
3.1.3.2. İnorganik Zemin 41
3.1.4. Kategori 2: Arazide İmal Edilen DSM Kolonlarını Temsilen Hazırlanan Numuneler 41
3.1.4.1. A Sahasında İmal Edilen DSM Kolonlarını Temsilen Hazırlanan Numuneler 41
3.1.4.2. B Sahasında İmal Edilen DSM Kolonlarını Temsilen Hazırlanan Numuneler 42
3.1.5. Kategori 3: Diğer Numuneler 43
3.1.5.1. A Sahasından Alınan Doğal Zemin ile Hazırlanan Numuneler 43
3.1.5.2. B Sahasından Alınan Doğal Zemin ile Hazırlanan Numuneler 44
3.2. ARAZİ ÇALIŞMALARI 45
3.2.1. A Sahasında Yapılan Arazi Çalışmaları 46
3.2.1.1. İmalat Sırasında Islak Numune Alıcı ile Numune Alınması 50
3.2.1.2. İmalat Sırasında Yapılan Kalite Kontrol Deneyleri 51
3.2.2. B Sahasında Yapılan Arazi Çalışmaları 52
3.2.2.1. İmalat Sırasında Islak Numune Alıcı ile Numune Alınması 55
3.2.2.2. İmalat Sonrasında Yapılan Kalite Kontrol Deneyleri 56
4. BULGULAR 58
4.1. LABORATUVAR ÇALIŞMALARINDAN ELDE EDİLEN BULGULAR 58
4.1.1. Kategori 1: Deneme Deneylerinin Sonuçları 58
4.1.1.1. Organik Zemin (Turba) 58
4.1.1.2. İnorganik Zemin 66
4.1.2. Kategori 2: Deneme DSM Kolonlarını Temsilen Hazırlanan Numunelerin Sonuçları 69

4.1.2.1. A Sahasında İmal Edilen DSM Kolonlarını Temsilen Hazırlanan Numunelerin Deney Sonuçları *69*
4.1.2.2. B Sahasında İmal Edilen DSM Kolonlarını Temsilen Hazırlanan Numunelerin Deney Sonuçları *78*
4.1.3. Kategori 3: Diğer Numunelerin Sonuçları 82
4.1.3.1. A Sahasından Alınan İnorganik Zemin için Deney Sonuçları *82*
4.1.3.2. B Sahasından Alınan Doğal Zemin ile Hazırlanan Numunelerin Deney Sonuçları *97*
4.2. ARAZİ ÇALIŞMALARINDAN ELDE EDİLEN BULGULAR 109
4.2.1. A Sahasında Yapılan Arazi Çalışmalarından Elde Edilen Bulgular 109
4.2.1.1. İmalat Sırasında Islak Numune Alıcı ile Alınan Numunelerin Deney Sonuçları *110*
4.2.1.2. Alınan Tam Boy Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan Çalışmalar *112*
4.2.1.3. DSM Kolonlarında İyileştirme Yüzdelerinin Değerlendirilmesi *114*
4.2.1.4. Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan Deneyler *119*
4.2.1.5. Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan Basınç Deneylerinin Sonuçları *120*
4.2.1.6. Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan İndeks Deneyleri *122*
4.2.1.7. Sondaj Kuyusundan Alınan Numuneler Üzerinde Yapılan Deneylerin Sonuçları *122*
4.2.1.8. Kolonlardan Alınan Numuneler Üzerinde Yapılan İndeks Deneylerinin Sonuçları *123*
4.2.1.9. Arazide Yapılan Presiyometre Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi *126*
4.2.1.10. Arazide Yapılan Basınçlı Su Testi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi *128*
4.2.2. B Sahasında Yapılan Arazi Çalışmalarından Elde Edilen Bulgular 129
4.2.2.1. İmalat Sırasında Islak Numune Alıcı ile Alınan Numunelerin Deney Sonuçları *130*
4.2.2.2. Alınan Tam Boy Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan Çalışmalar *132*
4.2.2.3. DSM Kolonlarında İyileştirme Yüzdelerinin Değerlendirilmesi *134*
4.2.2.4. Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan Deneyler *138*
4.2.2.5. Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan Basınç Deneylerinin Sonuçları *139*
4.2.2.6. Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan İndeks Deneyleri *141*
4.2.2.7. Sondaj Kuyusundan Alınan Numuneler Üzerinde Yapılan Deneylerin Sonuçları *141*
4.2.2.8. Kolonlardan Alınan Numuneler Üzerinde Yapılan İndeks Deneylerinin Sonuçları *142*
4.2.2.9. Arazide Yapılan Presiyometre Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi *145*
4.2.2.10. Arazide Yapılan Basınçlı Su Testi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi *147*

5. TARTIŞMA **148**
5.1. LABORATUVAR BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 148
5.1.1. Çimento Türünün Mukavemet Üzerindeki Etkisi 148
5.1.2. Kür Faktörünün Değerlendirilmesi 149
5.1.3. Serbest Basınç Mukavemeti-Toplam Su/Çimento İlişkisi 150
5.1.4. Mukavemet-Elastisite Modülü Korelasyonları 153
5.1.5. Mukavemet-Şekil Değiştirme İlişkisi 155
5.1.6. Likidite İndisine Bağlı Karıştırma Etkinliği 155
5.2. ARAZİ BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 156
5.2.1. Aynı İmalat Yöntemi ile İmal Edilen Kolonların Karşılaştırılması 156
5.2.2. Çimento Dozajının Etkisi 156
5.2.3. BRN Değerlerinin Oluşan Kolon Kalitesi Üzerinde Etkisi 159
5.2.4. DSM Kolonlarının Kabul Değerleri 160
6. SONUÇ VE ÖNERİLER **162**
KAYNAKLAR **167**
EKLER **175**
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI **191**
ETİK KURUL İZİN YAZISI **192**
KURUM İZNİ YAZILARI **193**
ÖZGEÇMİŞ **194**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Laboratuvar deneylerine göre toplam su-çimento oranı ile 28 günlük serbest basınç mukavemet ilişkisi (FHWA, 2013). 12

Şekil 2.2: Toplam su içeriğine göre karışımın basınç dayanımı, toplam su: zeminin doğal su muhtevası ve harçtaki suyun toplamı (Topolnicki, 2016). 13

Şekil 2.3: Başlangıç su içeriğinin mukavemet üzerindeki etkisi (Terashi ve diğ., 1977). 13

Şekil 2.4: f_c katsayısının imalattan sonra geçen gün sayısı ile değişimi. 14

Şekil 2.5: BRN değeri mukavemet ve değişkenlik üzerindeki etkisi (Larsson, 2005). 31

Şekil 2.6: İniş ve çıkış hızının ve devir sayısının mukavemet değerlerine etkisi (a) Nish1ibayashi ve diğ., 1985; Kitazume, 2022; b) Enami ve diğ., 1985; Kitazume, 2022). 32

Şekil 2.7: Kalite kontrol çalışmaları akış şeması (Cement Deep Mixing Method Association, 1999). 32

Şekil 3.1: Numune hazırlamada kullanılan kalıplar. 36

Şekil 3.2: EXCEL ortamında yapılan hesaplamalara ait örnek. 37

Şekil 3.3: a) Sulu harç hazırlanması b) Doğal zemin ile sulu harcın karıştırılması ile karışım numunesinin hazırlanması c) Numune hazırlanması d) Numunenin kaplanması e) Numunenin küre bırakılması. 37

Şekil 3.4: Birinci muayene çukuru ve açılan çukurdan alınan turba zemin (A Sahası). 39

Şekil 3.5: İkinci muayene çukuru ve açılan çukurdan alınan inorganik zemin (A Sahası). 40

Şekil 3.6: A sahasından doğal zemin numunesi alımı. 42

Şekil 3.7: B sahasından getirilen doğal zemin numuneleri. 43

Şekil 3.8: A sahasında yapılan kolon imalatlarının detayı. 47

Şekil 3.9: Kolon imalatlarının yapıldığı A sahası. 48

Şekil 3.10: A sahasında kullanılan makine ve bıçakları. 48

Şekil 3.11: A sahasında imal edilen kolonların yapım aşaması. 49

Şekil 3.12: A sahasındaki kolonların imalatlarının tamamlanmasından sonra üstten görünümü. 49

Şekil 3.13: A sahasında imal edilen kolonlardaki posa miktarları. 49

Şekil 3.14: Islak numune alıcı. 50

Şekil 3.15: A sahasında kolonlardan ıslak numune alıcı ile numune alınması. 50

Şekil 3.16: Islak numune alıcı için yaptırılan kalıplar. 51

Şekil 3.17: A sahasında yapılan kalite kontrol arazi deneyi uygulamaları. 51

Şekil 3.18: A sahasından alınan karotlara ilişkin fotoğraflar. 52

Şekil 3.19: B sahasında yapılan kolon imalatlarının detayı. 53

Şekil 3.20: Kolon imalatlarının yapıldığı B sahası. 53

Şekil 3.21: B sahasında kullanılan makine ve bıçakları. 53

Şekil 3.22: B sahasında imal edilen kolonların yapım aşaması. 54

Şekil 3.23: B sahasındaki kolonların imalatlarının tamamlanmasından sonra görünümü. 54

Şekil 3.24: Kolon imalatı sırasında yüksek plastisiteli kil nedeniyle kil kolonunun çıkması (Kil karışmamakta, augere ve bıçaklara yapışıp yukarı gelmektedir.). 54

Şekil 3.25: Islak numune alma aleti 55

Şekil 3.26: B sahasındaki kolonlardan ıslak numune alınması. 55

Şekil 3.27: Islak numune alıcı ile alınan numunelerin kalıplanması. 56

Şekil 3.28: B sahasında yapılan kalite kontrol arazi deneyi uygulamaları. 56

Şekil 3.29: A sahasından alınan karotlara ilişkin fotoğraflar. 57

Şekil 4.1: Turba zeminin yüksek dereceli etüvde yakılması. 59

Şekil 4.2: 28 gün kür süresi sonrasında numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Turba, CEM I, 350 kg/m^3-400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250). 60

Şekil 4.3: Serbest basınç mukavemetinin kür süresine bağlı değişimi (Turba, CEM I, 350 kg/m^3-400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250). 60

Şekil 4.4: Elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (Turba, CEM I, 350 kg/m^3-400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250). 61

Şekil 4.5: 28 gün kür süresi sonrasında numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Turba, CEM II, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250) 62

Şekil 4.6: Serbest basınç mukavemetinin kür süresine bağlı değişimi (Turba, CEM II, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250).....62

Şekil 4.7: Elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (Turba, CEM II, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250).....63

Şekil 4.8: 28 gün kür süresi sonrasında numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Turba, CEM III, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250). 63

Şekil 4.9: Serbest basınç mukavemetinin kür süresine bağlı değişimi (Turba, CEM III, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250). 64

Şekil 4.10: Elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (Turba, CEM III, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250). 64

Şekil 4.11: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (Turba, CEM I - CEM II - CEM III). 65

Şekil 4.12: İnorganik zeminin kıvam limitleri ve plastisite kartındaki yerinin gösterimi. 66

Şekil 4.13: 28 gün kür süresi sonrasında numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (İnorganik, CEM I, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=1.0-1.3, w_{in}=%28). 67

Şekil 4.14: Serbest basınç mukavemetinin kür süresine bağlı değişimi (İnorganik, CEM I, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=1.0-1.3, w_{in}=%28). 68

Şekil 4.15: Elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (İnorganik, CEM I, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=1.0-1.3, w_{in}=%28). 68

Şekil 4.16: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (İnorganik, CEM I, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=1.0-1.3, w_{in}=%28). 69

Şekil 4.17: 28 gün kür süresi sonrasında numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Turba, CEM II, farklı çimento dozajı, w:c=0.8, w_{in}=%450). 71

Şekil 4.18: Serbest basınç mukavemetinin kür süresine bağlı değişimi (Turba, CEM II, farklı çimento dozajı, w:c=0.8, w_{in}=%450). 71

Şekil 4.19: Serbest basınç mukavemetinin derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon (DSM-1 ila DSM-14) karot numuneleri ve organik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, A Sahası). 72

Şekil 4.20: Birim hacim ağırlığın derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon (DSM-1 ila DSM-14) karot numuneleri ve organik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, A Sahası). 72

Şekil 4.21: Su muhtevasının derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon (DSM-1 ila DSM-14) karot numuneleri ve organik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, A Sahası). 73

Şekil 4.22: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (Turba, CEM II, farklı çimento dozajı, w:c=0.8, w_{in}=%450).....73

Şekil 4.23: Doğal zeminin plastisite kartındaki yerinin gösterimi (A Sahası). 74

Şekil 4.24: 28 gün kür süresi sonrasında numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (İnorganik, CEM II, farklı çimento dozajı, w:c=0.8, w_{in}=%35).....75

Şekil 4.25: Serbest basınç mukavemetinin kür süresine bağlı değişimi (İnorganik, CEM II, farklı çimento dozajı, w:c=0.8, w_{in}=%35).....75

Şekil 4.26: Serbest basınç mukavemetinin derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon karot numuneleri ve inorganik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, A Sahası).76

Şekil 4.27: Serbest basınç mukavemetinin derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon karot numuneleri ve inorganik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, A Sahası).76

Şekil 4.28: Birim hacim ağırlığın derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon karot numuneleri ve inorganik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, A Sahası).....77

Şekil 4.29: Su muhtevasının derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon karot numuneleri ve inorganik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, A Sahası).....77

Şekil 4.30: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (İnorganik, CEM II, farklı çimento dozajı, w:c=0.8, w_{in}=%35).....78

Şekil 4.31: Doğal zeminin plastisite kartındaki yerinin gösterimi (B Sahası). 78

Şekil 4.32: 28 gün kür süresi sonrasında numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (İnorganik, CEM I, farklı çimento dozajı, w:c=1.0, w_{in}=%42).....79

Şekil 4.33: Serbest basınç mukavemetinin kür süresine bağlı değişimi (İnorganik, CEM I, farklı çimento dozajı, w:c=1.0, w_{in}=%42).....80

Şekil 4.34: Serbest basınç mukavemetinin derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon karot numuneleri ve inorganik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, B Sahası).80

Şekil 4.35: Birim hacim ağırlığın derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon karot numuneleri ve inorganik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, B Sahası).....81

Şekil 4.36: Su muhtevasının derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon karot numuneleri ve inorganik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, B Sahası).....81

Şekil 4.37: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (İnorganik, CEM I, farklı çimento dozajı, w:c=1.0, w_{in}=%42).....82

Şekil 4.38: 28 gün kür süresi sonrasında farklı başlangıç su muhtevalarına sahip numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri, A Sahası a) 400 kg/m^3, b) 350 kg/m^3, c) 300 kg/m^3.....83

Şekil 4.39: Farklı başlangıç su muhtevalarına sahip numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine bağlı değişimi, A Sahası a) 400 kg/m^3, b) 350 kg/m^3, c) 300 kg/m^3 84

Şekil 4.40: Farklı kür günlerindeki numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin zeminin başlangıç su muhtevasına bağlı değişimi, A Sahası a) 400 kg/m^3, b) 350 kg/m^3, c) 300 kg/m^3. 85

Şekil 4.41: Farklı kür günlerindeki numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin Likidite İndeksine bağlı değişimi, A Sahası a) 400 kg/m^3, b) 350 kg/m^3, c) 300 kg/m^3. 86

Şekil 4.42: 400 kg/m^3 çimento dozajındaki numunelerin 28 gün kür süresi sonrasında serbest basınç mukavemetlerinin Likidite İndeksine bağlı değişimi (A Sahası). 87

Şekil 4.43: 400 kg/m^3 çimento dozajında ve farklı başlangıç su muhtevasındaki numunelerin 28 gün sonrasında civalı porozimetri eğrileri (A Sahası). 88

Şekil 4.44: 400 kg/m^3 çimento dozajındaki numunelerin 28 gün ve bir yıl kür süresi sonrasında serbest basınç mukavemetlerinin likidite indeksine bağlı değişimi (A Sahası). 88

Şekil 4.45: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (İnorganik, 400 kg/m^3, CEM II, farklı başlangıç su muhtevası, A Sahası). 89

Şekil 4.46: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (İnorganik, 350 kg/m^3, CEM II, farklı başlangıç su muhtevası, A Sahası). 90

Şekil 4.47: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (İnorganik, 300 kg/m^3, CEM II, farklı başlangıç su muhtevası, A Sahası). 90

Şekil 4.48: 28 gün kür süresi sonrasında farklı oranlardaki katkı malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (İnorganik, 400 kg/m^3 dozaj, w:c=0.8, w_{in}=%25, A Sahası). 91

Şekil 4.49: Farklı oranlardaki katkı malzemelerinin serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine bağlı değişimi (İnorganik, 400 kg/m^3 dozaj, w:c=0.8, w_{in}=%25, A Sahası). 92

Şekil 4.50: 28 gün kür süresi sonrasında farklı oranlardaki katkı malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (İnorganik, 400 kg/m^3 dozaj, w:c=0.8, w_{in}=%35, A Sahası). 92

Şekil 4.51: Farklı oranlardaki katkı malzemelerinin serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine bağlı değişimi (İnorganik, 400 kg/m^3 dozaj, w:c=0.8, w_{in}=%35, A Sahası). 93

Şekil 4.52: 28 gün kür süresi sonrasında farklı oranlardaki katkı malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (İnorganik, 400 kg/m^3 dozaj, w:c=0.8, w_{in}=%50, A Sahası). 93

Şekil 4.53: Farklı oranlardaki katkı malzemelerinin serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine bağlı değişimi (İnorganik, 400 kg/m^3 dozaj, w:c=0.8, w_{in}=%50, A Sahası). 93

Şekil 4.54: 28 gün kür süresi sonrasında farklı oranlardaki katkı malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (İnorganik, 400 kg/m^3 dozaj, w:c=0.8, w_{in}=%58, A Sahası). 94

Şekil 4.55: Farklı oranlardaki katkı malzemelerinin serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine bağlı değişimi (İnorganik, 400 kg/m^3 dozaj, w:c=0.8, w_{in}=%58, A Sahası). 94

Şekil 4.56: Organik zemin ile hazırlanan numunelerin elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (A Sahası) 95

Şekil 4.57: Elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (İnorganik zemin, katkı türü sadece çimento, A Sahası) 96

Şekil 4.58: Elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (İnorganik zemin, katkı türü kireç+çimento, A Sahası) 96

Şekil 4.59: 28 gün kür süresi sonrasında farklı başlangıç su muhtevalarına sahip numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri, B Sahası a) 350 kg/m^3, b) 300 kg/m^3, c) 250 kg/m^3. 98

Şekil 4.60: Farklı başlangıç su muhtevalarına sahip numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine bağlı değişimi, B Sahası a) 350 kg/m^3, b) 300 kg/m^3, c) 250 kg/m^3 99

Şekil 4.61: Farklı kür günlerindeki numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin zeminin başlangıç su muhtevasına bağlı değişimi, B Sahası a) 350 kg/m^3, b) 300 kg/m^3, c) 250 kg/m^3. 100

Şekil 4.62: Farklı kür günlerindeki numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin Likidite İndeksine bağlı değişimi, B Sahası a) 350 kg/m^3, b) 300 kg/m^3, c) 250 kg/m^3 101

Şekil 4.63: 28 gün kür süresi sonrasında tüm dozajların serbest basınç mukavemetlerinin Likidite İndeksine bağlı değişimi (B Sahası). 102

Şekil 4.64: 300 kg/m^3 çimento dozajında ve farklı başlangıç su muhtevasındaki numunelerin 28 gün sonrasında civalı porozimetri eğrileri (B Sahası). 103

Şekil 4.65: 300 kg/m^3 çimento dozajındaki numunelerin 28 gün ve bir yıl kür süresi sonrasında serbest basınç mukavemetlerinin likidite indeksine bağlı değişimi (B Sahası). .. 103

Şekil 4.66: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (İnorganik, 350 kg/m^3, CEM I, farklı başlangıç su muhtevası, B Sahası) 104

Şekil 4.67: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (İnorganik, 300 kg/m^3, CEM I, farklı başlangıç su muhtevası, B Sahası) 105

Şekil 4.68: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (İnorganik, 250 kg/m^3, CEM I, farklı başlangıç su muhtevası, B Sahası) 105

Şekil 4.69: 28 gün kür süresi sonrasında farklı oranlardaki katkı malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (İnorganik, 350 kg/m^3 dozaj, w:c=1.0, w_{in}=%42, B Sahası) 106

Şekil 4.70: Farklı oranlardaki katkı malzemelerinin serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine bağlı değişimi (İnorganik, 350 kg/m^3 dozaj, w:c=1.0, w_{in}=%42, B Sahası). 107

Şekil 4.71: 28 gün kür süresi sonrasında farklı oranlardaki katkı malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (İnorganik, 300 kg/m^3 dozaj, w:c=1.0, w_{in}=%53, B Sahası).....107

Şekil 4.72: Farklı oranlardaki katkı malzemelerinin serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine bağlı değişimi (İnorganik, 300 kg/m^3 dozaj, w:c=1.0, w_{in}=%53, B Sahası). 107

Şekil 4.73: Elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (İnorganik zemin, katkı türü sadece çimento, B Sahası).....108

Şekil 4.74: Elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (İnorganik zemin, katkı türü kireç+çimento, B Sahası) 109

Şekil 4.75: Sondaj logo (SK-1, A Sahası). 110

Şekil 4.76: Islak numuneler üzerinde yapılan basınç testi sonucu kırılan numuneler (A Sahası). 111

Şekil 4.77: Islak numune alıcı ile alınan numunelerde mukavemet-derinlik değişimi (A Sahası). 111

Şekil 4.78: Kategorileri temsil eden karot fotoğrafları (A Sahası).....112

Şekil 4.79: Çizilen kolon profilleri (A sahası).....113

Şekil 4.80: DSM-1 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).....115

Şekil 4.81: DSM-2 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).....115

Şekil 4.82: DSM-3 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).....115

Şekil 4.83: DSM-4 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).....115

Şekil 4.84: DSM-5 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).....116

Şekil 4.85: DSM-6 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).....116

Şekil 4.86: DSM-7 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).....116

Şekil 4.87: DSM-8 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).....116

Şekil 4.88: DSM-9 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).....117

Şekil 4.89: DSM-10 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).....117

Şekil 4.90: DSM-11 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).....117

Şekil 4.91: DSM-12 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).....117

Şekil 4.92: DSM-13 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).....118

Şekil 4.93: DSM-14 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).....118

Şekil 4.94: DSM-15 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası). 118

Şekil 4.95: DSM-16 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası). 118

Şekil 4.96: Karot sandıklarındaki numunelerin ayrılması (A Sahası). 119

Şekil 4.97: Karot sandıklarındaki numunelerin kesimi. 119

Şekil 4.98: Karot numunelerinin mukavemet değerlerinin derinlikle değişimi (A Sahası). ..120

Şekil 4.99: Karot numunelerinin birim hacim ağırlıklarının derinlikle değişimi (A Sahası). 121

Şekil 4.100: Nokta yükleme deneyi. 121

Şekil 4.101: Nokta yükleme deney sonuçları (A Sahası). 121

Şekil 4.102: Nokta yükleme deney verilerinin diğer karot numunelerinin deney sonuçları ile birlikte değerlendirilmesi (A Sahası). 122

Şekil 4.103: Sondaj kuyusundan alınan farklı derinlikteki numunelerin elek analizi (A Sahası). 123

Şekil 4.104: Sondaj kuyusunda derinlik boyunca likit limit ve plastisite indeksi değişimi (A Sahası). 123

Şekil 4.105: Sondaj kuyusundan alınan farklı derinlikteki numunelerin plastisite kartındaki yerlerinin gösterimi (A Sahası). 123

Şekil 4.106: Sondaj kuyusu ve kolon numunelerinin dane dağılım eğrileri (A Sahası). 124

Şekil 4.107: Sondaj kuyusu ve kolon numunelerinin #4 nolu elekten geçen yüzdelerinin derinlikle değişimi (A Sahası). 124

Şekil 4.108: Sondaj kuyusu ve kolon numunelerinin #200 nolu elekten geçen yüzdelerinin derinlikle değişimi (A Sahası). 125

Şekil 4.109: Numunelerin likit limitlerinin derinlikle değişimi (A Sahası). 125

Şekil 4.110: Numunelerin plastisite indekslerinin derinlikle değişimi (A Sahası). 125

Şekil 4.111: Numunelerin plastisite kartındaki yerleri (A Sahası). 126

Şekil 4.112: Presiyometre modülünün derinlikle değişimi (A Sahası). 127

Şekil 4.113: Limit basıncın derinlikle değişimi (A Sahası). 127

Şekil 4.114: Net limit basıncın derinlikle değişimi (A Sahası). 128

Şekil 4.115: Presiyometre modülünün net limit basınca bağlı değişimi (A Sahası). 128

Şekil 4.116: Sondaj logo (SK-1, B Sahası). 130

Şekil 4.117: Islak numune alıcı ile alınan numunelerde mukavemet-derinlik değişimi (B Sahası). 131

Şekil 4.118: Kategorileri temsil eden karot fotoğrafları (B Sahası). 132

Şekil 4.119: Çizilen kolon profilleri (B sahası). 133

Şekil 4.120: DSM-1 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası). 134

Şekil 4.121: DSM-2 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası). 134

Şekil 4.122: DSM-3 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası). 135

Şekil 4.123: DSM-4 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası). 135

Şekil 4.124: DSM-5 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası). 135

Şekil 4.125: DSM-6 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası). 135

Şekil 4.126: DSM-7 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası). 136

Şekil 4.127: DSM-8 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası). 136

Şekil 4.128: DSM-9 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası). 136

Şekil 4.129: DSM-10 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası). 136

Şekil 4.130: DSM-11 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası). 137

Şekil 4.131: DSM-12 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası). 137

Şekil 4.132: DSM-13 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası). 137

Şekil 4.133: DSM-14 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası). 137

Şekil 4.134: DSM-15 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası). 138

Şekil 4.135: DSM-16 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası). 138

Şekil 4.136: Karot sandıklarındaki numunelerin ayrılması (B Sahası). 139

Şekil 4.137: Karot numunelerinin mukavemet değerlerinin derinlikle değişimi (B Sahası).. 139

Şekil 4.138: Karot numunelerinin birim hacim ağırlıklarının derinlikle değişimi (B Sahası). 140

Şekil 4.139: Nokta yükleme deney sonuçları (B Sahası). 140

Şekil 4.140: Nokta yükleme deney verilerinin diğer karot numunelerinin deney sonuçları ile birlikte değerlendirilmesi (B Sahası). 141

Şekil 4.141: Sondaj kuyusundan alınan farklı derinlikteki numunelerin elek analizi (B Sahası). 142

Şekil 4.142: Sondaj kuyusunda derinlik boyunca likit limit ve plastisite indeksi değişimi (B Sahası). 142

Şekil 4.143: Sondaj kuyusundan alınan farklı derinlikteki numunelerin plastisite kartındaki yerlerinin gösterimi (B Sahası). 142

Şekil 4.144: Sondaj kuyusu ve kolon numunelerinin dane dağılım eğrileri (B Sahası). 143

Şekil 4.145: Sondaj kuyusu ve kolon numunelerinin #4 nolu elekten geçen yüzdelerinin derinlikle değişimi (B Sahası). 143

Şekil 4.146: Sondaj kuyusu ve kolon numunelerinin #200 nolu elekten geçen yüzdelerinin derinlikle değişimi (B Sahası). 144

Şekil 4.147: Numunelerin likit limitlerinin derinlikle değişimi (B Sahası). 144

Şekil 4.148: Numunelerin plastisite indekslerinin derinlikle değişimi (B Sahası). 144

Şekil 4.149: Numunelerin plastisite kartındaki yerleri (B Sahası). 145

Şekil 4.150: Presiyometre modülünün derinlikle değişimi (B Sahası). 145

Şekil 4.151: Limit basıncın derinlikle değişimi (B Sahası). 146

Şekil 4.152: Net limit basıncın derinlikle değişimi (B Sahası). 146

Şekil 4.153: Presiyometre modülünün net limit basınca bağlı değişimi (B Sahası). 146

Şekil 5.1: Turba zeminde farklı çimento türlerinin etkisi (w:c=0.7). 148

Şekil 5.2: Turba zeminde farklı çimento türlerinin etkisi (w:c=1.0). 149

Şekil 5.3: Turba zeminler için kür faktörünün FHWA (2013) ile karşılaştırılması. 150

Şekil 5.4: İnorganik zeminler için kür faktörünün FHWA (2013) ile karşılaştırılması. 150

Şekil 5.5: Turba zeminin serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişiminin FHWA (2013) ile karşılaştırılması. 151

Şekil 5.6: İnorganik zeminin serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişiminin FHWA (2013) ile karşılaştırılması. 151

Şekil 5.7: Karıştırma etkinliğinin Likidite İndeksi aracılığı ile değerlendirilmesi ve FHWA (2013) ile karşılaştırılması (İnorganik, 400 kg/m^3, A Sahası). 152

Şekil 5.8: Karıştırma etkinliğinin Likidite İndeksi aracılığı ile değerlendirilmesi ve FHWA (2013) ile karşılaştırılması (İnorganik, 350 kg/m^3, B Sahası). 152

Şekil 5.9: Karıştırma etkinliğinin Likidite İndeksi aracılığı ile değerlendirilmesi ve FHWA (2013) ile karşılaştırılması (İnorganik, 300 kg/m^3, B Sahası). 152

Şekil 5.10: Karıştırma etkinliğinin Likidite İndeksi aracılığı ile değerlendirilmesi ve FHWA (2013) ile karşılaştırılması (İnorganik, 250 kg/m^3, B Sahası). 153

Şekil 5.11: Bu çalışmada elde edilen mukavemet-modül korelasyonları (Turba, Katkı: çimento). 153

Şekil 5.12: Bu çalışmada elde edilen mukavemet-modül korelasyonları (İnorganik yüksek plastisiteli kil, Katkı: çimento). 154

Şekil 5.13: Literatür ile karşılaştırma, turba zemin için (Katkı: çimento) mukavemet-modül korelasyonları (Çınar Özkan ve diğ., 2023). 154

Şekil 5.14: Literatür ile karşılaştırma, inorganik yüksek plastisiteli kil için (Katkı: çimento) mukavemet-modül korelasyonları (Çınar Özkan ve diğ., 2023). 155

Şekil 5.15: Göçme birim deformasyonun serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi. 155

Şekil 5.16: İmalat parametreleri aynı olan kolonlarının iyileşme oranlarının karşılaştırılması (A Sahası). 157

Şekil 5.17: İmalat parametreleri aynı olan kolonlarının iyileşme oranlarının karşılaştırılması (B Sahası). 158

Şekil 5.18: Kolon imalatlarında kullanılan çimento dozajına göre kolonların iyileşme oranları (A Sahası). 159

Şekil 5.19: Kolon imalatlarında kullanılan çimento dozajına göre kolonların iyileşme oranları (B Sahası). 159

Şekil 5.20: Önerilen DSM kolonlarının kabul değerine ait bir örnek. 161

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Derin karıştırma ile iyileştirilen zeminlerde genel veriler (Bruce ve Bruce, 2003). 10

Tablo 2.2: Zemin türüne göre E-q_u korelasyonları (Çınar Özkan ve diğ., 2023). 15

Tablo 2.3: Bazı mevcut karışım prosedürlerinin özeti (Kitazume ve diğ., 2009). 22

Tablo 2.4: Karıştırmada problem olması beklenen zeminler (Kawamura ve diğ., 2001). 29

Tablo 2.5: Örnek BRN hesabı (Bozbey ve diğ., 2022a). 30

Tablo 2.6: Avrupa ve Japonya'da ıslak karıştırma yönteminde uygulanan tipik uygulama parametreleri (Massarsch and Topolnicki, 2005). 31

Tablo 2.7: Organik zeminler için farklı bağlayıcılar ile elde edilen göreceli mukavemet artışı (EuroSoilStab, 2002). 33

Tablo 4.1: Zemin özellikleri (Turba, A Sahası). 59

Tablo 4.2: Zemin özellikleri (İnorganik, A Sahası). 66

Tablo 4.3: Zemin özellikleri (A Sahası). 74

Tablo 4.4: Zemin özellikleri (İnorganik, B Sahası). 79

Tablo 4.5: Kolonlardan alınan ıslak numuneler üzerinde yapılan basınç testi sonuçları (A Sahası). 111

Tablo 4.6: Görsel olarak sınıflandırılan numune kategorileri. 112

Tablo 4.7: Basınçlı su testi deney sonuçları (A Sahası). 129

Tablo 4.8: Kolonlardan alınan ıslak numuneler üzerinde yapılan basınç testi sonuçları (B Sahası). 131

Tablo 5.1: Bu çalışmada zemin türüne göre elde edilen E_{50}-q_u korelasyonları 154

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
a_w	: Çimentonun kuru ağırlığı/zeminin kuru ağırlığı
c_u	: Drenajsız kayma mukavemeti
f_c	: Kür faktörü
E_{50}	: Sekant Elastisite Modülü
k	: Permeabilite
L/D	: Boy/çap oranı
LI	: Likidite İndeksi
N	: Numune sayısı
N_d	: İniş sırasındaki dönme hızı
N_u	: Çıkış sırasındaki dönme hızı
$q_{dm,spec}$	: 28 günlük dayanım
q_u	: Serbest basınç mukavameti
s_{dm}	: DSM ile iyileştirilmiş zeminin kayma mukavemeti
T	: Bıçak dönüş sayısı
V	: Kalıp hacmi
V_d	: İnme hızı
V_u	: Çıkış hızı
w:c, w/c	: Su/çimento oranı
w_{in}	: Başlangıç su muhtevası
w_b	: Bağlayıcı miktarı
w_L	: Likit Limit
w_n	: Doğal su muhtevası
w_s	: Kuru zemin ağırlığı
w_T	: Toplam su miktarı
$w_{w,slurry}$	: Sulu harç karışımı için gerekli suyun ağırlığı
α	: Bağlayıcı dozajı
γ_d	: Zeminin kuru birim hacim ağırlığı
ΣM	: Birim metre için karıştırıcı bıçak sayısı

Kısaltmalar	Açıklama
BRN	: Bıçak Dönüş Sayısı
DSM	: Derin Karıştırma Yöntemi
CPT	: Koni Penetrasyon Deneyi
FHWA	: ABD Federal Karayolu İdaresi
RPM	: Devir sayısı
SPT	: Standart Penetrasyon Deneyi
UCS	: Serbest Basınç Mukavemeti

ÖZET

DOKTORA TEZİ

DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİNDE ELDE EDİLEN İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİN ÖZELLİKLERİNİN LABORATUVAR ve ARAZİ ŞARTLARINDA BELİRLENMESİ

Fatma Tuğçe ÇINAR ÖZKAN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği, Doktora Programı

Danışman : Prof. Dr. İlknur BOZBEY

Son yıllarda teknolojinin ilerlemesi ile birçok zemin iyileştirme yöntemi gelişme göstermektedir. Derin karıştırma yöntemi (Deep Mixing Method: DSM) de bunlardan birisidir ve bu yöntemde doğal zemin çeşitli bağlayıcılar ile karıştırılarak yerinde iyileştirme sağlanır. Bu yöntem son yıllarda ülkemizde de sıklıkla kullanılmaktadır. Tez kapsamında derin karıştırma iyileştirme yöntemine yönelik çok kapsamlı bir laboratuvar ve arazi çalışmaları yapılmıştır. İyileştirilmiş zeminlerin mukavemet ve modül özellikleri laboratuvarda kapsamlı bir deney programı ile belirlenmiştir. Deneyler turba ve yüksek plastisiteli zeminler, farklı çimento tipleri ve çimento dozajları ve kür günleri için yapılmıştır. Deneyler sonucunda numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş, serbest basınç mukavemet değerleri bulunmuş ve sekant elastisite modülü değerleri hesaplanmıştır. Mukavemet (q_u) ve modül (E_{50}) değerleri arasında korelasyon kurulmasına yönelik alt ve üst sınırlar önerilmiştir. Bu deneylerde bağlayıcı olarak çimento kullanılmakla birlikte, bir grup numunede çimento ve kirecin birlikte kullanılmasının etkisi de araştırılmıştır. Yüksek plastisiteli killer için karıştırmanın etkin olarak sağlanmasının çok önemli olduğu ve zeminin doğal su muhtevasının bunun için önemli bir etken olduğu gösterilmiştir. Yüksek plastisiteli killerde Likidite İndeksine bağlı karıştırma etkinliği tanımlanmış ve literatüre özgün bir katkı getirilmiştir. Arazi çalışmaları kapsamında farklı imalat parametreleri ile deneme DSM kolonları imal edilmiştir. Sonrasında yapılan kalite kontrol deneyleri ile her kolonda elde edilen iyileşme seviyeleri gözlemsel ve sayısal olarak tespit edilmiştir. İmal edilmiş olan tüm kolonlar süreklilik bakımından titizlikle değerlendirilmiş, farklı kategorilerde iyileştirme elde edilebildiği görülmüştür. Ancak imalat sırasında gerçek zamanlı ölçüm alınamadığı için pek çok kolonda hedeflenen kalitede DSM kolonları elde edilememiştir. Bu tür kolonlarda daha yüksek dozaj kullanımı kalite seviyesini

artıramamıştır. Kolonlardaki iyileşme seviyeleri, imalat parametreleri ve koşulları birlikte değerlendirilmiştir. Laboratuvar ve arazide elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Uygulamaya yönelik öneriler yapılmıştır. Arazideki DSM kolonları için ilave bir kriteri dikkate alan bir öneri getirilmiştir.

Aralık 2023 , 224 sayfa.

Anahtar kelimeler: Derin karıştırma yöntemi (DSM), Zemin iyileştirmesi, Mukavemet-modül korelasyonları, Yüksek plastisiteli kil, Turba, Karıştırma etkinliği

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

LABORATORY and FIELD DETERMINATION of PROPERTIES of SOILS by DEEP MIXING METHOD

Fatma Tuğçe ÇINAR ÖZKAN

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Civil Engineering, Programme of PhD

Supervisor : Prof. Dr. İlknur BOZBEY

In recent years, many soil improvement methods have been developed with the advancement of technology. Deep Mixing Method (DSM) is one of these methods and in this method, natural soil is mixed with various binders and in-situ improvement is provided. This method has been frequently used in our country in recent years. Extensive laboratory and field studies were carried out for the deep mixing method (DSM) within the scope of tht thesis. The unconfined compression strength and modulus properties of the DSM improved soils were determined by a comprehensive test program in laboratory. Experiments were carried out for peat and high plasticity soils, different cement types and cement dosages and curing days. As a result of the experiments, the stress-strain curves of the samples were obtained, the unconfined compressive strength values were found and the secant elasticity modulus values were calculated. Lower and upper limits were recommended for correlations between unconfined compression strength (q_u) and E_{50} values. In these experiments, although cement was used as a binder, the effect of using cement and lime together in a group of samples was also investigated. It has been shown that effective mixing is very important for high plasticity clays and that the natural water content of the soil is an important factor for this. Mixing efficiency in high plasticity clays depending on the Liquidity Index has been defined and an original contribution to the literature has been made. As part of field studies, trial DSM columns were executed with different parameters. With the quality control experiments performed afterwards, the improvement levels obtained in each column were determined observationally and numerically. All manufactured columns were carefully evaluated in terms of continuity, and it was seen that improvement could be achieved in different categories. However, since real-time measurements could not be taken

during manufacturing, DSM columns with the targeted quality could not be obtained in many columns. In such columns, the use of higher dosage could not increase the quality level. Level of improvement obtained in each column, manufacturing parameters and conditions were evaluated together. Values obtained in the laboratory and field were compared. Suggestions for implementation were made. For DSM columns in the field an additional criterion has been proposed.

December 2023, 224 pages.

Keywords: Deep mixing method (DSM), Soil improvement, Strength-modulus correlations, High plasticity clay, Peat, Mixing efficiency

1. GİRİŞ

Son yıllarda teknolojinin ilerlemesi ile birçok zemin iyileştirme yöntemi gelişme göstermektedir. Derin karıştırma yöntemi (Deep Mixing Method: DSM) de bunlardan birisidir. Bu yöntemde doğal zemin çeşitli bağlayıcılar ile karıştırılarak yerinde iyileştirme sağlanır. Bu yöntem son yıllarda ülkemizde de sıklıkla kullanılmaktadır.

Derin karıştırma yöntemi, ulaştırma projelerinde genellikle karayolu dolgu stabilitesini sağlamak ve dolguların oturmasını azaltmak amaçlı kullanılmaktadır. Diğer uygulama alanları ise yapı temelleri, köprü kenar ayakları ve sıvılaşmayı azaltma uygulamaları olarak sıralanabilir. DSM uygulamalarında iyileştirilen malzeme doğal zemine kıyasla yüksek mukavemet, düşük geçirgenlik ve düşük sıkışabilirlik gibi mühendislik özelliklerine sahiptir ve iyileştirilen zeminlerin özellikleri, doğal zeminin ve bağlayıcıların özelliklerine, yükleme durumuna ve kür süresine bağlı olarak değişir. Yöntemin uygulanışı, ıslak karıştırma ve kuru karıştırma olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Islak karıştırma yönteminde bağlayıcı, sulu harç şeklinde zeminle karıştırılırken, kuru karıştırmada mevcut zeminde su olduğundan kuru (toz) olarak karıştırılır. Derin karıştırma yönteminde kullanılan bağlayıcılar genellikle çimento ve kireçtir. Ülkemizdeki mevcut DSM uygulamalarında ise bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılmaktadır.

Derin karışımın zemini nasıl etkileyeceğine dair tahminler elde etmek için, sahadaki imalata başlamadan önce laboratuvar deneyleri uygulanmalıdır. Karıştırma ve kür koşulları arazi ve laboratuvar deneyleri arasında farklılık göstereceğinden, iyileştirilmiş zeminin özelliklerinin de farklı olması beklenir. İyileştirilmiş zemin özellikleri arazi deneyleri ile doğrulanmalıdır, çünkü laboratuvarda hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneyler arazideki davranışı tam olarak gösteremeyebilir.

Bu tez kapsamında derin karıştırma iyileştirme yöntemine yönelik çok kapsamlı bir laboratuvar ve arazi çalışmaları yapılmıştır. İyileştirilmiş zeminlerin mukavemet ve modül özellikleri laboratuvarda kapsamlı bir deney programı ile belirlenmiştir. Bağlayıcı olarak çimento ve iki farklı kireç yüzdesi ile birlikte çimento kullanılmıştır. Arazide farklı imalat parametreleri ile

deneme DSM kolonları imal edilmiştir. Sonrasında yapılan kalite kontrol deneyleri ile elde edilen iyileşme seviyeleri tespit edilmiş, uygulamaya yönelik öneriler yapılmıştır.

Laboratuvar çalışmaları kapsamında ilk olarak numune hazırlama prosedürlerinin belirlenmesi için literatürde mevcut olan farklı dokümanlar incelenmiştir. Seçilen numune hazırlama yöntemi ile laboratuvarda deneme deneyleri yapılmış ve numune hazırlama yönteminin tüm aşamaları detaylı olarak tanımlanmıştır. A ve B olarak adlandırılan iki farklı sahada arazi çalışmaları kapsamında deneme DSM kolonları imal edilmiştir. Deneme DSM kolonlarının yapıldığı bölgelerden inorganik ve organik (turba) doğal zemin numuneleri alınarak laboratuvara getirilmiştir. Laboratuvarda her iki sahadan alınan zemin ile arazide imal edilen deneme DSM kolonlarında kullanılan çimento dozajı ve su/çimento (w:c) oranı kullanılarak derin karışım numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde farklı kür süreleri sonunda serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar, arazide imal edilen kolonlardan alınan tam boy karot numuneleri üzerinde yapılan deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Her iki sahadan alınan doğal zemin numuneleri ile farklı başlangıç su muhtevaları ve bağlayıcı tipleri kullanılarak laboratuvar numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda bütün numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş, serbest basınç mukavemetleri bulunmuş ve sekant elastisite modülü E_{50} değerleri hesaplanmıştır. Sekant elastisite modülü E_{50} ve serbest basınç mukavemeti q_u arasındaki ilişki değerlendirilerek bu ikisi arasında korelasyonlar bulunmasına yönelik alt ve üst sınırlar verilmiştir. Organik içerik derin karıştırma iyileştirmesinden elde edilen faydayı azaltan önemli bir faktördür. Bu nedenle deneylerin bir kısmı da turba zemin ile yapılarak organik içeriğin etkisi incelenmiştir.

Tez kapsamında laboratuvar çalışmalarına ilaveten arazi çalışmaları da yapılmıştır. Arazi çalışmaları kapsamında iki farklı sahada deneme DSM kolon imalatları yapılmıştır. İki sahada da farklı imalat parametreleri ve çimento dozajları uygulanmış, daha sonra imal edilen otuz iki adet derin karıştırma kolonları üzerinde kalite kontrol deneyleri yapılmıştır. Gerek turba, gerekse yüksek plastisiteli killerde DSM uygulamasında karşılaşılabilecek problemler gözlemlenmiştir. Deneme kolonlarından tam boy karot alınmış, kolonların içinde belirli derinliklerde basınçlı su testi ve presiyometre deneyleri yapılmıştır. Aynı zamanda doğal zemini karakterize edebilmek amacıyla iki sahada da zemin sondajı, SPT ve presiyometre deneyleri yapılmıştır. Her iki sahada da karot sandıkları oluşturulmuş ve laboratuvara getirilmiştir. Laboratuvarda karot sandıkları detaylı bir şekilde değerlendirilmiş ve ilk olarak

zemin iyileştirme seviyesine göre gözlemsel olarak sınıflandırılmıştır. Karot numuneleri, farklı testlere tabii tutulmak üzere ayrılmış ve uygun bir ortamda muhafaza edilmiştir. Numuneler üzerinde mukavemet deneyleri (serbest basınç deneyi ve nokta yükleme deneyi) yapılmıştır. Ayrıca parçalanmış numuneler üzerinde elek analizi ve kıvam limit deneyleri yapılarak elde edilmiş olan iyileştirme seviyesi konusunda değerlendirme yapılmıştır. Arazide oluşan ve oluşmayan DSM kolonları için imalata ve zemin tipine yönelik önemli saptamalar yapılmıştır. Bu konuda dikkat edilmesi gereken öneriler sunulmuştur.

Tez altı bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1, Giriş bölümüdür. Bölüm 2'de derin karıştırma yöntemi (DSM) hakkında genel bilgiler verilmiş, DSM uygulamalarından bahsedilmiş, bağlayıcı türleri ve diğer etkilere değinilmiş ve DSM ile iyileştirilen zeminlerin mühendislik özelliklerinden bahsedilmiştir. Aynı zamanda laboratuvarda derin karışım numunelerinin hazırlanmasına yönelik çalışmalar verilmiş ve DSM uygulamalarındaki arazi çalışmalarından bahsedilmiştir. Derin karıştırma ile iyileştirilmiş zeminlerin laboratuvar ve arazi şartlarındaki mühendislik özelliklerine değinilmiş ve organik zeminler için dikkat edilmesi gereken hususlardan bahsedilmiştir.

Bölüm 3'te laboratuvarda derin karışım numunelerin hazırlanma yönteminden bahsedilmiş, kullanılan bağlayıcı türleri hakkında genel bilgiler verilmiş ve laboratuvar deneyleri kapsamında hazırlanan numuneler kategorilere ayrılarak bu numunelerin özellikleri verilmiştir. Aynı zamanda A ve B sahalarında yapılan arazi çalışmaları anlatılmıştır.

Bölüm 4'te tez kapsamında yapılmış olan laboratuvar ve arazi çalışmalarından elde edilen bulgular sunulmaktadır. Laboratuvarda hazırlanan bütün numunelerin; mukavemet-kür günü ilişkisi, 28 günlük serbest basınç mukavemeti-toplam su-çimento oranı ilişkisi, sekant elastisite modülü-serbest basınç mukavemeti ilişkisi bulunmuştur. Laboratuvarda hazırlanan numunelerin, kullanılan zemin türene, bağlayıcı türüne ve miktarına, su/çimento oranına göre mukavemet değişimleri incelenmiştir. Aynı zamanda arazide deneme DSM kolon imalatları sonrasında alınan karot sandıkları incelenmiş ve karot numuneleri üzerinde yapılan deney sonuçları bu bölümde sunulmuştur. Arazide ve laboratuvarda yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bölüm 5'te laboratuvar ve arazi bulgularında elde edilen sonuçlar derlenmiş ve literatürde mevcut olan çalışmalar ile birlikte değerlendirilmiştir.

Bölüm 6’da ise tez kapsamında elde edilen bütün sonuçlar sunulmuştur. Derin karıştırma iyileştirmesinde, laboratuvar ve arazi uygulamalarına yönelik önerilerde bulunulmuştur.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ (DSM) HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Son yıllarda teknolojinin ilerlemesi ile birçok zemin iyileştirme yöntemi gelişme göstermektedir. Derin karıştırma yöntemi (DSM) de bunlardan biridir. Derin karıştırma yöntemi (DSM), ilk olarak Japonya ve İsveç'te ortaya çıkmış, daha sonra Amerika Birleşik Devletleri başta olmak üzere birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Ülkemizde de derin karıştırma uygulamaları son yıllarda sık olarak kullanılmaktadır.

Derin karıştırma yöntemi (DSM), doğal zeminin çeşitli bağlayıcılar ile karıştırılarak yerinde iyileştirilmesi işlemidir. Derin karıştırma yönteminde zemini kazmadan, çeşitli ekipmanlar kullanılarak doğal zemin ve bağlayıcı yerinde karıştırılarak iyileştirme sağlanır. Derin karıştırma yöntemi ile elde edilen iyileştirilmiş zeminin mukavemet, elastisite modülü, poisson oranı, permeabilite ve birim ağırlığı gibi mühendislik özellikleri değişmektedir. Derin karıştırma yönteminde amaç zeminlerin sıkışabilirliğini azaltmak ve mukavemetini artırmaktır. Doğal zeminlere kıyasla, oluşturulan kompozit malzeme yüksek mukavemet, düşük geçirgenlik ve düşük sıkışabilirlik gibi mühendislik özelliklerine sahip olmaktadır. İyileştirilmiş zeminlerin mukavemet ve deformasyon özelliklerini çok sayıda faktörün etkilediği bilinmektedir. Bu faktörler, başlıca bağlayıcının özelliklerine (tür, miktar), zemin koşullarına (zemin tipi, nem içeriği ve organik içerik), karıştırma koşullarına (karıştırma derecesi) ve kür koşullarına bağlıdır (Terashi, 1997; Bruce ve diğ., 2013).

Bu yöntemin ıslak ve kuru karıştırma olmak üzere iki farklı türü vardır. Islak derin karıştırma yönteminde bağlayıcı madde sulu enjeksiyon şeklinde uygulanırken, kuru derin karıştırma yönteminde ise bağlayıcı toz halinde kuru olarak uygulanmaktadır. Derin karıştırma yönteminin uygulama alanı çok geniştir. Kara ve deniz yapılarında uygulanabilmektedir. DSM uygulaması en çok dolguların stabilitesi ve oturmalarının azaltılması için kullanılmaktadır (Terashi, 2009). Bu nedenle, bu zemin iyileştirme yöntemi ulaştırma projeleri için çok önemli bir iyileştirme tipi olarak yer bulmaktadır. Duvar tipi, kolon tipi, ızgara tipi ve blok tipi gibi çeşitleri mevcuttur.

Derin karıştırma yönteminde kullanılan bağlayıcılar genellikle çimento ve kireçtir. Bunların yanı sıra uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu vb. gibi bağlayıcılar da

kullanılmaktadır. İyileştirme sürecinde kısa vadede kil minerallerin yüzeyinde oluşan iyon değişimi ve uzun vadede oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucunda pozolanik mineraller oluşmaktadır. Çeşitli kimyasal bağlayıcıların geliştirilip kullanılmasına rağmen, günümüzde en çok kullanılan bağlayıcılar kullanılabilirliği ve maliyetinden dolayı kireç ve çimentodur.

Birçok avantajının yanı sıra ekonomik olması sebebiyle derin karıştırma yöntemi, sıkışabilir ve yüksek organik içerikli zeminlerin iyileştirilmesinde, zemin güçlendirme, istinat duvarı (geçici veya nihai), temeller ve sızdırmazlık perdeleri için geleneksel yöntemlere bir alternatiftir. Ancak bu yeni uygulamalar, malzemeler üzerinde olduğu kadar yöntem üzerinde de yeni gereklilikleri ortaya koymaktadır. Sertleşmiş malzeme üzerinde çok sayıda araştırma yapılmasına rağmen, uluslararası standart ve uygulama eksikliğinden dolayı ve genellikle belirli bir zemin türüne odaklanıldığından, yaygın olarak uygulanabilir bir formül veya nomogram bulunmamaktadır (Szymkiewic ve diğ., 2015).

Derin karışımın zemini nasıl etkileyeceğine dair tahminler elde etmek için, inşaattan önce laboratuvar deneyleri uygulanmalıdır. Karıştırma ve kür koşulları arazi ve laboratuvar deneyleri arasında farklılık göstereceğinden, zemin davranışı da farklılık gösterecektir (Amin, 2015). Zeminin iyileştirilmiş özellikleri arazi deneyleri ile doğrulanmalıdır, çünkü laboratuvarda hazırlanan numuneler üzerindeki deneyler tam olarak kayma mukavemeti ve deformasyon özelliklerini verememektedir (Larsson, 2005).

2.2. DERİN KARIŞTIRMA YÖNTEMİ (DSM) UYGULAMALARI

Derin karıştırma yönteminin birçok uygulama alanı vardır. Bu uygulama alanları şunlardır (Porbaha ve diğ., 1998);

- Kıyı ve deniz uygulamaları (rıhtım duvarları, iskele yapıları, dalgakıranlar)
- Yapı temelleri (tanklar ve kuleler, köprü ayakları, altyapı tesisleri, dolgu stabilizasyonu, istinat duvarları, yapı temelleri)
- Toprak basıncının kontrol altına alınması (temel kabarması, kazı kontrol, toprak ve şev kayması, komşu yapıların desteklenmesi, açık kazı stabilizasyonu)
- Sızıntı kontrolü (baraj iyileştirmesi, nehir kıyısı stabilizasyonu)
- Sıvılaşmanın engellenmesi
- Çevresel uygulamalar

Günümüzde bu yöntem; zemin iyileştirilmesi, şev stabilitesinin iyileştirilmesi (yapılar ve dolgular), oturmaların azaltılması (yapılar ve dolgular), kazıların ve şevlerin desteklenmesi, taşıma kapasitesinin artırılması, vibrasyon ve bunun yapılar üzerindeki etkilerinin azaltılması, sismik etkilerin ve sıvılaşmanın azaltılması, muhafaza yapılarının inşasında, atık depozitlerin ya da kirli zeminlerin immobilizasyonu ve/veya kapatılması gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır (Holm, 1999).

DSM uygulamaları farklı geometrilerde yapılabilir. Derin karıştırma yönteminin uygulama şekilleri; tekil kolonlar, duvar veya paneller, kafesler, ızgara sistemler ya da bloklar şeklinde olabilir. Kitazume ve Terashi (2013)'te belirtildiği gibi, bu geometri tiplerinin hangisinin kullanılması gerektiği arazide gerek duyulan taşıma kapasitesine, üst yapı tarafından aktarılan yüklerin büyüklüğüne ve zemin koşullarına bağlıdır.

- Tekil kolonlar ile zemindeki oturmaları azaltmak ve zeminin taşıma kapasitesini artırmak amaçlanır. Bu tür sistemler üst yapı yükünün düşük olduğu durumlarda tercih edilir. Tekil kolonlar, dolgu şev tabanında kullanılmaları durumunda düşük çekme ve eğilme mukavemetleri nedeniyle göçmeye maruz kalabilir.
- Tanjant grup kolonlar, yatay yüklerin az olduğu durumlarda yüksek stabilite sağlar. Kolonların bitişik (kesişen değil) üretilmesi için detaylı bir imalat işlemi gerekir. Genel stabilite ve tanjant kolonların iç stabilitesinin kontrolü gerekir. Alan yer değiştirme oranı, tekil kolonlara göre daha yüksek olduğu için etkili bir yöntemdir.
- Derin karıştırma yönteminde birbiriyle örtüşen kolon sistemlerinin bir araya gelerek oluşturdukları uygulama şekli duvar sistemi olarak adlandırılır. Bu sistemde üst yapıdan gelen yüklerin taşınması ve gelen yüklerin sağlam zemine aktarılması amacıyla imal edilen uzun duvarlar ve bu duvarları dik kesen uzun duvarların stabilitesini sağlamak amacıyla uygulanan kısa duvarlar mevcuttur. İmalatın kolonlar arasında yeterli teması sağlayacak şekilde yapılmış olması gerekir. Duvarlar arasında kalan iyileştirilmiş zemin için de tahkik yapılması gerekir. Duvarların birbiri ile olan mesafesi önemli bir parametredir.
- DSM'nin duvar ve blok sistemlerinin bir arada kullanılmasıyla oluşturulan uygulama şekli ise ızgara sistemi olarak adlandırılır. İmalat sırası zorluk getirebilir. Sayısal olarak üç boyutlu olarak çözülmesi uygundur.
- Blok sistemler ise büyük yatay kuvvetlere karşı stabiliteyi koruyabilir. Tüm kolonlar kesişen kolon olarak imal edildiği için imalat uzun sürer.

2.3. BAĞLAYICI TÜRLERİ VE DİĞER ETKİLER

Derin karıştırma yönteminde kullanılan bağlayıcılar genellikle çimento ve kireçtir. Bunların yanı sıra uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu vb. gibi bağlayıcılar da kullanılmaktadır. Bağlayıcıların ana işlevi, daha yüksek kayma dayanımı ve direnci ile karakterize edilen ve zeminin deformasyon özelliklerini iyileştiren yeni malzemelerin oluşumuna neden olan kimyasal reaksiyonlar meydana getirmektir. Zemini karıştırma etkinliği birçok faktöre bağlıdır, ancak sonuçları en çok etkileyen şey, bağlayıcıların miktarıdır (Ghirardini, 2016).

Çimento, zemin iyileştirmede kullanılabilecek en etkili malzemedir. Çimento ile stabilize edilmiş zeminler üzerinde yapılan serbest basınç deneyleri, artan çimento miktarı (a_w, çimentonun kuru ağırlığı/zeminin kuru ağırlığı) ve kür süresinin UCS'yi doğrudan artırdığını göstermektedir (Lade ve Overton, 1989; Lorenzo ve Bergado, 2004).

Lorenzo ve Bergado (2004), farklı su içeriğine (%100, %130 ve %160) sahip, çimento (çimento içeriği %5, %10, %15 ve %20) ile iyileştirilmiş yumuşak Bangkok kili üzerinde UCS ve ödometre deneyleri gerçekleştirmiştir. Çimento miktarının arttıkça iyileştirilmiş zeminin birim ağırlığının da arttığını belirtmişlerdir. Bunun nedeni, çimentolanma ürünlerinin oluşumunun birim hacimdeki katı madde miktarını artırmasıdır. Aynı yıl, Horpibulsuk ve diğ. (2004), sürtünme açısının zemine az miktarda çimento (%6) eklenmesiyle önemli ölçüde arttığını belirtmiştir. Fakat çimentonun daha da artmasının performansı önemli ölçüde iyileştirmeyeceğini belirtmiştir.

Janz ve Johansson (2002), farklı türdeki bağlayıcıların etkisi üzerinde çalışmıştır. Killi zeminler üzerinde çimento veya kireç-çimento kullanımı her zaman daha iyi bir etkiye sahip iken sadece kireç kullanımının her zaman çimento veya kireç-çimentodan daha az etkili olduğunu göstermiştir.

Kireç ve çimentonun birlikte kullanımı çoğu zaman avantajlıdır, çünkü çimentonun hidratlanması hızlı bir mukavemet iyileşimi verirken, kireç puzolanik reaksiyonları hızlandırır. Jacobson ve diğ. (2005), çok yumuşak zemin ve yüksek derecede sıkıştırılabilir silt ve killerin alüvyal çökeltileri üzerindeki en iyi etkiyi belirlemek için farklı kireç-çimento karışımlarını test etmişlerdir. Çimento ve kirece bağlı olarak değişen mukavemet değerlerini incelemiş ve mukavemetin kireçten ziyade çimento miktarına bağlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Åhnberg (2006), yüksek kayma mukavemetine ulaşmak için en uygun karışımın %60-90 çimento aralığında ve %40-10 kireç aralığında olduğunu belirtmektedir. Ancak doğru kireç-çimento oranı durumdan duruma değişiklik göstermektedir. Çünkü bu oran zemin türüne ve özelliklerine bağlıdır.

Åhnberg ve Holmen (2008), farklı türlerde bağlayıcı kullanarak (çimento, kireç, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve uçucu külü) bu bağlayıcıların çeşitli kombinasyonları üzerinde çalışmıştır. Zemine karıştırılan bağlayıcı miktarının 50-250 kg/m^3 arasında değişmekte olduğunu ancak genellikle 100 kg/m^3 bağlayıcı miktarının kullanıldığını belirtmektedir.

Çimento reaktivetisini etkileyen en önemli faktörlerden biri de su-çimento oranıdır. Yüksek su-çimento oranı, yüksek su içeriği, dolayısıyla yüksek porozite ve düşük mukavemeti ifade etmektedir (Ghirardini, 2016).

Farouk ve Shahien (2013), SM sınıfından iki farklı zemin üzerinde deneyler yaparak su-çimento oranının gerilme-şekil değiştirme davranışına olan etkilerini incelemiştir. Su-çimento oranının artması ile zeminde mukavemet azalımı olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca çimento miktarının zeminin gerilme-şekil değiştirme davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çimento miktarının artması ile mukavemet ve elastisite modülü değerlerinin arttığını belirtmişlerdir.

DSM uygulamalarında çimento dozajı zeminin kuru ağırlığına bağlı olarak %6-%15 arasında değişmektedir. İnce daneli killi zeminler için, iri danelilere kıyasla daha fazla miktarda çimentoya ihtiyaç olduğu bilinmektedir (Farouk ve Shahien, 2013). Benzer mukavemet seviyeleri için kumlu zeminler, killi zeminlere göre daha az çimentoya gereksinim duyar. Organik zeminler için de inorganik zeminlere kıyasla daha fazla çimento kullanmak gerekir. Ayrıca organik zeminler için cüruf içeren çimentolar, içermeyenlere göre daha etkili olabilmektedir. Çimento tiplerine göre kür sürecinde ulaşılan mukavemet değerleri de değişebilmektedir.

2.4. DSM ile İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

Derin karıştırma ile iyileştirilmiş zeminlerin önemli mühendislik özellikleri arasında mukavemet, modül, Poisson oranı, permeabilite ve birim hacim ağırlık değerleri sayılabilir. Stabilite analizleri için, mukavemet ve birim hacim ağırlık gibi malzeme özelliklerine ihtiyaç vardır. DSM, hidrolik bariyerler oluşturmak için kullanıldığında sızıntı analizleri için

permeabilitenin de bilinmesi gerekir. Sayısal analizler için mukavemet, modül, Poisson oranı ve birim hacim ağırlık değerlerinin bilinmesi gerekmektedir Güvenilirlik analizleri için bu değerlerin değişebilirliğinin bilgisi de gerekmektedir (Bruce ve diğ., 2013).

Babasaki ve diğ. (1996), malzemelerin mekanik özelliklerindeki iyileşme seviyesini etkileyen faktörleri, bağlayıcı ve zemin özellikleri, karıştırma sürecinin etkinliği ve kür koşulları olarak sıralamıştır. Drenajsız ve drenajlı kayma mukavemeti, sıkışma modülü, elastisite modülü ve permeabilite iyileştirilmiş zemin davranışını önemli ölçüde etkileyen özelliklerdir (Ghirardini, 2016). Bruce ve Bruce (2003), derin karıştırma ile iyileştirilen zeminlerin özelliklerini Tablo 2.1'de özetlemektedir.

Tablo 2.1: Derin karıştırma ile iyileştirilen zeminlerde genel veriler (Bruce ve Bruce, 2003).

Islak Yöntemler	
Özellik	**Tipik Aralık**
UCS (genellikle 28 gün)	0.2-5.0 MPa (0.5-5.0 MPa granüler zeminlerde) (0.2-2.0 MPa kohezyonlu zeminlerde)
Permeabilite, k	10^{-6}-10^{-9} m/s (Bentonit kullanılması durumunda daha düşük olur.)
Modül değeri, E_{50}	Laboratuvar numuneleri için (350-1000)*UCS Arazi numuneleri için (150-500)*UCS
Kayma mukavemeti (direkt kesmeden, normal gerilme yok)	UCS değerleri < 1.0 MPa durumunda %(40-50)UCS, fakat bu oran UCS arttığında kademeli olarak azalır.
Çekme dayanımı	Genellikle %(8-14)UCS
28 günlük UCS	Silt ve killer için 7 günlük dayanımın 1.4–1.5 katı Kumlar için 7 günlük dayanımın 2 katı
60 günlük UCS	15 yıllık UCS'nin 60 günlük UCS'ye oranı 3:1 kadar yüksek olabilirken, 28 günlük UCS'nin 1.5 katı. Genelde yüksek w/c oranlı harçların 28 günden sonra ulaşılan uzun vadeli dayanımı çok daha azdır.
Kuru Yöntemler	
Drenajsız kayma mukavemeti, c_u	(10-50)*zeminin drenajsız kayma mukavemeti, c_u (150-1000 kPa)
Young modülü	(50-200)*c_u (50-200)*q_u (iyileştirilmiş zeminin) (sadece çimento)
Göçmedeki şekil değiştirme	< %2
Permeabilite (kireç çimento) Permeabilite (kireç)	Yerinde zeminler ile yaklaşık olarak aynı 100-1000 kat artış gösterir

2.4.1. Mukavemet

Derin karıştırma yöntemi ile iyileştirilen kolonların mukavemeti stabilite analizleri için en önemli girdidir. Litratürde bu konuda verilen çeşitli değerler bulunmaktadır. Laboratuvarda karıştırılmış numunelerin serbest basınç mukavemet değerleri zemin cinsine, çimentonun türüne ve miktarına bağlı olarak kuru karıştırma için 0.01 ile 2.8 MPa arasında değişirken, ıslak karıştırma için 0.1 ile 28 MPa arasında değişiklik göstermektedir (Jacobson ve diğ., 2003; Japanese Geotechnical Society, 2000; Baker, 2000). Bruce (2001) ve Kitazume (2022),

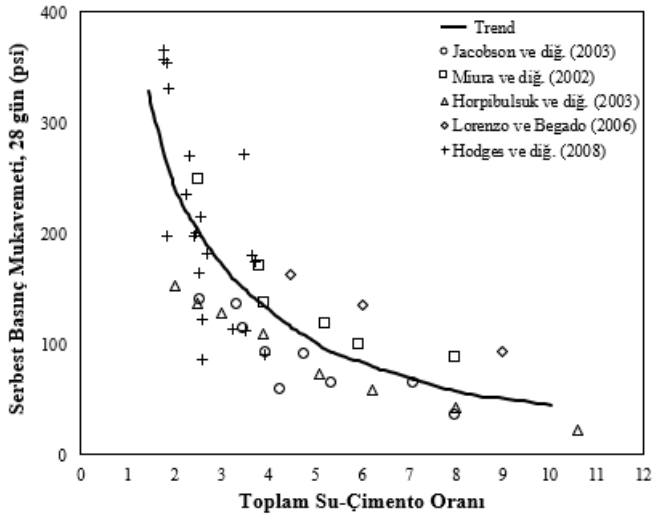
mukavemet değerleri için literatürü şu şekilde özetlemiştir; Çimento ile yapılan DSM'lerde organik ve çok yüksek plastiseli killerin 1.0 MPa'dan düşük, yumuşak killerin 0.4-1.5 MPa arasında, orta ve katı killerin 0.7-2.4 MPa arasında, inorganik siltlerin 1.0-3.0 MPa arasında, ince ve orta kumların 1.5-5.0 MPa arasında ve iri kum ve çakılların ise 3.0-10.0 MPa arasında mukavemete ulaşmaları beklenir. Bruce (2001), tarafından laboratuvar ve arazi mukavemet değerlerini değerlendirdiğinde, 28 gün sonunda elde edilen mukavemetin 7 gün sonunda elde edilen değerin 1.5-2.0 katı olduğu, 56 gün sonunda elde edilen mukavemet değerlerinin 28 gün sonundakinin iki katına ulaştığı ve 56 gün sonrasında da mukavemet artışının sürdüğü bildirilmiştir. Porbaha (1998), çimento ile iyileştirilen zeminlerin mukavemetinin zamanla betonun davranışına benzer şekilde arttığının genel bir kabul olduğunu belirtmektedir. Bruce (2001) ve Topolnicki (2004), iyileştirilecek zeminin özelliklerine bağlı olarak mukavemet kazanım hızları ve mukavemet aralıkları önermiştir. Aynı zamanda Babasaki ve diğ. (1996), bir veya birkaç faktöre bağlı olarak malzemenin mukavemet ve şekil değiştirebilirliğini tahmin etmek için formüller önermiştir. Çimento, su ve/veya ince dane içeriği göz önüne alınarak formüller önerilen başka çalışmalar da bulunmaktadır (Ahnberg, 2006; Szymkiewicz ve diğ., 2012). Bununla birlikte, iyileştirilmiş malzemenin mukavemetini tam olarak tahmin etmek ve dikkate alınması gereken tüm faktörleri hesaba katmak için yaygın olarak uygulanabilir bir formül yoktur (CDIT, 2002).

DSM'nin sıklıkla kullanıldığı Kuzey ülkelerindeki yaklaşımda DSM ile yapılan iyileştirmelerde, DSM ile kolonlar arasındaki zeminin birlikte çalışması ve etkileşimli olarak yük taşımaları istenildiği için, DSM'lerin aradaki zemine kıyasla çok yüksek mukavemet ve modül değerlerine sahip olması tercih edilmez. Bu nedenle DSM uygulamasının yapılacağı zemin türü ile uyumlu mukavemet ve modül değerlerinin seçilmesi son derece kritik bir tasarım kabulüdür. Çok yüksek mukavemet değerlerinin seçilmesi, bu değerlerin sahada sağlanabilmesini güçleştirmektedir. Ayrıca çok yüksek mukavemet değerleri DSM iyileştirmesinin genel çalışma prensibi ile uyuşmayan sonuçlar doğurabilmektedir (Bozbey ve diğ., 2022a).

Esasen sadece mukavemet değerleri değil, mukavemetin kolon içerisinde ne kadar değişebildiği de tasarım bakımından önemlidir. Derin karıştırılmış zeminlerin mukavemeti doğal zeminlere göre nispeten daha yüksek değişkenliğe sahiptir. Amerika Birleşik Devletleri'nde on adet derin karıştırma projesinde on dört veri setinden alınan 7873 serbest basınç mukavemeti testlerinde istatiksel analizler yapılmış ve değişim katsayısının ortalama 0.56 değeri olduğu ve 0.34 ila

0.79 aralığında değiştiği bulunmuştur. Uluslararası projelerden toplanan veriler de benzer sonuçları göstermiştir. Doğal kil depozitlerinin drenajsız kesme mukavemetinin değişim katsayısı ise 0.13 ila 0.40 aralığındadır. Bu değerler, DSM ile iyileştirilmiş zemin mukavemetinin doğal kil zeminlerin mukavemetinden iki kat daha değişken olduğu görülmektedir. Derin karıştırılmış zeminin nispeten yüksek değişkenliği uygun tasarım mukavemetlerinin seçimi bakımından önem taşır (Bruce ve diğ., 2013).

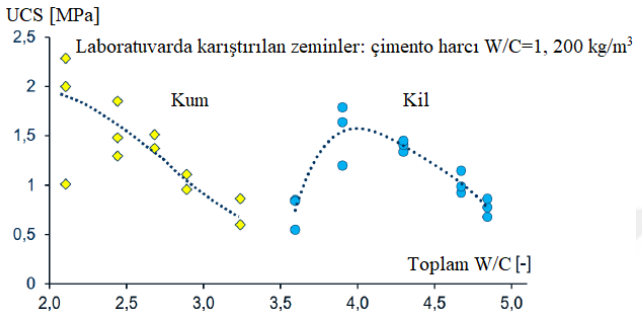
Su/bağlayıcı oranı (w/c) da serbest basınç mukavemetinin oluşumunda çok etkili bir faktördür. Numuneler üzerinde yapılan laboratuvar deney verilerine göre, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi karışımın toplam su-çimento oranı (w/c) arttığında 28 günlük serbest basınç mukavemetinde azalma olmaktadır. Bu grafik FHWA (2013)'te verilmekte olup, ülkemizde de tasarım için en çok kullanılan referanslardan birisidir. Bu grafik derin karıştırma iyileştirmesi için yapılan tasarımlarda arazide oluşacak kolonların dayanım değerlerinin hangi seviyede olabileceği konusunda yol gösterici olarak kullanılmak üzere sunulmaktadır. Ancak laboratuvarda, ya da arazide elde edilebilecek mukavemet değerini kesin olarak veremez. Bu grafikte yatay eksende "toplam su-çimento oranı" olduğu görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir konu zeminin doğal su muhtevasının "toplam su-çimento oranının" bir parçası olduğudur. Dolayısı ile zeminin doğal su muhtevası hesaba katılmadan sadece enjeksiyona ait su-çimento oranının (w/c) bu grafikte kullanılması yanlış bir yaklaşımdır (Bozbey ve diğ., 2022a).



Şekil 2.1: Laboratuvar deneylerine göre toplam su-çimento oranı ile 28 günlük serbest basınç mukavemet ilişkisi (FHWA, 2013).

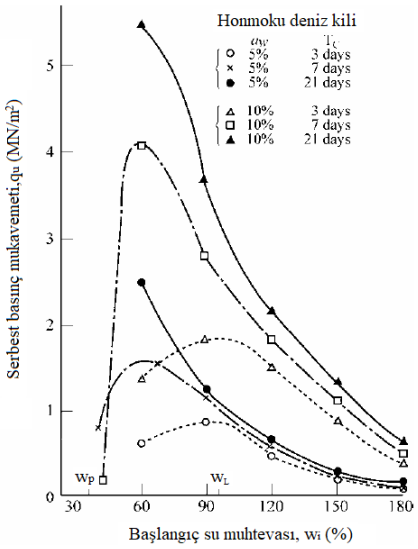
DSM iyi iyileştirilmiş zeminler için önemli olan diğer bir husus da zeminin başlangıç su muhtevasıdır. Doğal zeminin başlangıç su muhtevası yerinde karıştırma sonunda oluşan

kompozit malzemenin toplam su-çimento oranını değiştirecek ve bu da stabilize zeminin nihai basınç dayanımını etkileyecektir (Topolnicki, 2016). Topolnicki (2016), yaptığı çalışmada granüler zeminlerde zemin karışımının basınç dayanımının genellikle artan su içeriğiyle azaldığını, kohezyonlu zeminlerin ise Şekil 2.2'de gösterilen laboratuvar deneyleriyle doğrulandığı üzere, kilin likit limitine yakın toplam w/c oranında karıştırıldığında en yüksek basınç dayanımına sahip olma eğiliminde olduğu göstermiştir.



Şekil 2.2: Toplam su içeriğine göre karışımın basınç dayanımı, toplam su: zeminin doğal su muhtevası ve harçtaki suyun toplamı (Topolnicki, 2016).

Terashi ve diğ. (1977), yaptıkları bir çalışmada doğal zeminin su içeriğinin serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisini incelemiştir (Şekil 2.3). Farklı başlangıç su içeriklerinde (w_i) hazırlanan Honmoku deniz kili, iki farklı miktarda kireç ile stabilize edilmiş ve farklı kür günlerinde serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, su muhtevası likit limiti (w_L) aştığında, su içeriğinin artmasıyla iyileştirme etkisinin önemli ölçüde azaldığını belirtmişlerdir.

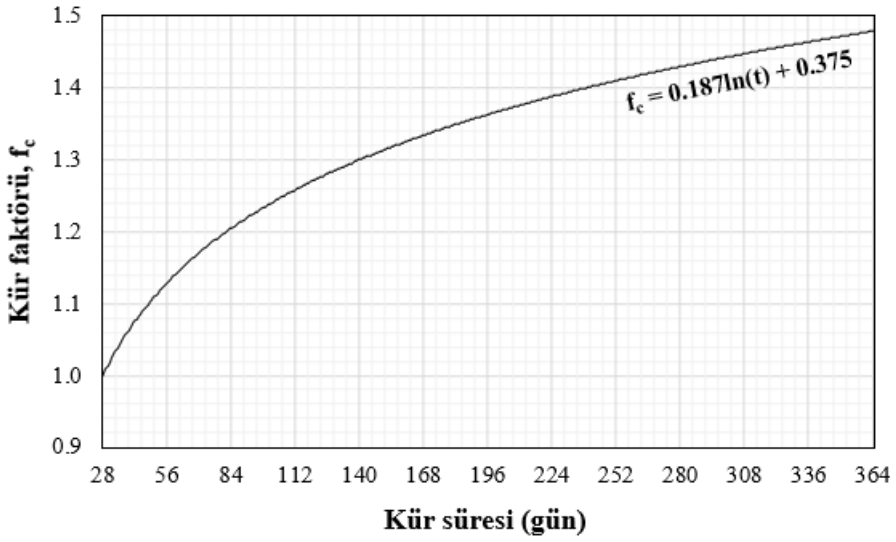


Şekil 2.3: Başlangıç su içeriğinin mukavemet üzerindeki etkisi (Terashi ve diğ., 1977).

Derin karıştırma kolonu için tasarımda kullanmak üzere öncelikle bir kayma mukavemeti değeri belirlenmelidir. Bunun için en önemli parametre iyileştirilmiş zemin için 28 kür günü sonunda ulaşılan tek eksenli dayanım değeridir ($q_{dm,spec}$). Bu değer için FHWA (2013)'te verilen toplam su/çimento oranı-serbest basınç mukavemeti grafiği yaklaşımı yaklaşık bir değer olarak kullanılabilir. Ancak bu değer arazi şartları düşünülerek modifiye edilmelidir. Buna yönelik bir yaklaşım yine FHWA (2013)'te verilmektedir. Bu yaklaşımda kayma mukavemeti değeri, ilave kür süresine ve arazideki gerilme durumunu da dikkate alarak modifiye edilmektedir. Bu iki modifikasyonlardan ilki olan f_c, kür süresini dikkate almaktadır. Dolgu imalatının yükseklik bakımından %75'ine ulaştığı sürenin imalattan itibaren 28 günden daha fazla olması durumunda dayanım değerlerinde oluşacak artışın dikkate alınması gerekir. Bu artışı ifade eden faktör aşağıdaki formüldeki gibi f_c ile hesaplanır. Eğer sahada iyileştirilen zeminler organik içerikli ise, ya da turba zemin ise saha deneyleri daha yüksek bir değer vermedikçe f_c değeri 1.0 ile sınırlandırılmalıdır. Kür süresinin etkisi denklem 2.1'de verilmektedir. Burada; f_c (kür faktörü), t zamanındaki serbest basınç mukavemetinin 28 gündeki serbest basınç mukavemetine oranını, t ise kür süresini (gün) temsil etmektedir (FHWA, 2013).

$$f_c = 0.187 \ln(t) + 0.375 \tag{2.1}$$

Şekil 2.4'te zamana bağlı olarak f_c değerinin değişimi görülmektedir. Bu değerin bir yıl sonunda 1.48 değerine ulaştığı görülmektedir. Görüldüğü gibi bu yaklaşımda DSM kolonlarında mukavemet değerinde zamana bağlı artış olacağı göz önüne alınmaktadır.



Şekil 2.4: f_c katsayısının imalattan sonra geçen gün sayısı ile değişimi.

Diğeri modifikasyon ise f_r olup tek eksenli dayanım deneyindeki gerilme durumu ve arazideki gerçek gerilme durumu arasındaki ilişkiyi göz önüne alan bir modifikasyon faktörüdür ve daha büyük birim deformasyon değerlerine karşılık gelen dayanım değerini dikkate almaktadır. Pik mukavemetten sonra ulaşılan rezidüel mukavemet değerlerinin tek eksenli dayanım değerinin oranına bağlı olarak f_r değerinin 0.65 ila 0.90 arasında olabileceği belirtilmektedir (FHWA, 2013). Bu durumda DSM ile iyileştirilmiş zeminin kayma mukavemeti değeri olan s_{dm} aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$s_{dm} = \frac{1}{2} f_r f_c q_{dm,spec} \tag{2.2}$$

2.4.2. Elastisite Modülü (Young Modülü)

İyileştirilmiş zeminin Young Modül değerleri oluşacak oturmaların ve yanal deplasmanların belirlenmesi için önemlidir. DSM kolonlarının oturma davranışı ve DSM kolon-zemin arasındaki yük dağılımı kolonların modül değerine bağlıdır. DSM ile iyileştirme yapılan tasarımlarda arazide oluşacak oturmaların doğru tahmin edilmesi için DSM ile iyileştirilmiş zeminlerin modül değerlerinin doğru olarak tayin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Ancak kalite kontrol deneylerinde, DSM kolonları üzerinde genellikle mukavemet değeri ölçülmekte, modüle yönelik deneysel ölçümler genellikle yapılmamakta ve deformasyonun tayini için gereken modül değerlerine korelasyonlar ile geçilmektedir. Literatürde yer alan çok sayıda çalışmalar, elastisite modülü değeri ile derin karıştırılmış zeminlerin serbest basınç mukavemetleri yani q_u arasında korelasyon kurulabildiğini göstermektedir. FHWA (2013) ise ıslak karıştırma için modül değerini $300q_u$ olarak, kuru karıştırma için $150q_u$ olarak önermiştir.

Çınar Özkan ve diğ. (2023), önceki çalışmalardan yararlanarak farklı zeminlerdeki elastisite modülünün serbest basınç dayanımına göre değişimini gösteren verileri bir araya getirmiştir. Farklı zemin türlerinin laboratuvarda çimento ile iyileştirilmesini içeren çalışmada derlenen veri tabanından elde edilen E-q_u korelasyonları Tablo 2.2'de verilmektedir.

Tablo 2.2: Zemin türüne göre E-q_u korelasyonları (Çınar Özkan ve diğ., 2023).

Zemin Türü	Alt Limit	Üst Limit	Ortalama Değer	Veri Sayısı	R^2
Kil	45	225	112	427	0.89
*Kum	50	180	107	137	0.94
**Kum	50	180	75	260	0.93
***Turba	50	140	108	110	0.91

* q_u değerinin 3.0 MPa ve altı olması durumu için geçerlidir.
** q_u değerinin 3.0 MPa üstü olması durumu için geçerlidir.
*** q_u değerinin 1.0 MPa ve altı olması durumu için geçerlidir.

2.4.3. Poisson Oranı

Sayısal analizlerde Poisson oranına da ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde Poisson oranı için birkaç kaynak mevcuttur. CDIT (2002) ve Terashi (2003), derin karıştırılmış zeminlerin serbest basınç mukavemetine bakılmaksızın Poisson oranının 0.25 ile 0.50 arasında değişiklik gösterdiğini belirtmiştir. Porbaha ve diğ. (2005), ıslak yöntem kullanarak oluşturulan derin karıştırılmış malzemelerin düşük gerilme davranışlarında Poisson oranının 0.3 ile 0.4 arasındaki değerlerde olduğunu sismik yöntemler ile belirlemiştir. Hireda ve diğ. (1995), stabilize edilen kumlar üzerinde Poisson oranının çapları yaklaşık 1.0 ile 1.2 m, boyları yaklaşık 1.5 ile 2.4 m olan kolonlar üzerinde ölçmüştür. Bu deneylerde, Poisson oranı eksenel ve radyal gerilmelerle ölçülerek elde edilmiştir. McGuinn ve O'Rourke (2003), Poisson oranını 0.25 olarak vermektedir. Hebib ve Farrell (2003), kuru çimento ile stabilize edilmiş turba zeminler için Poisson oranını %1'den daha az gerilmeler için 0.1 olarak ölçmüştür.

2.4.4. Permeabilite (Hidrolik Geçirgeclik)

Kuru karıştırma için EuroSoilStab (2002), kuru kireç ve çimento ile iyileştirilen killi zeminin permeabilitesinin, stabilize edilmemiş zeminin permeabilitesinin 200 ila 600 katı olarak varsayılabileceğini belirtmektedir. Baker (2000)'in uyguladığı arazi testleri kuru yöntem ile oluşturulmuş kolonların permeabilitesinin, iyileştirilmemiş killi zemin permeabilitesinin 10 ila 100 katı olduğunu belirtmiştir. Sonuç olarak kuru karıştırılmış kolonlar, bir ölçüde düşey drenler olarak işlev görmektedir (Bruce ve diğ., 2013). Kumlu zeminlere uygulanan ıslak karıştırma sonucunda elde edilen permeabilite değerleri 10^{-5}-10^{-6} cm/s seviyesindedir. Bağlayıcıyı artırma ve bentonit ekleme ıslak yöntem ile yapılan karıştırmanın permeabilitesini azaltacaktır. Islak yöntem ile yapılan derin karıştırılmış kolonların düşey direnler olarak işlev görmediği dikkate alınmalıdır (Broms, 1999).

2.4.5. Birim Hacim Ağırlık

CDM (1985), ıslak karıştırma ile iyileştirilen zeminlerin yoğunluk değişiminin ihmal edilebileceğini belirtmektedir. CDIT (2002), kuru karıştırma ile iyileştirilen zeminler için iyileştirilen zeminin toplam birim ağırlığının iyileştirilmemiş zemine göre %3 ila %15 oranında arttığını belirtmiştir.

2.4.6. Dinamik Yükler Altındaki Özellikler

Bu kapsama giren önemli özelliklerden biri kayma modülüdür. DSM ile iyileştirilmiş malzemelerin kayma modülü değerlerinde artış olmaktadır. Çevre basıncı artışı dinamik modül

değerlerini artırmaktadır. Artan kayma birim deformasyon değerleri ise kayma modülünde düşüşlere sebep olur (Porhaba ve diğ., 2000). Dinamik üç eksenli, rezonant kolon ve bender eleman deneyleri ile bu özellikler doğrudan ölçülebilir.

2.5. LABORATUVARDA NUMUNE HAZIRLAMA YÖNTEMLERİ

Arazideki zeminlerin derin karıştırma yöntemi ile ne seviyede iyileşebileceği önemli konulardan birisidir. Arazide gerçekte hedeflenen dayanım değerlerine ulaşılıp ulaşılamayacağının belirlenmesi için laboratuvarda karışım tasarımı deneylerinin yapılması gerekmektedir. Bu amaçla arazideki zemin tiplerini temsil eden numuneler ile laboratuvar deneyleri yapılır. Yapılacak deneylerde kür süresinin (7, 14, 28 ve 56 gün) de etkisinin sağlıklı olarak görülebilmesi için en az üç aylık bir süreye ihtiyaç duyulabilir (Bozbey ve diğ., 2022a).

İyileştirilmiş zeminlerin laboratuvar mukavemeti; numunenin nasıl hazırlandığı, kür koşulları, deney koşulları gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Derin karıştırma projeleri planlanırken, genellikle değişik miktarlarda ve farklı bağlayıcılar ile hazırlanan ve farklı kür sürelerinden sonra test edilen numunelerin özellikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir (Kitazume ve Terashi, 2013). Eğer laboratuvarda deneyin nasıl yapılacağı çalışma öncesinde belirlenmez ise, uygulanacak farklı yöntemler nedeniyle ölçülen değerlerin birbirleri ile sağlıklı bir şekilde karşılaştırılması mümkün olmayacaktır. Bu problemlerden kaçınmak için zemin numuneleri hazırlanırken standartlaştırılmış hazırlama prosedürleri kullanılmalıdır. Bu konuda yapılmış olan bazı çalışmalar bu bölümde özetlenmektedir.

Jacobson ve diğ. (2005), hazırladıkları karışımı 50 mm çapında ve 100 mm boyunda plastik kalıplara dört tabakada yerleştirmiştir. Her bir tabaka, hava boşluklarını ortadan kaldırmak ve tabakaları birbirine bağlamak için 5 mm çapında pirinç çubuk kullanılarak şişlenmiştir. Aynı zamanda her bir tabaka, Carlsten ve Ekstrom (1995) tarafından kullanılan sıkıştırma basıncı olan, ekstrüzyona sebep olmayan ve 100 kPa'yı aşmayan bir basınca sahip 48 mm çapındaki piston kullanılarak yerinde sıkıştırılmıştır. Hazırlanan numuneler, nemli bir odada oda sıcaklığında (yaklaşık 20°C) kürlenmiştir. Numuneler arasındaki hava akışını sağlamak için aralarında yeterli boşluk bırakılmıştır.

Larsson (2006), kil ve bağlayıcıları dört aşamada karıştırmıştır. İlk olarak, bağlayıcı eklenmeden önce kili daha homojen bir hale getirmek için karıştırmıştır. Sonra bağlayıcı ekleyerek görülebilen bağlayıcı kalmayana kadar karıştırmıştır. Daha sonra kabın kenarları ve

tabana yapışmış olan kil tekrar karıştırılmadan önce bir spatula ile gevşek bir şekilde kazınmıştır. Bu işlem üç kez tekrarlamıştır. Süre ile ilgili herhangi bir sınır uygulamamış ancak bütün numune hazırlama işlemi 30 dakikadan fazla, karıştırma işlemi ise 10 dakikadan fazla sürmemiştir.

Åhnberg ve Holmen (2008), iyileştirilmiş zemin numunelerinin hazırlanması sürecinde zemini ilk önce doğal su muhtevasında homojenize etmiş ve daha sonra zeminin içine kuru bağlayıcı karıştırmıştır. İyileştirilmiş numunelerin kalıplanması ve kürlenmesi ülkelerinde izlenilen prosedürlere uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Carlsten ve Ekstrom, 1995; EuroSoilStab, 2002; SD, 2005). Deney yapılmadan önce iyileştirilmiş zeminler, üç gün ile yaklaşık bir yıl arasında değişiklik gösteren sürelerde kürlenmiştir.

Farouk ve Shahien (2013), ıslak derin karıştırma yöntemi için karıştırılmış zemin numunelerinin hazırlanması, kür koşulları ve deneyleri için uygulanabilir bir laboratuvar prosedürü geliştirmiştir. Bu prosedür Shrestha (2008) tarafından tarif edilen prosedüre benzemektedir. Numuneleri hazırlamak için ilk olarak gerekli miktarda zemin 24 saat boyunca 105°C'lik fırında kurutulmuştur. Sonrasında zemin, çakıl içeriği ayırmak üzere 8 no'lu elek kullanılarak elenmiştir. Numune için gerekli çimento ilave edilmiştir. Son olarak, hedeflenen su-çimento oranına göre, önceden belirlenmiş bir su miktarı eklenmiştir. Çimento-su-zemin karışımı yaklaşık 3-5 dakika süreyle karıştırılmıştır. Karışım ince çeperli PVC kalıplarının içerisine 3 tabaka halinde dökülerek silindirik çimentolu zemin numuneleri hazırlanmıştır. Her bir tabaka, hava boşluklarını ortadan kaldırmak ve tabakaları birleştirmek için bir tahta çubuk kullanılarak elle sıkıştırılmıştır. Tüm kalıplar 100 mm'lik çapa ve 150 mm'lik yüksekliğe sahiptir. Doldurulan kalıplar daha sonra plastik poşetler ile kaplanmış ve 25°C'lik sabit bir sıcaklıkta 7 gün kür süresi boyunca saklanmıştır. Kürlenmeden sonra, numuneler kalıplardan çıkartılmış ve deney yapılmadan önce 1 gün süreyle havalandırmaya bırakılmıştır.

Szymkiewicz ve diğ. (2015), numune hazırlarken ilk önce üniform bir kıvam elde etmek için zemin ve çimentoyu kuru olarak elle iyice karıştırmış, daha sonra karışımı miksere koyup, su eklemiştir. Su muhtevası (w), en az karışımın likit limitine eşit olmalıdır. Malzeme daha sonra iri daneli zeminler için 5 dakika ve ince daneli zeminler için 10 dakika süresince karıştırılmıştır. Karışım 52 mm çapında silindirik kalıplara dökülmüş ve numuneler içindeki hava kabarcıklarını önlemek için çubuk yardımıyla hafifçe vurulmuştur. Kalıplar yüksek bağıl nem

içeren hava geçirmez bir torba içine kaplanmış ve kapatılmıştır. Bu numuneler deney günlerine kadar (7, 14, 21, 28, 56 ve 90 gün) 20 ± 3°C sıcaklıkta saklanmıştır.

Kitazume ve diğ. (2015), iyileştirilmiş zemin numunelerinin hazırlanmasında, ilk önce zemin belirlenmiş başlangıç su muhtevası (w_i=%120) ile tamamen homojen hale getirilmiştir. Bağlayıcı kuru bir şekilde eklendikten sonra üniform bir karışım elde etmek için 10 dakika boyunca zeminle karıştırılmıştır. Karıştırmadan hemen sonra, karışımın su muhtevası ölçülmüştür. İyileştirilmiş zemin, 3-6 tabaka halinde plastik kalıplara (silindirik kalıp, 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde) yerleştirilmiştir. Hafifçe vurma, çubukla şişleme, dinamik sıkıştırma ve statik sıkıştırma olmak üzere dört farklı kalıplama tekniği kullanılmıştır. Her kalıp bir dolgu macun ile kaplanmış ve numuneden su buharlaşmasını önlemek için %95 nispi nemde özel bir kürleme odasında saklanmıştır. Bütün iyileştirilmiş zeminler, Kitazume ve Nishimura (2009)'a göre karıştırma süresi ve karışımın kalıplamasının tamamlanması arasında oluşan hidratasyonun etkilerini azaltmak için, bağlayıcı eklendikten sonra 45 dakikadan daha kısa bir sürede kalıplanmıştır. 28 günlük kürlenme süresinden sonra, numuneler kalıplardan çıkarılmış ve daha sonra eksenel şekil değiştirme hızı %1.0/dakika olan serbest basınç deneylerine tabi tutulmuştur.

Amin (2015), çalışmasında numuneleri delme makinesine eklenmiş bir boya karıştırıcısı kullanarak hazırlamıştır. Bu yöntem iyi bir homojenlik ile numunelerin üretilebilirliğini sağlamıştır. Delme makinesi, bileşenleri iyice karıştıran çok yüksek bir dönme hızına sahiptir. Karıştırma sırasındaki sorun, karıştırıcının yüksek dönme hızı nedeniyle bağlayıcının uçabileceği olmuştur. Bu durum karıştırmadan önce kil içine bağlayıcıyı elle karıştırarak önlenmiştir.

Deney prosedürü ve özellikle numunelerin hazırlanması ve kürlenme yöntemi aynı bölgedeki bir şirketten diğerine veya bir bölgeden diğerine farklılık göstermektedir. Laboratuvar test prosedürlerindeki farklılıkları ve bu farklılıkların yanlış yorumlanmasını önlemek için deney sonuçlarına etkisini bilmek önemlidir. Kitazume ve diğ. (2009), bu konuda kullanılan farklı yöntemleri anlamak üzere bir anket yapmıştır. Anket katılımcıları tarafından rapor edilen, standartlaştırılmış olsun veya olmasın, belgelendirilmiş veya belgesiz ya da bölgesel veya bireysel olarak kabul edilen deney prosedürlerini bir araya getirmiş ve verileri karşılaştırmıştır. Kitazume ve diğ. (2009), bu çalışmada önerilen veya geleneksel olarak kabul edilen

protokollerde belirtilen ayrıntılı deney prosedürlerini gözden geçirmiş ve bunların aralarındaki dikkate değer benzerlikleri ve farklılıkları tartışmıştır. Bu çalışma Tablo 2.3'te verilmektedir.

2.5.1. Laboratuvar Numuneleri için Tasarım Karışımı Hesabı

Bu bölümde laboratuvarda karışım tasarım deneylerinin yapılması sırasında uygulanması tavsiye edilen deney prosedürü tarif edilmektedir. Bu bölümün hazırlanmasında Puppala ve diğ. (2008) dokümanı kullanılmıştır. Deneyler için numune hazırlanması için gerekli olan zemin, bağlayıcı ve su miktarı için gerekli olan tanımlar ve hesaplamalar aşağıda sunulmaktadır.

Zemin Miktarı

Zeminden sondaj ile alınan örselenmemiş numuneler kullanılarak zeminin doğal birim hacim ağırlığı, doğal su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı belirlenmelidir. Zeminin kuru birim hacim ağırlığı kullanılarak, laboratuvarda hazırlanacak karışım numuneleri için gerekli olan kuru zemin ağırlığı, w_s, aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$w_s = \gamma_d * V * N * \eta \tag{2.3}$$

Burada; γ_d, zeminin kuru birim hacim ağırlığı, V, kalıp hacmi, N, numune sayısı ve η ise numune hazırlama sırasında herhangi bir malzeme kaybını hesaba katan ilave kütle miktarıdır. η değeri 1.1 ila 1.2 aralığında alınabilir (JSG, 2000).

Bağlayıcı Miktarı

Bağlayıcı miktarlarının kg/m^3 ya da % cinsinden hesaplanmasına yönelik ifadeler aşağıda verilmektedir. Bağlayıcı miktarı olarak tanımlanan a_w, bağlayıcı kuru ağırlığının zeminin kuru ağırlığına oranı olarak yüzde olarak tanımlanmaktadır. Bağlayıcı dozajı (α) ise 1.0 m^3 zemini yerinde iyileştirmek için gereken bağlayıcının kuru ağırlık miktarı (kg) olarak tanımlanmaktadır ve birimi kg/m^3'tür. Bu iki tanım arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Bağlayıcı\ dozajı, \alpha\ (kg/m^3) = \frac{a_w * \rho_b}{100 * (1 + w_n)} \tag{2.4}$$

Numune karışımı için belirlenen kuru zemin ağırlığını iyileştirmek için gerekli bağlayıcı miktarı aşağıdaki denklemler ile hesaplanır.

$$w_b = \alpha * V * N * \eta \quad \text{ya da} \quad w_b = a_w * w_s \tag{2.5}$$

Sulu Harç (Slurry) Karışımının Su İçeriği

Kullanılacak sulu harç (slurry) karışımın su miktarı, zeminin doğal su içeriği ve su-bağlayıcı (çimento) (w/c) oranından hesaplanmaktadır. Su-bağlayıcı (w/c) oranı, sulu harç karışımı için gerekli su ağırlığının, bağlayıcının kuru ağırlığına oranı olarak aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$w/c = \frac{w_{w,slurry}}{w_b} \tag{2.6}$$

Su-bağlayıcı oranı (w/c) kullanılarak eklenmesi gereken su ağırlığı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$w_{w,slurry} = w/c * w_b \tag{2.7}$$

Zeminde mevcut olan su ağırlığı zeminin doğal su muhtevası kullanılarak aşağıdaki formül ile bulunabilir.

$$w_w = w_n * w_s \tag{2.8}$$

Böylelikle, zemin-bağlayıcı karışımı hazırlamak için toplam su miktarı aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$w_T = w_w + w_{w,slurry} \tag{2.9}$$

Aşağıda laboratuvarda hazırlanan bir derin karışım numunesi için bağlayıcı miktarı, sulu harç karışımının su miktarı ve toplam su miktarının hesaplandığı bir örnek verilmektedir. Zeminin, doğal birim hacim ağırlığı, γ_n=1.6 t/m^3 ve doğal su muhtevası, w_{in}=%28 kabulü yapılmıştır. 2.5 kg kuru zemin kullanılarak karışım numuneleri hazırlanması durumunda, gerekli diğer miktarlar aşağıdaki gibi bulunur.

- Kuru zemin ağırlığı, W_s=2.5 kg
- Bağlayıcı dozajı, a_w; 400 kg/m^3 ve α değeri ise %32 olarak verilmektedir.
- Bu durumda kullanılacak çimento ağırlığı, 0.8 kg olarak bulunur.
- Su-çimento oranı (w:c) 0.8 olarak kullanılacak ise;
- Karışım için w:c oranından su ağırlığı, $w_{w,slurry}$=0.64 kg olarak bulunur.
- Doğal su muhtevasından zemindeki su ağırlığı ise w_w=0.7 kg olarak hesaplanır.
- Zemin-bağlayıcı karışımı hazırlamak için toplam su miktarı, w_T=1.34 kg'dır.

Tablo 2.3: Bazı mevcut karışım prosedürlerinin özeti (Kitazume ve diğ., 2009).

	Standartlar/Yönergeler			
Protokol	JGS0821 (Japonya) 2000	SGI Protokol (İsveç) 2006	EuroSoilStab (Avrupa) 2002	
Uygulama	DMM, vb.	Derin ve kütle stabilizasyonu	Kolon stabilizasyonu	Kütle stabilizasyonu
Bağlayıcı durumu	Kuru / ıslak	Kuru	Kuru / ıslak	Kuru
Bağlayıcı tipi	Çimento, kireç vb.	Çimento, kireç vb.	Çimento, kireç vb.	
Uygulanabilir zeminler	ϕ=50 mm kalıp için D<9.5 mm	Kil, silt ve turba	Organik içerikli yumuşak ince daneli zeminler	
Kalıp boyutu	ϕ=50 mm x h=100 mm boy/çap = 2.0-2.5	Zemin için, ϕ=50 mm x h=170 mm; Turba için, ϕ=70 mm x h>200 mm	ϕ=50 mm x H=100 mm. Daha büyük kalıp kullanılabilir.	ϕ=68 mm x H=200-300 mm. Daha büyük kalıp kullanılabilir.
Karıştırıcı	Karıştırıcı makine	Harç karıştırıcı ya da laboratuvar ölçekli karıştırıcı	Harç karıştırıcı ya laboratuvar ölçekli karıştırıcı. Şartname yok. Yerel deneyimlere dayanarak karar verilir.	
Zemin numunesi hazırlama	Doğal su içeriğinde tutulmalı. 9.5 mm'den büyük daneler çıkartmalı. Bağlayıcı eklemeden önce homojenleştirmeli.	Kaybedilmiş su eklenmemeli. Kaba daneler çıkartılmalı. İyice homojenleştirme gerekli. Turba numunesi ise 7ºC'de muhafaza edilmeli.	Kökler ve büyük lifleri çıkartmalı. Turbalar için, lifleri yok etmekten kaçınmak için homojenleştirme süresini sınırlandırmalı.	
Karıştırma	Yeterince homojen olana kadar (genellikle 10 dk). Makinede karıştırma sırasında manüel müdahale önerilir.	Manuel müdahale ile karıştırıcı 5 dk. Turba için, soğuk odadan çıktıktan sonra 15 dk içinde karıştırılmalı.	İmkan dahilinde manuel müdahale ile 5 dk önerilir.	5 dk önerilir
Kalıplama yöntemi	Üç tabaka halinde kalıp içine yerleştirin. Hava kabarcıkları yere doğru hafifçe vurarak, tokmaklayarak, sarsarak vb. her tabakadan uzaklaştırılmalıdır. Kumlar ve volkanik killi zeminler için dikkat etmelidir.	Her katmanı 5 sn 100 kPa ile statik olarak sıkıştırın. Turba için, eğer likitse sıkıştırmayın; aksi takdirde 5-6 katman halinde kalıba yerleştirin ve saplı tokmak ya da her biri düşme ağırlığı ile sıkıştırılmış 0.5 dl'lik tabakaları hafifçe bastırıp sıkıştırın/yoğurun.	25 mm'lik tabakalarda, 2 sn için 100 kPa (tabaka başına 6 kompaksiyon) ile özel bir şekilde statik sıkıştırma. Likit zeminler için, sadece dökün.	Kalıp içine dökün. Eğer katı ise, 5-6 tabakada sıkıştırın. Tabaka ara yüzlerini kazıyın.
Kalıplama zamanı	Olabildiğince çabuk	Bağlayıcı eklendikten sonra 30 dk içinde	Bağlayıcı eklendikten sonra 30 dk içinde	
Kürleme	Örneğin, polimer bir malzeme ile kapatın. Yüksek nemli ortamda kürleyin. 20 ± 3°C. Zaman 1, 3, 7, 10, 14, 28 gün vb. olarak seçilebilir.	Kapalı ve 7°C'de küre tabi tutulmuştur. Kireçle, numuneler bazen ilk önce belirli bir süre oda sıcaklığında tutulur. 14, 28, 91, 180 gün, vb. kür. Nem kaybından kaçının. Turbalar için, karıştırmaya başladıktan 45 dakika sonra 18 kPa'lık özgün bir sürşarj uygulanır ve kürleme boyunca tutulur. Su banyosunda 20 ± 2°C'de kürleyin.	18-22°C'de kapayın.	Su banyonsunda 18 kPa'lık vb. sürşarj ile 18-22°C'de kapayın.

Tablo 2.3 (devam): Bazı mevcut karışım prosedürlerinin özeti (Kitazume ve diğ., 2009).

Genel Uygulamalar					
Protokol	Finlandiya	USA (Virjinya Teknik)		USA (Raito)	Cambridge (İngiltere)
Uygulama	-	Kuru kolon stabilizasyonu	Islak derin karıştırma	-	-
Bağlayıcı durumu	Kuru	Yaş	Yaş	Yaş	Yaş
Bağlayıcı tipi	Çimento, kireç vb.	Çimento, kireç	Çimento	-	-
Uygulanabilir zeminler	-	İnorganik zeminler		-	-
Kalıp boyutu	Standart deneyler için, ϕ=42-50 mm, h=125-170 mm. İndeks deneyleri için, ϕ=20 mm x h=60 mm	ϕ=50 mm x h=100 mm		ϕ=50 mm x h=100 mm. ya da ϕ=75 mm x h=150 mm	ϕ=50 mm ya da ϕ=100 mm x H=100 mm
Karıştırıcı	Harç karıştırıcı	Harç çengeli (kohezyonlu zeminler için) ve düz çırpıcı (plastik olmayan zeminler için)		Tipik hobart tipi karıştırıcı	Mikser
Zemin numunesi hazırlama	6 dk süresince homojenleştirmeli	3-4 dk süresince homojenleştirmeli	4'ten büyük elekteki daneler çıkartmalı. %100 oranında nem ortamında 20°C'de muhafaza etmeli. 3 dk süresince homojenleştirmeli	Doğal su içeriği belirlenmeli ve korunmalı. Kalıp çapını 1/4'ünden büyük daneler çıkartmalı. Homojenleştirmeli	Su içeriği iyileştirilecek doğal zemine benzer olmalı. Homojenleştirmeli
Karıştırma	İmkan dahilinde manuel müdahale ile 2-6 dk	3-5 dk	10 dk	7-10 dk	Belirtilmemiş
Kalıplama yöntemi	Statik kompaksiyon: 25 mm tabakalar, 6 s süresince 100 kPa veya hafifçe vurun. Düşme kütlesi de kullanılabilir.	Eğer likit ise dökün ve hafifçe vurun; eğer katıysa her 25 mm'lik tabaka için 5 mm çapında çubuk ile 25 darbeyle 2-5 s süresince 100 kPa'ya kadar statik olarak sıkıştırın.	3 üst tabakada şişleme ve hafifçe vurma	ϕ 50 mm için 3 tabaka ve ϕ 75 mm için 5 tabakaya hafifçe vurun. Eğer çok katı ise, başparmak veya tahta çubukla sıkıştırın.	Çeşitli tabakalarda çubukla tokmakla
Kalıplama zamanı	Bağlayıcı eklendikten sonra 30 dk içinde	Karıştırmanın tamamlanmasından itibaren 20 dk içinde	Karıştırmanın tamamlanmasından itibaren 30 dk içinde	Bağlayıcı eklendikten sonra 45 dk içinde	Bağlayıcı eklendikten sonra 30 dk içinde
Kürleme	Su havuzunda, izole edilmiş kutu veya plastik torbada (RH %95). Kireç ile, ilk 0, 2, 7 veya 14 gün süresinde 20°C ve daha sonra 6-8°C. Çimento ile, ilk 0, 2 veya 7 gün süresince 20°C ve daha sonra 6–8°C	Su altında veya 20°C'de %100 nemli bir odaya kapatın ve kürleyin. Zaman olarak 7, 14, 28 ve 56 gün önerilir.	23 ± 2°C (ASTM C 192 / C), RH>%95. 7 ve 28 gün süresince kürleme ve eğer gerekirse ayrıca 3 ve 14 gün.	20-21°C, RH=%98	-

2.6. DERİN KARIŞTIRMA ile İYİLEŞTİRİLMİŞ ZEMİNLERİN LABORATUVAR ve ARAZİ ŞARTLARINDA MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

Derin karıştırma ile elde edilen zeminlerin mühendislik özellikleri laboratuvarda ve arazi şartlarında farklılaşabilir. Arazi ve laboratuvar arasındaki farklılıklar gözetilerek arazide oluşabilecek değerlerin daha düşük seviyede olabileceği hesaba katılmalıdır. Laboratuvar deneylerinde, bağlayıcı miktarı ve kür süresi dışında arazinin benzerini oluşturmanın bir yolu yoktur. Bu nedenle mukavemet verilerinin bu tür deneylerde "kesin bir öngörü değil", gerçek dayanıma ilişkin bir "indeks" sağladığına dikkat edilmelidir (Terashi, 1997). Bruce ve diğ. (2013) de aynı karışım oranındaki malzemelerle yapılan deneylerde laboratuvar karışım numunelerinin dayanımının arazi karışım numunelerinden daha yüksek olabileceğini ve derin karıştırma tasarımında laboratuvar deneylerinin kesin veriler olmadığını, arazi deneyleri de yapmak gerektiğini vurgulamaktadır.

Arazi deneyleri esastır ve arazide genellikle daha düşük mukavemet ve modül değerleri elde edilir. Stab (2002), arazide karıştırılmış malzemelerin dayanımının laboratuvarda karıştırılmış numunelerin dayanımının %20'si ila %50'si kadar küçük olabileceğini belirtmiştir. CDIT (2002) ise arazi şartlarında imal edilen DSM malzemesinin dayanımının laboratuvarda hazırlanan numunelerin dayanımının %20'si ila %100'ü arasında değişebileceğini belirtmektedir. ABD'deki uygulamalardaki genel beklenti arazide malzemelerin dayanımının, laboratuvarda hazırlanan numunelerinin dayanımının en az %50'si oranında elde edilebiliyor olmasıdır. Arazi ve laboratuvar değerleri arasındaki gerçek oran, karıştırma ekipmanlarının işleyiş ve türüne, zemin cinsine, arazi kür koşullarına ve laboratuvar numunelerini hazırlamak için kullanılan yöntemlere bağlıdır. Bu nedenle mühendisler arazide elde edilmiş ve laboratuvarda hazırlanmış malzemelerin dayanımı arasındaki ilişkiye ulaşabilmek için benzer zeminlerdeki benzer projelerin önceki deneyimlerini dikkate almalıdır (Bruce ve diğ., 2013). Kitazume (2022), ıslak derin karıştırma metodu için literatürdeki çeşitli verileri bir araya getirmiş ve arazide üç kat kadar düşük değerler olabileceğini belirtmiştir. Bazı kaynaklarda bu oran beş olarak bildirilmiştir. Kitazume (2022)'ye göre arazide elde edilen mukavemet değerlerinin laboratuvara göre daha küçük, bununla birlikte standart sapma değerinin de daha büyük olması beklenir.

2.7. DSM UYGULAMALARINDA ARAZİ ÇALIŞMALARI

Zemin ortamının fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi geoteknik arazi karakterizasyon çalışmalarının en önemli hedeflerden birisidir. Günümüzde kullanılan sayısal yöntemler için zemini gerçekçi modellemek amacıyla son derece karmaşık zemin parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin son yıllarda geoteknik tasarımlarda çok sık olarak kullanılan sayısal analiz programlarında malzemeleri gerçeğe yakın bir şekilde tanımlayabilmek amacı ile farklı malzeme modelleri geliştirilmiştir. Bu karmaşık modellerde ihtiyaç duyulan parametreler sıradan ve iyi planlanmamış zemin araştırmaları ile elde edilemez. Bu nedenle iyi planlanmış ve ihtiyaca cevap veren zemin incelemelerinin yapılması şarttır (Bozbey ve diğ., 2022a).

DSM uygulamaları öncesinde yapılabilecek arazi deneyleri aşağıda listelenmiştir (FHWA, 2013).

- Yeterli sayıda sondaj kuyusu açılmalıdır.
- Zemin tabakalanmasının ve kayma dalgası hızlarının belirlenmesi bakımından jeofizik deneylerin yapılması gereklidir.
- Her sondaj kuyusu içinde Standard Penetrasyon Deneyi (SPT) deneyi yapılmalıdır.
- Koni Penetrasyon Deneyleri (CPT) de yapılabilir.
- Uygun zemin şartlarında arazi veyn deneyi de mukavemet ölçümü için yapılabilir.
- Presiyometre deneyi doğal zeminin elastisite modülü değerlerini belirlemek üzere her arazi incelemesinde yer alması önem taşır, çünkü modül değerleri sayısal yöntemlerin en önemli girdi parametrelerindendir. Deney zemin yüzeyinden itibaren etki derinliğine kadar 3.0-5.0 m aralıklarla yapılmalıdır. Deneylerin arazideki farklı zemin tabakalarını ve derinliklerini temsil edebilecek sayıda yapılmış olduğu gösterilmelidir.
- Sızdırmazlık ile ilgili projelerde arazide geçirgenlik deneyleri yapılmalıdır.

Araziden alınan numuneler üzerinde gerekli sayıda laboratuvar deneyleri yapılmış olmalıdır. Deneylerde ilgili geçerli standartlar takip edilmelidir. Bu deneylerin kapsamı aşağıda verilmektedir (FHWA, 2013; Bozbey ve diğ., 2022a).

- Zeminlerin doğal su muhtevası, dane çapı dağılımı, kıvam limitleri belirlenmelidir. Zemin sınıfları tanımlanmalıdır. Organik içerik, içeriğin cinsi ve organik içerik mevcut

ise zeminin pH değeri ve yakma kaybı, zeminde klorit ve suda çözünen sülfat oranı belirlenmelidir.

- Farklı derinlikleri temsil edecek sayıda deney ile doğal zeminin konsolidasyon deneyleri yapılmalıdır. Yüksek plastisiteli killerde ve organik zeminlerde ikincil konsolidasyon oturmaları için de deney yapılmalıdır.
- Arazide yapılacak presiyometre deneyi veya diğer deneylerden modül değerlerinin mümkün olduğunca direkt ölçümler, mümkün değil ise korelasyonlar yardımı ile bulunması gereklidir. Sayısal analizlerde modül değerlerinin doğru girilmiş olması büyük önem taşımakta ve tüm tasarımı etkilemektedir. Rastgele korelasyonlardan ya da benzer zeminler için üretilmemiş ampirik formüllerden elde edilen modül değerlerinin sayısal analizlerde kullanılması kesinlikle yanlıştır.
- Laboratuvarda mukavemet deneylerinin yapılması önemlidir. Stabilite analizlerinde inşaat süreci ve sonrası durumlar için, doygun killer için drenajsız kayma mukavemet parametreleri ve kum ve çakıllar için drenajlı mukavemet parametreleri geçerlidir. Doğal zeminlerin uzun ve kısa dönem mukavemeti belirlemek üzere CU deneylerinin yapılması tavsiye edilir. Doğal zeminlerden alınan numuneler üzerinde yapılan serbest basınç mukavemet değerlerinin daha sonra yapılacak sayısal analizlere önemli bir veri sağladığı söylenemez. Bu deneylerden alınan mukavemet ve modül değerleri birer indeks değeri olarak değerlendirilmelidir.
- Permeabilite değerleri de konsolidasyon sürecinin ne hızda ilerlediğinin belirlenmesi bakımından sayısal analizler için önemli bir girdidir. Permeabilite değerinin konsolidasyon deneylerinden elde edilmesi mümkündür.
- Bazı projelerde sızma testleri ve sızıntı suyunun kimyasal özelliklerinin incelenmesi gerekir.
- DSM tasarım projelerine altlık sağlamak üzere mümkün olursa araziden getirilen ve bağlayıcı ile iyileştirilen zeminlerin serbest basınç mukavemet özelliklerinin ölçülmüş olması tavsiye edilir.

2.7.1. DSM İmalatı

Derin karıştırma yönteminin yapım ve imalat aşamaları şu şekilde sıralanabilir. İlk olarak delici makine, kolon koordinatlarında pozisyon alır. Ardından karıştırıcı şaft ile zemini parçalayarak istenilen derinliğe kadar inilir. Hedeflenen derinliğe ulaştıktan sonra, zemin karıştırılarak karıştırıcı şaft yukarı çekilir. İstenilen derinliğe inme ve bu derinliğe ulaştıktan sonra geri çekme

evrelerinin birinde veya genellikle her ikisinde bağlayıcı madde enjeksiyon olarak verilerek zemin ile karıştırma sağlanır (Bozbey ve diğ., 2022a).

Ülkemizde yaygın olarak ıslak yöntem kullanılmaktadır. Bu uygulamada karıştırma ile birlikte klasik DSM uygulamasına kıyasla daha yüksek enjeksiyon basıncı uygulanmaktadır. Islak karıştırmada bağlayıcılar sulu enjeksiyon şeklinde (yaş) zeminle karıştırılmak üzere enjekte edilir. Arazide üretim hızı kolonun çapına, makinenin gücüne ve zeminin yerindeki mukavemetine bağlıdır. Islak karıştırma yönteminde, çimentonun harç olarak eklenmesi yüzeyde kabarmaya ya da posa oluşmasına sebep olabilir. Pratikte posanın, karıştırma aletinin geri çekilmesiyle kalan oyuk içinde kalması beklenir. Oluşan posanın miktarının kolon yer değiştirme oranına bağlı olduğu söylenebilir (Bozbey ve diğ., 2022a).

DSM uygulamasında delme karıştırma işlemini yapan delici makine ve enjeksiyonu sağlayan pompa-mikser seti ana makine grubunu oluşturur. Derin karıştırma sisteminin uygulanması için gerekli ekipmanlar, karıştırıcı şaft, çimento tankı, su tankı, mikser ve pompa olarak sınıflandırılabilir. Karıştırıcı şaft; kesme bıçakları, karıştırma bıçakları, enjeksiyon portları ve enjeksiyon nozüllerinden oluşmaktadır. Ekipman ve karıştırma aletleri; uygulama prosedürü, iyileştirilecek zeminin derinliği ve tasarımda belirlenmiş uygulama toleranslarıyla uyumlu olmalıdır (Bozbey ve diğ., 2022a).

2.7.2. DSM Makinelerinde Güç, Tork ve Devir Değerleri

Dönüş dişli grubu olan rotarinin gerekli tork ve devir değerlerine sahip olması gereklidir. Yeterli devir zeminin yeterince ve doğru şekilde karıştırılmasını sağlayacaktır (TBT Makine DSM el Kitabı, 2021). Tork, motordan hareket parçalarına iletilen itme kuvveti ya da dönme momentidir ve birimi Newton metredir (Nm). Bir motorun gücü ise motorun torkunun açısal hızı ile çarpımına eşittir. Tork değeri zeminde istenilen derinliğe kadar delme yapabilmek ve her derinlikte hedeflenen devire ulaşabilmek için çok önemli bir parametredir.

Üreticilerin rotariler için verdikleri tork diyagramlarında rotarinin hangi tork değerinde hangi devire ulaşılabileceği bilgileri verilmektedir. Ayrıca üreticiler rotariyi çalıştırabilmek için gerekli olan ana pompanın özelliklerini, yani basınç değerleri ve debi değerlerini de sunmaktadır. Bir rotari için gerekli olan güç değeri tork ve devir sayısının çarpımı ile bulunur. Belirli bir motor gücü için hedeflenen tork değeri arttıkça, ulaşılabilecek devir sayısı (RPM) azalmaktadır. Aynı şekilde devir sayısını artırmak gerekirse, imalat sırasında daha küçük tork değerlerine ulaşılabilmektedir.

$$Güç(P) = Tork(T) * Devir(n) \quad (2.10)$$

Diğer taraftan bir DSM makinesinin bu devir (RPM) değerine hangi durumda ulaşabildiği büyük önem taşımaktadır. Bu değere havada değil, zemin içerisinde iken ulaşıldığı gösterilmelidir. DSM makinesinin tork değeri ve devir/dönme sayısı (RPM), enjeksiyon pompasının debisi de makine için önemli parametrelerdir (Bozbey ve diğ., 2022a).

2.7.3. DSM Makineleri için Enjeksiyon Pompası

İmalat hızını belirleyen bir diğer faktör de zemine verilmesi gereken enjeksiyon miktarıdır. Az zamanda zemine daha çok enjeksiyon verebilmek için debisi yüksek bir enjeksiyon pompası kullanmak gerekir, bu da güçlü bir enjeksiyon pompası gerektirir. İniş ve çıkış hızları, su/çimento oranı ve kolonun çapı DSM kolonu için ihtiyaç duyulan enjeksiyon miktarını belirler. Gerekli akış hızı (lt/dk) ve uygulanacak basınç değeri kullanılarak ihtiyaç duyulan pompanın özellikleri belirlenir. Akış hızı ve kolon çapı, kolon imalatı için gerekli olan süreyi hesaplamak için önemlidir (Bozbey ve diğ., 2022a).

2.7.4. Kuru Derin Karıştırma Yöntemi

Kuru karıştırma yönteminde zeminde su muhtevası oldukça yüksek olduğundan bağlayıcı toz şeklinde (kuru) kullanılır (Bruce ve diğ., 2013). Islak karıştırma ekipmanları kuru karıştırma ekipmanlarından daha büyük ve daha ağırdır. Kuru karıştırmanın uygulama süreci TS EN 14679 (2006)'da aşağıdaki şekilde tarif edilmiştir.

- Karıştırma aleti doğru bir şekilde yerleştirilir,
- Karıştırma şaftı, karıştırma aleti aracılığıyla zeminin eş zamanlı ayrışması ile uygulama derinliğine kadar nüfuz eder,
- Hedeflenen derinliğine ulaşıldıktan sonra, şaft geri çekilir ve aynı zamanda bağlayıcı madde granüler ya da toz formunda zemine enjekte edilir ve yatay düzlemde dönen karıştırma aleti zemini ve bağlayıcıyı karıştırır. Bağlayıcı ayrıca penetrasyon aşamasında da enjekte edilebilir ve zeminle karıştırılabilir.

Kuru karıştırmada hava basıncı, hava giriş problemleri ve zemin hareketinden kaçınmak için karıştırma işlemi süresince olabildiğince düşük tutulmalıdır. Ancak hava basıncı çok düşükse bağlayıcı kolonun tüm ara kesit alanına yayılmayabilir. Bağlayıcı ve hava basıncı miktarı kolonların imalatı boyunca gözlemlenmelidir. Üniform iyileştirilmiş zemin profili elde etmek

için karıştırma enerjisi imalat sırasında sürekli olarak gözlemlenmelidir (Bozbey ve diğ., 2022a).

2.7.5. Islak Karıştırma Uygulamasında Zemini Karıştırmanın Önemi

DSM uygulamasında iyileşme için en önemli parametrelerden birisi zeminin etkin bir şekilde karıştırılmasıdır. Karıştırma bıçaklar ile yapılır. Islak yöntemde karıştırıcı bıçakların üzerinde diş ve nozüller bulunur. Zemin karıştırma işlemi iri daneli zeminler için sürekli bir burgu ile etkin bir şekilde yapılabilir, ancak ince daneli zeminler için daha sofistike karıştırma bıçakları gereklidir. Örneğin turbalar ve yüksek plastisiteli zeminler için dönme sırasında kesme kuvveti uygulayabilen karıştırma bıçaklarına ihtiyaç duyulur. DSM makinesinin kapasitesi de kil-silt matrisini dağıtabilecek şekilde karıştırma sağlayabilmek için yeterli olmalıdır. Kullanılan bıçak geometrisinin zemin tipi için uygun olduğu ve karıştırmanın etkin bir şekilde yapılıp yapılamayacağı tecrübeye dayalı olarak muhakkak değerlendirilmelidir. Kil içeriği yüksek zeminlerde karıştırmanın etkin olabilmesi için bıçaklarda ilave olarak karıştırmayı daha etkin hale getirebilecek (shear bar) kesme çubuğu bulunması gerekmektedir (Bozbey ve diğ., 2022a).

Kawamura ve diğ. (2001), karıştırma bakımından sorun yaşanabilecek zeminleri Tablo 2.4'te listelemiştir. Bu nedenle arazide bu tür zeminlerde yapılacak DSM iyileştirmelerinde karıştırma bıçağının zemine uygun bir geometride seçilmesi büyük önem taşır.

Tablo 2.4: Karıştırmada problem olması beklenen zeminler (Kawamura ve diğ., 2001).

Özellik	Kriter
Çakıl içeriği	< %5
İnce içeriği	< %80
Kıvam indisi	> 0.2
Aktivite	Yüksek
Plastisite indisi	> 40
Likit limit	> 80
Hassaslık	Düşük

Kitazume ve diğ. (2021)'e göre, yüksek plastisiteli zeminlerde iyi karıştırma sağlamak oldukça zordur. Örneğin montmorillonite içeren zeminlerde karıştırma işleminde büyük zorluklar oluşmaktadır (Nozu ve diğ., 2012, 2015). Kıvam indisi 0.2'den büyük olan zeminlerde de karıştırma daha zor olmaktadır. Karıştırılması zor olan bu tür katı killerle karşılaşıldığında zemine ilave su gönderilmesi ile karıştırmayı daha etkin hale getirmek ancak bazı zeminlerde mümkündür. Diğer taraftan ilave olarak su ilavesi yapılması uzun dönem mukavemetini düşürdüğü gibi, zeminde kabarmaya ve yatayda ötelenmeye sebep olabilir. Eğer arazide

karşılaşılan zeminler yukarıdaki tablodaki kriterlere uygunsa, arazide karıştırma işlemine daha çok özen gösterilmesi gerektiği anlaşılmalıdır.

2.7.6. İmalat Detayları-Bıçak Dönüş Sayısı (BRN)

DSM imalatı sırasında yapılan karıştırmanın seviyesi, karıştırma bıçağının dönme hızına ve iniş ve çıkış hızına bağlıdır. Aktarılan enerjiyi sayısallaştırmak için Blade Rotation Number, yani Bıçak Dönüş Sayısı (BRN) yukarıdaki üç parametreye bağlı olarak hesaplanmaktadır. T ile ifade edilen bu değerin 270 veya 350 üzerinde olması durumunda etkin bir karıştırma sağlanabileceği belirtilmektedir. Killi zeminler için bu BRN değerinin 500 civarında olması gerektiği de son yıllardaki araştırmalarda vurgulanmaktadır. BRN sayısı aşağıdaki gibi hesaplanır (Kitazume ve Terashi, 2013; Bozbey ve diğ., 2022a). Bu konu ile ilgili olarak Tablo 2.5'te bir örnek sunulmaktadır.

$$T = \sum M.\left(\frac{N_d}{V_d} + \frac{N_u}{V_u}\right) \tag{2.11}$$

Burada; T : bıçak dönüş sayısı (BRN)

ΣM : birim metre için karıştırıcı bıçak sayısı

N_d : iniş sırasındaki dönme hızı (N/dk)

V_d : inme hızı (m/dk)

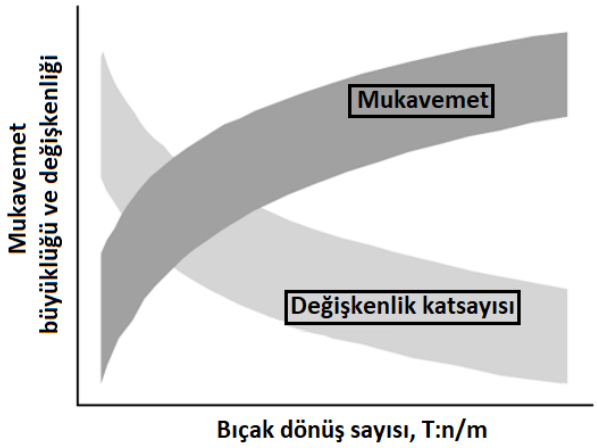
N_u : çıkış sırasındaki dönme hızı (N/dk)

V_u : çıkış hızı (m/dk)

Şekil 2.5'te görüldüğü gibi BRN değerinin artması ile mukavemet değerinde artış ve değişkenlik katsayısında düşüş görülmektedir. Benzer davranışın diğer mühendislik özelliklerinde de görülmesi beklenir. Ancak BRN sayısı mukavemetin artmasını her halükarda sağlayan bir yöntem olarak görülmemelidir. Mukavemet artışının zemin tipi, bağlayıcı miktarı ve çeşidi, kür ortamı gibi pek çok farklı faktöre bağlı olduğu unutulmamalıdır.

Tablo 2.5: Örnek BRN hesabı (Bozbey ve diğ., 2022a).

İniş Hızı (cm/dk)	Çıkış Hızı (cm/dk)	Devir (devir/dk)	Bıçak / m	BRN
60	76	45	4	537
100	100	20	10	400
150	150	80	4	427
120	120	60	4	400



Şekil 2.5: BRN değeri mukavemet ve değişkenlik üzerindeki etkisi (Larsson, 2005).

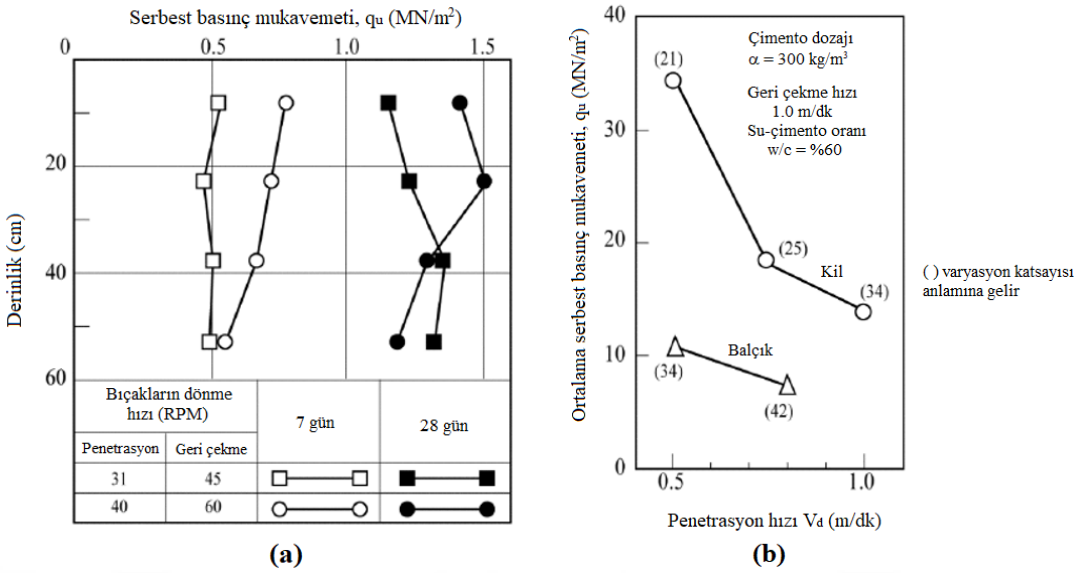
2.7.7. Tipik İniş, Çıkış ve Dönme Hızları

DSM uygulamalarında farklı iniş, çıkış ve dönme hızları uygulanabilmektedir. İmalatı direkt olarak etkileyen bu parametrelere ait bazı aralıklar Tablo 2.6'da verilmektedir (Massarsch and Topolnicki, 2005). DSM uygulamasında kullanılan makineye göre bu aralıkların dışında kalan farklı iniş, çıkış ve dönme hızlarının da kullanıldığı bilinmektedir.

Tablo 2.6: Avrupa ve Japonya'da ıslak karıştırma yönteminde uygulanan tipik uygulama parametreleri (Massarsch and Topolnicki, 2005).

Karıştırma makinesi	Karada, Avrupa	Karada, Japonya	Denizde, Japonya
İniş hızı	0.5 m/dk - 1.5 m/dk	1.0 m/dk	1.0 m/dk
Çıkış hızı	3.0 m/dk - 5.0 m/dk	0.7 m/dk - 1.0 m/dk	1.0 m/dk
Dönme hızı	25 devir/dk - 50 devir/dk	20 devir/dk - 40 devir/dk	20 devir/dk - 60 devir/dk
Bıçak dönüş sayısı (BRN)	Sürekli auger	Metre başına 350	Metre başına 350
Bağlayıcı miktarı	80 kg/m^3 - 450 kg/m^3	70 kg/m^3 - 300 kg/m^3	70 kg/m^3 - 300 kg/m^3
Enjeksiyon aşaması	İnerken ve/veya çekerken	İnerken ve/veya çekerken	İnerken ve/veya çekerken

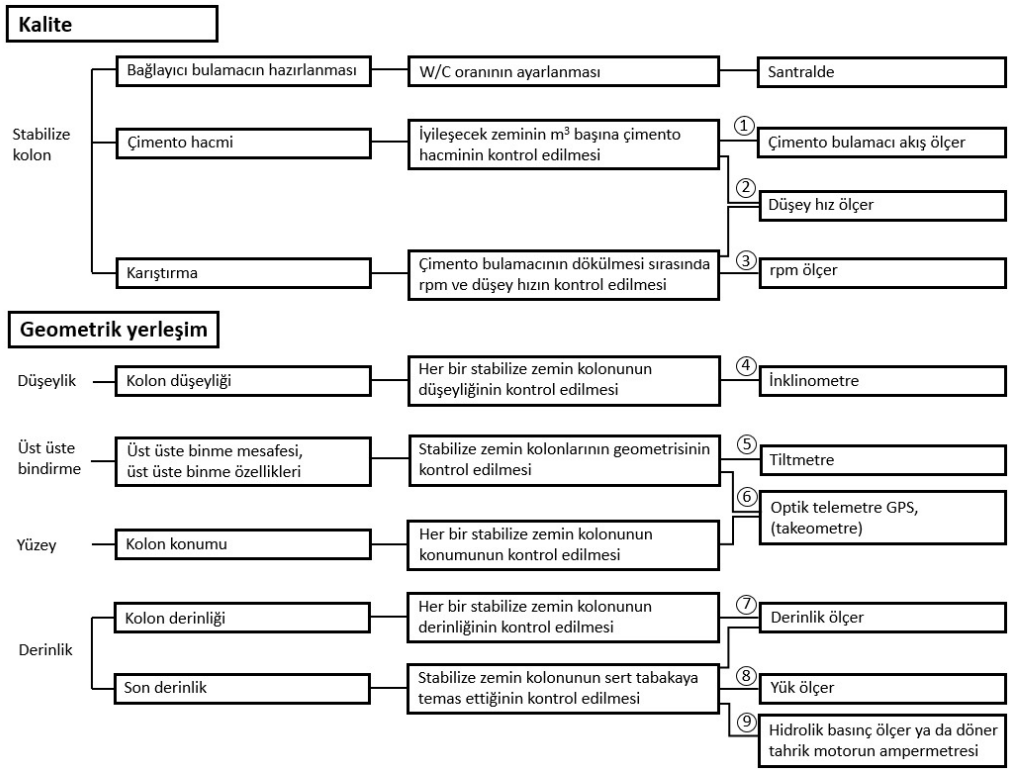
Bu parametrelerin DSM imalatının kalitesine olan etkileri Şekil 2.6'da görülmektedir. Yüksek inme ve çıkma hızlarının mukavemet değerlerinde düşüşlerine neden olabildiği görülmektedir. Aynı şekilde artan devir sayısının da mukavemet üzerinde olumlu etkisi bulunmaktadır. Esasen daha etkin karıştırma sağlayan imalat parametrelerinin yüksek mukavemete neden olduğu görülmektedir. İniş çıkış hızı grafiğinde, parantez içerinde olan sayılardan da görülebileceği gibi, artan dönüş hızı ile birlikte mukavemet değerlerinin değişkenlik katsayılarında artış olduğu da anlaşılmaktadır. İniş çıkış hızı ve devir sayılarının BRN değerini de etkilediği belirtilmişti.



Şekil 2.6: İniş ve çıkış hızının ve devir sayısının mukavemet değerlerine etkisi **(a)** Nish1ibayashi ve diğ., 1985; Kitazume, 2022; **b)** Enami ve diğ., 1985; Kitazume, 2022).

2.7.8. Arazide Yapılacak Olan Kalite Kontrol Çalışmaları

Arazide imalat sırasında ve sonrasında kalite kontrol deneyleri yapılmalıdır. Şekil 2.7'de arazide yapılacak kalite kontrol çalışmaları şematik olarak verilmektedir (Cement Deep Mixing Method Association, 1999).



Şekil 2.7: Kalite kontrol çalışmaları akış şeması (Cement Deep Mixing Method Association, 1999).

2.8. ORGANİK ZEMİNLER için DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN HUSUSLAR

Zeminin organik içeriğe sahip olması durumunda ilave olarak dikkat edilmesi gereken hususlar bulunmaktadır. İyileştirmeye yönelik deneyler öncesinde organik içeriğin tipi, hümik asit miktarı, zeminin pH değeri, akkor kaybı, iletkenlik, klorür ve sülfat içeriği belirlenmesi iyileşmenin ne seviyede etkin olacağı konusunda ön bilgi verebilir (Bozbey ve diğ., 2022a).

Organik zeminlerin içeriği ve miktarı bağlayıcılar ile elde edilebilecek iyileşme miktarını etkiler (Bruce ve diğ., 2013; FHWA, 2013). Organik zeminler için elde edilecek iyileştirmeler için CEM II ve CEM III tipi bağlayıcıların da etkili olabildiği görülmüştür. Bu nedenle organik zeminler için yapılan karışım deneylerinde, bu çimento tiplerinin de test edilmesi tavsiye edilmektedir. Artan organik içerik çoğu zaman daha fazla çimento miktarı gerektirir ve yaklaşık %10'dan daha yüksek organik içerikler çimentolanma ile önemli ölçüde etkileşim göstermektedir. Turbaların iyileştirilmesi de problemli olabilir. Çimento stabilizasyonu için zeminin pH değeri 5'ten büyük olmalıdır. Tablo 2.7'de organik zeminler için kullanılabilecek bağlayıcı maddeleri ve bunların zemin tipine göre uygunluk seviyesi görülmektedir (EuroSoilStab, 2002).

Organik zeminlerde mukavemet gelişimi daha yavaş oluşabileceği için 90 gün sonunda da mukavemet deneylerinin yapılması gereklidir. EuroSoilStab (2002) kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda çimento ile birlikte uçucu kül, fırın cürufu kullanılması durumunda mukavemet artışının daha uzun bir sürece ihtiyaç duyduğu (birkaç ay) görülmüştür. Diğer önemli bir husus da ortam sıcaklığıdır. Organik içerikli zeminlerde çimentolanma reaksiyonlarının etkili bir şekilde gerçekleşmesi için yüzeye yakın zemin sıcaklıklarının yaklaşık 4°C'den düşük olmaması gereklidir, zaten daha derindeki sıcaklık daha yüksek olacaktır.

Tablo 2.7: Organik zeminler için farklı bağlayıcılar ile elde edilen göreceli mukavemet artışı (EuroSoilStab, 2002).

Bağlayıcı	Silt Organik İçerik %0-2	Kil Organik İçerik %0-2	Organik Kil Organik İçerik %2-30	Turba Organik İçerik %50-100
Çimento	XX	X	X	XX
Kireç + çimento	XX	XX	X	-
Kireç	-	XX	-	-
Çimento + jipsum + kireç	XX	XX	XX	-
Çimento + fırın cürufu	XX	XX	XX	XXX

XXX Çoğu zaman çok etkili, XX çoğu zaman etkili, X bazen etkili, - uygun değil

3. YÖNTEM

Bu tez kapsamında zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan derin karıştırma yöntemine yönelik kapsamlı bir laboratuvar ve arazi çalışmaları yapılmıştır. Arazi çalışmaları, A ve B sahalarında arazi karakterizasyonu için zemin sondajı ve arazi deneylerinin yapılmasını, bu sahalarda deneme derin karıştırma kolonlarının (DSM) imal edilmesini ve bu kolonlar içinde yapılan arazi deneylerini kapsamaktadır. Laboratuvar çalışmaları ise bu sahalardan alınan doğal zemin numuneleri ile laboratuvarda derin karışım numunelerinin hazırlanmasını ve bu numuneler üzerinde laboratuvar deneylerinin yapılmasını kapsamaktadır. Bu tez çalışması, Karayolları Genel Müdürlüğü Ar-Ge Dairesi Başkanlığı tarafından desteklenen KGM-ARGE-2019-8 numaralı ve "Derin karıştırma yönteminde elde edilen iyileştirilmiş zemin özelliklerinin laboratuvar ve arazi şartlarında tayini ve derin karıştırma şartnamesi hazırlanması" başlıklı Ar-Ge projesi kapsamında yapılmıştır (Bozbey ve diğ., 2022b). Yapılan çalışmalar aşağıda detaylı olarak verilmektedir.

3.1. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Laboratuvar çalışmaları kapsamında, ilk olarak derin karışım numunelerinin hazırlama prosedürünün belirlenmesi için literatürde mevcut olan farklı dokümanlar incelenmiş ve numune hazırlama yöntemleri belirlenmiştir. Daha sonra seçilen numune hazırlama yöntemi ile laboratuvarda deneme deneyleri yapılmıştır. Deneme deneylerinde A sahasından alınan inorganik ve organik (turba) doğal zemin numuneleri kullanılarak derin karışım numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Laboratuvarda hazırlanan ve deneme deneylerini kapsayan bu numuneler Kategori 1 olarak sınıflandırılmıştır.

Arazi çalışmaları kapsamında A ve B sahalarında deneme DSM kolon imalatları yapılmıştır. Deneme DSM kolon imalatlarının yapıldığı A sahasından inorganik ve organik (turba) doğal zemin numuneleri, B sahasından ise inorganik doğal zemin numunesi alınarak laboratuvara getirilmiştir. Laboratuvarda her iki sahadan alınan doğal zeminler ile arazide imal edilen deneme DSM kolonlarında kullanılan çimento dozajı ve su/çimento (w:c) oranları kullanılarak derin karışım numuneleri hazırlanmıştır ve bu numuneler üzerinde serbest basınç mukavemet

deneyleri yapılmıştır. Bu numuneler de Kategori 2 olarak sınıflandırılmıştır. Burada amaç, laboratuvar şartlarında aynı çimento dozajı ve su/çimento (w:c) oranı kullanılarak hazırlanan derin karışım numunelerinde elde edilen değerleri, arazide yapılan deneme DSM kolonlarda bulunan değerler ile karşılaştırmaktır.

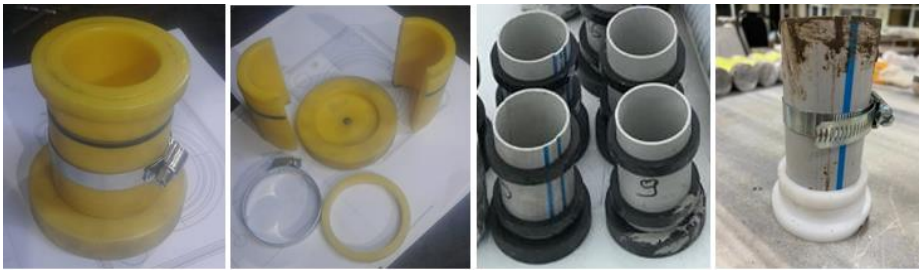
Laboratuvar çalışmaları kapsamında ayrıca her iki sahadan alınan doğal zemin ile farklı başlangıç su muhtevaları (w_i) ve bağlayıcı tipleri (çimento, kireç ve çimento) kullanılarak çeşitli derin karışım numuneleri de hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde farklı kür günlerinde serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Bu numuneler ise Kategori 3 olarak sınıflandırılmıştır. Deneyler sonucunda numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş, serbest basınç mukavemetleri bulunmuş ve sekant elastisite modülü E_{50} değerleri hesaplanmıştır. Deney sonuçlarından E_{50}-q_u ilişkisi değerlendirilerek, korelasyonlar için alt ve üst sınırlar verilmiştir. Bu gruptaki altı adet numune üzerinde ODTÜ'de civalı porozimetre deneyleri yaptırılmış, mukavemet değerleri ve boşluk dağılımı arasında bir ilişki olup olmadığı incelenmiştir.

3.1.1. Numune Hazırlama Yöntemi

Numune hazırlama prosedürünün belirlenmesi için farklı şartnameler ve standartlar incelenmiş ve numune hazırlama yöntemleri karşılaştırılmıştır. Tüm şartnamelerde ve standartlarda bağlayıcı tipleri, karıştırıcılar ve kalıplama zamanlarında benzerlik olduğu, ancak kalıp boyutları, karıştırma süreleri ve kalıplama yöntemlerinde farklılık olduğu görülmektedir. Bu yöntemler değerlendirilerek numune hazırlama yöntemi olarak Japon Geoteknik Topluluğu standardı (Japanese Geotechnical Society (JGS), 2000) seçilmiştir. Bu standarda göre;

- Zemin dane boyutu 9.5 mm'den küçük olmalıdır.
- Kalıp boyutu 5 cm x 10 cm veya L/D oranı 2.0-2.5 arasında olmalıdır.
- Zemine bağlayıcı ekledikten sonra yeterince homojenleştirilmeli ve karıştırıcı makine ile karıştırılmalıdır.
- Zemin üç tabaka halinde kalıba yerleştirilmeli ve hava kabarcıkları yere doğru hafifçe vurarak, tokmaklayarak, sarsarak vb. her tabakadan uzaklaştırılmalıdır.
- Kalıplama işlemi olabildiğince çabuk olmalıdır.
- Kalıplama sonrasında numune küre bırakılmalıdır.

Laboratuvarda derin karışım numunelerinin hazırlanmasında kullanılmak üzere kalıp boyutu 5 cm x 10 cm ve L/D oranı 2.0-2.5 olan çeşitli kalıplar yaptırılmıştır. Yaptırılan kalıplar Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



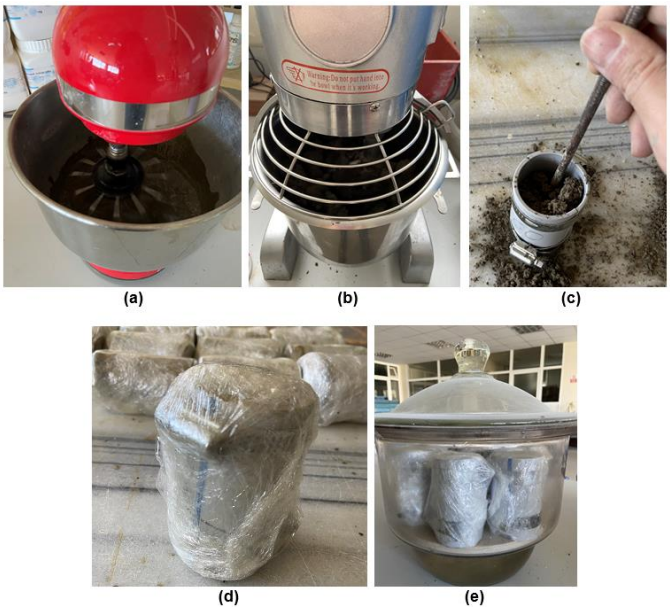
Şekil 3.1: Numune hazırlamada kullanılan kalıplar.

Laboratuvarda hazırlanan derin karışım numuneleri arazide uygulanan yöntem ile uyumlu olacak şekilde ıslak karıştırma yöntemine göre hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken ilk önce doğal zemin 4 nolu elek ile elenmiş ve 100°C'de 24 saat etüvde kurutulmuştur. Sonrasında zemini doğal su muhtevasına (w_i) getirmek için gerekli su miktarı doğal zemine eklenerek karıştırılmış ve naylon örtü ile sarılarak 24 saat homojenleşmeye bırakılmıştır. EXCEL ortamında yapılan hesaplama sonrasında zeminin birim hacim ağırlığı, su muhtevası, enjeksiyonun su/çimento (w:c) oranı kullanılarak, karışımda kullanılması gereken çimento ve su miktarı belirlenmiştir. Şekil 3.2'de EXCEL ortamında yapılan hesaplamalara ait bir örnek gösterilmektedir. Belirlenen çimento ve su miktarı karıştırılarak sulu harç oluşturulmuştur. Sulu harcın zemine eklenmesi ve karıştırma makinesiyle karıştırılması ile karışım malzemesi oluşturulmuştur. Karıştırma süreleri inorganik zeminlerde yaklaşık 5-6 dakika, organik (turba) zeminlerde ise yaklaşık 2 dakikadır. Turba zeminin karıştırma süresine Puppala ve diğ. (2008) tarafından hazırlanan teknik rapor incelenerek karar verilmiştir. Hazırlanan karışım malzemesi kalıplara 3 tabaka halinde yerleştirilmiş ve her tabakada şişleme yapılarak, hafifçe yere vurularak hava kabarcıkları uzaklaştırılmıştır. Daha sonra numuneler hava almayacak şekilde kaplanmış ve küre bırakılmıştır. Literatürde de belirtildiği gibi numune hazırlama ve kalıplama işlemleri 30 dakikayı aşmamıştır. Numune hazırlama aşamaları Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Bu çalışma kapsamında laboratuvarda hazırlanan bütün numuneler bu şekilde hazırlanmıştır.

Doğal birim hacim ağırlığı, γ =	1.75	t/m^3 =	1750	kg/m^3
Doğal su muhtevası, w_n =	42	% =	0.42	
Kuru birim hacim ağırlığı, γ_d =	1.2	t/m^3 =	1232	kg/m^3
Kuru zemin ağırlığı, W_s =	1232	kg → 1 m^3 zemin için		
Bağlayıcı oranı, α ya da a_w =	100	m^3 →	8	%
	250	m^3 →	20	%
	300	m^3 →	24	%
	350	m^3 →	28	%

Doğal su muhtevası, w_n =	42	%			
Kuru zemin ağırlığı, W_s =	2.5	kg	=	2500	gr
Bağlayıcı oranı, α ya da a_w =	28	%			
Bağlayıcı miktarı, w_b =	0.71	kg			
Kireç-çimento oranı =	0	-		100	
Kireç ağırlığı =	0	kg			
Çimento ağırlığı =	0.71	kg	=	710.0	gr
Su-bağlayıcı oranı (w:b) =	1				
$W_{w,slurry}$ =	0.71	kg	=	710.0	gr
W_w =	1.050	kg	=	1050	gr
Karışım için toplam su miktarı =	1.760	kg	=	1760.0	gr
Toplam karışım ağırlığı =	4.970	gr	=	4970.0	gr
Toplam su/çimento oranı =	w_t:c	=	2.48		

Şekil 3.2: EXCEL ortamında yapılan hesaplamalara ait örnek.



Şekil 3.3: a) Sulu harç hazırlanması **b)** Doğal zemin ile sulu harcın karıştırılması ile karışım numunesinin hazırlanması **c)** Numune hazırlanması **d)** Numunenin kaplanması **e)** Numunenin küre bırakılması.

3.1.2. Bağlayıcı Türleri

Bu çalışmada kullanılan çimentolar; CEM I 42.5 R Portland çimentosu, CEM II/A-M (P-L) 42.5 R Portland-kompoze çimento ve CEM III/A 42.5 R yüksek fırın cüruflu çimentodur.

CEM çimentosunun hidrolik sertleşmesi öncelikle kalsiyum silikatların hidratasyonundan kaynaklanmaktadır. Ancak, alüminatlar gibi diğer kimyasal bileşenler de sertleşme sürecine katılabilir. CEM çimentosunun oranları EN 196-2'ye göre belirlendiğinde, reaktif kalsiyum oksit (CaO) ve reaktif silikon dioksit (SiO_2) oranlarının toplamı kütlece en az %50 olmalıdır. Farklı çimentolar farklı özelliklere ve performansa sahiptir (TS EN 197-1, 2012).

CEM I Portland çimentosu en çok tercih edilen çimento türüdür. Çimento bileşenlerinde ana bileşen olarak sadece Portland çimentosu klinkeri kullanılır. Kütlece klinker oranı %95-%100

olmalıdır (TS EN 197-1, 2012). Genel kullanıma uygun olan bu çimentoda hidratasyon reaksiyonu hızlı bir şekilde gerçekleşir ve çimento harcı çabuk sertleşir. Çimentonun ana bileşenlerinden biri olan C_3S içerir ve bu bileşen sayesinde kullanılan çimento malzemesinin erken sertleşmesini sağlar (Şenkaya, 2019).

CEM II Portland-kompoze çimentosu klinker dışında kullanılan ana bileşenlere göre sınıflandırılır. Toplamda 19 tip CEM II çimentosu, %6 ile %35 arasında değişen oranlarda yüksek fırın cürufu, silis dumanı, puzolanik malzemeler, uçucu kül, pişmiş şist ve kalker içermektedir. CEM II çimentosu bu bileşenlerin yüzdelerine göre adlandırılır (TS EN 197-1, 2012). Bu çimento, içerdiği mineral katkılar sayesinde Portland çimentosuna göre uzun süreli yüksek dayanıma, düşük su ihtiyacına ve daha yüksek dayanıklılığa sahiptir (Şenkaya, 2019).

CEM III tipi çimento yüksek oranda yüksek fırın cürufu içermektedir. CEM III/A tipinde cüruf miktarı %36 ile %65 arasında değişmektedir. CEM III/B ve CEMIII/C tiplerinde ise cüruf miktarı sırasıyla %66 ve %81'den fazladır (TS EN 197-1, 2012). CEM III yüksek fırın cüruflu çimentolar erken dayanımları düşük olan genel çimentolardır. Erken dayanım gereksinimleri nedeniyle diğer genel çimentolardan ayrılır.

CEM II ve CEM III tipi çimentolar katkılı çimentolar olarak sınıflandırılır. Bu çimentoların içerdiği puzolanik katkılar tek başlarına bağlayıcı özellik göstermezken, uzun sürede çimentonun hidratasyon reaksiyonunu iyileştirirler. Priz konusunda ise, bu çimentolardaki katkılar ağırlıkça yüzde olarak çimentonun yerini aldığından, daha düşük oranda klinker içerirler ve bu nedenle daha geç priz alırlar (Pantazopoulos ve diğ., 2012; Vipulanandan ve Shenoy, 1992; Perret ve diğ., 1997).

CEM III tipi çimento en geç priz alan çimentodur. CEM II ve CEM III çimentolarının priz sürelerindeki farklılığın nedeni içerdikleri mineral katkıların ağırlık yüzdelerinin farklı olmasıdır. CEM III çimentosu yaklaşık %55 oranında katkı içerirken, CEM II çimentosu yaklaşık %20 oranında katkı içermektedir (Şenkaya, 2019).

Portland-kompoze çimento olarak da adlandırılan CEM II tipi çimento, yüksek fırın cürufu katkılı CEM III çimentosuna göre daha yüksek oranda klinker içermektedir. Şenkaya (2019) tarafından yapılan çalışmada, CEM II tipi çimento 7 günde CEM III tipi çimentoya göre daha yüksek dayanım vermiştir. CEM III çimentosunun klinker oranı %35-40 arasında olduğu için 7 günlük dayanım testlerinde en düşük dayanımı vermiştir.

Puzolanik katkı maddesi içeren CEM II ve CEM III çimentoları ile hazırlanan numuneler erken dönemde daha düşük dayanım vermiş ancak 28 günlük kür süresi sonunda katkı maddesi içermeyen Portland çimentosu olan CEM I çimentosu ile hazırlanan numunelerin ortalama basınç dayanımlarından daha yüksek çıkmıştır. CEM II çimentosu doğal puzolan içerir. CEM III çimentosu yüksek fırın cürufu içerir. Bu mineral katkılar puzolanik reaksiyon sağlayarak 28 günlük kür süresi boyunca katkısız çimentoya göre daha yüksek dayanım artışı sağlamıştır. CEM III yüksek fırın cürufu katkılı çimento ile hazırlanan numuneler uzun süreli dayanım testlerinde en yüksek dayanım sonuçlarını vermiştir Şenkaya (2019).

Kireç çok farklı zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabilir. Sönmüş kireç (kalsiyum hidroksit, $Ca(OH)_2$), sönmemiş kirecin (kalsiyum oksit, CaO) suyla reakte edilmesiyle oluşur. Kirecin killi zeminlere etkisinde dört ana başlık katyon değişimi, flokülasyon, puzolanik reaksiyon ve karbonatlaşma olarak sıralanabilir (Sarıkahya, 2023). Bu çalışmada kullanılan kireç, CL-80 S tipi sönmüş kireçtir.

3.1.3. Kategori 1: Deneme Deneyleri Kapsamında Hazırlanan Numuneler

Deneme deneyleri kapsamında, A sahasında deneme DSM kolonlarının yapılması planlanan bölgede iki adet muayene çukuru açılarak doğal zemin numunesi alınmıştır. Birinci muayene çukuru yaklaşık 3.5 metre derinlikte, diğeri ise yaklaşık 3.0 metre derinlikte kazılmıştır (Şekil 3.4 ve Şekil 3.5). Açılan birinci muayene çukurdan yüksek organik madde ve su muhtevası içeriğine sahip olan turba zemin ve ikinci muayene çukurdan ise inorganik zemin alınarak laboratuvara getirilmiştir. Ayrıca yer altı suyu numunesi de alınmıştır. Bu zeminler üzerinde çeşitli deneyler yapılarak zemin karakterize edilmiş, daha sonra iyileştirmeye yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmalar kapsamında derin karışım numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde mukavemet deneyleri yapılmıştır. Bu bölgelerden alınan zemin numuneleri ile yapılan deneyler deneme deneyleri olarak kategorize edilmiştir.



Şekil 3.4: Birinci muayene çukuru ve açılan çukurdan alınan turba zemin (A Sahası).



Şekil 3.5: İkinci muayene çukuru ve açılan çukurdan alınan inorganik zemin (A Sahası).

3.1.3.1. Organik Zemin (Turba)

A sahasından alınan turba zemin ile derin karışım numuneleri Bölüm 3.1.1.'de verilen yöntem kullanılarak hazırlanmıştır. Ancak turba zemin ile numune hazırlarken, zeminin organik içeriği ve su muhtevası çok fazla olduğundan, ayrıca lifli malzeme içerdiğinden dolayı numune etüvde kurutulmamıştır. Zemin laboratuvarda açık havada kurutulmuştur.

Bu zemin ile farklı çimento dozajları, farklı çimento türleri ve farklı su/çimento oranları (w:c) kullanılarak derin karışım numuneleri hazırlanmıştır. Kullanılan çimentolar, CEM I 42.5 R Portland çimentosu, CEM II/A-M (P-L) 42.5 R Portland-kompoze çimento ve CEM III/A 42.5 R yüksek fırın cüruflu çimentodur. Hazırlanan numuneler aşağıda verilmektedir:

Katkı maddesi olarak CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılarak hazırlanan numuneler aşağıda verilmektedir:

- 350 kg/m^3 çimento dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 0.7
- 400 kg/m^3 çimento dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 0.7
- 400 kg/m^3 çimento dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 1.0

Katkı maddesi olarak CEM II/A-M (P-L) 42.5 R Portland-kompoze çimento kullanılarak hazırlanan numuneler aşağıda verilmektedir:

- 400 kg/m^3 çimento dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 0.7
- 400 kg/m^3 çimento dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 1.0

Katkı maddesi olarak CEM III/A 42.5 R yüksek fırın cüruflu çimento kullanılarak hazırlanan numuneler aşağıda verilmektedir:

- 400 kg/m^3 çimento dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 0.7
- 400 kg/m^3 çimento dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 1.0

Hazırlanan numuneler üzerinde farklı kür günleri sonunda serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Numunelerin serbest basınç mukavemet değerleri bulunmuş, gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş ve sekant elastisite modülü, E_{50} değerleri hesaplanmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen sekant elastisite modülü, E_{50} ile serbest basınç mukavemeti, q_u arasındaki ilişki değerlendirilerek alt ve üst sınırlar verilmiştir.

3.1.3.2. İnorganik Zemin

A sahasından alınan inorganik zemin ile de farklı çimento dozajları ve su/çimento oranları (w:c) kullanılarak derin karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan derin karışım numunelerinde de katkı maddesi olarak sadece çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimento CEM I 42.5 R Portland çimentosudur. Derin karışım numuneleri Bölüm 3.1.1.'de verilen yöntem kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler aşağıda verilmektedir:

- 400 kg/m^3 çimento dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 1.0
- 400 kg/m^3 çimento dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 1.3

Hazırlanan bu numuneler üzerinde de farklı kür günlerinde serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda numunelerin serbest basınç mukavemetleri bulunmuş, gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş ve sekant elastisite modülü, E_{50} değerleri hesaplanmıştır.

3.1.4. Kategori 2: Arazide İmal Edilen DSM Kolonlarını Temsilen Hazırlanan Numuneler

Bu çalışma kapsamında iki farklı sahada deneme DSM kolonları imal edilmiştir. Deneme kolonlarının yapıldığı bölgelerde muayene çukurları açılarak doğal zemin numuneleri alınmış ve laboratuvara getirilmiştir. Her iki araziden gelen doğal zemin ile arazide imalatı yapılan deneme DSM kolonlarının çimento dozajı ve su/çimento (w:c) oranları kullanılarak laboratuvarda derin karışım numuneleri hazırlanmıştır ve bu numuneler üzerinde kür süreleri sonunda serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları arazide imal edilen kolonlardan alınan tam boy karot numuneleri üzerinde yapılan deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hazırlanan numuneler aşağıda sunulmaktadır.

3.1.4.1. A Sahasında İmal Edilen DSM Kolonlarını Temsilen Hazırlanan Numuneler

A sahasında deneme DSM kolon imalatlarının yapıldığı bölgede, muayene çukuru açılarak alınan inorganik ve organik (turba) doğal zemin numuneleri laboratuvara getirilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6: A sahasından doğal zemin numunesi alımı.

Arazide imalatı yapılan deneme DSM kolonlarını temsilen laboratuvarda doğal zeminler ile üç farklı çimento dozajı ve tek su/çimento oranı (w:c) kullanılarak derin karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bu arazide CEM II sınıfı çimento kullanılarak deneme DSM kolon imalatları yapıldığı için laboratuvarda da derin karışım numuneleri CEM II sınıfı çimento kullanılarak hazırlanmıştır. Derin karışım numuneleri Bölüm 3.1.1.'de verilen yöntem kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan tüm numuneler üzerinde farklı kür günlerinde serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Bu araziyi temsilen turba ve inorganik zemin ile laboratuvarda hazırlanan numuneler aşağıda verilmektedir:

- 400 kg/m^3 çimento dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 0.8
- 350 kg/m^3 çimento dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 0.8
- 300 kg/m^3 çimento dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 0.8

3.1.4.2. B Sahasında İmal Edilen DSM Kolonlarını Temsilen Hazırlanan Numuneler

B sahasında da deneme DSM kolon imalatlarının yapıldığı bölgede, muayene çukuru açılarak alınan inorganik doğal zemin numuneleri laboratuvara getirilmiştir (Şekil 3.7).

Doğal zemin numuneleri ile arazide imalatı yapılan deneme DSM kolonlarını temsilen laboratuvarda üç farklı çimento dozajı ve tek su/çimento oranı (w:c) kullanılarak derin karışım numuneleri hazırlanmıştır. Bu arazide katkı maddesi olarak CEM I sınıfı çimento kullanılarak deneme DSM kolon imalatları yapıldığı için laboratuvarda da derin karışım numuneleri CEM I sınıfı çimento kullanılarak hazırlanmıştır. Derin karışım numuneleri Bölüm 3.1.1.'de verilen yöntem kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan tüm numuneler üzerinde farklı kür günlerinde serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Bu araziyi temsilen laboratuvarda hazırlanan numuneler aşağıda verilmektedir:

- 350 kg/m^3 çimento dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 1.0
- 300 kg/m^3 çimento dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 1.0
- 250 kg/m^3 çimento dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 1.0



Şekil 3.7: B sahasından getirilen doğal zemin numuneleri.

3.1.5. Kategori 3: Diğer Numuneler

Bu grupta iki tür numune hazırlanmıştır. Birinci grup deney, doğal su muhtevasının karışım üzerindeki etkisinin belirlenmesine yöneliktir. Literatür incelendiğinde derin karışım numunelerinin mukavemetini doğal zeminin su muhtevasının da önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Bu etkiyi araştırmak için her iki araziden alınan inorganik doğal zemin ile farklı başlangıç su muhtevalarında derin karışım numuneleri hazırlanmış ve farklı kür günlerinde serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. İkinci grup deneyde ise, farklı bağlayıcıların kullanılmasının etkilerini incelemek için her iki araziden getirilen inorganik doğal zemin ile bağlayıcı olarak kireç ve çimento birlikte kullanılarak derin karışım numuneleri hazırlanmış ve farklı kür günlerinde serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır.

Laboratuvarda hazırlanmış ve serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmış olan bütün numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden sekant elastisite modülleri, E_{50} belirlenmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen sekant elastisite modülü, E_{50} ile serbest basınç mukavemeti, q_u arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Aşağıda bu kategori kapsamında hazırlanan numuneler verilmektedir.

3.1.5.1. A Sahasından Alınan Doğal Zemin ile Hazırlanan Numuneler

Bu sahadan alınan inorganik zemin ile zeminin su muhtevasının mukavemet üzerindeki etkisini incelemek amacıyla farklı başlangıç su muhtevaları kullanılarak derin karışım numuneleri hazırlanmıştır. Kullanılan su muhtevaları %25, %35, %44, %50 ve %58'dir. Seçilen su

muhtevalarına doğal zeminin Likidite İndekslerine göre karar verilmiştir. Bu numuneler hazırlanırken katkı malzemesi olarak CEM II sınıfı çimento ve arazide uygulanan çimento dozajı ve su/çimento oranı kullanılmıştır.

Farkı kimyasalların etkilerini de incelemek için bağlayıcı malzemesi olarak kireç ve çimento birlikte kullanılarak inorganik zeminler ile derin karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan derin karışım numunelerinin bağlayıcı dozajı 400 kg/m^3 ve su/çimento oranı, w:c=0.8'dir. Hazırlanan numuneler aşağıda verilmektedir:

- 400 kg/m^3 bağlayıcı dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 0.8; doğal zemin su muhtevası w=25; bağlayıcı oranı %25 kireç ve %75 çimento
- 400 kg/m^3 bağlayıcı dozajı ve su-çimento oranı, w:c = 0.8; doğal zemin su muhtevası w=35; bağlayıcı oranı %25 kireç ve %75 çimento
- 400 kg/m^3 bağlayıcı dozajı ve su-çimento oranı, w:c = 0.8; doğal zemin su muhtevası w=50; bağlayıcı oranı %25 kireç ve %75 çimento
- 400 kg/m^3 bağlayıcı dozajı ve su-çimento oranı, w:c = 0.8; doğal zemin su muhtevası w=50; bağlayıcı oranı %50 kireç ve %50 çimento
- 400 kg/m^3 bağlayıcı dozajı ve su-çimento oranı, w:c = 0.8; doğal zemin su muhtevası w=58; bağlayıcı oranı %25 kireç ve %75 çimento
- 400 kg/m^3 bağlayıcı dozajı ve su-çimento oranı, w:c = 0.8; doğal zemin su muhtevası w=58; bağlayıcı oranı %50 kireç ve %50 çimento

Hazırlanan bütün numuneler üzerinde farklı kür günlerinde yapılan serbest basınç mukavemet deneyleri sonucunda numunelerin serbest basınç mukavemetleri bulunmuş, gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş ve elastisite modülü, E_{50} değerleri hesaplanmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen sekant elastisite modülü, E_{50} ile serbest basınç mukavemeti, q_u arasındaki ilişki değerlendirilerek alt ve üst sınırlar verilmiştir.

3.1.5.2. B Sahasından Alınan Doğal Zemin ile Hazırlanan Numuneler

Bu sahadan alınan doğal zemin ile de farklı başlangıç su muhtevaları kullanılarak derin karışım numuneleri hazırlanmıştır. Kullanılan su muhtevaları %35, %42, %53 ve %63'tür. Seçilen su muhtevalarına doğal zeminin likitide indekslerine göre karar verilmiştir. Bu numuneler hazırlanırken katkı malzemesi olarak CEM I sınıfı çimento ve arazideki çimento dozajı ve su/çimento oranı kullanılmıştır.

Bu araziden getirilen inorganik zemin ile de farkı kimyasalların etkilerini incelemek için bağlayıcı malzemesi olarak kireç ve çimento birlikte kullanılarak derin karışım numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan derin karışım numunelerinin bağlayıcı dozajı 350 kg/m^3 ve su/çimento oranı, w:c=1.0'dir. Hazırlanan numuneler aşağıda verilmektedir:

- 350 kg/m^3 bağlayıcı dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 1.0; doğal zemin su muhtevası w=42; bağlayıcı oranı %25 kireç ve %75 çimento
- 350 kg/m^3 bağlayıcı dozajı ve su-çimento oranı, w:c = 1.0; doğal zemin su muhtevası w=42; bağlayıcı oranı %50 kireç ve %50 çimento
- 350 kg/m^3 bağlayıcı dozajı ve su/çimento oranı, w:c = 1.0; doğal zemin su muhtevası w=53; bağlayıcı oranı %25 kireç ve %75 çimento
- 350 kg/m^3 bağlayıcı dozajı ve su-çimento oranı, w:c = 1.0; doğal zemin su muhtevası w=53; bağlayıcı oranı %50 kireç ve %50 çimento

Bu numuneler üzerinde de farklı kür günlerinde yapılan serbest basınç mukavemet deneyleri sonucunda numunelerin serbest basınç mukavemetleri bulunmuş, gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş ve elastisite modülü, E_{50} değerleri hesaplanmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen sekant elastisite modülü, E_{50} ile serbest basınç mukavemeti, q_u arasındaki ilişki değerlendirilerek alt ve üst sınırlar verilmiştir.

3.2. ARAZİ ÇALIŞMALARI

Bu tez kapsamında detaylı bir arazi çalışması yapılmıştır. Arazi çalışmaları kapsamında mevcut DSM kolon imalatlarının yapıldığı iki farklı şantiyede (A ve B sahaları), farklı imalat parametreleri uygulanarak deneme DSM kolonları imal edilmiştir. Arazide farklı bağlayıcı türleri kullanılarak deneme DSM kolon imalatları yapılması planlanmış ancak Türkiye'de yapılan mevcut uygulamalarda kullanılan bağlayıcı türünün sadece çimento olduğu ve farklı bir bağlayıcı ile imalat yapmanın o günkü şantiye koşullarında mümkün olmadığı görülmüştür. Bu sebeple deneme kolonlarının imalatı, şantiyelerdeki mevcut uygulamada kullanılan çimento tipleri kullanılarak yapılmıştır. Kolon imalatları sonrasında imal edilen derin karıştırma kolonlarında kalite kontrol deneyleri yapılmıştır. Deneme kolonlarından tam boy karot alınmıştır ve kolonların içinde belirli derinliklerde basınçlı su testi ve presiyometre deneyleri yapılmıştır. Aynı zamanda doğal zemini karakterize edebilmek amacıyla iki sahada da zemin sondajı yapılarak, SPT ve presiyometre deneyleri uygulanmıştır. Her iki sahada da karot

sandıkları oluşturulmuş ve laboratuvara getirilmiştir. Laboratuvarda karot sandıkları detaylı bir şekilde değerlendirilmiş ve ilk olarak zemin iyileştirme seviyesine göre gözlemsel olarak sınıflandırılmıştır. Numuneler, farklı testlere tabii tutulmak üzere ayrılmış ve uygun bir ortamda muhafaza edilmiştir. İki sahada da derin karıştırma kolonlarının yapıldığı bölgelerde muayene çukurları açılmıştır ve doğal zemin numunesi alınarak laboratuvara getirilmiştir. Bu doğal zemin numuneleri laboratuvarda hazırlanan derin karışım numuneleri için kullanılmıştır.

Arazide yapılacak deneme DSM kolon imalatında kullanılacak parametrelerin değerlendirilmesi amacıyla yapılan literatür taraması sonucunda, imalat sırasında yapılan karıştırmanın seviyesinin, karıştırma bıçağının dönme hızına ve iniş ve çıkış hızına bağlı olduğu görülmüştür. Nitekim karıştırma enerjisini sayısal olarak belirleyen Bıçak Dönüş Sayısı (BRN) bu parametrelere bağlı olarak hesaplanmaktadır (Kitazume ve Terashi, 2013). Tablo 2.6'da tipik uygulama parametreleri verilmiştir.

İlk aşamada bu parametreler ve ülkemiz uygulamaları göz önüne alınarak, her iki saha için sekiz farklı kolon imalat parametresi seçilmiş ve her bir parametre ikişer adet kolon üzerinde denenmiştir. A sahasında 16 adet ve B sahasında 16 adet olmak üzere toplam 32 adet derin karıştırma kolon imalatı yapılmıştır. İlk bölgede kolonlar sekiz metre, diğer tarafta iki kolon hariç on metredir. Parametreler Tablo 2.6 ile uyumlu olacak şekilde seçilmiş ve özellikle düşük iniş ve çıkış hızlarının test edilmesi ve BRN sayılarının yükselmesi amaçlanmıştır. Farklı çimento dozajlarının kullanılması da parametre olarak seçilerek, farklı imalat yöntemlerinin (daha yüksek BRN değerleri) daha az çimento kullanılmasını sağlayıp sağlamadığının incelenmesi amaçlanmıştır. Dönüş hızları da değiştirilmiş ve çok yüksek dönüş hızlarına ihtiyaç olup olmadığı anlaşılmaya çalışılmıştır. Aşağıdaki bölümlerde tüm bu detaylar her iki saha için sunulmaktadır.

3.2.1. A Sahasında Yapılan Arazi Çalışmaları

Bu sahada 9.0 metre derinliğinde zemin sondajı yapılmıştır ve sondaj kuyusunda belirli derinliklerde SPT ve presiyometre deneyleri tamamlanmıştır. Yapılan sondaj kuyusu verilerine bakıldığında; 0.0-2.5 metre aralığında yapay dolgu, 2.5-5.0 metre aralığında katı, sarımsı kahverengi renkli, siltli kumlu kil, 5.0-6.0 metre aralığında organik malzeme ve 6.0-9.0 metre aralığında katı, sarımsı kahverengi renkli, siltli kumlu kil birimler geçilmiştir. 1.5 metre derinlikteki SPT-1 değeri 14, 3.0 metre derinlikteki SPT-2 değeri 9 ve 6.0 metre derinlikteki SPT-3 değeri ise 13'tür.

Bu sahada farklı imalat parametreleri kullanılarak on altı adet kolon imalatı yapılmıştır. İlk aşamada kolon imalat parametreleri literatürle uyumlu olarak seçilmiş ancak imalat öncesinde sahada yapılan görüşmelerde mevcut imalatlarda kullanılan DSM makinesinin akış hızının imalat hızlarını belirlediği öğrenilmiştir. Düşük iniş ve çıkış hızları uygulandığında kolon içerisindeki imalat süresi uzamakta, bu nedenle hedeflenenden çok yüksek çimento dozajlarına neden olacak şekilde enjeksiyon yapılmaktadır. Bu nedenle, deneme kolonlarında akış hızından yola çıkılarak, hedeflenen dozajı sağlayacak şekilde iniş ve çıkış hızları belirlenmiş ve belirli bir hacim enjeksiyonunun kolon içerisine gönderilmesi sağlanmıştır. Bu sahada DSM makinesinin sabit akış hızının 300 lt/dk olduğu ve nozüllerin tıkanma ihtimali nedeniyle daha düşük akış hızı kullanılamayacağı belirtilmiştir. Bu nedenle daha önce belirlenen imalat parametrelerinde değişiklik yapılması gerekmiştir. Sekiz farklı parametre kullanılarak ve her parametrenin uygulandığı kolondan iki adet olmak üzere toplam on altı adet kolon bu sahada yapılmıştır. Her kolondan iki adet yapılarak, aynı imalat sonrasında kolonlarda ne seviyede benzerlik yakalandığını incelemiştir. Kolon imalatlarında, bağlayıcı türü olarak sahada mevcut uygulamalarda kullanılan CEM II sınıfı çimento kullanılmıştır.

Şekil 3.8'de bu sahada imal edilen deneme kolonlarının parametre detayları verilmektedir. Bu sahada imal edilen kolonların çapları 100 cm ve boyları 8.0 metredir. Tüm kolonlarda su/çimento (w:c) oranı 0.8 ve uygulanan basınç 100-200 bardır. İlk 14 kolon bir defa iniş-çıkış yapılarak, son iki kolon (DSM-15 ve DSM-16) ise tarama yapılarak imal edilmiştir. DSM-15 numaralı kolonda dört tarama, DSM-16 numaralı kolonda ise iki tarama yapılarak imalat tamamlanmıştır. Bu son iki kolonda tarama yapılmasının nedeni Türkiye'deki derin karıştırma imalat uygulamalarında birden daha çok tarama yapılmasının tercih ediliyor olmasıdır.

A İNŞAAT SAHASI																	
Parametreler	**Birim**	**DSM-1**	**DSM-2**	**DSM-3**	**DSM-4**	**DSM-5**	**DSM-6**	**DSM-7**	**DSM-8**	**DSM-9**	**DSM-10**	**DSM-11**	**DSM-12**	**DSM-13**	**DSM-14**	**DSM-15**	**DSM-16**
Çimento dozajı	*[kg/m³]*	400	400	400	400	350	350	300	300	300	300	400	400	350	350	400	400
w/c	-	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Basınç	*[bar]*	100-200	100-200	100-200	100-200	100-200	100-200	100-200	100-200	100-200	100-200	100-200	100-200	100-200	100-200	100-200	100-200
İnme hızı	*[cm/dak]*	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	170	170	200	200	Tarama yapılarak, 300 cm/dk iniş hızı, yavaş çık dönme hızı (inme) 40 rpm dönme hızı (çekme) 80 rpm	
Çekme hızı	*[cm/dak]*	115	115	115	115	140	140	170	170	170	170	170	170	200	200		
Dönme hızı (inme)	*[rpm]*	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40		
Dönme hızı (çekme)	*[rpm]*	80	80	40	40	40	40	80	80	40	40	40	40	40	40		
İniş-çıkış sayısı	*[adet]*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	2
Bıçak sayısı	*[adet]*	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Bıçak dönüş sayısı (BRN)		**492**	**492**	**284**	**284**	**246**	**246**	**357**	**357**	**216**	**216**	**282**	**282**	**240**	**240**	-	-
Kolon çapı	*[m]*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Kolon boyu	*[m]*	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
İniş hızı	*[dakika]*	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	4.7	4.7	4.0	4.0	-	-
Çıkış hızı	*[dakika]*	7.0	7.0	7.0	7.0	5.7	5.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.0	4.0	-	-
İmalat süresi	*[dakika]*	9.5	9.5	9.5	9.5	8.2	8.2	7.2	7.2	7.2	7.2	9.4	9.4	8.0	8.0	-	-

Şekil 3.8: A sahasında yapılan kolon imalatlarının detayı.

Şekil 3.8'de görüldüğü gibi akış hızı olan 300 lt/dk'nın iniş ve çıkış hızını etkiliyor olması nedeni ile, imalat sürelerinin kullanılan dozaja göre 7-10 dk arasında olması gerekmelidir. Bu süreleri tutturabilmek için iniş ve çıkış hızları olabilecek en küçük değerler olarak belirlenmiştir. Parametreleri belirlerken amaç asıl olarak 1.0-1.5 m/dk hızlarını en azından çıkışlarda sağlayabilmek için hızlı iniş ve daha yavaş çıkış alternatifleri denenmiştir. Bazı kolonlarda da iniş ve çıkış hızları eşit tutulmuştur. Arazide bu hızları tam olarak kontrol etmek mümkün olmadığı için, iniş ve çıkışın kaçar dakika sürmesi gerektiği hesaplanmış ve imalat manuel olarak bu sürelere uygun olarak devam ettirilmiştir. Dönüş hızları da DSM makinesinin kolaylıkla sabit kalabildiği 80 ve 40 olarak seçilmiştir. BRN sayıları da bu değerlere uygun olarak hesaplanmıştır.

Kolon imalatlarının yapıldığı saha Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Kolonların imalatı Bauer RTG RG 25 S marka makine ile yapılmıştır. Şekil 3.10'da ise kullanılan makine ve bıçakları gösterilmektedir. Bıçak üzerinde toplam 14 adet nozül bulunmaktadır. DSM makinesinden imalat sırasında derinlik boyunca reel olarak gerçekleşen iniş hızı, çıkış hızı, dönme hızı, her derinlikte ne seviyede enjeksiyon gönderebildiğine ilişkin bir veri toplayıcıdan bir ölçüm/kayıt alınamamıştır.



Şekil 3.9: Kolon imalatlarının yapıldığı A sahası.



Şekil 3.10: A sahasında kullanılan makine ve bıçakları.

Şekil 3.11'de kolonların imalatı sırasındaki görünümü ve Şekil 3.12'de kolonların imalatların tamamlanmasından sonra yukarıdan görünümü gösterilmiştir. DSM kolon imalatları sırasında karışım sebebiyle dışarı bir miktar posa çıkmaktadır. Şekil 3.13'te görüldüğü gibi ilk 14 kolondan çıkan posa az miktardadır, son iki kolondan çıkan posa miktarı ise 2-3 kat daha fazla olmuştur. Bu da çoğul taramalı imalat sonucunda oluşan posanın oldukça fazla miktarda olduğuna ve esasen oluşturulacak DSM kolonunun zemin-çimento karışımından ziyade, çimento enjeksiyonu ile oluşacak kolonlar olacağı öngörülebilir.



Şekil 3.11: A sahasında imal edilen kolonların yapım aşaması.



Şekil 3.12: A sahasındaki kolonların imalatlarının tamamlanmasından sonra üstten görünümü.



Şekil 3.13: A sahasında imal edilen kolonlardaki posa miktarları.

3.2.1.1. İmalat Sırasında Islak Numune Alıcı ile Numune Alınması

Kolonların imalatı sırasında kolonlardan ıslak numune alıcı ile numuneler alınmıştır. Bu numune alıcı belirli bir derinliğe kadar ağzı kapalı olarak indirilen ve ilgili derinlikte basınç yardımı ile ağzı açılarak içine numunenin girmesi sağlanan bir alet olarak sahadaki firmalardan biri tarafından deneme amaçlı tasarlanmıştır. Şekil 3.14'te ıslak numune alma aleti ve Şekil 3.15'te ıslak numune alınma fotoğrafı gösterilmektedir.

Sahada ıslak numune alıcı manuel olarak kolon içine indirildiği için ilk birkaç metrenin aşağısına inilememiştir. Bu sebeple ıslak numuneler kolonların sadece üst seviyelerindeki derinliklerden alınabilmiştir. Daha derine indirilmesi için makineye bağlanmasının ve makine kuvveti ile daha derinlere inmesinin mümkün olabileceği görülmekle birlikte, sahada bu uygulamayı yapma imkanı bulunamamıştır.



Şekil 3.14: Islak numune alıcı.



Şekil 3.15: A sahasında kolonlardan ıslak numune alıcı ile numune alınması.

Numune alıcı ile alınan numuneler özel olarak hazırlatılmış olan kalıplar içerisine konulmuş, suyunu kaybetmeyecek şekilde hemen şeffaf plastik ve alüminyum folyo ile sarılmıştır. Plastik boruların kesilmesi ile yaptırılmış kalıplar 45 cm-70 cm, 50 cm-100 cm ve 80 cm-160 cm boyutlarındadır. Her kolon için numune alıcıdan gelen numune miktarına göre hem küçük hem de büyük kalıplara numune alınmıştır. Bu numuneler daha sonra laboratuvara getirilmiş ve küre

bırakılmıştır. Kürlenme sonrasında numuneler kalıptan çıkarılmıştır ve numuneler üzerinde basınç testi yapılmıştır. Kullanılan numune kalıpları Şekil 3.16'da verilmektedir.



Şekil 3.16: Islak numune alıcı için yaptırılan kalıplar.

3.2.1.2. İmalat Sırasında Yapılan Kalite Kontrol Deneyleri

A sahasında kolon imalatlarından yaklaşık 45 gün sonra imalata yönelik kalite kontrol arazi deneyleri yapılmıştır.

- Arazide imal edilen on altı adet kolondan tam boy karot alınmıştır. Tüm kolonların içinde belirli derinliklerde presiyometre ve basınçlı su testi deneyleri yapılmıştır.
- Kolon imalatlarının yapıldığı bölgeyi karakterize edebilmek için 9.0 m derinliğinde zemin sondajı yapılmıştır.
- Sondaj kuyusunda SPT ve presiyometre deneyleri yapılmıştır. Örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınmıştır.
- Bu uygulamalara ilişkin fotoğraflar Şekil 3.17'de sunulmaktadır.
- Karot sandıkları, karotların çıkarılmasına paralel olarak takip edilmiştir. Numuneler su muhtevalarını kaybetmemeleri için hemen şeffaf plastik ve alüminyum folyo ile sarılmıştır. Şekil 3.18'de buna ilişkin bazı karot sandık fotoğrafları görülmektedir. Bu sahadan alınan tüm karot sandıkları Ek-1'de verilmektedir.



Şekil 3.17: A sahasında yapılan kalite kontrol arazi deneyi uygulamaları.



Şekil 3.18: A sahasından alınan karotlara ilişkin fotoğraflar.

3.2.2. B Sahasında Yapılan Arazi Çalışmaları

Bu sahada 20.0 m derinliğinde zemin sondajı yapılmıştır ve sondaj kuyusunda belirli derinliklerde SPT ve presiyometre deneyleri tamamlanmıştır. Yapılan sondaj kuyusu verilerine bakıldığında; 0.0-0.5 metre aralığında bitkisel toprak, 0.5-20.0 metre aralığında grimsi, kahverengimsi renklerde, organik ara katkılı, orta katı-katı siltli kil birimler geçilmiştir. 1.5 metre derinlikteki SPT-1 değeri 6, 3.0 metre derinlikteki SPT-2 değeri 11, 4.5 metre derinlikteki SPT-3 değeri 9, 6.0 metre derinlikteki SPT-4 değeri 15, 7.5 metre derinlikteki SPT-5 değeri 5, 9.0 metre derinlikteki SPT-6 değeri 8, 10.5 metre derinlikteki SPT-7 değeri 8, 12.0 metre derinlikteki SPT-8 değeri 5, 13.5 metre derinlikteki SPT-9 değeri 19, 15.5 metre derinlikteki SPT-10 değeri 9, 16.5 metre derinlikteki SPT-11 değeri 9 ve 18.0 metre derinlikteki SPT-12 değeri ise 9'dur.

Bu sahada da farklı imalat parametreleri kullanılarak on altı adet kolon imalatı yapılmıştır. Bu sahada yapılan mevcut uygulamalarda kullanılan makinede akış hızının ayarlanabileceği öğrenilmiş ve buna bağlı imalat süreleri, iniş ve çıkış hızları hesaplanmıştır. Akış hızları 125-150 ve 175 lt/dk'dır. Parametreleri belirlerken amaç asıl olarak 1.0-1.5 m/dk hızlarını en azından çıkışlarda sağlayabilmek için hızlı iniş ve daha yavaş çıkış alternatifleri denenmiştir. Bazı kolonlarda da iniş ve çıkış hızı eşit tutulmuştur. Arazide bu hızları tam olarak kontrol etmek mümkün olmadığı için, iniş ve çıkışın kaçar dakika sürmesi gerektiği hesaplanmış ve imalat manuel olarak bu sürelere uygun olarak devam ettirilmiştir. Dönüş hızları da DSM makinesinin kolaylıkla sabit kalabildiği 70 dönüş/dk, 50 dönüş/dk ve 40 dönüş/dk olarak seçilmiştir. Kolon imalatlarında, bağlayıcı türü olarak sahada mevcut uygulamalarda kullanılan CEM I sınıfı çimento kullanılmıştır. Şekil 3.19'da bu sahada imal edilen kolonların parametre detayları verilmektedir.

B İNŞAAT SAHASI																	
Parametreler	**Birim**	**DSM-1**	**DSM-2**	**DSM-3**	**DSM-4**	**DSM-5**	**DSM-6**	**DSM-7**	**DSM-8**	**DSM-9**	**DSM-10**	**DSM-11**	**DSM-12**	**DSM-13**	**DSM-14**	**DSM-15**	**DSM-16**
Çimento dozajı	*[kg/m³]*	350	350	350	350	350	350	350	350	300	300	300	300	250	250	250	250
w/c	-	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Basınç	*[bar]*	100	100	100	100	80-100	80-100	80-100	80-100	100	100	100	100	100	100	100	100
İnme hızı	*[cm/dak]*	Tarama yapılarak, dönme hızı 70 rpm		145	145	265	265	265	265	265	265	170	170	265	265	265	265
Çekme hızı	*[cm/dak]*			145	145	100	100	100	100	100	100	170	170	100	100	100	100
Dönme hızı	*[rpm]*			70	70	70	70	40	40	70	70	70	70	50	50	70	70
İniş-çıkış sayısı	*[adet]*	2	2	1	1	İlk 3 m çift tarama, sonrasında tek iniş-çıkış		1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Bıçak sayısı	*[adet]*	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Bıçak dönüş sayısı (BRN)		-	-	**579**	**579**	**578**	**578**	**331**	**331**	**578**	**578**	**494**	**494**	**413**	**413**	**1157**	**1157**

Kolon çapı	*[m]*	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Kolon boyu	*[m]*	15.0	15.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
İniş hızı	*[dakika]*	-	-	6.9	6.9	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	5.9	5.9	3.8	3.8	3.8	3.8
Çıkış hızı	*[dakika]*	-	-	6.9	6.9	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	5.9	5.9	10.0	10.0	10.0	10.0
İmalat süresi	*[dakika]*	-	-	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	11.8	11.8	13.8	13.8	13.8	13.8

Şekil 3.19: B sahasında yapılan kolon imalatlarının detayı.

Bu sahada da sekiz farklı parametre kullanılarak ve her parametrenin uygulandığı kolondan iki adet olmak üzere toplam on altı adet kolon yapılmıştır. Kolon imalatlarının yapıldığı saha Şekil 3.20'de gösterilmektedir. Kolonların imalatı Soilmec R-825 marka makine ile yapılmıştır. Şekil 3.21'de kullanılan makine ve bıçakları gösterilmektedir. Nozül sayısı 14'tür. Bu DSM makinesinden de imalat sırasında derinlik boyunca reel olarak gerçekleşen iniş hızı, çıkış hızı, dönme hızı, her derinlikte ne seviyede enjeksiyon gönderebildiğine ilişkin bir veri toplayıcıdan bir ölçüm/kayıt alınamamıştır.



Şekil 3.20: Kolon imalatlarının yapıldığı B sahası.



Şekil 3.21: B sahasında kullanılan makine ve bıçakları.

Şekil 3.22'de kolonların imalatı sırasındaki görünümü ve Şekil 3.23'te kolonların imalatların tamamlanmasından sonra görünümü gösterilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi kolonlardan çok fazla posa çıkmıştır. Bunun nedeni zeminin yüksek plastisiteli olması sebebiyle imalat nedeniyle büyük zemin kütlelerin çıkış aşamasında augerle birlikte dışarı çıkmasıdır, yani zemin bıçak ve augere yapışarak karıştırmaya maruz kalmadan direkt olarak zemin yüzeyine çıkabilmektedir. Şekil 3.24'te hiç karıştırılamadan zemin yüzeyine kadar çıkan zemin örnekleri görünmektedir. Bu "zemin kolonlarının" boyları 2.0-2.5 metre yüksekliğinde olabilmektedir.



Şekil 3.22: B sahasında imal edilen kolonların yapım aşaması.



Şekil 3.23: B sahasındaki kolonların imalatlarının tamamlanmasından sonra görünümü.



Şekil 3.24: Kolon imalatı sırasında yüksek plastisiteli kil nedeniyle kil kolonunun çıkması (Kil karışmamakta, augere ve bıçaklara yapışıp yukarı gelmektedir.).

3.2.2.1. İmalat Sırasında Islak Numune Alıcı ile Numune Alınması

Bu sahada da kolonların imalatı sırasında kolonlardan ıslak numune alıcı ile numuneler alınmıştır. A sahasında kullanılan ıslak numune alma aleti bu sahada da kullanılmıştır. Şekil 3.25'te ıslak numune alma aleti ve Şekil 3.26'da ıslak numune alınması gösterilmektedir. Bu sahada da ıslak numune alıcı manuel olarak kolon içine indirildiği için ilk metrenin aşağısına inilememiştir. Bu sebeple bu sahada da ıslak numuneler kolonların sadece üst seviyelerindeki derinliklerden alınabilmiştir. Daha derine indirilmesi için makineye bağlanmasının ve makine kuvveti ile daha derinlere inmesinin mümkün olabileceği görülmekle birlikte, sahada bu uygulamayı yapma imkanı bulunamamıştır.

Bu sahada da numune alıcı ile alınan numuneler özel olarak hazırlatılmış olan kalıplar içerisine konulmuş, suyunu kaybetmeyecek şekilde hemen şeffaf plastik ve alüminyum folyo ile sarılmıştır. Her kolon için numune alıcıdan gelen numune miktarına göre hem küçük hem de büyük kalıplara numune alınmıştır. Bu numuneler daha sonra laboratuvara getirilmiş ve küre bırakılmıştır. Kürlenme sonrasında numuneler kalıptan çıkarılmıştır ve numuneler üzerinde basınç testi yapılmıştır. Arazide kalıplama işlemi Şekil 3.27'de verilmektedir.



Şekil 3.25: Islak numune alma aleti.



Şekil 3.26: B sahasındaki kolonlardan ıslak numune alınması.



Şekil 3.27: Islak numune alıcı ile alınan numunelerin kalıplanması.

3.2.2.2. İmalat Sonrasında Yapılan Kalite Kontrol Deneyleri

B sahasında da kolon imalatlarından yaklaşık 45 gün sonra imalata yönelik kalite kontrol arazi deneyleri yapılmıştır.

- Arazide imal edilen on altı adet kolondan tam boy karot alınmıştır. Tüm kolonların içinde belirli derinliklerde presiyometre ve basınçlı su testi deneyleri yapılmıştır.
- Kolon imalatlarının yapıldığı bölgeyi daha iyi karakterize edebilmek için 20.0 metre derinliğinde zemin sondajı yapılmıştır.
- Sondaj kuyusunda SPT ve presiyometre deneyleri yapılmıştır. Örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınmıştır.
- Bu uygulamalara ilişkin fotoğraflar Şekil 3.28'de sunulmaktadır.
- Karot sandıkları, karotların çıkarılmasına paralel olarak takip edilmiştir. Numuneler su muhtevalarını kaybetmemeleri için hemen şeffaf plastik ve alüminyum folyo ile sarılmıştır. Şekil 3.29'da buna ilişkin bazı karot sandık fotoğrafları görülmektedir. Bu sahadan alınan tüm karot sandıkları Ek-2'de verilmektedir.



Şekil 3.28: B sahasında yapılan kalite kontrol arazi deneyi uygulamaları.



Şekil 3.29: A sahasından alınan karotlara ilişkin fotoğraflar.

4. BULGULAR

Tez kapsamında A ve B sahalarında yapılan arazi çalışmaları ve bu sahalardan alınan doğal zeminler ile laboratuvarda yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular aşağıda detaylı olarak sunulmaktadır.

4.1. LABORATUVAR ÇALIŞMALARINDAN ELDE EDİLEN BULGULAR

Laboratuvar çalışmaları kapsamında ilk olarak "Kategori 1" olarak sınıflandırılan deneme deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler, A sahasından imalat öncesinde deneme DSM kolonları yapılması planlanan bölgeden alınan organik ve inorganik doğal zemin numuneleri ile hazırlanan derin karışım numunelerini kapsamaktadır. "Kategori 2" olarak sınıflandırılan numuneler ise A ve B sahalarında deneme DSM kolonlarının yapıldığı bölgelerden alınan doğal zemin numuneleri ile hazırlanan derin karışım numuneleridir. Bu numuneler arazide imalatı yapılan kolonların dozajı ve su/çimento (w:c) oranları kullanılarak hazırlanmış ve deneyleri yapılmıştır. Burada amaç arazide imal edilen kolonların laboratuvarda hazırlanan numuneler ile karşılaştırılmasıdır. "Kategori 3" olarak sınıflandırılan numuneler ise A ve B sahalarından getirilen inorganik doğal zeminler ile farklı başlangıç su muhtevalarında ve farklı bağlayıcı türleri kullanılarak laboratuvarda hazırlanan derin karışım numunelerini içermektedir. Aşağıda bu tüm kategorilerde hazırlanan derin karışım numuneleri üzerinde yapılan deney sonuçları detaylı olarak verilmektedir.

4.1.1. Kategori 1: Deneme Deneylerinin Sonuçları

A sahasında deneme DSM kolonlarının yapılması planlanan bölgeden alınan organik ve inorganik doğal zeminler ile hazırlanan derin karışım numuneleri üzerinde yapılan deneme deneylerinin sonuçları aşağıda verilmektedir.

4.1.1.1. Organik Zemin (Turba)

Turba zeminin birim hacim ağırlığı, γ_n, 11.4 kN/m^3, doğal su muhtevası ise %250 civarındadır. Turba zemin, yüksek dereceli etüvde, 700°C'de altı saat boyunca yakılmıştır (Şekil 4.1). Deney sonucunda zeminin organik içeriği %40 olarak bulunmuştur. Bu oldukça yüksek bir organik

içeriktir. Zemin özellikleri Tablo 4.1'de verilmektedir. Bu zeminde kıvam limitleri deneyi yapılamamıştır.

Tablo 4.1: Zemin özellikleri (Turba, A Sahası).

Zemin Özellikleri			
A Sahası	**Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN/m^3)**	**Doğal Su Muhtevası, w_i (%)**	**Organik İçerik (%)**
Turba	11.4	250	40

Özel bir laboratuvarda zeminin sülfat miktarını belirlemek için sülfat analizi yaptırılmıştır. Analiz sonucuna göre zemindeki sülfat miktarı 5.83 mg/kg olarak bulunmuştur. Analizler TS EN ISO 10390 (2021) ve TS EN ISO 10304-1 (2010) standartlarına göre yapılmıştır. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde zemindeki sülfat miktarının etki seviyesinin ihmal edilebilir olduğu değerlendirilmiştir. Aynı zamanda araziden getirilen yer altı suyuna da sülfat analizi yaptırılmıştır. Analiz sonucuna göre suyun pH'ı 6.52 ve sülfat miktarı 407.06 mg/L olarak bulunmuştur. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde sudaki sülfat miktarının etki derecesinin de ihmal edilebilir olduğu değerlendirilmiştir.

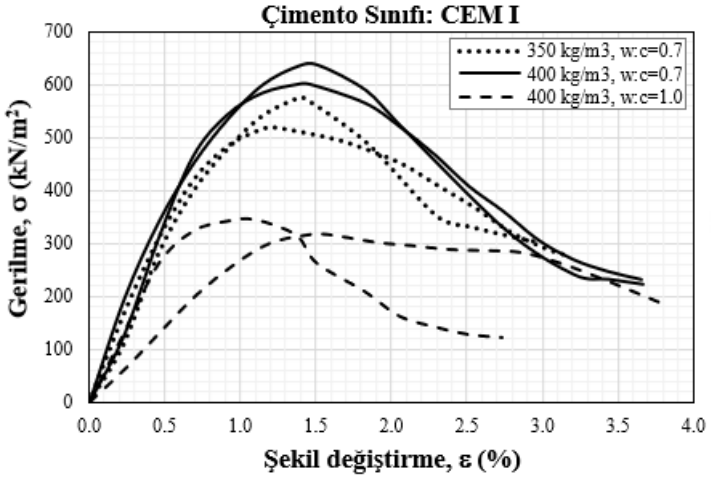


Şekil 4.1: Turba zeminin yüksek dereceli etüvde yakılması.

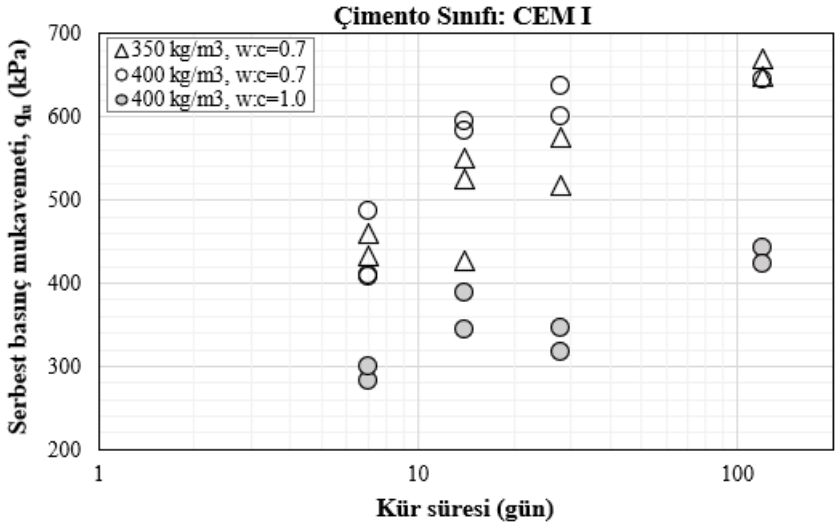
Bu zemin ile farklı çimento dozajları, farklı çimento türleri ve farklı su/çimento oranları (w:c) kullanılarak derin karışım numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde farklı kür günlerinde serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Kullanılan çimentolar, CEM I 42.5 R Portland çimentosu, CEM II/A-M (P-L) 42.5 R Portland-kompoze çimento ve CEM III/A 42.5 R yüksek fırın cüruflu çimentodur. Yapılan deneyler sonrasında numunelerin serbest basınç mukavemet değerleri bulunmuş, gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş ve sekant elastisite modülü, E_{50} değerleri hesaplanmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen sekant elastisite modülü, E_{50} ile serbest basınç mukavemeti, q_u arasındaki ilişki değerlendirilerek alt ve üst sınırlar verilmiştir (Çınar Özkan ve Bozbey, 2022).

➢ *CEM I Sınıfı Çimento Kullanılarak Hazırlanan Numunelerin Deney Sonuçları*

Bu grup numune farklı çimento dozajı (350 kg/m^3 ve 400 kg/m^3) ve su/çimento (w:c = 0.7 ve 1.0) oranı kullanılarak hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde 28 gün kür süresi sonrasında yapılan serbest basınç mukavemet deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme (σ-ε) eğrileri Şekil 4.2'de verilmektedir. Şekil 4.3'te ise bu grup numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin kür gününe bağlı değişimleri gösterilmektedir.



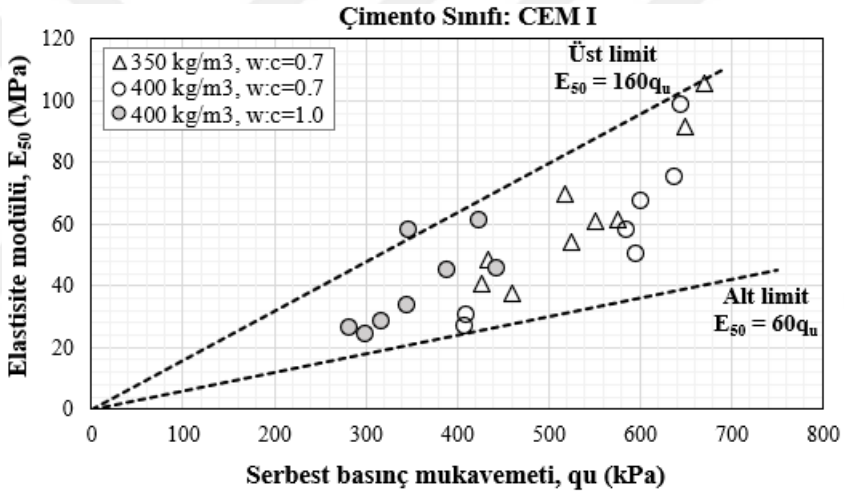
Şekil 4.2: 28 gün kür süresi sonrasında numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (**Turba**, CEM I, 350 kg/m^3-400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250).



Şekil 4.3: Serbest basınç mukavemetinin kür süresine bağlı değişimi (**Turba**, CEM I, 350 kg/m^3-400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250).

- Şekillerde görüldüğü üzere bu zemin için aynı su/çimento oranında, farklı çimento dozajlarının mukavemet artışı üzerinde büyük bir etkisi olmamıştır.
- Su/çimento oranının, çimento dozajı kadar etkili olduğu görülmektedir.

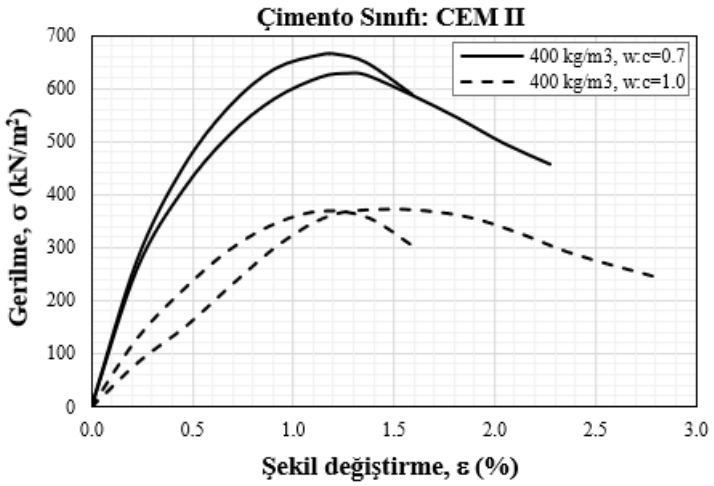
- Mukavemet değerleri 120 gün sonunda 700 kN/m^2 değerinin altında kalmıştır. Ancak aynı çimento dozajına sahip olan numunelerin su/çimento oranı (w:c) azaldıkça mukavemetlerinde artış olduğu görülmüştür. Bu durum literatür ile uyumludur.
- Deney sonuçlarından elde edilen sekant elastisite modülü, E_{50} ile serbest basınç mukavemeti, q_u arasındaki ilişki değerlendirilerek alt ve üst sınırlar verilmiştir. Şekil 4.4'te sekant elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi verilmektedir. Bu grup numune ile yapılan deney sonuçlarına göre E_{50} değerlerinin, q_u değerinin 60 ile 160 katı arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir.
- Şekil 4.4'te görüldüğü üzere su/çimento oranı (w:c) azaldıkça modül değerlerinde de azalma olmaktadır. Daha büyük su/çimento (w:c) değerlerinde modül değerleri maksimum 50-60 MPa seviyesinde kalmaktadır.



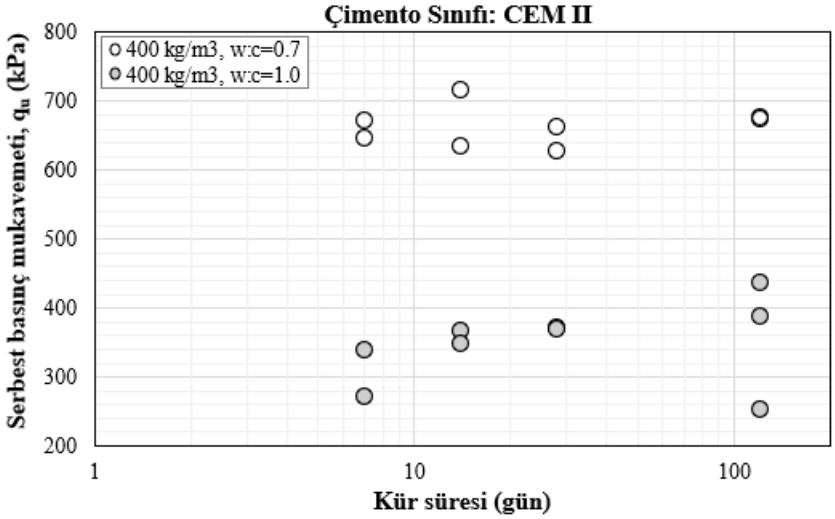
Şekil 4.4: Elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (**Turba**, CEM I, 350 kg/m^3-400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250).

➢ *CEM II Sınıfı Çimento Kullanılarak Hazırlanan Numunelerin Deney Sonuçları*

Bu grup numune aynı çimento dozajı (400 kg/m^3) ve farklı su/çimento (w:c = 0.7 ve 1.0) oranı kullanılarak hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde 28 gün kür süresi sonrasında yapılan serbest basınç mukavemet deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme (σ-ε) eğrileri Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Şekil 4.6'da ise bu grup numunelerin serbest basınç mukavemet değerlerinin kür gününe bağlı değişimleri verilmektedir.

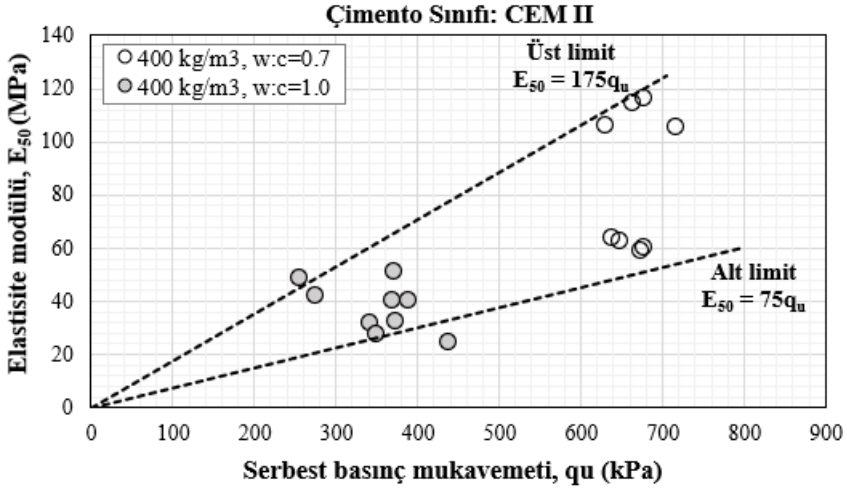


Şekil 4.5: 28 gün kür süresi sonrasında numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (**Turba**, CEM II, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250).



Şekil 4.6: Serbest basınç mukavemetinin kür süresine bağlı değişimi **(Turba**, CEM II, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250).

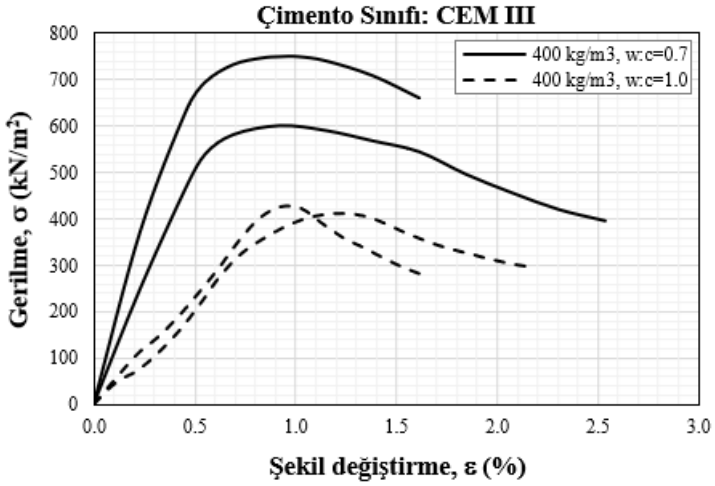
- Aynı çimento dozajına sahip olan numunelerin su/çimento oranı (w:c) azaldıkça mukavemetlerinde artış olduğu görülmüştür.
- Bu çimento tipi ile hazırlanan turba zeminin kür gününe bağlı mukavemet artışı görülmemiştir. Mukavemet değerleri 120 gün sonunda da 700 kN/m^2 seviyesindedir.
- Şekil 4.7'de sekant elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi verilmektedir. Bu grup numune ile yapılan deney sonuçlarına göre E_{50} değerlerinin, q_u değerinin 75 ile 175 katı arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir.



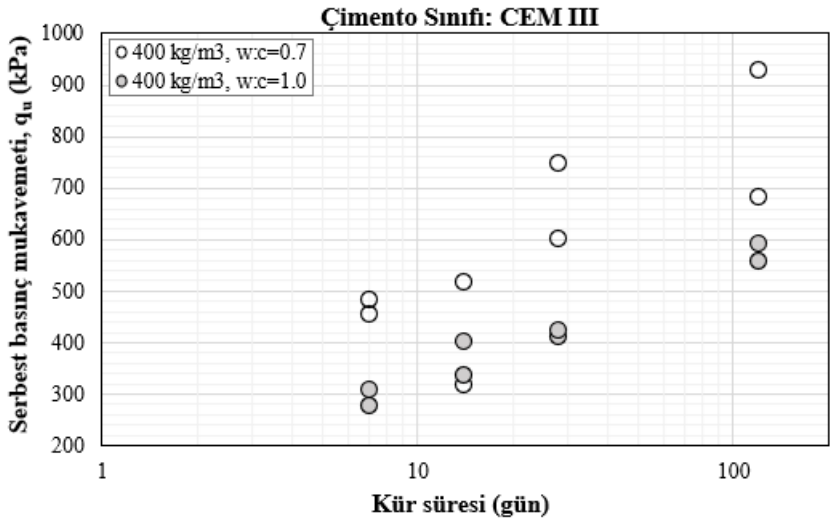
Şekil 4.7: Elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (**Turba**, CEM II, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250).

- *CEM III Sınıfı Çimento Kullanılarak Hazırlanan Numunelerin Deney Sonuçları*

Bu grup numune de aynı çimento dozajı (400 kg/m^3) ve farklı su/çimento (w:c = 0.7 ve 1.0) oranı kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde 28 gün kür süresi sonrasında yapılan serbest basınç mukavemet deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme (σ-ε) eğrileri Şekil 4.8'de verilmektedir. Şekil 4.9'da ise bu grup numunelerin serbest basınç mukavemet değerlerinin kür gününe bağlı değişimleri gösterilmektedir.

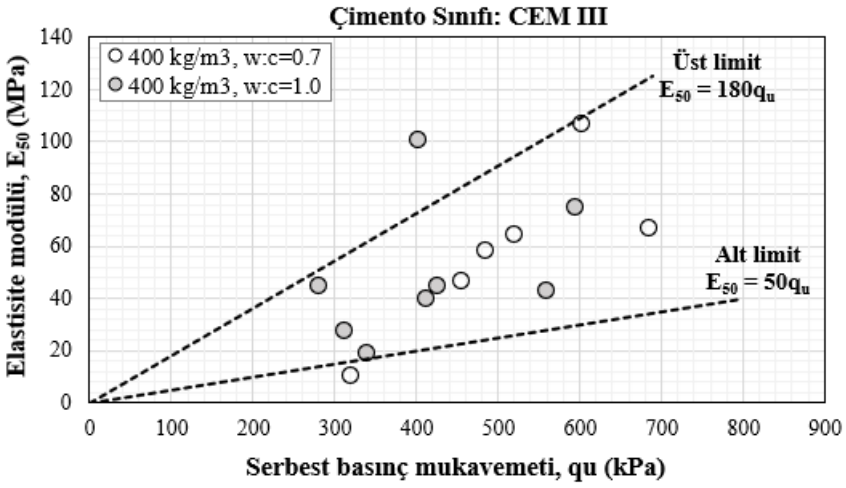


Şekil 4.8: 28 gün kür süresi sonrasında numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (**Turba**, CEM III, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250).



Şekil 4.9: Serbest basınç mukavemetinin kür süresine bağlı değişimi (**Turba**, CEM III, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250).

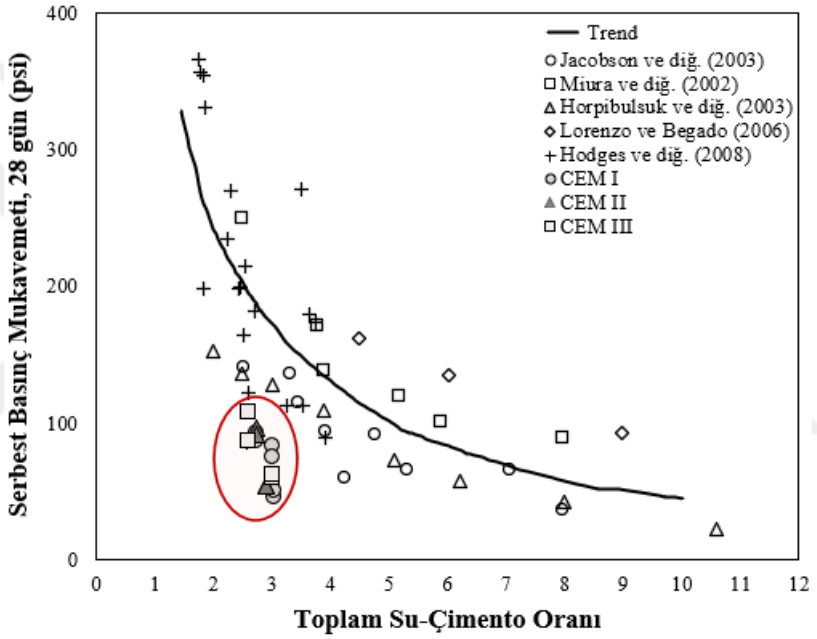
- Aynı çimento dozajına sahip olan numunelerin su/çimento oranı (w:c) azaldıkça mukavemetlerinde artış olduğu görülmüştür.
- Mukavemet değerleri 120 gün sonunda 1000 kN/m^2 altındadır. Bu çimento türü ile hazırlanan turba zeminin kür gününe bağlı mukavemet artışı olmuştur.
- Şekil 4.10'da sekant elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi verilmektedir. Bu grup numune ile yapılan deney sonuçlarına göre E_{50} değerlerinin, q_u değerinin 50 ile 180 katı arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.10: Elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (**Turba**, CEM III, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=0.7-1.0, w_{in}=%250).

➢ *FHWA (2013) ile Karşılaştırma*

FHWA (2013) dokümanında yer alan ve inorganik zeminler için 28 günlük serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimini gösteren grafik Şekil 4.11'de görülmektedir. Bu grafik toplam su/çimento oranı için derin karıştırma karışımlarının mukavemet değerleri için yol gösterici olarak kullanılmaktadır. Şekil 4.11'de organik zemin ile hazırlanmış olan numuneler için 28 gün kür süresi sonunda elde edilen mukavemet değerleri de işaretlenmiştir. Görüldüğü gibi organik zemin ile hazırlanan numunelerde elde edilen değerler inorganik zeminlere göre daha düşüktür. FHWA (2013)'in önerdiği grafiğin organik zeminler için kullanılmasının sakıncalı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (**Turba**, CEM I - CEM II - CEM III**).**

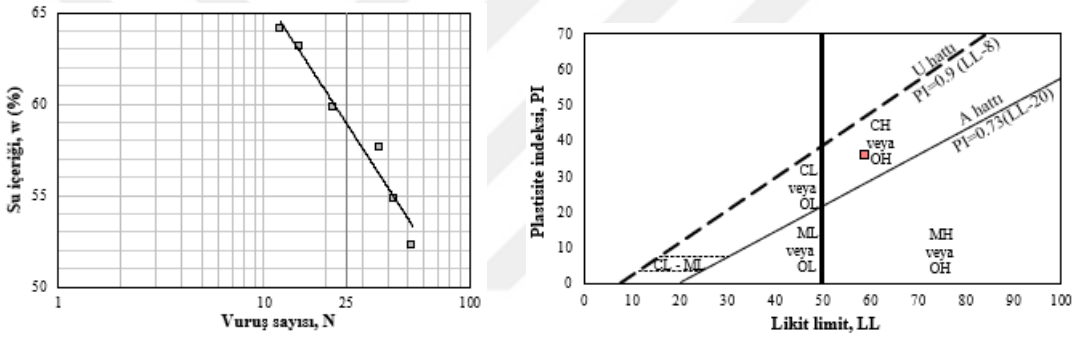
Doğal zeminde organik içerik olması derin karıştırma iyileştirmesinden elde edilen faydayı azaltan önemli bir faktördür. Organik zeminlerin iyileştirilmesi inorganik zeminlere kıyasla daha zordur ve derin karıştırma projelerinde önemli sorunlar yaratabilmektedir.

Çimento türünün farklılaşmasının kür gününe bağlı dayanım artışında farklılık oluşturduğu görülmektedir. Örneğin bu zemin için CEM III tipi çimento ile uzun dönemde (120 gün) diğerlerine göre biraz daha yüksek dayanım elde edilebilmiştir. CEM II ile 28 gün ve 120 gün arasında belirgin bir artış olmamıştır. Bu nedenle arazide kullanılacak çimento türü yapılacak kalite kontrol deney günlerini değiştirebilir. Öncesinde laboratuvarda yapılacak çalışmalar ile kullanılan çimento tipi için mukavemet-kür günü ilişkisi anlaşılmalıdır.

Deneyler sonucunda tüm çimento tipleri ile hazırlanan numunelerin serbest basınç mukavemetleri ve gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden elde edilen sekant elastisite modülleri, E_{50} arasındaki ilişki geniş bir aralığa yayılmaktadır. Bu korelasyonlarda çimento türüne bağlı bir değişiklik görülmemiştir. Bu korelasyonlar 1000 kN/m^2'den daha küçük mukavemet değerleri için kullanılabilir.

4.1.1.2. İnorganik Zemin

İnorganik zeminin tabii birim hacim ağırlığı, γ_n, 16.0 kN/m^3, doğal su muhtevası ise %28 civarındadır. Zemin için kıvam limitleri deneyi yapılmıştır. 4.12'de inorganik zeminde yapılan kıvam limitleri ve zeminin plastisite kartındaki yeri gösterilmektedir. Kıvam limitleri deneyleri sonucunda zeminin yüksek plastisiteli kil (CH) olduğu belirlenmiştir. Zemin özellikleri Tablo 4.2'de verilmektedir.



Şekil 4.12: İnorganik zeminin kıvam limitleri ve plastisite kartındaki yerinin gösterimi.

Tablo 4.2: Zemin özellikleri (İnorganik, A Sahası).

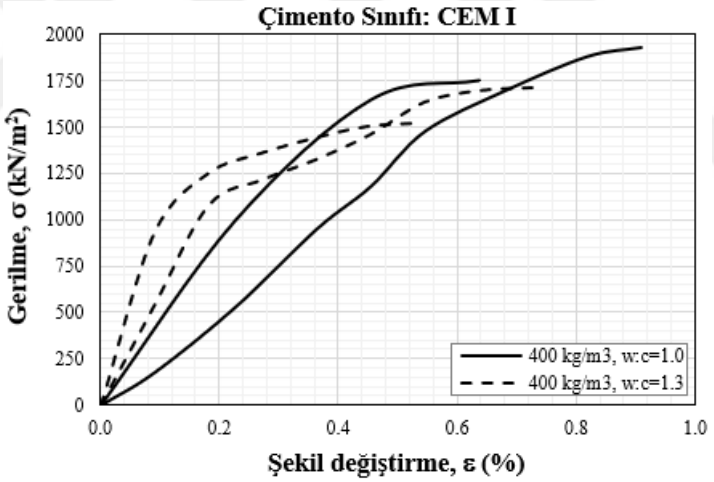
Zemin Özellikleri				
A Sahası	**Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN/m^3)**	**Doğal Su Muhtevası, w_i (%)**	**Likit Limit, LL**	**Plastisite İndeksi, PI**
İnorganik	16.0	28	59.0	35.9

Özel bir laboratuvarda zeminin sülfat miktarını belirlemek için sülfat analizi de yaptırılmıştır. Analiz sonucuna göre zemindeki sülfat miktarı 75.31 mg/kg olarak bulunmuştur. Analizler TS EN ISO 10390 (2021) ve TS EN ISO 10304-1 (2010) standartlarına göre yapılmıştır. Analiz sonuçları zemindeki sülfat miktarının etki derecesinin ihmal edilebilir olduğu göstermektedir. Aynı zamanda araziden getirilen yer altı suyuna da sülfat analizi yaptırılmıştır. Analiz sonucuna göre suyun pH'ı 6.75 ve sülfat miktarı 271.372 mg/L olarak bulunmuştur. Analiz sonuçları değerlendirildiğinde sudaki sülfat miktarının etki derecesinin de ihmal edilebilir olduğu değerlendirilmiştir.

İnorganik zemin ile aynı çimento dozajında farklı su/çimento oranları (w:c) kullanılarak derin karışım numuneleri hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde farklı kür günlerinde serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Kullanılan çimento, CEM I 42.5 R Portland çimentosudur. Bu numunelerin de serbest basınç mukavemet değerleri bulunmuş, gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş ve sekant elastisite modülü, E_{50} değerleri hesaplanmıştır. Sekant elastisite modülü, E_{50} ile serbest basınç mukavemeti, q_u arasındaki ilişki değerlendirilerek alt ve üst sınırlar verilmiştir.

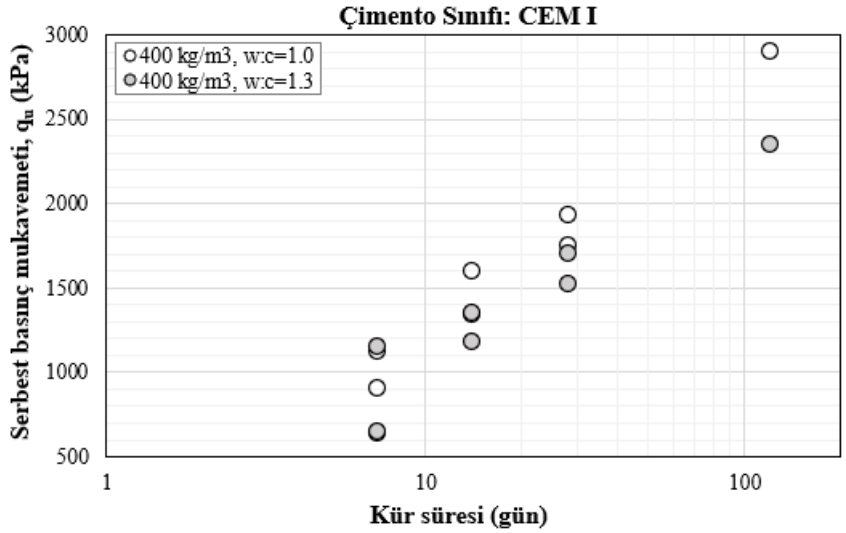
- *CEM I Sınıfı Çimento Kullanılarak Hazırlanan Numunelerin Deney Sonuçları*

Bu grup numune aynı çimento dozajı (400 kg/m^3) ve farklı su/çimento (w:c = 1.0 ve 1.3) oranı kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde 28 gün kür süresi sonrasında yapılan serbest basınç mukavemet deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme (σ-ε) eğrileri Şekil 4.13'te verilmektedir. Şekil 4.14'te ise bu grup numunelerin serbest basınç mukavemet değerlerinin kür gününe bağlı değişimleri gösterilmektedir.

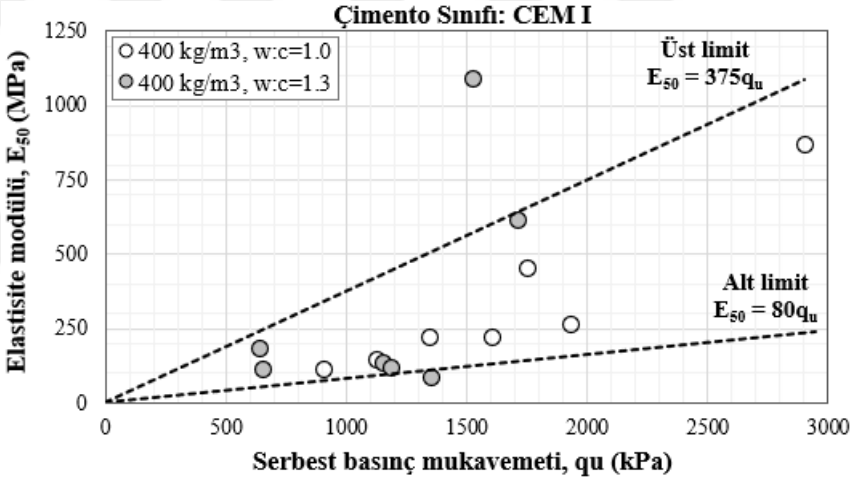


Şekil 4.13: 28 gün kür süresi sonrasında numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (**İnorganik**, CEM I, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=1.0-1.3, w_{in}=%28).

- Değerler 28 gün sonunda 1500-2000 kPa seviyelerine yükselmiştir. Bu değerler organik zemin için elde edilen değerlerin çok üzerindedir.
- Şekilde görüldüğü üzere numunelerde kür gününe bağlı mukavemet artışı olmuştur. Aynı çimento dozajına sahip olan numunelerin su/çimento oranı (w:c) azaldıkça mukavemetlerinde artış olduğu görülmüştür.
- Şekil 4.15'te sekant elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi verilmektedir. Bu grup numune ile yapılan deney sonuçlarına göre E_{50} değerlerinin, q_u değerinin 80 ile 375 katı arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir.



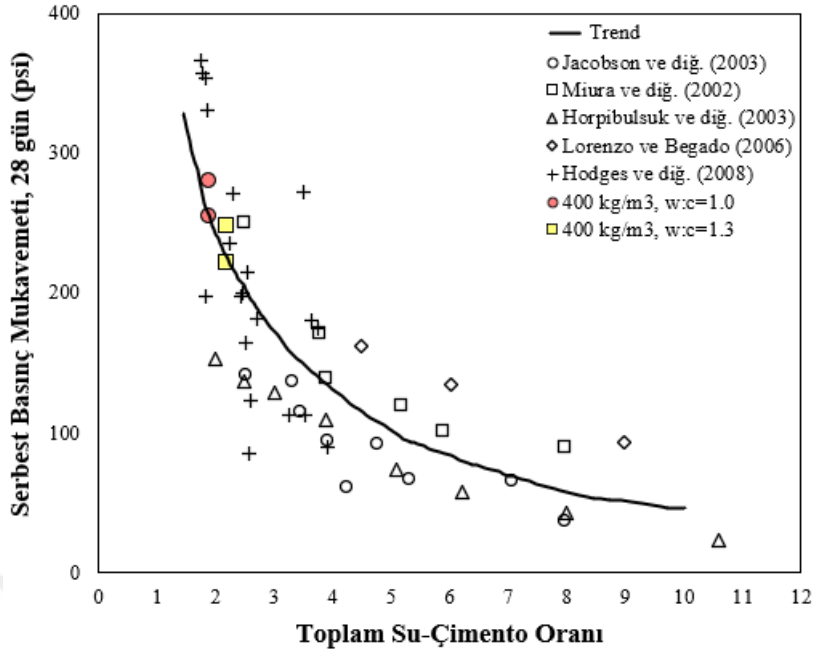
Şekil 4.14: Serbest basınç mukavemetinin kür süresine bağlı değişimi (**İnorganik**, CEM I, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=1.0-1.3, w_{in}=%28).



Şekil 4.15: Elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (**İnorganik**, CEM I, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=1.0-1.3, w_{in}=%28).

- *FHWA (2013) ile Karşılaştırma*

FHWA (2013) dokümanında yer alan ve inorganik zeminler için 28 günlük serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimini gösteren grafik üzerine inorganik zemin ile hazırlanmış olan numuneler için 28 gün kür süresi sonunda elde edilen mukavemet değerleri de işaretlenmiştir (Şekil 4.16). Bu zemin ile verilen çimento dozajları ve su/çimento oranı ile hazırlanan numunelerde görüldüğü gibi literatür ile uyumlu değerler bulunmuştur.



Şekil 4.16: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (**İnorganik**, CEM I, 400 kg/m^3 çimento dozajı, w:c=1.0-1.3, w_{in}=%28).

4.1.2. Kategori 2: Deneme DSM Kolonlarını Temsilen Hazırlanan Numunelerin Sonuçları

Arazi çalışmaları kapsamında A ve B sahalarında yapılan deneme DSM kolonlarını temsilen laboratuvarda derin karışım numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler arazide kolon imalatlarının yapıldığı bölgeden alınan doğal zeminler ile hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken arazide imal edilen kolonlarda kullanılan çimento dozajları ve su/çimento oranları kullanılmıştır. Daha sonra bu numuneler üzerinde serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları arazi çalışmaları kapsamında deneme DSM kolonlarından alınan karot numunelerinin deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

4.1.2.1. A Sahasında İmal Edilen DSM Kolonlarını Temsilen Hazırlanan Numunelerin Deney Sonuçları

Bu sahadan alınan organik ve inorganik doğal zeminler ile arazide imal edilen deneme DSM kolonlarını temsilen laboratuvarda hazırlanan derin karışım numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç mukavemet deney sonuçları aşağıda verilmektedir. Sonuçlar, araziden alınan karot numuneleri üzerinde yapılan mukavemet, birim hacim ağırlık ve su muhtevası değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu deneylere ait detaylı bilgiler, arazi ile ilgili bulgular bölümünde detaylı olarak sunulmaktadır.

Organik Zemin (Turba)

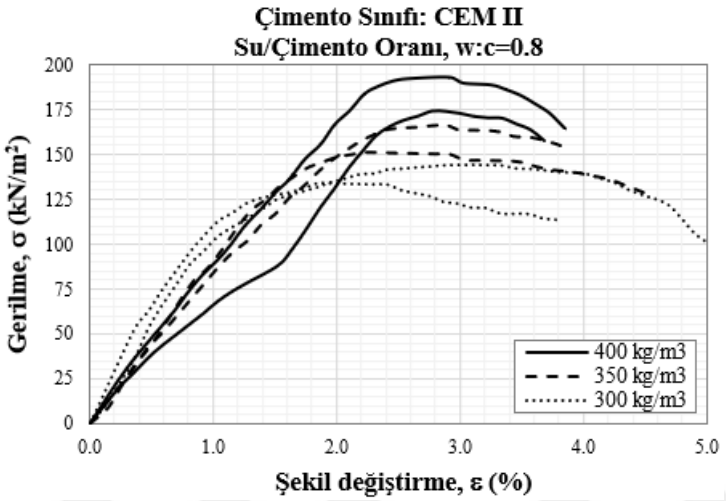
Bu zemin ile arazide imal edilen deneme DSM kolonlarını temsilen laboratuvarda CEM II tipi çimento ile üç farklı çimento dozajı (400 kg/m^3, 350 kg/m^3, 300 kg/m^3) ve tek su/çimento oranı (w:c=0.8) kullanılarak derin karışımı numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan derin karışım numunelerinde o dönemki arazi değerine uygun olarak organik zeminin doğal su muhtevası %450 olarak kullanılmıştır. Bu numuneler üzerinde farklı kür günlerinde serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır.

Şekil 4.17'de bu numuneler üzerinde 28 gün kür süresi sonrasında yapılan serbest basınç mukavemet deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme (σ-ε) eğrileri gösterilmektedir. Şekil 4.18'de ise serbest basınç mukavemetlerinin kür gününe bağlı değişimleri verilmektedir. Şekil 4.18'de görüldüğü gibi turba ile hazırlanan numunelerde mukavemet değerleri 100 kPa ile 240 kPa arasındadır. Turba zemin ile elde edilen mukavemet değerlerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Kür süreleri sonunda bütün dozajlar değerlendirildiğinde ise kullanılan çimento miktarı arttıkça genellikle mukavemette artış olduğu görülmüştür.

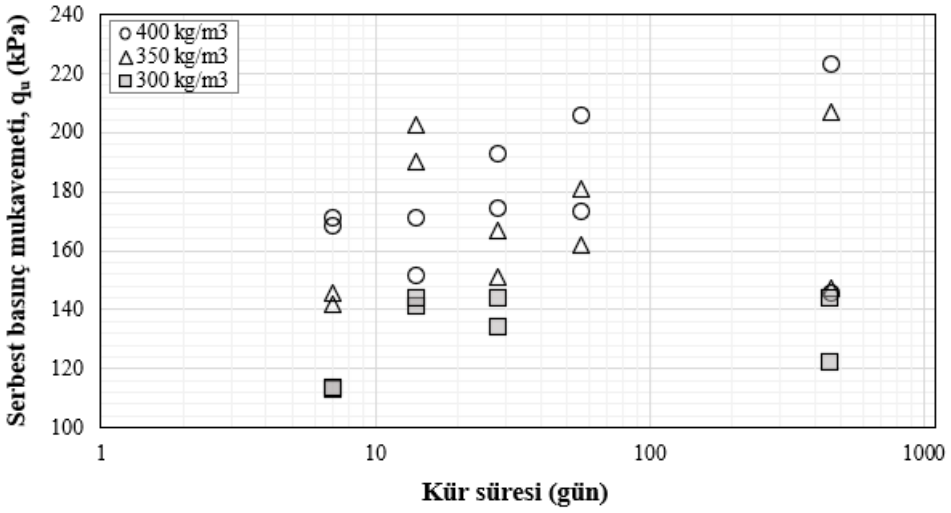
Şekil 4.19'da arazi ve laboratuvarda elde edilen mukavemet deney sonuçları verilmektedir. DSM-1 ila DSM-14 arasındaki on dört adet kolonda elde edilen mukavemet değerleri, laboratuvarda elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu kolonlardan alınan tam boy karot numuneleri incelendiğinde kolonların çoğunda 4.0 metre-6.0 metre derinlikleri aralığında organik zemin ile karşılaşıldığı ve kolonların bu derinliklerinde arazide iyileşme olamadığı görülmüştür. DSM-15 kolonunun bu derinliklerinden alınan karot numuneleri üzerinde yapılan nokta yükleme ve basınç deneyleri sonucunda daha yüksek mukavemet değerleri elde edilmiştir. Bu kolonun bu derinliğinde kısmen de olsa bir iyileşme olmuştur. DSM-16 kolonundan alınan karot numuneleri ise genellikle çok yüksek enjeksiyon ve çok az zemin içerdiği için basınç deneylerinde çok yüksek mukavemet değerleri elde edilmiştir. Bu nedenle bu iki kolon (DSM-15 ve DSM-16) organik zemin ile hazırlanan numunelerin deney sonuçları ile değerlendirilirken dikkate alınmamıştır. Grafiklerde laboratuvarda hazırlanan numunelerin deney sonuçları ortalama 5.0 m derinlikte gösterilmektedir. Şekil 4.19'da görüldüğü gibi sahadan alınan organik zemin numuneleri ve laboratuvarımızda hazırlanan derin karışım numuneleri düşük mukavemet değerlerine ulaşabilmiştir. Ancak şekilden de görüldüğü gibi laboratuvardaki numunelerin mukavemet değerleri arazideki numunelerin mukavemet

değerlerinden daha büyüktür. Bu durumun nedenleri arazi deneyleri bölümünde değerlendirilmektedir.

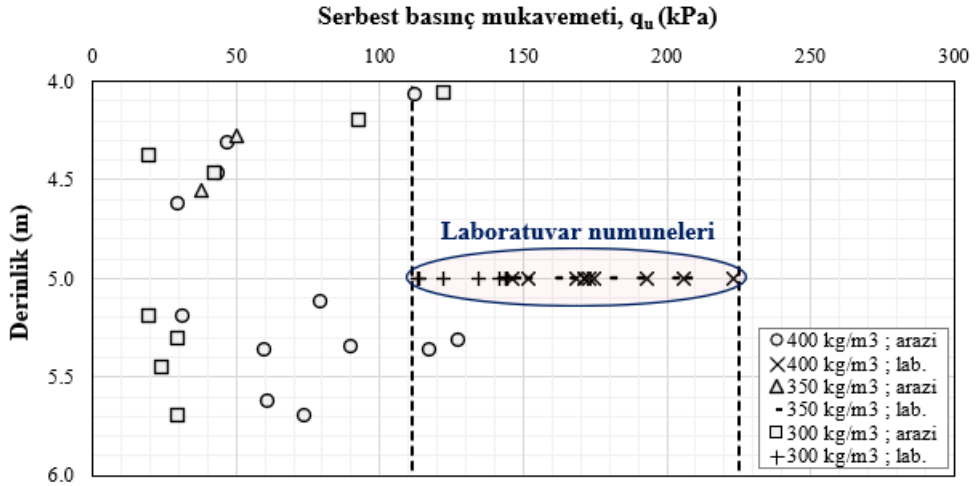
Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de ise arazi ve laboratuvarda deney yapılan numunelerin birim hacim ağırlıkları ve su muhtevaları verilmektedir. Arazi ve laboratuvar numuneleri arasında gerek birim hacim ağırlık değerleri gerekse su muhtevaları bakımından bir miktar farklılık bulunmaktadır.



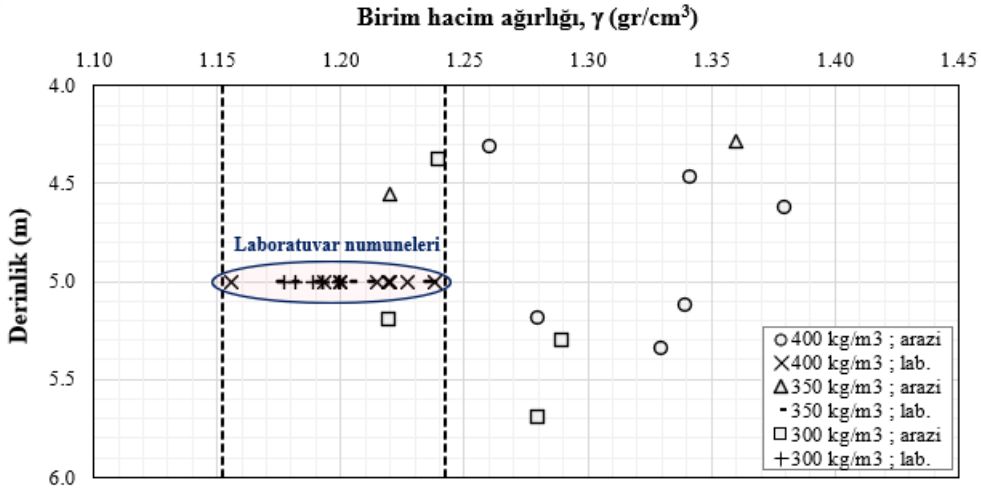
Şekil 4.17: 28 gün kür süresi sonrasında numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (**Turba**, CEM II, farklı çimento dozajı, w:c=0.8, w_{in}=%450).



Şekil 4.18: Serbest basınç mukavemetinin kür süresine bağlı değişimi **(Turba**, CEM II, farklı çimento dozajı, w:c=0.8, w_{in}=%450).



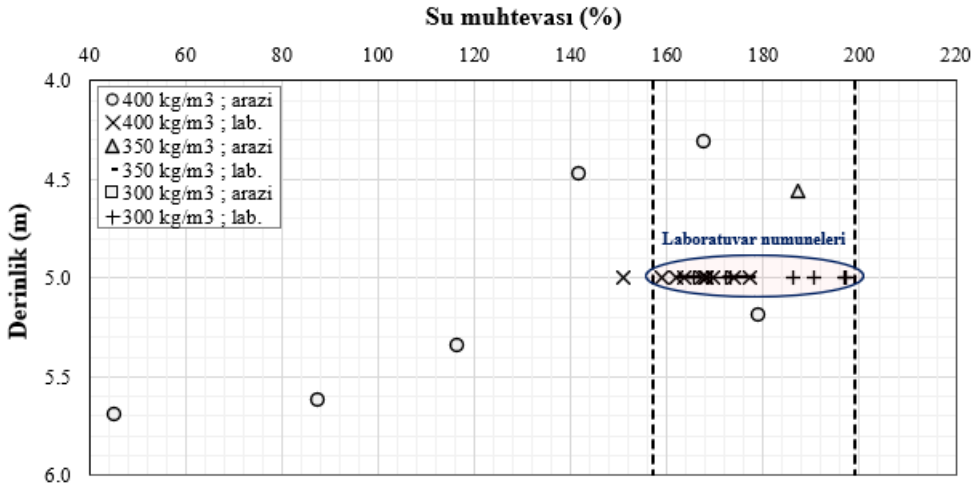
Şekil 4.19: Serbest basınç mukavemetinin derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon (DSM-1 ila DSM-14) karot numuneleri ve organik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, A Sahası).



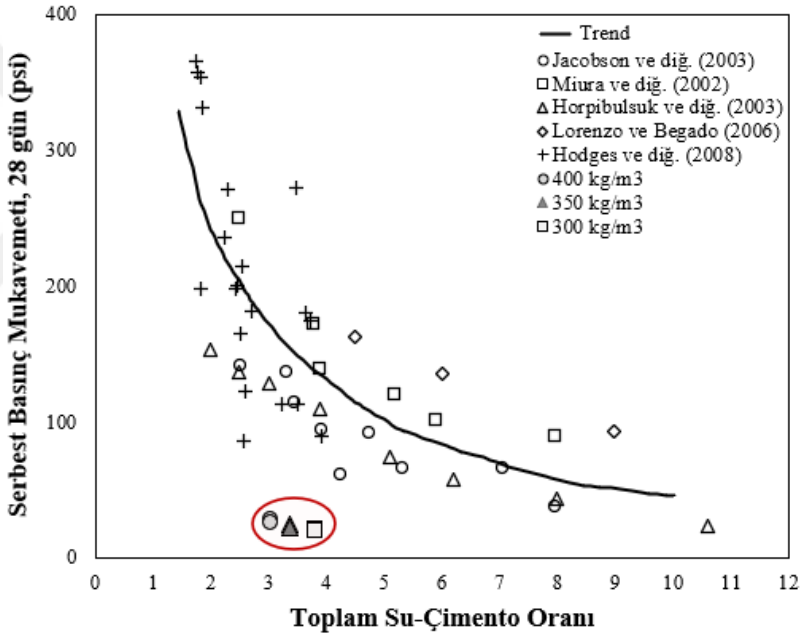
Şekil 4.20: Birim hacim ağırlığın derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon (DSM-1 ila DSM-14) karot numuneleri ve organik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, A Sahası).

- *FHWA (2013) ile Karşılaştırma*

FHWA (2013) dokümanında yer alan ve inorganik zeminler için 28 günlük serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimini gösteren grafik üzerine bu organik zemin ile hazırlanmış olan numuneler için 28 gün kür süresi sonunda elde edilen mukavemet değerleri de işaretlenmiştir (Şekil 4.22). Görüldüğü gibi organik zemin ile hazırlanan numunelerde elde edilen değerler inorganik zeminlere göre oldukça düşüktür. FHWA (2013)'in inorganik zeminler için önerdiği bu grafiğin turba tipi organik zeminler için kullanılmasının sakıncalı olacağı açıkça görülmektedir.



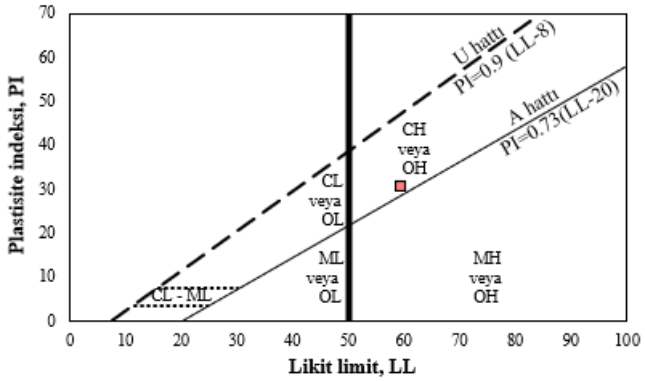
Şekil 4.21: Su muhtevasının derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon (DSM-1 ila DSM-14) karot numuneleri ve organik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, A Sahası).



Şekil 4.22: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (**Turba**, CEM II, farklı çimento dozajı, w:c=0.8, w_{in}=%450).

İnorganik Zemin

A sahasında deneme DSM kolon imalatlarının yapıldığı bölgeden alınan inorganik doğal zemin üzerinde ilk olarak elek analizi ve Atterberg Limitleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonrasında Şekil 4.23'te görüldüğü gibi araziden alınan numune yüksek plastisiteli kil, CH olarak belirlenmiştir. Zeminin doğal su muhtevası %35'tir. Zemin özellikleri Tablo 4.3'te verilmektedir.



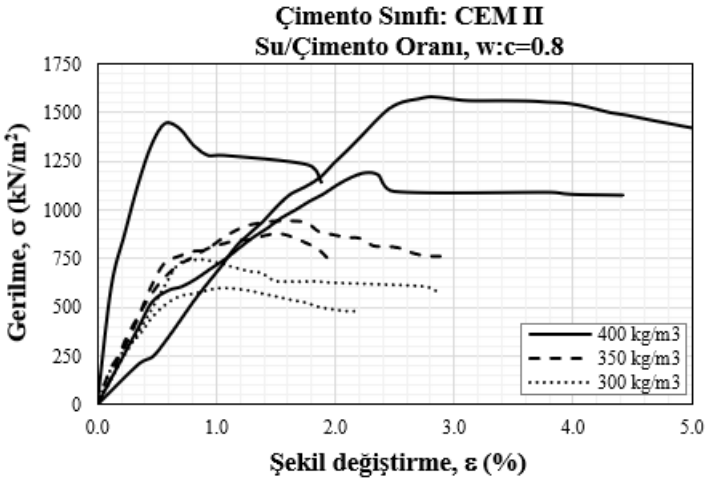
Şekil 4.23: Doğal zeminin plastisite kartındaki yerinin gösterimi (A Sahası).

Tablo 4.3: Zemin özellikleri (A Sahası).

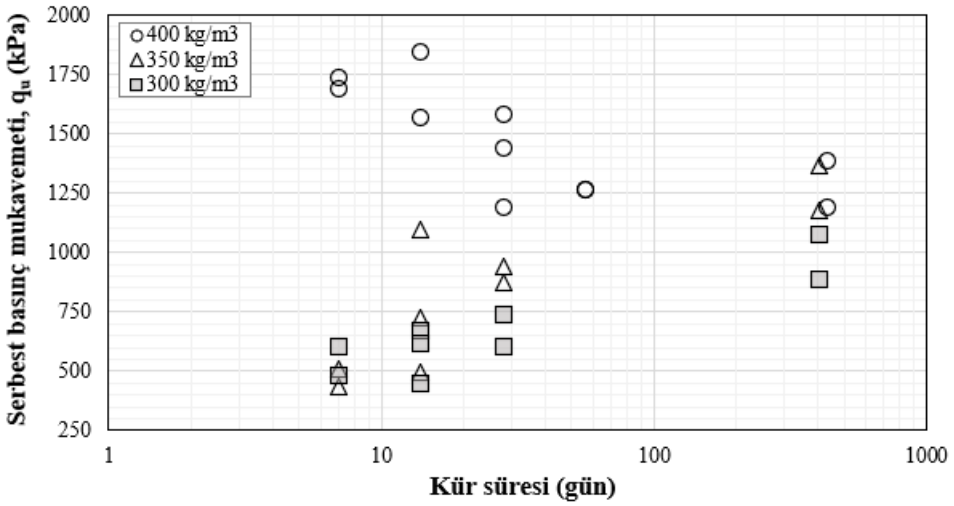
Zemin Özellikleri				
A Sahası	**Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN/m³)**	**Doğal Su Muhtevası, w_i (%)**	**Likit Limit, LL**	**Plastisite İndeksi, PI**
İnorganik	17.0	35	59.5	30.6

Bu doğal zemin numunesi ile arazide imal edilen deneme DSM kolonlarını temsilen laboratuvarda üç farklı çimento dozajı (400 kg/m^3, 350 kg/m^3, 300 kg/m^3) ve tek su/çimento oranı (w:c=0.8) kullanılarak derin karışımı numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan derin karışım numunelerinde inorganik zeminin doğal su muhtevası %35'tir. Bu numuneler üzerinde farklı kür günlerinde serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır.

Şekil 4.24'te bu numuneler üzerinde 28 gün kür süresi sonrasında yapılan serbest basınç mukavemet deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme (σ-ε) eğrileri gösterilmektedir. Şekil 4.25'te ise serbest basınç mukavemetlerinin kür gününe bağlı değişimleri verilmektedir. 300 kg/m^3-350 kg/m^3 çimento dozajı ile hazırlanan numunelerde kür süresi sonunda mukavemette artış olmuştur. 400 kg/m^3 için kür süresinin ilave bir etkisi görülmemiştir. Bir yıllı aşkın kür süresi sonunda 400 kg/m^3 ve 350 kg/m^3 çimento dozajına sahip numuneler benzer mukavemet değerlerine ulaşmıştır.



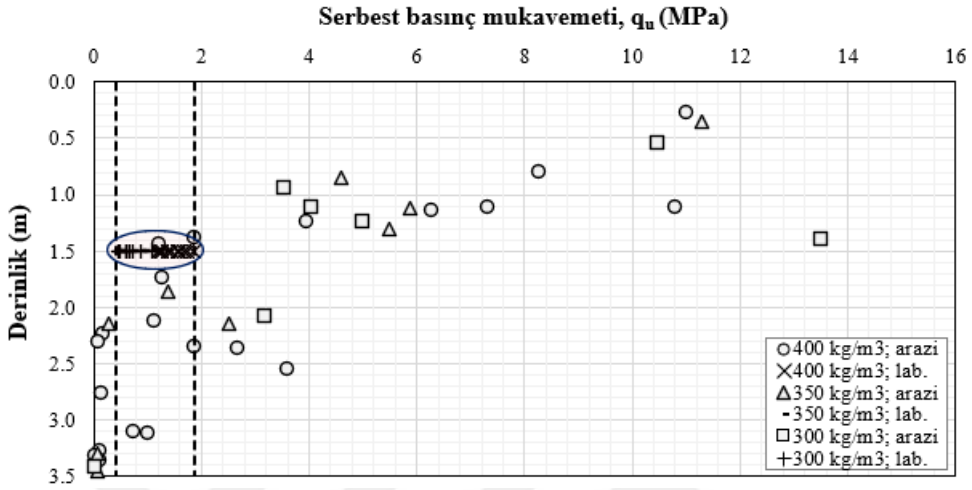
Şekil 4.24: 28 gün kür süresi sonrasında numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (**İnorganik**, CEM II, farklı çimento dozajı, w:c=0.8, w_{in}=%35).



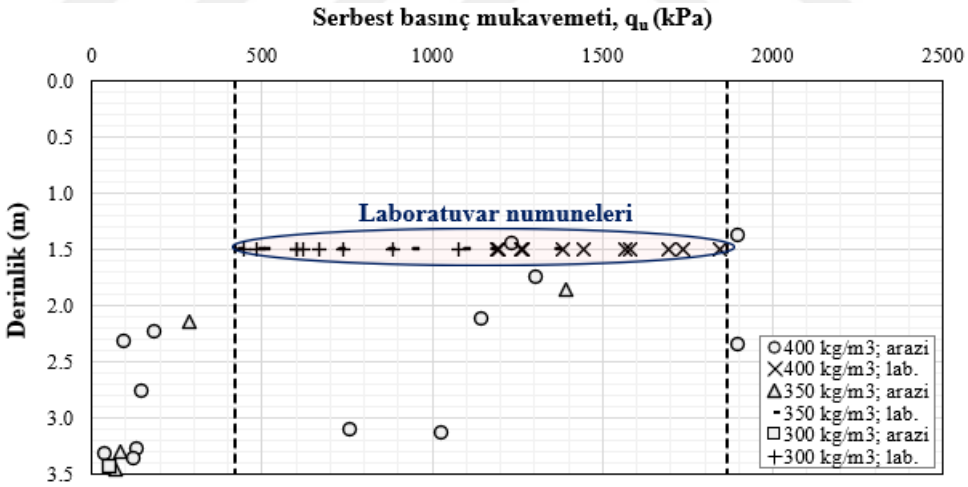
Şekil 4.25: Serbest basınç mukavemetinin kür süresine bağlı değişimi (**İnorganik**, CEM II, farklı çimento dozajı, w:c=0.8, w_{in}=%35).

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de arazi ve laboratuvarda elde edilen mukavemet deney sonuçları gösterilmektedir. Bu sahada yapılan kolonlarda ilk 2.0-3.0 metre derinlikteki numuneler yüksek enjeksiyon malzemesinden ve az miktarda zeminden oluşmuştur. Bu durum enjeksiyonun zemin içerisinde homojen dağılmadığını göstermektedir. Enjeksiyon büyük bir ihtimalle (enjeksiyonun verilişi imalat sırasında derinlik boyunca kontrol edilemediği için) bazı bölgelerde toplanmakta, diğer bölgeler enjeksiyondan mahrum kalmaktadır. Bu değerler derin karışım numunelerini temsil edememektedir. Bu nedenle, Şekil 4.26'da verilen mukavemet aralıkları düşürülerek grafik tekrar sunulmuştur (Şekil 4.27). Grafiklerde laboratuvarda hazırlanan numunelerin deney sonuçları ortalama 1.5 m derinlikte gösterilmektedir. Şekil 27'deki mukavemet değerleri incelendiğinde arazideki çok sayıda numunenin mukavemet

değerlerinin laboratuvarda hazırlanan numunelerin mukavemetlerinden düşük olduğu görülmektedir. Sonuç olarak inorganik zeminlerde de laboratuvar deneyleri, arazideki gerçek durumu temsil edememekle birlikte, bazı değerlerde çakışma olmaktadır. Bu durum daha sonra arazi deneyleri bölümünde değerlendirilecektir.

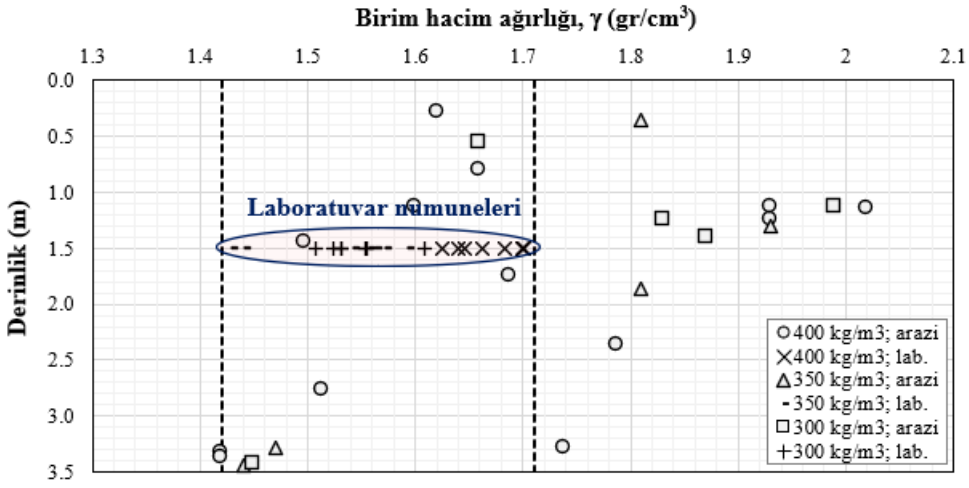


Şekil 4.26: Serbest basınç mukavemetinin derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon karot numuneleri ve inorganik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, A Sahası).

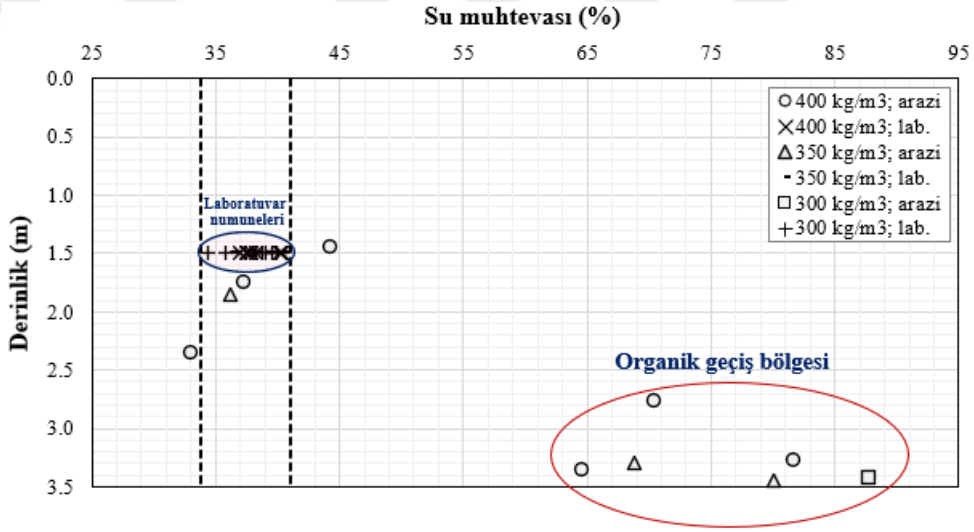


Şekil 4.27: Serbest basınç mukavemetinin derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon karot numuneleri ve inorganik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, A Sahası).

Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da ise arazi ve laboratuvarda deney yapılan numunelerin birim hacim ağırlıkları ve su muhtevaları verilmektedir. Turba zeminin olduğu derinliğe yaklaşıldıkça yüksek su muhtevaları ile karşılaşılmaktadır, çünkü iyileşme ya kısmi olarak sağlanmıştır ya da sağlanmamıştır.



Şekil 4.28: Birim hacim ağırlığın derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon karot numuneleri ve inorganik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, A Sahası).

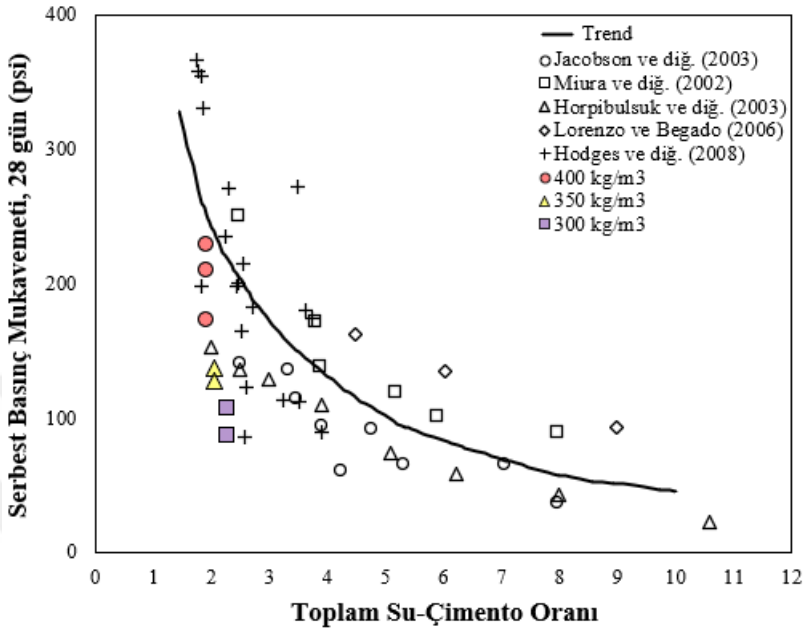


Şekil 4.29: Su muhtevasının derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon karot numuneleri ve inorganik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, A Sahası).

- *FHWA (2013) ile Karşılaştırma*

FHWA (2013) dokümanında yer alan ve inorganik zeminler için 28 günlük serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimini gösteren grafik üzerine bu inorganik zemin ile hazırlanmış olan numuneler için 28 gün kür süresi sonunda elde edilen mukavemet değerleri de işaretlenmiştir (Şekil 4.30). Hazırlanan bütün numunelerde doğal zeminin su muhtevası %35'tir. Şekilde de görüldüğü gibi toplam su-çimento oranı arttıkça mukavemette azalma olmaktadır. Ancak, aynı toplam su muhtevası/çimento oranında FHWA (2013)'te önerilenden daha düşük mukavemetler elde edilebilmektedir. FHWA (2013) tarafından önerilen bu grafiğin laboratuvarda ve sonrasında arazide deneyler yapmadan

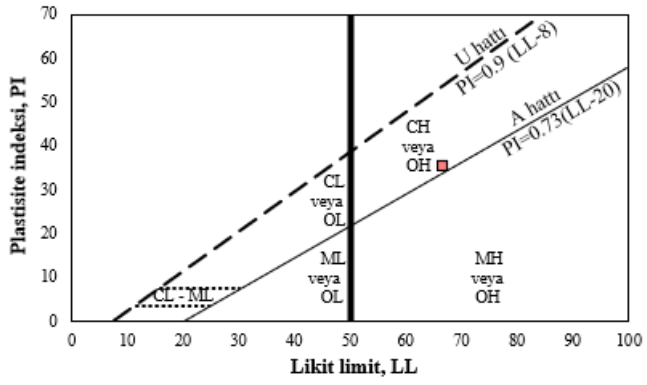
kullanılmasının sakıncalı olabileceği görülmektedir. Düşük değerlerin, doğal su muhtevasının Likit Limit değerine kıyasla düşük olması ve bu nedenle karıştırmanın laboratuvarda dahi etkin olmaması ile açıklanması mümkün görünmektedir.



Şekil 4.30: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (**İnorganik**, CEM II, farklı çimento dozajı, w:c=0.8, w_{in}=%35).

4.1.2.2. B Sahasında İmal Edilen DSM Kolonlarını Temsilen Hazırlanan Numunelerin Deney Sonuçları

B sahasından da deneme DSM kolon imalatlarının yapıldığı bölgeden alınan inorganik doğal zemin üzerinde elek analizi ve Atterberg Limitleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonrasında Şekil 4.31'de görüldüğü gibi araziden alınan numune yüksek plastisiteli kil, CH olarak belirlenmiştir. Zeminin doğal su muhtevası %42'dir. Zemin özellikleri Tablo 4.4'te verilmektedir.



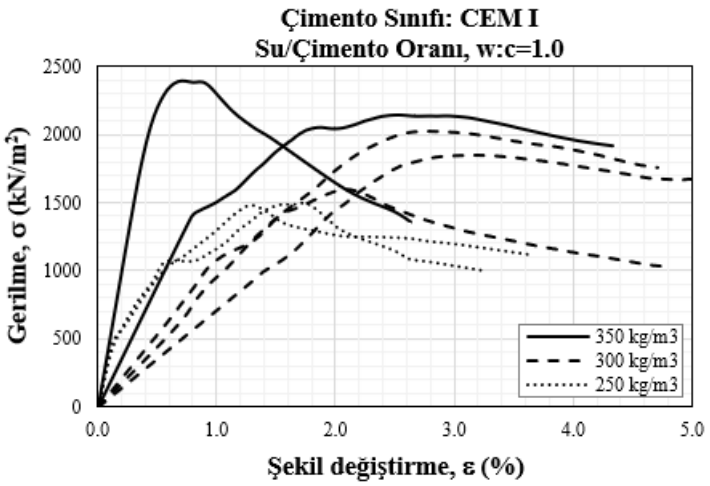
Şekil 4.31: Doğal zeminin plastisite kartındaki yerinin gösterimi (B Sahası).

Tablo 4.4: Zemin özellikleri (İnorganik, B Sahası).

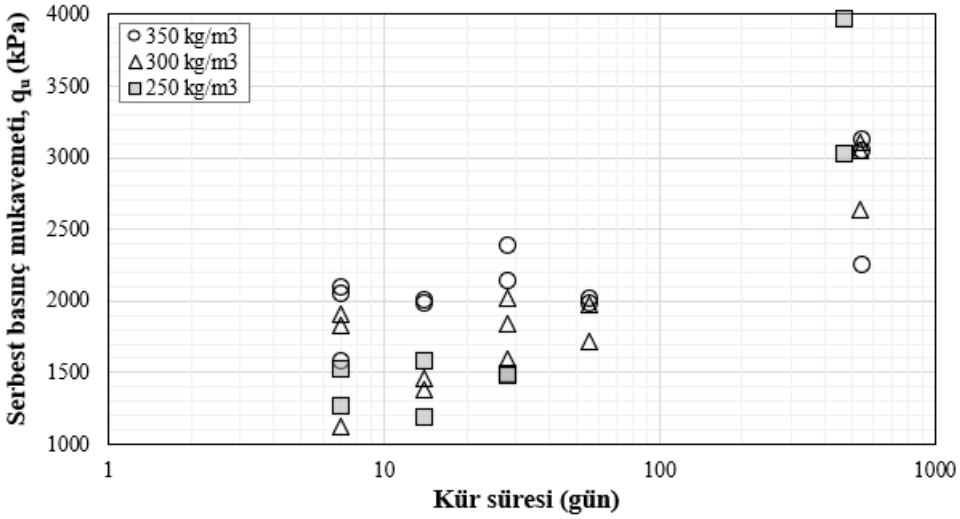
Zemin Özellikleri				
B Sahası	**Birim Hacim Ağırlığı, γ (kN/m³)**	**Doğal Su Muhtevası, w_i (%)**	**Likit Limit, LL**	**Plastisite İndeksi, PI**
İnorganik	17.5	42	66.8	35.1

Bu inorganik doğal zemin ile de arazide imal edilen deneme DSM kolonlarını temsilen laboratuvarda CEM I tipi çimento ile üç farklı çimento dozajı (350 kg/m^3, 300 kg/m^3, 250 kg/m^3) ve tek su/çimento oranı (w:c=1.0) kullanılarak derin karışımı numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan derin karışım numunelerinde inorganik zeminin doğal su muhtevası %42 olarak kullanılmıştır. Bu numuneler üzerinde farklı kür günlerinde serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır.

Şekil 4.32'de bu numuneler üzerinde 28 gün kür süresi sonrasında yapılan serbest basınç mukavemet deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme (σ-ε) eğrileri gösterilmektedir. Şekil 4.33'te ise serbest basınç mukavemetlerinin kür gününe bağlı değişimleri verilmektedir. 28 gün kür süresi sonunda kullanılan çimento miktarı arttıkça mukavemet artışı da olmuştur. Aynı karışım ile hazırlanan laboratuvar numunelerinde de mukavemet değerlerinde fark oluşmaktadır. Bir yıllı aşkın kür süresi boyunca bu artış sürmüştür.

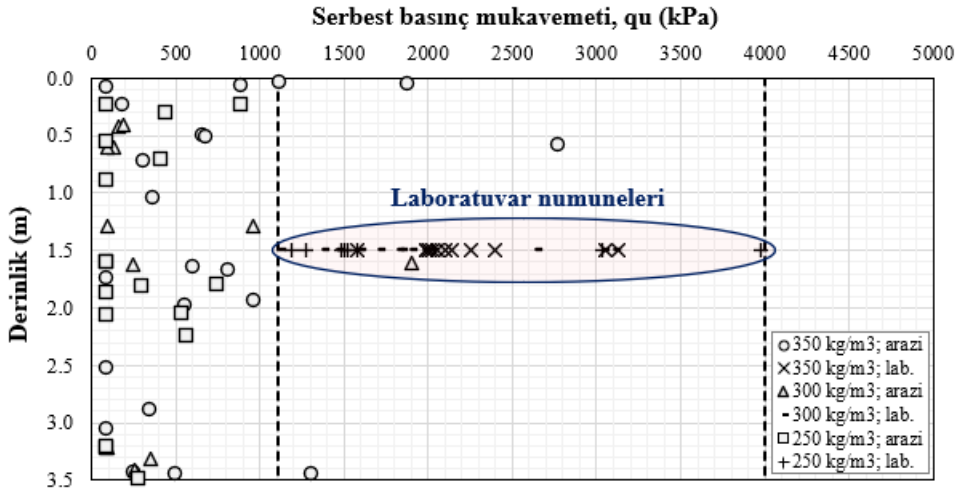


Şekil 4.32: 28 gün kür süresi sonrasında numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (**İnorganik**, CEM I, farklı çimento dozajı, w:c=1.0, w_{in}=%42).

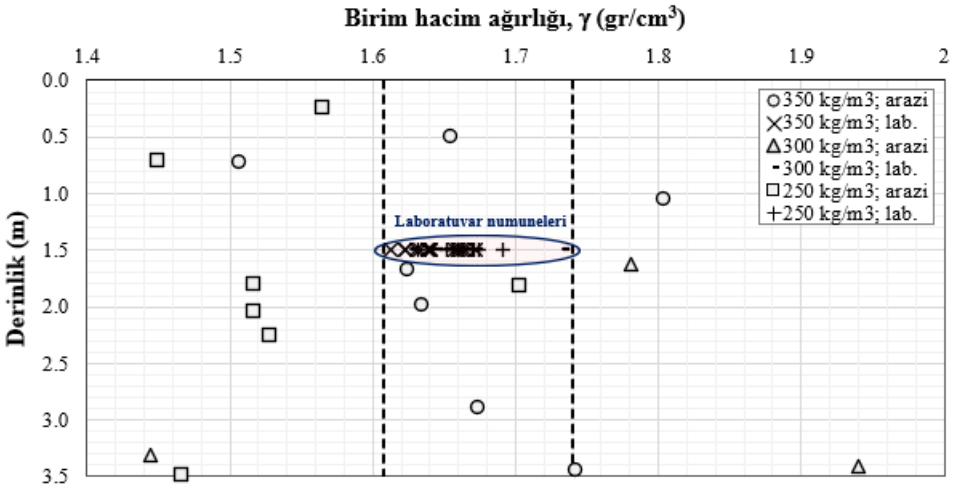


Şekil 4.33: Serbest basınç mukavemetinin kür süresine bağlı değişimi (**İnorganik**, CEM I, farklı çimento dozajı, w:c=1.0, w_{in}=%42).

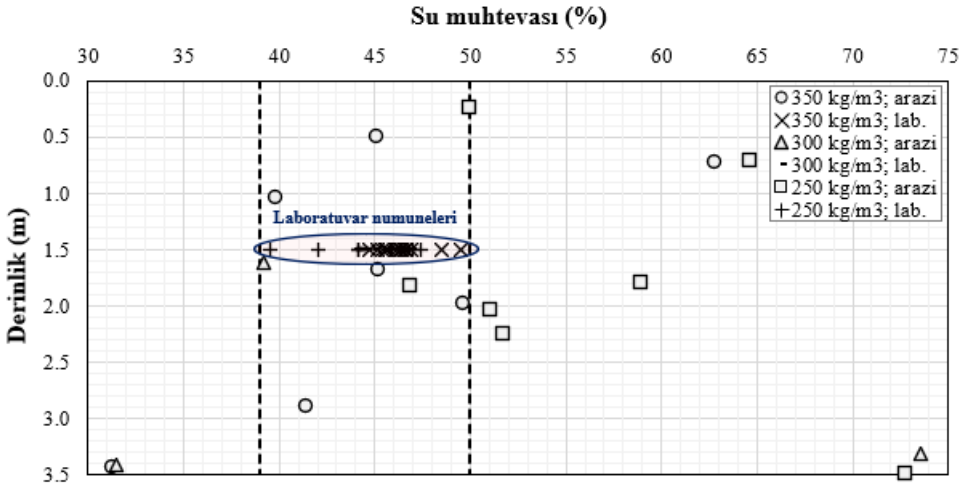
Şekil 4.34'te arazi ve laboratuvarda elde edilen mukavemet deney sonuçları gösterilmektedir. Grafiklerde laboratuvarda hazırlanan numunelerin deney sonuçları ortalama 1.5 m derinlikte gösterilmektedir. Bu grupta, arazide 1000 kN/m^2'ye kadar mukavemet değerlerine ulaşılmıştır. Şekil 4.34'teki mukavemet değerleri incelendiğinde arazideki numunelerin mukavemet değerlerinin laboratuvarda hazırlanan numunelerin mukavemetlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. Şekil 4.35 ve 4.36'da ise arazi ve laboratuvarda deney yapılan numunelerin birim hacim ağırlıkları ve su muhtevaları verilmektedir.



Şekil 4.34: Serbest basınç mukavemetinin derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon karot numuneleri ve inorganik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, B Sahası).



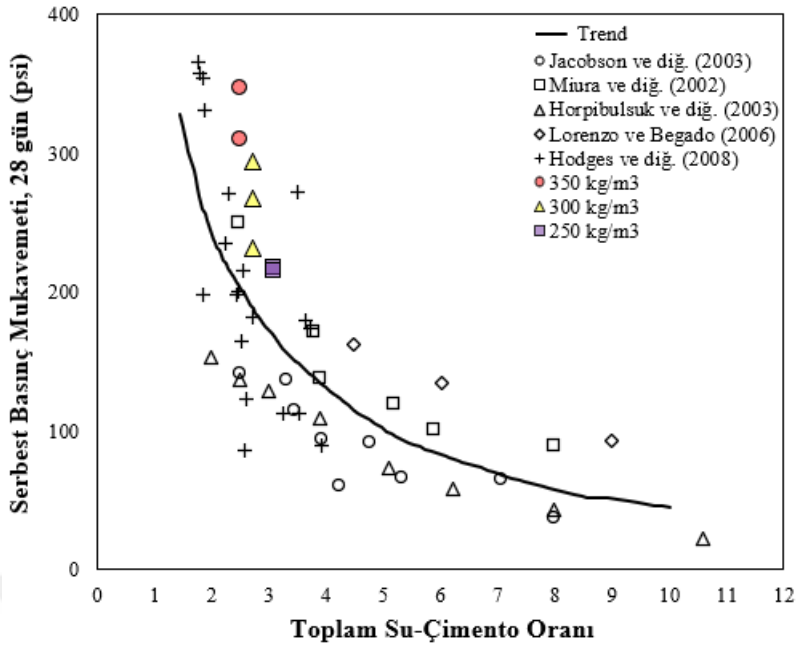
Şekil 4.35: Birim hacim ağırlığın derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon karot numuneleri ve inorganik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, B Sahası).



Şekil 4.36: Su muhtevasının derinlikle değişimi (Deneme DSM kolon karot numuneleri ve inorganik zemin ile laboratuvarda hazırlanan karışım numuneleri, B Sahası).

- *FHWA (2013) ile Karşılaştırma*

FHWA (2013) dokümanında yer alan ve inorganik zeminler için 28 günlük serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimini gösteren grafik üzerine inorganik zemin ile hazırlanmış olan numuneler için 28 gün kür süresi sonunda elde edilen mukavemet değerleri de işaretlenmiştir (Şekil 4.37). Hazırlanan bütün numunelerde doğal zeminin su muhtevası %42'dir. Şekilde de görüldüğü gibi toplam su-çimento oranı arttıkça mukavemette düşüş olmaktadır. Bu zemin ile hazırlanan derin karışım numunelerinde FHWA (2013)'te önerilen değerlere yakın mukavemet değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.37: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (**İnorganik**, CEM I, farklı çimento dozajı, w:c=1.0, w_{in}=%42).

4.1.3. Kategori 3: Diğer Numunelerin Sonuçları

Doğal zeminin su muhtevasının derin karışım numunelerinin mukavemeti üzerindeki etkisini incelemek amacıyla yürütülen bu grup deney sonuçları bu bölümde sunulmaktadır. Diğer bir parametre de bağlayıcı olarak kireç ve çimentonun birlikte kullanılması durumudur. Bu çerçevede A ve B sahalarından alınan inorganik zeminler ile laboratuvarda hazırlanan derin karışım numuneleri üzerinde farklı kür günlerinde mukavemet deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları aşağıda verilmektedir.

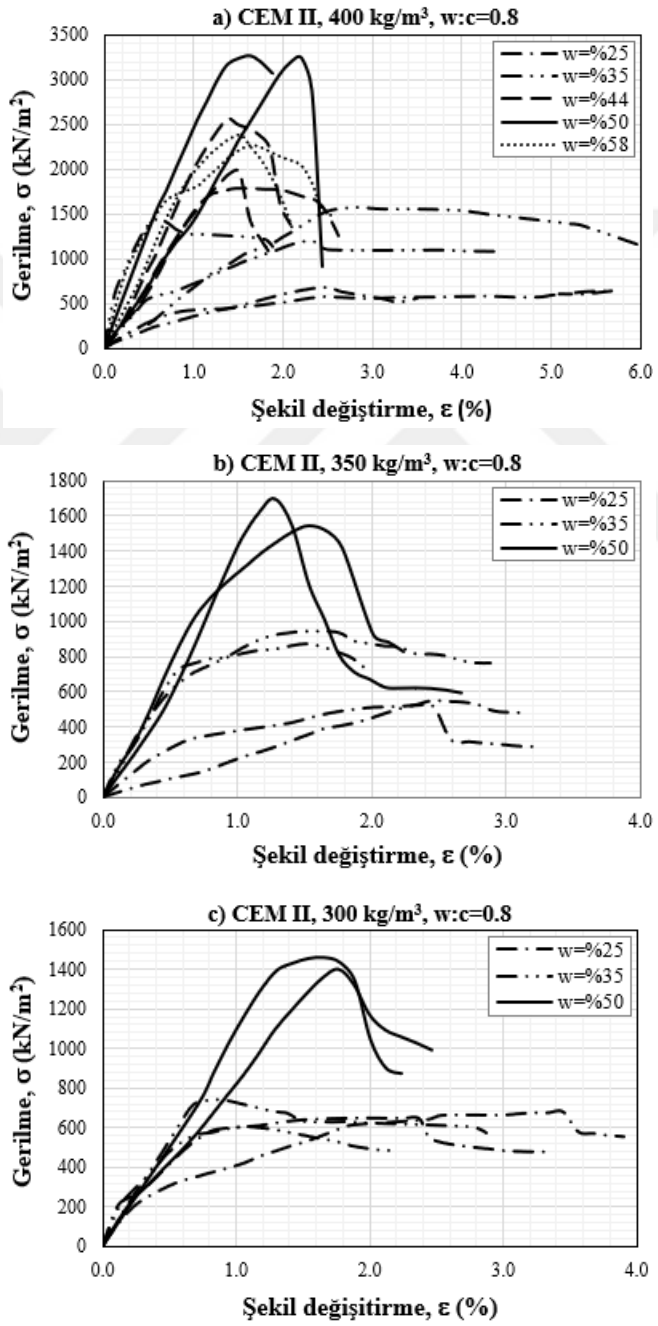
4.1.3.1. A Sahasından Alınan İnorganik Zemin için Deney Sonuçları

A sahasından alınan inorganik doğal zemin ile hazırlanmış olan derin karışım numunelerinin deney sonuçları aşağıda verilmektedir.

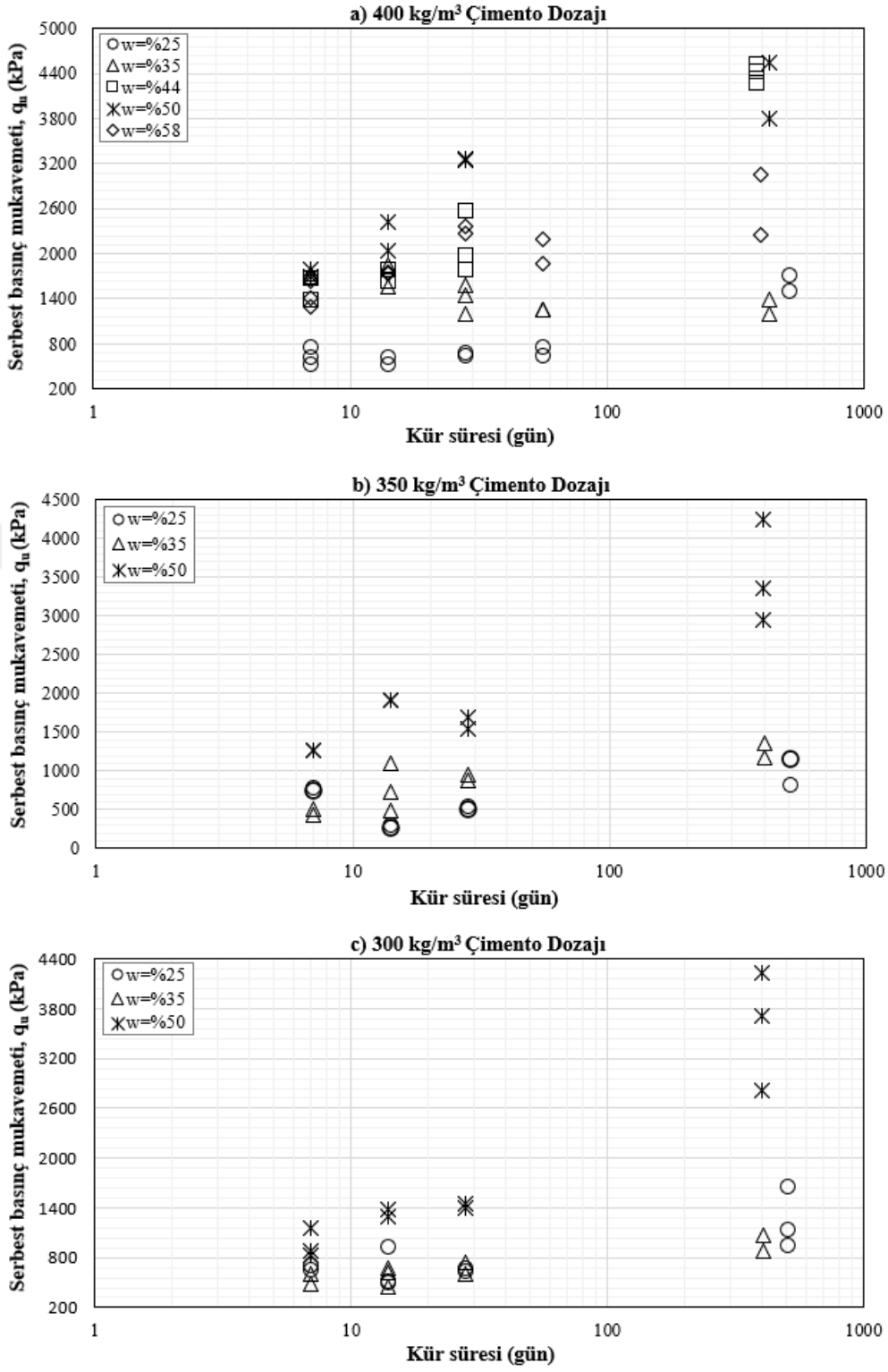
Zeminin Doğal Su Muhtevasının Derin Karışım Numuneleri Üzerindeki Etkisi

Bu sahadan alınan inorganik zemin ile farklı başlangıç su muhtevaları kullanılarak hazırlanan derin karışım numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç mukavemet deney sonuçları aşağıda verilmektedir. Bu numuneler hazırlanırken katkı malzemesi olarak CEM II sınıfı çimento kullanılmıştır ve arazideki çimento dozajı ve su/çimento oranı değiştirilmemiştir. 400 kg/m^3 çimento dozajı için kullanılan zeminin doğal su muhtevaları %25, %35, %44, %50 ve %58'dir. Diğer iki dozaj için %44 ve %58 doğal su muhtevasında deney yapılmamıştır. Seçilen su muhtevalarına doğal zeminin Likitide İndekslerine göre karar verilmiştir.

Şekil 4.38'de farklı başlangıç su muhtevalarına sahip numunelerin 28 gün kür süresi sonrasında yapılan serbest basınç mukavemet deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme (σ-ε) eğrileri verilmektedir. Şekil 4.39'da ise farklı başlangıç su muhtevalarına sahip numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin kür gününe bağlı değişimleri gösterilmektedir. Her su muhtevası için kür günü-mukavemet ilişkisi farklılaşmaktadır. Laboratuvar ortamında yüksek dozaj, daha yüksek mukavemeti sağlamaktadır.

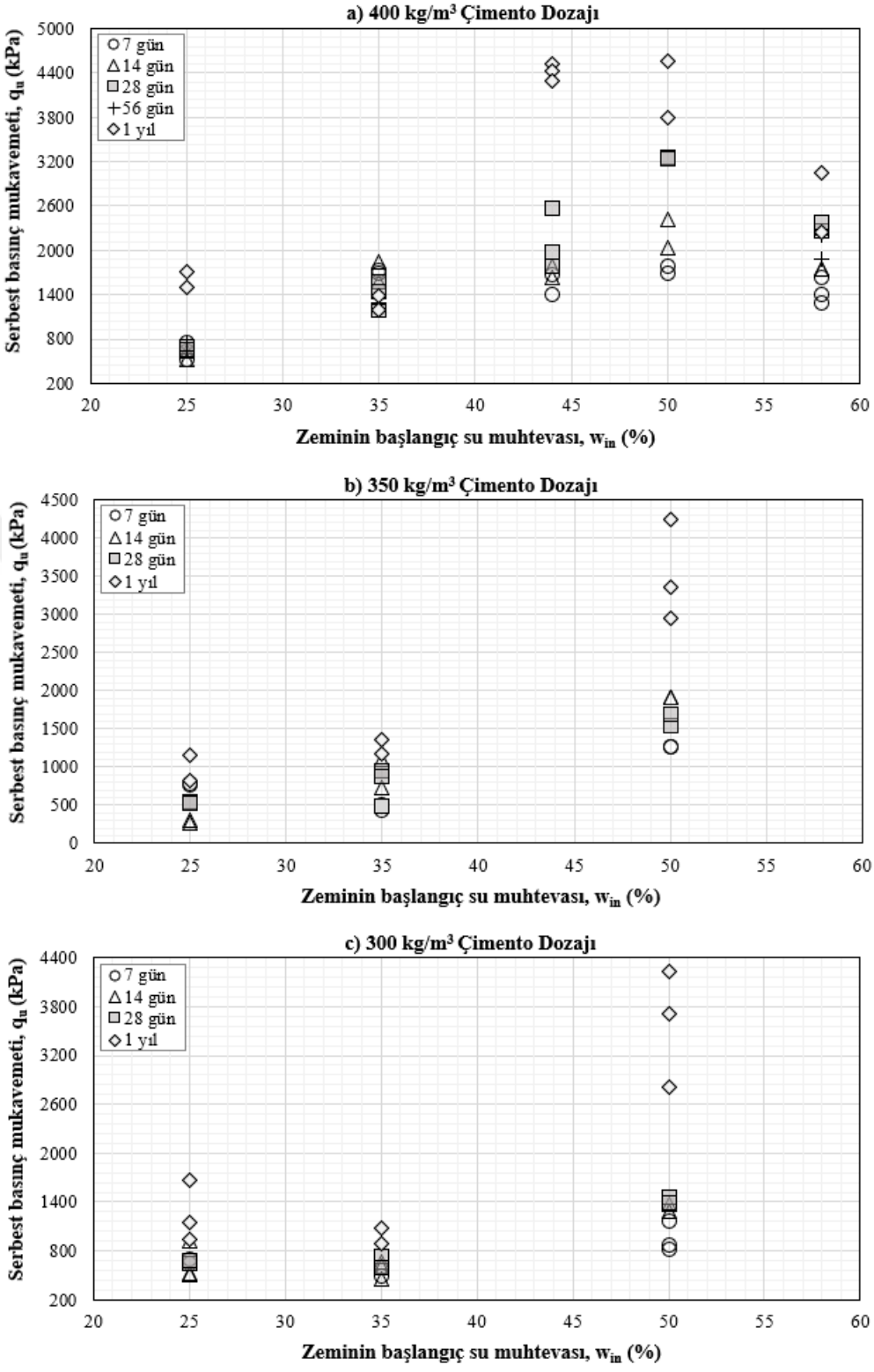


Şekil 4.38: 28 gün kür süresi sonrasında farklı başlangıç su muhtevalarına sahip numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri, A Sahası **a)** 400 kg/m^3, **b)** 350 kg/m^3, **c)** 300 kg/m^3.



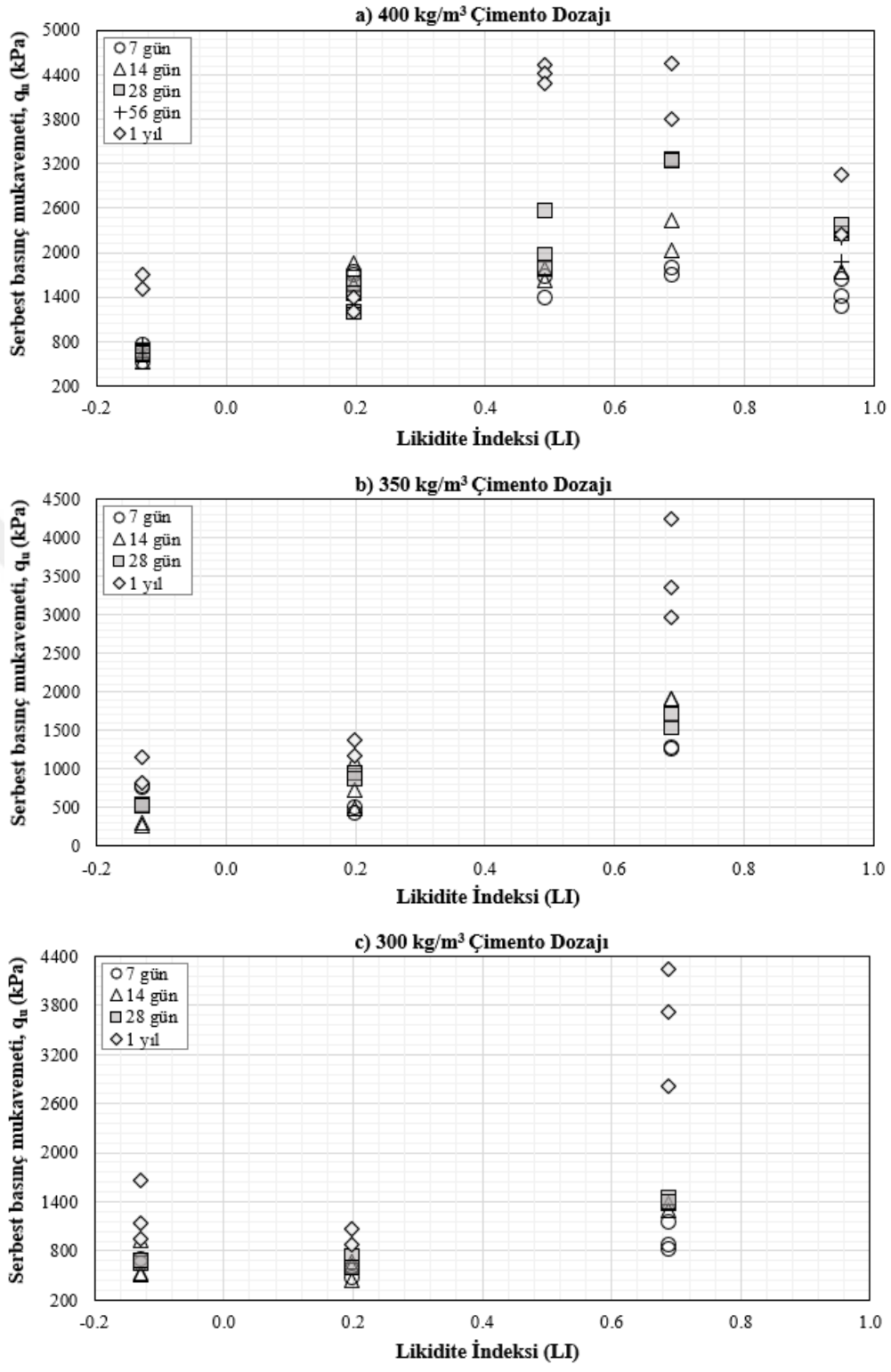
Şekil 4.39: Farklı başlangıç su muhtevalarına sahip numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine bağlı değişimi, A Sahası **a)** 400 kg/m^3, **b)** 350 kg/m^3, **c)** 300 kg/m^3.

Şekil 4.40'ta farklı kür günlerinde test edilen numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin zeminin başlangıç su muhtevasına (w_{in}) bağlı değişimleri gösterilmektedir.



Şekil 4.40: Farklı kür günlerindeki numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin zeminin başlangıç su muhtevasına bağlı değişimi, A Sahası **a)** 400 kg/m^3, **b)** 350 kg/m^3, **c)** 300 kg/m^3.

Şekil 4.41'de farklı kür günlerinde test edilen numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin Likidite İndeksine bağlı değişimleri gösterilmektedir.

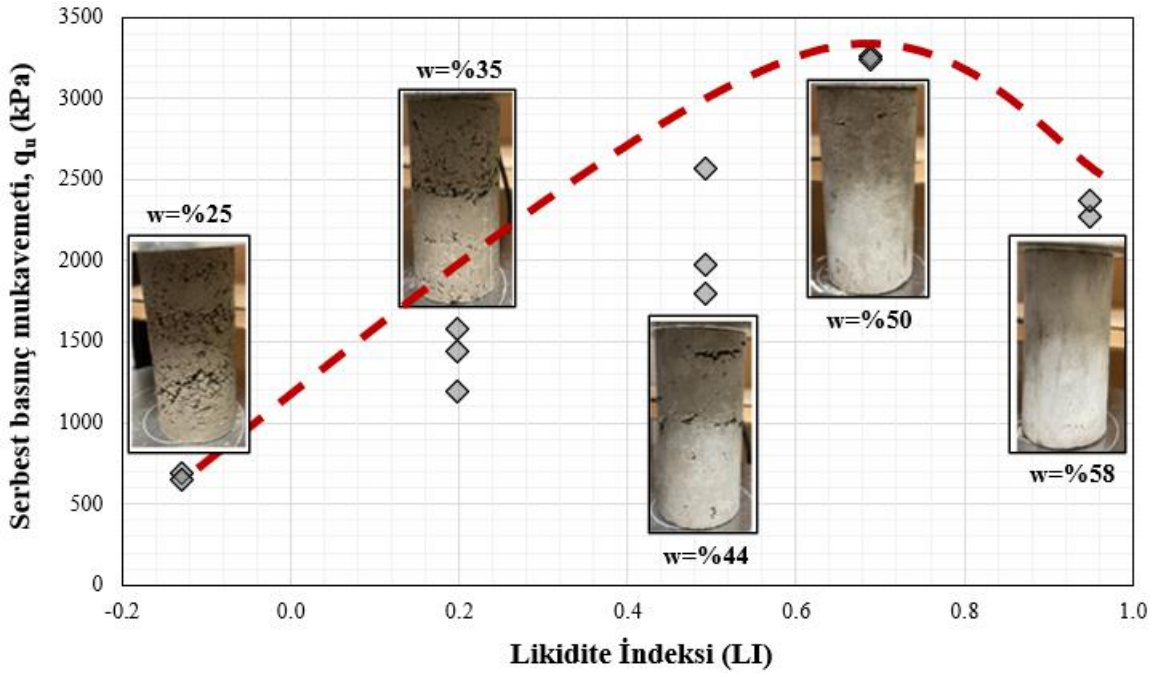


Şekil 4.41: Farklı kür günlerindeki numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin Likidite İndeksine bağlı değişimi, A Sahası **a)** 400 kg/m^3, **b)** 350 kg/m^3, **c)** 300 kg/m^3.

Yukarıda verilen şekillerde görüldüğü üzere 400 kg/m^3 çimento dozajı için belirli bir seviyeye kadar zeminin başlangıç su muhtevasındaki artış ile birlikte mukavemet artışı olmuştur. Ancak

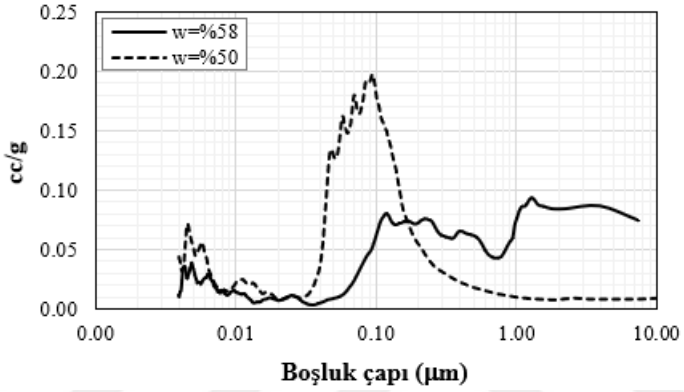
başlangıç su muhtevasının çok yüksek olması durumunda (w_{in}=%58) mukavemette azalma gerçekleşmiştir. Ayrıca düşük başlangıç su muhtevası (w_{in}=%25-%35), yüksek mukavemet oluşmasını garantilememektedir, çünkü karıştırma etkinliği yeterli seviyede olmamaktadır. Belirli bir su muhtevasına kadar zeminin başlangıç su muhtevasında ve buna bağlı olarak Likidite İndeksindeki artış ile mukavemet değerlerinde artış olmaktadır. Ancak başlangıç su muhtevasının ve Likidite İndeksinin çok yüksek olması durumunda ise mukavemette düşüş gerçekleşmektedir. Diğer iki dozajda da başlangıç su muhtevasının w_{in}=%50 olması durumunda, su muhtevasının, w_{in}=%25 ve w_{in}=%35 olması durumuna göre bir yılı aşan kür süresi sonrasında numunelerde yaklaşık iki kat mukavemet artışı olmuştur. Bu grupta da doğal su muhtevasının karıştırma etkinliğini uzun vadede doğrudan etkilediği görülmektedir.

Şekil 4.42'de 400 kg/m^3 çimento dozajındaki numunelerin 28 gün kür süresi sonrasında serbest basınç mukavemetlerinin Likidite İndekslerine bağlı değişimleri ve numune fotoğrafları birlikte verilmektedir. Şekil 4.42'de verilen numunelerin fotoğraflarından da görüldüğü gibi zeminin başlangıç su muhtevasının az olması durumunda homojen bir karışım gerçekleşememekte ve bu da düşük mukavemete sebep olmaktadır. Çok yüksek su muhtevalarında ise, homojen bir karışım elde edilmekle birlikte, ortamdaki zemin miktarının azalması nedeniyle mukavemetler düşük olarak gelişmektedir.



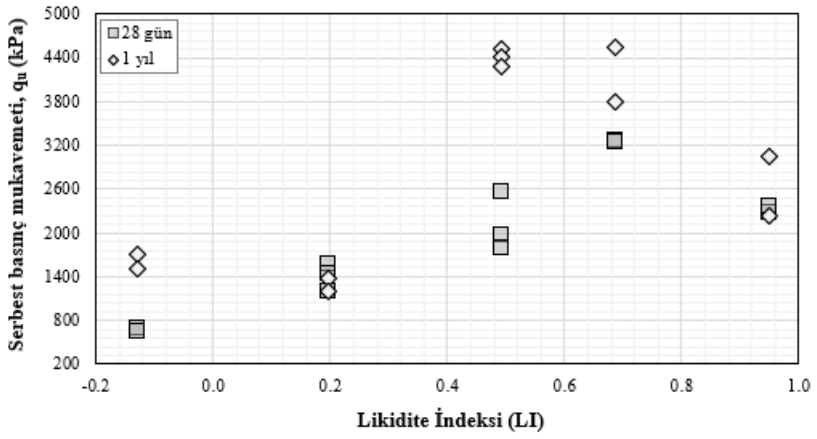
Şekil 4.42: 400 kg/m^3 çimento dozajındaki numunelerin 28 gün kür süresi sonrasında serbest basınç mukavemetlerinin Likidite İndeksine bağlı değişimi (A Sahası).

Bu gruptaki üç numune için ODTÜ Merkez Laboratuvarında civalı porozimetre analizleri yapılmıştır. Elde edilen eğriler Şekil 4.43'te verilmektedir. A sahası için su içeriği w_{in}=%58 olan numunede yüksek su muhtevasının daha büyük boşluk çaplarına sebep olabildiği (>0.1 μm) görülmektedir. Bu numune için mukavemet değerlerinin de küçük olduğu Şekil 4.42'de görülmektedir. Ancak maksimum mukavemetin ölçüldüğü, su içeriği w_{in}=%50 numunesinde, boşlukların çapları belirli bir boşluk çapında yoğunlaşmaktadır, büyük boşluklar oluşmadığı görülmektedir. Bu da boşluk çapı bakımından homojen bir yapının işareti olarak değerlendirilebilir.



Şekil 4.43: 400 kg/m^3 çimento dozajında ve farklı başlangıç su muhtevasındaki numunelerin 28 gün sonrasında civalı porozimetri eğrileri (A Sahası).

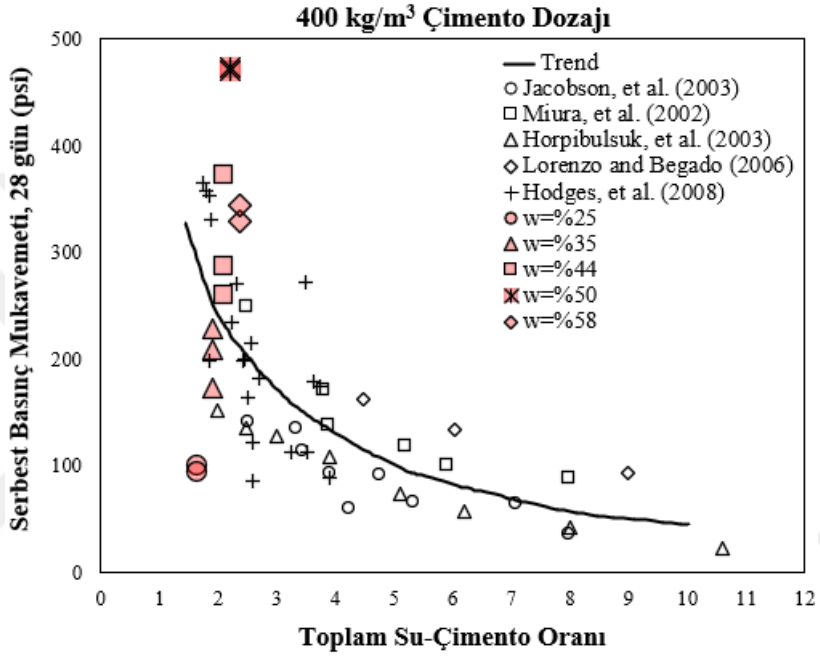
Şekil 4.44'te ise 400 kg/m^3 çimento dozajındaki numunelerin bir yılı aşkın kür süresi sonrasında serbest basınç mukavemetlerinin Likidite İndekslerine bağlı değişimleri 28 gün kür süresi ile birlikte gösterilmektedir ve bu numunelerde de aynı etki görülmüştür. Etkin karıştırmanın etkisi kür süresi ile birlikte değişmemektedir.



Şekil 4.44: 400 kg/m^3 çimento dozajındaki numunelerin 28 gün ve bir yıl kür süresi sonrasında serbest basınç mukavemetlerinin likidite indeksine bağlı değişimi (A Sahası).

➢ *FHWA (2013) ile Karşılaştırma*

Şekil 4.45'te görüldüğü gibi 400 kg/m^3 çimento dozajında hazırlanan numunelerde belirli bir seviyeye kadar zeminin başlangıç su muhtevasındaki artış ile mukavemet artışı olmaktadır. Ancak başlangıç su muhtevasının çok yüksek olması durumunda ise mukavemette düşüş gerçekleşmektedir. Yani toplam su-çimento oranı arttığında, bu eğriden beklendiği gibi mukavemet değerlerinde düşüş olması gerekmez. Esasen karıştırma etkinliği bu eğrinin önemli bir parçasıdır.

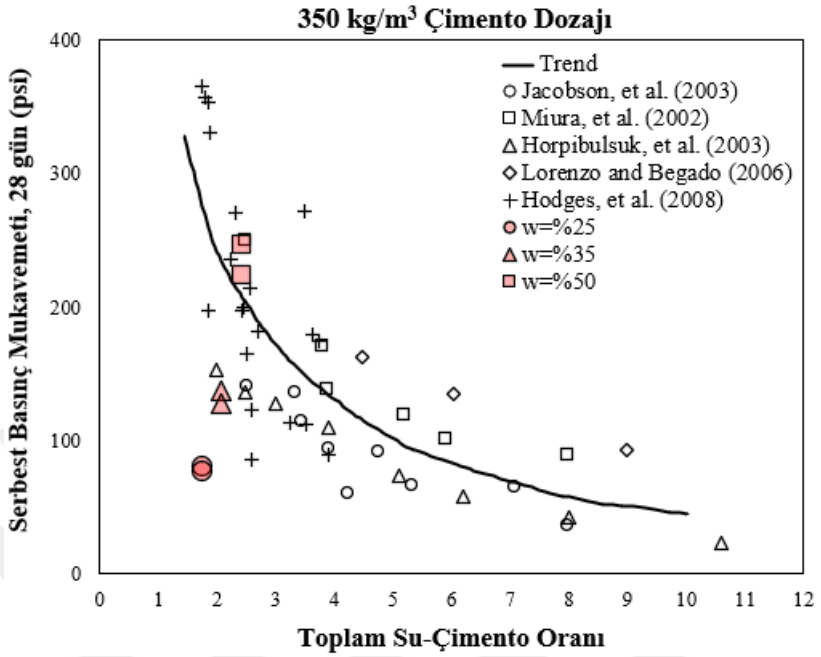


Şekil 4.45: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (**İnorganik**, 400 kg/m^3, CEM II, farklı başlangıç su muhtevası, A Sahası).

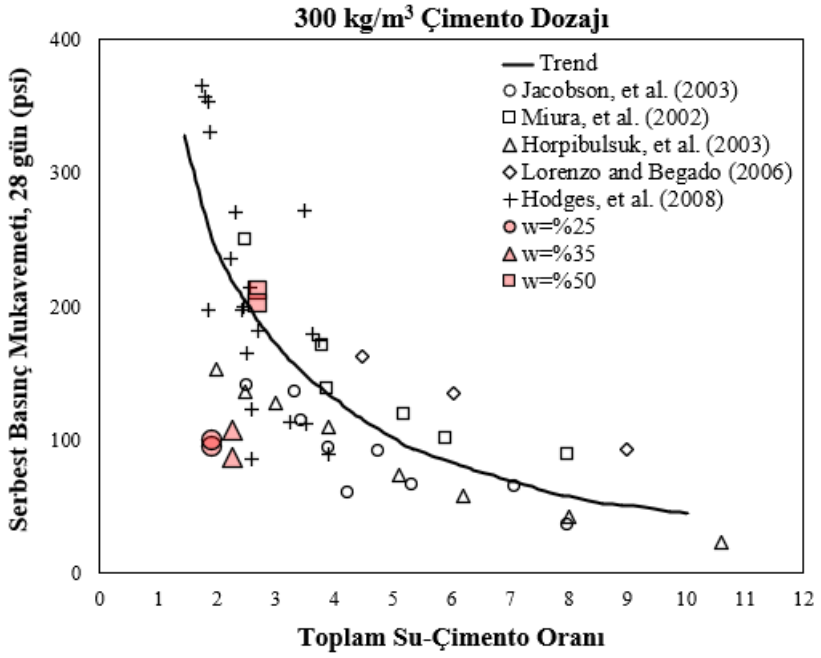
Şekil 4.46'da verilen 350 kg/m^3 çimento dozajında hazırlanan numunelerde de zeminin başlangıç su muhtevasındaki artış ile mukavemet artışı olmaktadır. Bu dozaj için de başlangıç su muhtevasının çok düşük seviyelerde olması (w_{in}=%25) durumunda mukavemette düşük değerler elde edilmiştir. Zeminin başlangıç su muhtevası, w_{in}=%50 olduğunda ise eğrideki değerler yakalanmıştır. Zeminin başlangıç su muhtevasının derin karışım numunelerinin mukavemet değerleri için çok önemli olduğu bu sonuçlarda da görülmektedir.

Şekil 4.47'de görüldüğü gibi 300 kg/m^3 çimento dozajında hazırlanan numunelerin başlangıç su muhtevasının w_{in}=%25 ve w_{in}=%35 olması durumunda mukavemette düşük değerler elde edilmiştir. Ancak başlangıç su muhtevasının w_{in}=%50 olması durumunda FHWA (2013)'te önerilen değerlerle uyumlu mukavemet değerleri elde edilmiştir. Doğal zeminin su

muhtevasının derin karışım numunelerinin mukavemet değerleri için çok önemli olduğu burada da görülmektedir.



Şekil 4.46: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (**İnorganik**, 350 kg/m^3, CEM II, farklı başlangıç su muhtevası, A Sahası).

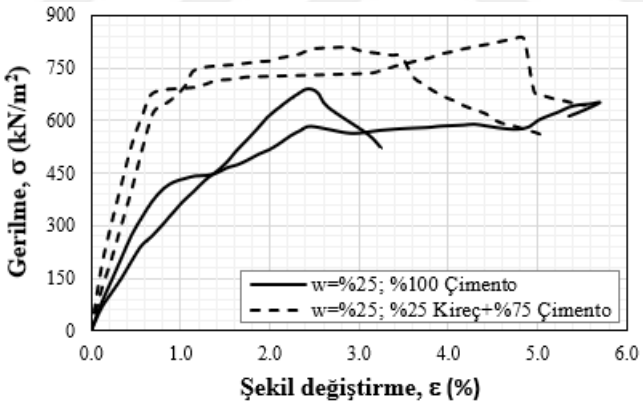


Şekil 4.47: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (**İnorganik**, 300 kg/m^3, CEM II, farklı başlangıç su muhtevası, A Sahası).

Farklı Bağlayıcıların Kullanılmasının Derin Karışım Numuneleri Üzerindeki Etkisi

Farkı bağlayıcıların etkilerini incelemek amacıyla bağlayıcı malzemesi olarak kireç ve çimento birlikte kullanılarak doğal zemin ile hazırlanan derin karışım numuneleri üzerinde farklı kür günlerinde yapılan serbest basınç mukavemet deney sonuçları bu bölümde verilmektedir. Hazırlanan derin karışım numunelerinin bağlayıcı dozajı 400 kg/m^3 ve su/çimento oranı, w:c=0.8'dir.

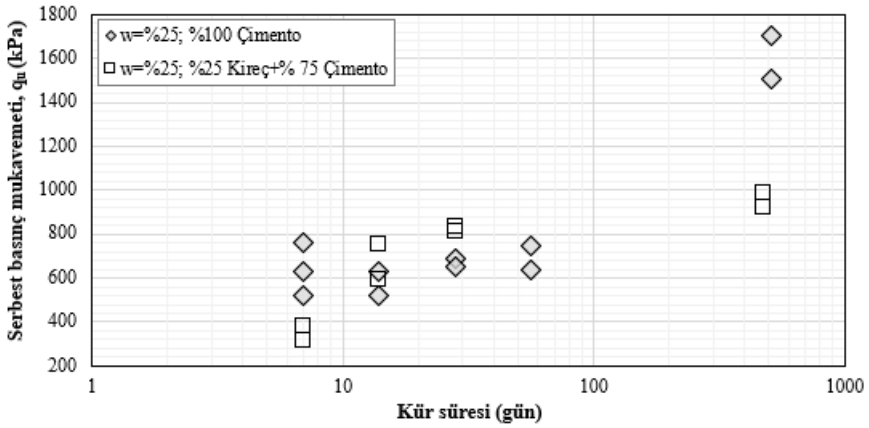
Şekil 4.48'de zeminin doğal su muhtevası, w_{in}=%25 olan ve katkı malzemeleri olarak %100 çimento ve %25 kireç + %75 çimento oranları kullanılarak hazırlanan numunelerin 28 gün kür süresi sonrasında yapılan serbest basınç mukavemet deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme (σ-ε) eğrileri verilmektedir. Şekil 4.49'da ise farklı bağlayıcı türü ve oranlarına sahip numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin kür gününe bağlı değişimleri gösterilmektedir. Bu su muhtevasında bağlayıcı olarak kireç ve çimentonun birlikte kullanıldığı numunelerin 28 gün kür süresi sonunda sadece çimento kullanılarak hazırlanan numunelerden daha yüksek mukavemet verdiği ancak bir yılı aşkın kür süresi sonunda ise sıklıkla daha düşük mukavemetlere ulaştığı görülmektedir.



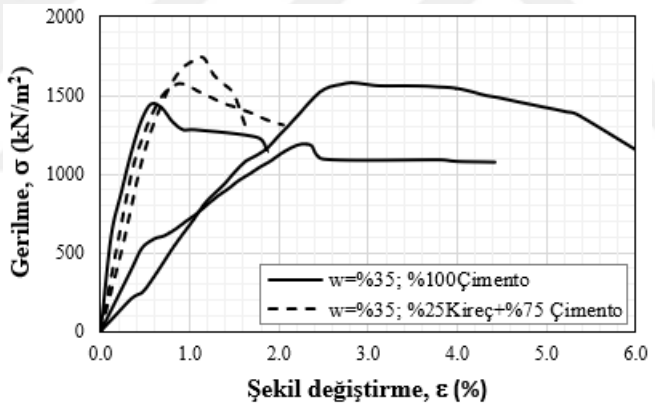
Şekil 4.48: 28 gün kür süresi sonrasında farklı oranlardaki katkı malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (**İnorganik**, 400 kg/m^3 dozaj, w:c=0.8, w_{in}=%25, A Sahası).

Şekil 4.50'de doğal zeminin su muhtevası, w_{in}=%35 olan ve katkı malzemeleri olarak %100 çimento ve %25 kireç + %75 çimento oranları kullanılarak hazırlanan numunelerin 28 gün kür süresi sonrasında yapılan serbest basınç mukavemet deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme (σ-ε) eğrileri verilmektedir. Şekil 4.51'de ise farklı bağlayıcı türü ve oranlarına sahip numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin kür gününe bağlı değişimleri gösterilmektedir. Bu numunelerde kireç ve çimentonun birlikte kullanıldığı numuneler 7 ve 14 gün kür süreleri sonunda sadece çimento kullanılan numunelerden daha düşük mukavemet vermiştir. Ancak 28

gün ve bir yılı aşkın kür süreleri sonrasında kireç ve çimentonun birlikte kullanıldığı numuneler sadece çimento kullanılan numunelerden daha yüksek mukavemetlere ulaşmıştır. Buradan da görüldüğü üzere zeminin doğal su muhtevası kullanılan bağlayıcı türü ve miktarı gibi etkilidir.

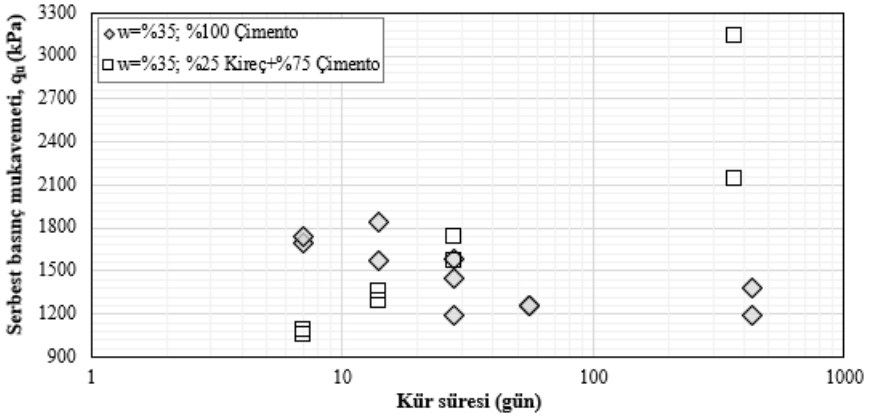


Şekil 4.49: Farklı oranlardaki katkı malzemelerinin serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine bağlı değişimi (**İnorganik**, 400 kg/m^3 dozaj, w:c=0.8, w_{in}=%25, A Sahası).

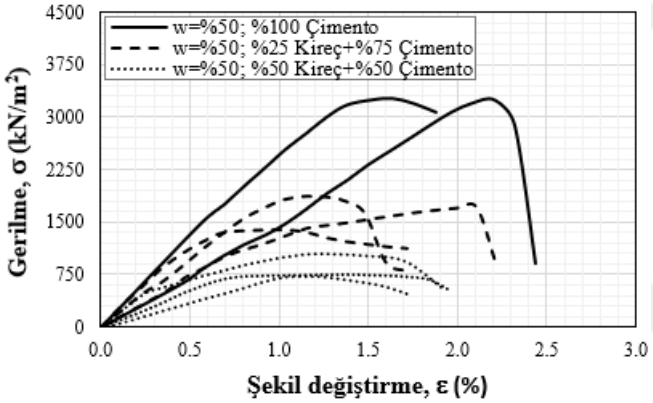


Şekil 4.50: 28 gün kür süresi sonrasında farklı oranlardaki katkı malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (**İnorganik**, 400 kg/m^3 dozaj, w:c=0.8, w_{in}=%35, A Sahası).

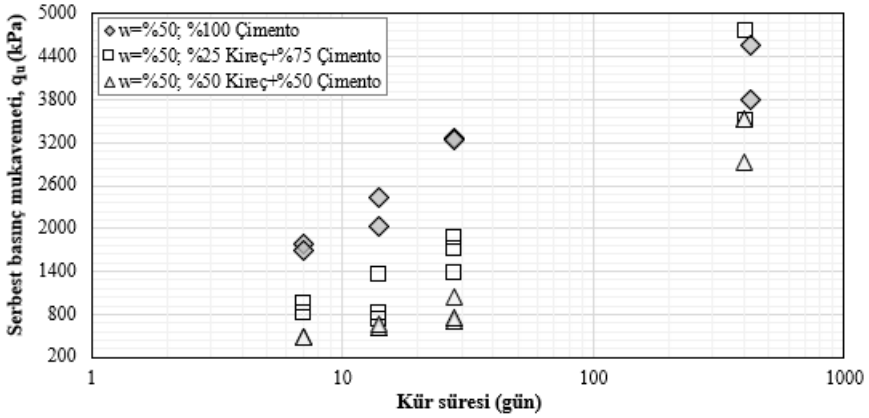
Şekil 4.52'de zeminin doğal su muhtevası, w_{in}=%50 olan ve katkı malzemeleri olarak %100 çimento, %25 kireç + %75 çimento ve %50 kireç + %50 çimento oranları kullanılarak hazırlanan numunelerin 28 gün kür süresi sonrasında yapılan serbest basınç mukavemet deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme (σ-ε) eğrileri verilmektedir. Şekil 4.53'te ise farklı bağlayıcı türü ve oranlarına sahip numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin kür gününe bağlı değişimleri gösterilmektedir. Bu numunelerin bir kısmında kireç ve çimentonun birlikte kullanıldığı numuneler sadece çimento kullanılan numunelerden daha düşük mukavemet vermiştir. Kullanılan kireç miktarının artması ile de mukavemetlerde düşüş olmuştur.



Şekil 4.51: Farklı oranlardaki katkı malzemelerinin serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine bağlı değişimi (**İnorganik**, 400 kg/m^3 dozaj, w:c=0.8, w_{in}=%35, A Sahası).



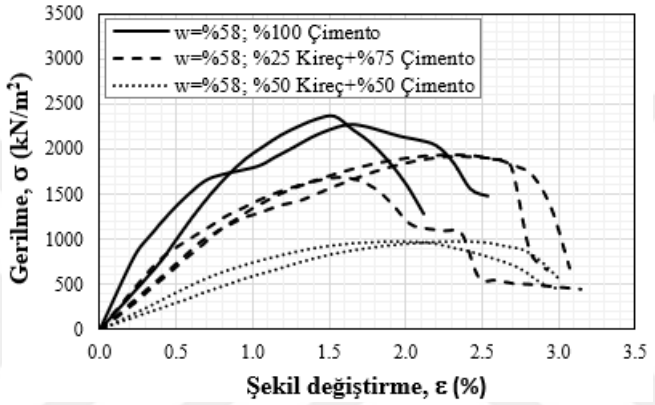
Şekil 4.52: 28 gün kür süresi sonrasında farklı oranlardaki katkı malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (**İnorganik**, 400 kg/m^3 dozaj, w:c=0.8, w_{in}=%50, A Sahası).



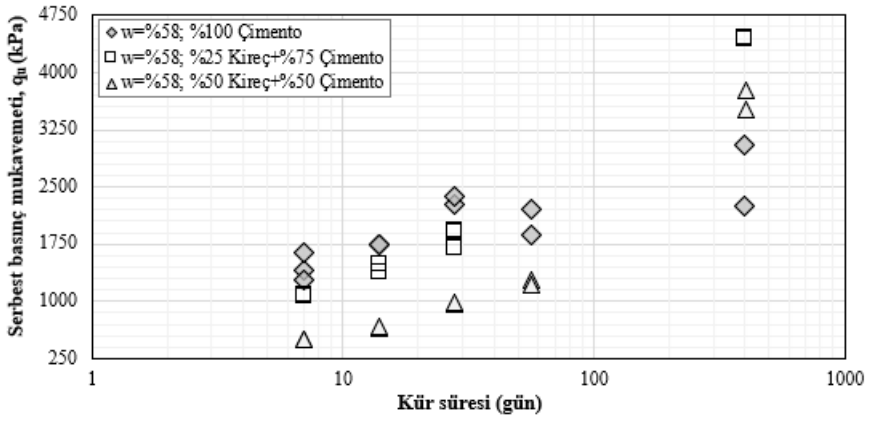
Şekil 4.53: Farklı oranlardaki katkı malzemelerinin serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine bağlı değişimi (**İnorganik**, 400 kg/m^3 dozaj, w:c=0.8, w_{in}=%50, A Sahası).

Şekil 4.54'te zeminin doğal su muhtevası, w_{in}=%58 olan ve katkı malzemeleri olarak %100 çimento, %25 kireç + %75 çimento ve %50 kireç + %50 çimento oranları kullanılarak

hazırlanan numunelerin 28 gün kür süresi sonrasında yapılan serbest basınç mukavemet deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme (σ-ε) eğrileri verilmektedir. Şekil 4.55'te ise farklı bağlayıcı türü ve oranlarına sahip numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin kür gününe bağlı değişimleri gösterilmektedir. Bu numunelerde ise 7, 14, 28 ve 56 gün kür süreleri sonrasında kireç ve çimentonun birlikte kullanıldığı numuneler sadece çimento kullanılan numunelerden daha düşük mukavemet vermiştir. Ancak bir yılı aşkın kür süresi sonrasında sadece çimento kullanılan numuneler daha düşük mukavemet göstermiştir. Kullanılan kireç miktarının artması ile de tüm numunelerin mukavemetlerinde azalım olmuştur.



Şekil 4.54: 28 gün kür süresi sonrasında farklı oranlardaki katkı malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (**İnorganik**, 400 kg/m^3 dozaj, w:c=0.8, w_{in}=%58, A Sahası).



Şekil 4.55: Farklı oranlardaki katkı malzemelerinin serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine bağlı değişimi (**İnorganik**, 400 kg/m^3 dozaj, w:c=0.8, w_{in}=%58, A Sahası).

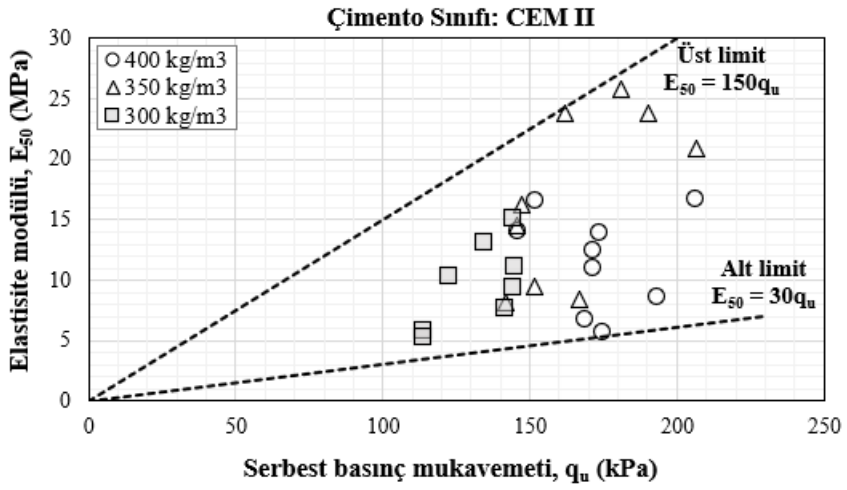
Sonuçlar, çimento ve kireçli numunelerde de yüksek mukavemetlere ulaşılabileceğini göstermektedir. Ayrıca kireç ilavesinin karışımın işlenebilirliğini artırdığı görülmüştür. Düşük doğal su muhtevasına sahip zeminlerde kireç ve çimentonun birlikte kullanılması daha yüksek mukavemet değerleri ile sonuçlanırken, doğal su muhtevası arttıkça bu etki azalmaktadır.

Karıştırma etkinliğinin az olduğu düşük doğal su muhtevalı zeminlerde kirecin karıştırma etkinliğini artırdığı düşünülebilir. Laboratuvarda da kireçli karışımlar için numune hazırlama süreci çok daha kolay olmuş, karışım miksere daha az yapışmıştır. Bunun kimyasal bir açıklaması da mevcuttur. Kireç ilavesinin yüksek plastisiteli killerin işlenebilirliğini katyon değişimi nedeniyle artırdığı bilinmektedir. Yüksek plastisiteli killerin arazide de karşılaşılan karıştırma sorunu için çimentoya kireç ilave edilmesi bir çözüm olabilir. Bu bölümde yapılan deneylerin arazide sık karşılaşılan bir soruna çözüm getirebileceği düşünülmektedir.

Derin Karışım Numunelerinin Elastisite Modülü-Serbest Basınç Mukavemeti İlişkisi

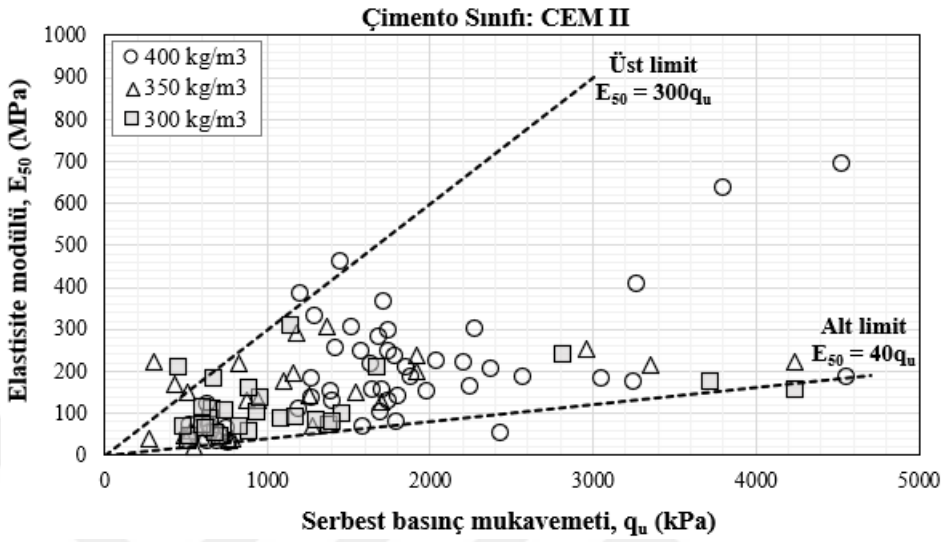
Bu araziden alınan organik ve inorganik doğal zemin ile laboratuvarda hazırlanan bütün numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden elde edilen sekant elastisite modülleri, E_{50} hesaplanmıştır. Zemin türüne ve kullanılan kimyasalların türüne göre sekant elastisite modülü, E_{50} ile serbest basınç mukavemeti, q_u arasındaki ilişkiler değerlendirilerek alt ve üst limit değerleri verilmiştir.

Şekil 4.56'da turba zemin ile hazırlanan numunelerin sonuçları gösterilmektedir. Turba zeminde 250 kPa'a kadar mukavemet elde edilmiş, modül bakımından ise en fazla 25 MPa'a kadar çıkılmıştır. Görüldüğü gibi sonuçlar son derece dağınık dağılım göstermektedir. Numuneler laboratuvarda hazırlanmasına rağmen turbanın üniform olmayan yapısı sebebiyle hem mukavemet, hem de modül bakımından farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu deney sonuçlarına göre E_{50} değerlerinin, q_u değerinin 30 ile 150 katı arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir. Bu değerler deneme deneylerindeki değerleri ile de uyumludur.



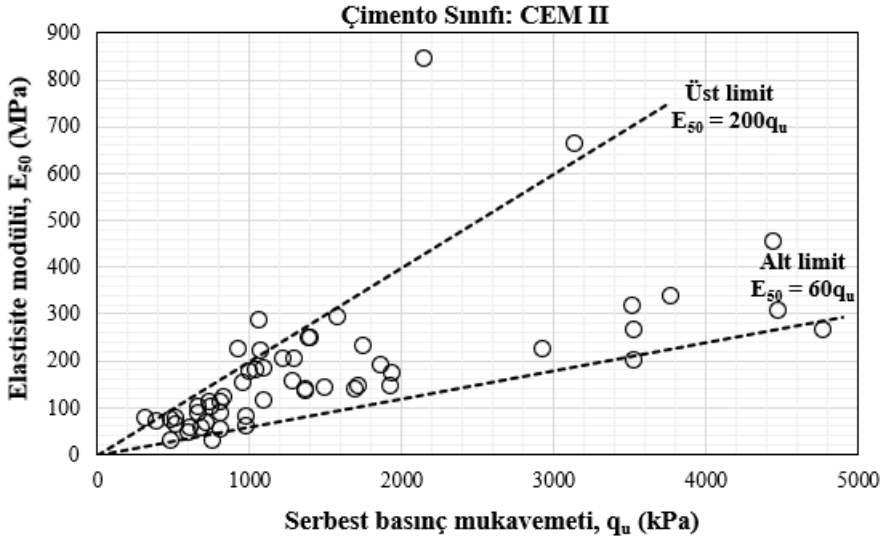
Şekil 4.56: Organik zemin ile hazırlanan numunelerin elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (A Sahası)

Şekil 4.57'de inorganik zemin ve bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılarak hazırlanan numunelerin sonuçları gösterilmektedir. Bu deney sonuçlarına göre E_{50} değerlerinin, q_u değerinin 40 ile 300 katı arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.57: Elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (İnorganik zemin, katkı türü sadece çimento, A Sahası)

Şekil 4.58'de inorganik zemin ve bağlayıcı olarak kireç ve çimento birlikte kullanılarak hazırlanan numunelerin sonuçları gösterilmektedir. Bu deney sonuçlarına göre E_{50} değerlerinin, q_u değerinin 60 ile 200 katı arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir. Bu aralığın 2000 kPa ve altındaki mukavemet değerleri için daha uygun olduğu vurgulanmalıdır.



Şekil 4.58: Elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (İnorganik zemin, katkı türü kireç+çimento, A Sahası)

4.1.3.2. B Sahasından Alınan Doğal Zemin ile Hazırlanan Numunelerin Deney Sonuçları

B sahasından alınan inorganik doğal zemin ile hazırlanmış olan derin karışım numunelerinin deney sonuçları aşağıda verilmektedir.

Zeminin Doğal Su Muhtevasının Derin Karışım Numuneleri Üzerindeki Etkisi

Bu sahadan alınan inorganik zemin ile farklı başlangıç su muhtevaları kullanılarak hazırlanan derin karışım numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç mukavemet deney sonuçları aşağıda verilmektedir. Bu numuneler hazırlanırken bağlayıcı olarak CEM I sınıfı çimento kullanılmıştır ve arazideki çimento dozajı ve su/çimento oranı değiştirilmemiştir. Tüm çimento dozajları için kullanılan zeminin başlangıç su muhtevaları %35, %42, %53 ve %63'tür. Seçilen su muhtevalarına doğal zeminin Likidite İndekslerine göre karar verilmiştir.

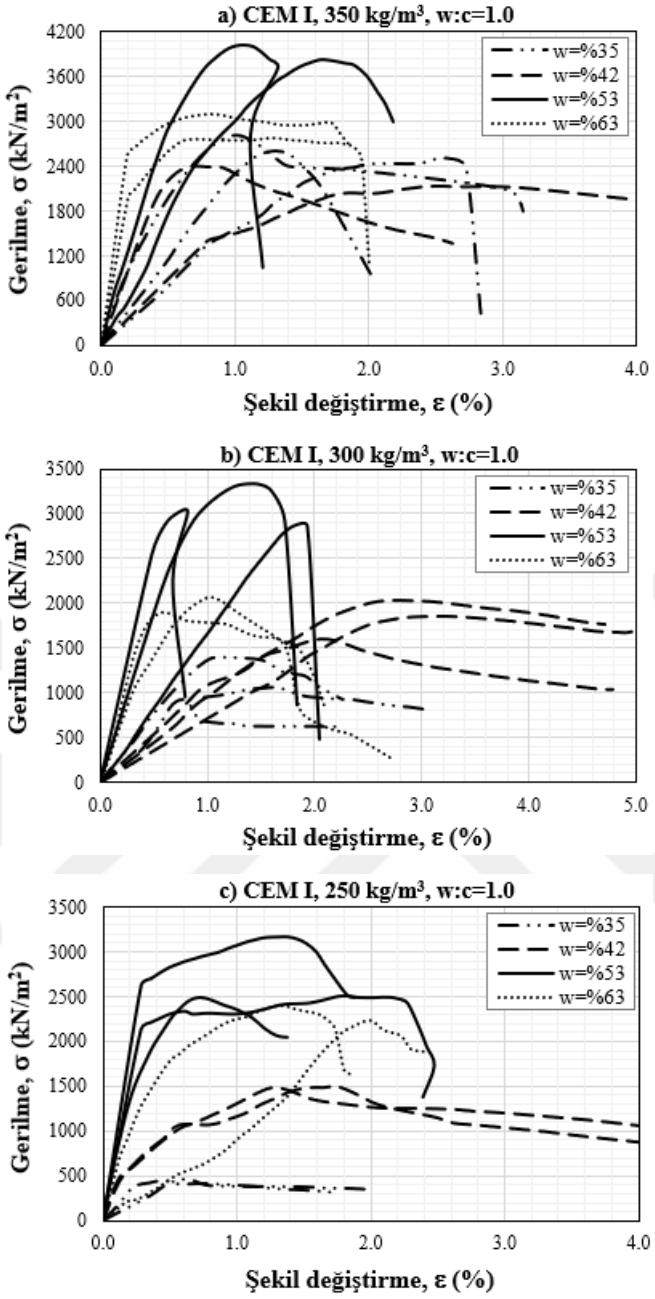
Şekil 4.59'da farklı başlangıç su muhtevalarına sahip numuneler için 28 gün kür süresi sonunda yapılan serbest basınç mukavemet deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme (σ-ε) eğrileri verilmektedir.

Şekil 4.60'da ise farklı başlangıç su muhtevalarına sahip numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin kür gününe bağlı değişimleri gösterilmektedir. Her su muhtevası için kür günü-mukavemet ilişkisi farklılaşmaktadır.

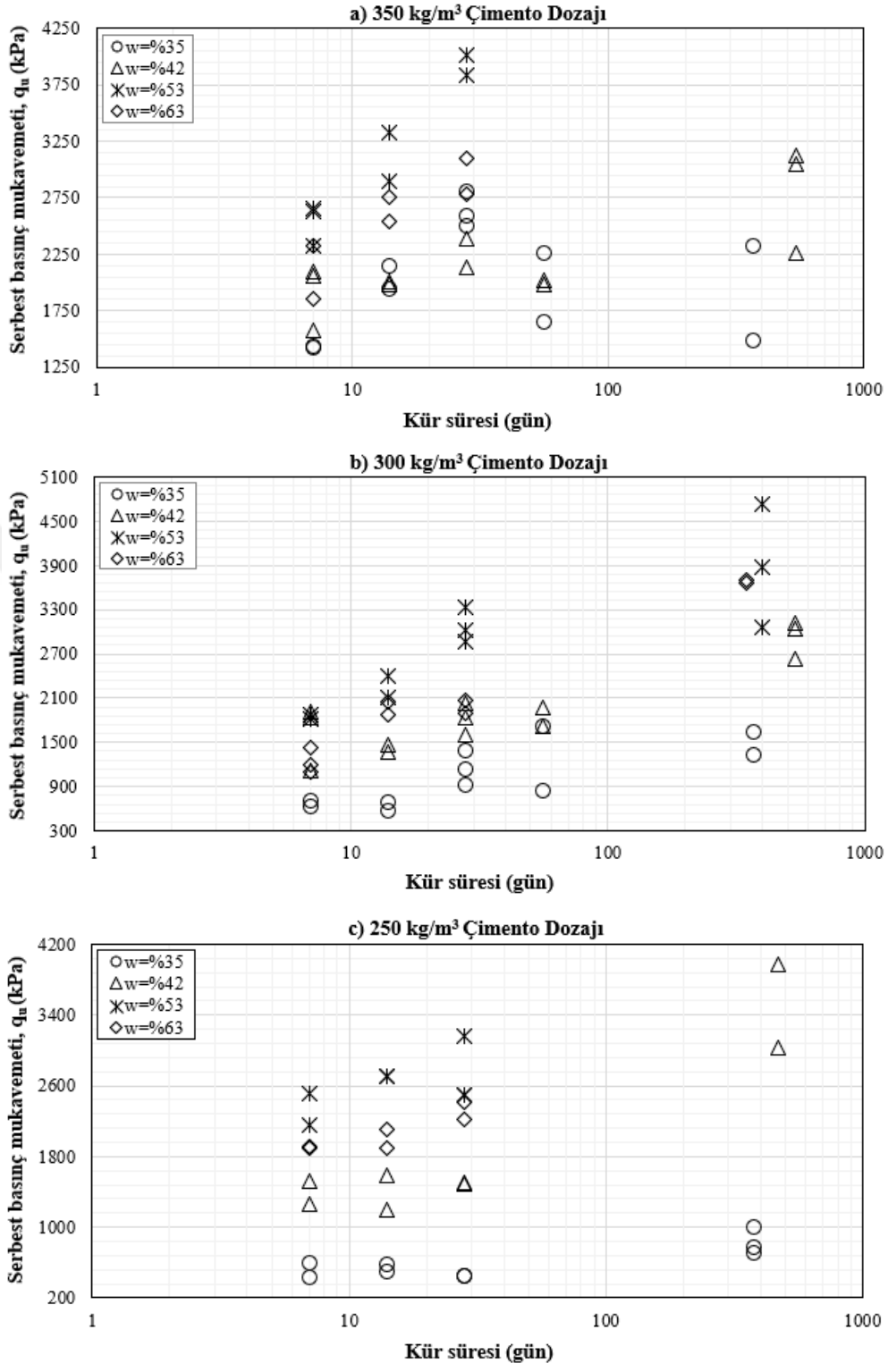
Şekil 4.61'de farklı kür günlerinde test edilen numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin zeminin başlangıç su muhtevasına (w_{in}) bağlı değişimleri gösterilmektedir.

Şekil 4.62'de ise farklı kür günlerinde test edilen numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin Likidite İndeksine bağlı değişimleri gösterilmektedir.

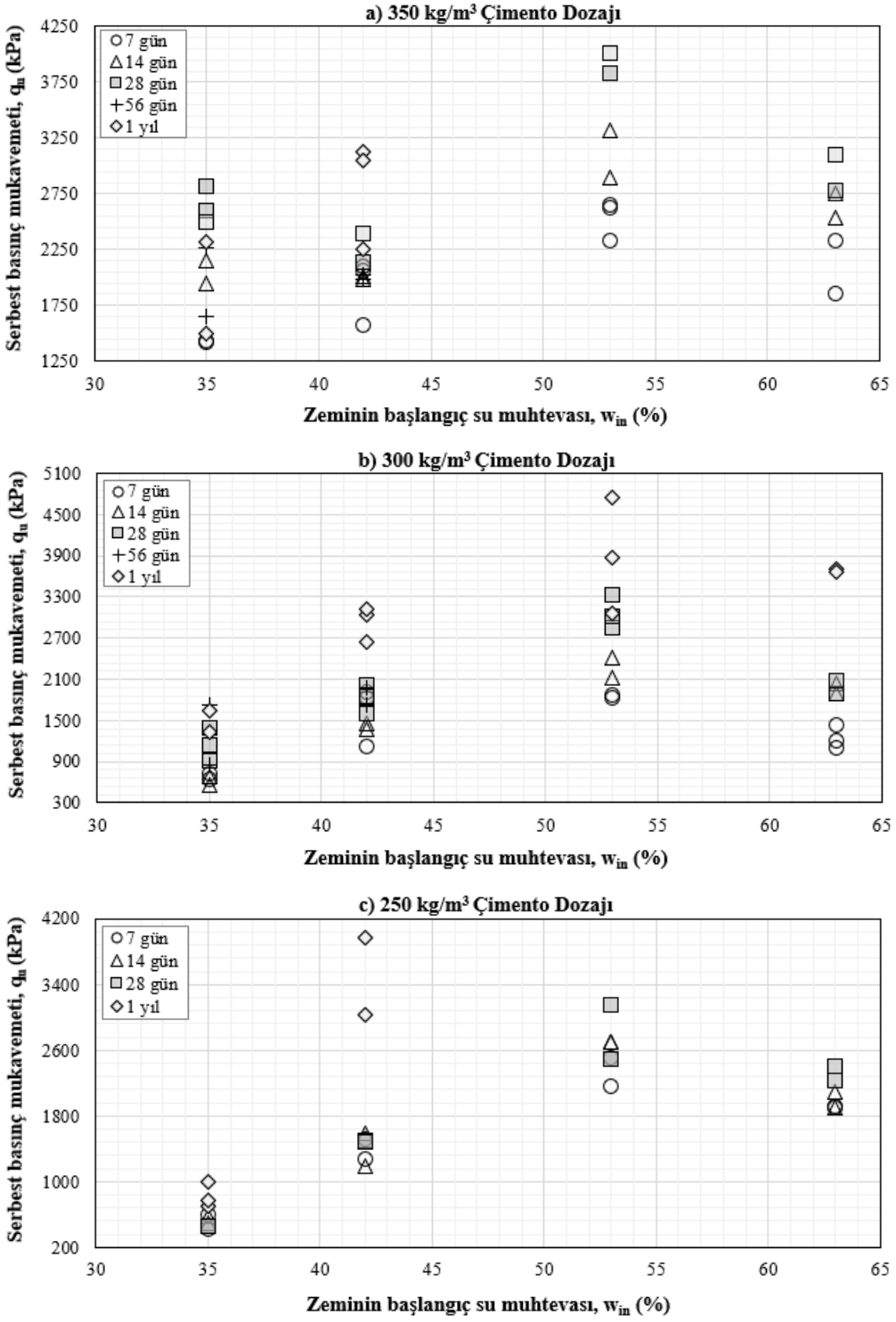
Aşağıda verilen şekillerde görüldüğü üzere kullanılan bütün dozajlar için belirli bir seviyeye kadar zeminin başlangıç su muhtevasındaki artış ile mukavemet artışı olmuştur. Ancak başlangıç su muhtevasının çok fazla olması durumunda (w_{in}=%53) ise mukavemette azalma gerçekleşmektedir. Bu grup numunelerde de başlangıç su muhtevasının karıştırma etkinliğini doğrudan etkilediği görülmektedir. Bu sonuçlar diğer sahada yapılan deney sonuçları ile benzerlik göstermektedir.



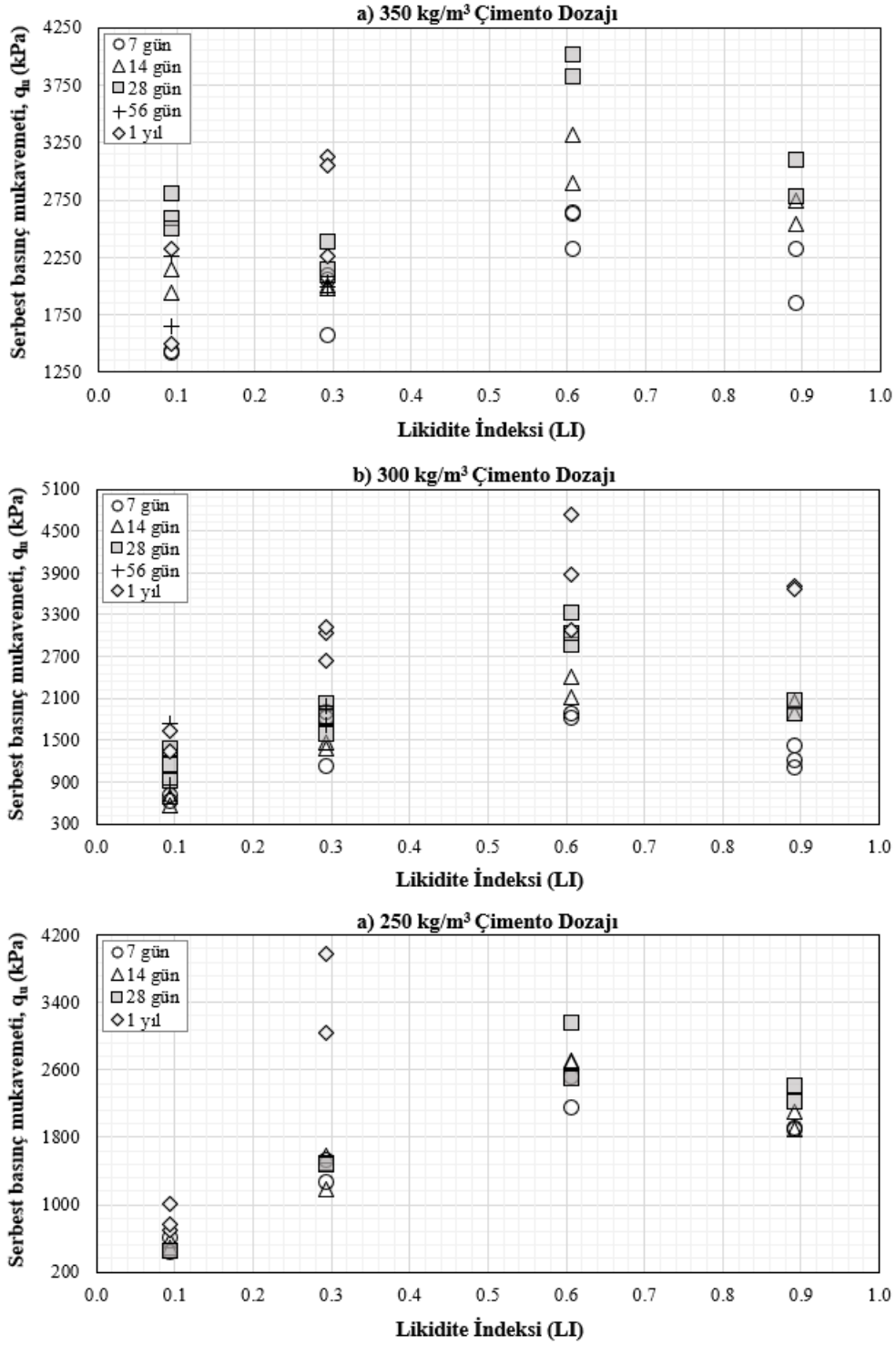
Şekil 4.59: 28 gün kür süresi sonrasında farklı başlangıç su muhtevalarına sahip numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri, B Sahası **a)** 350 kg/m^3, **b)** 300 kg/m^3, **c)** 250 kg/m^3.



Şekil 4.60: Farklı başlangıç su muhtevalarına sahip numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine bağlı değişimi, B Sahası **a)** 350 kg/m^3, **b)** 300 kg/m^3, **c)** 250 kg/m^3.



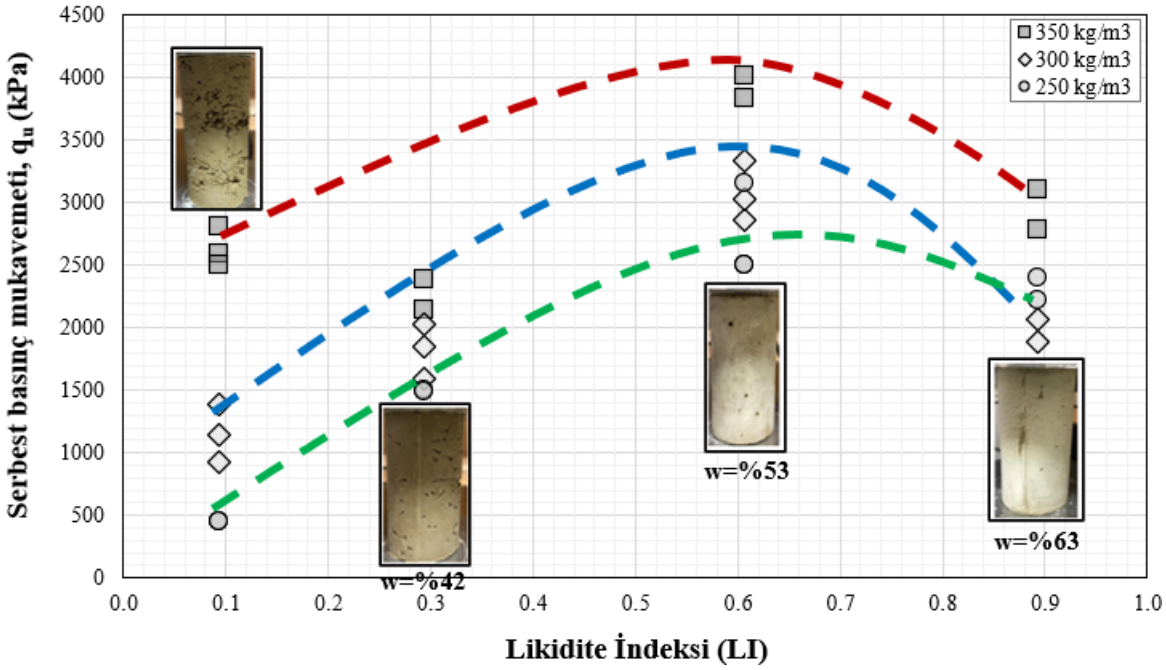
Şekil 4.61: Farklı kür günlerindeki numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin zeminin başlangıç su muhtevasına bağlı değişimi, B Sahası **a)** 350 kg/m^3, **b)** 300 kg/m^3, **c)** 250 kg/m^3.



Şekil 4.62: Farklı kür günlerindeki numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin Likidite İndeksine bağlı değişimi, B Sahası **a)** 350 kg/m^3, **b)** 300 kg/m^3, **c)** 250 kg/m^3.

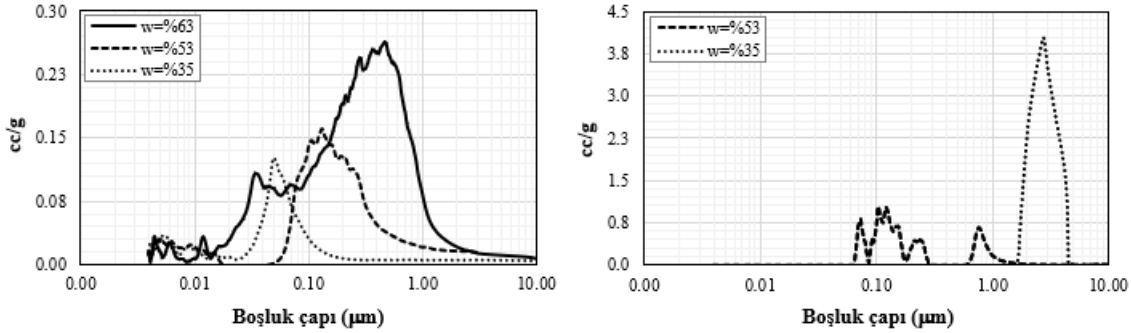
Şekil 4.63'te 350 kg/m^3, 300 kg/m^3 ve 250 kg/m^3 çimento dozajındaki numunelerin 28 gün kür süresi sonrasında serbest basınç mukavemetlerinin Likidite İndekslerine bağlı değişimleri ve örnek numune fotoğrafları birlikte verilmektedir. 28 gün kür süresi sonrasında da görüldüğü

gibi tüm dozajlarda belirli bir seviyeye kadar zeminin başlangıç su muhtevasındaki ve Likidite İndeksindeki artış ile mukavemet artışı olmaktadır. Ancak başlangıç su muhtevasının ve Likidite İndeksinin çok yüksek olması durumunda mukavemette azalma gerçekleşmektedir. Şekil 4.63'te verilen numunelerin fotoğraflarından da görüldüğü gibi başlangıç su muhtevasının az olması durumunda homojen bir karışım gerçekleşememektedir.



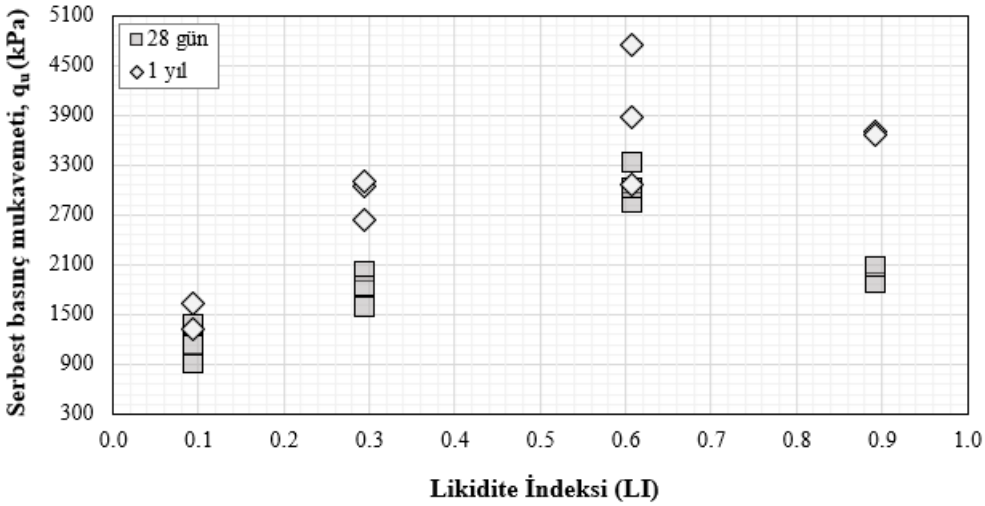
Şekil 4.63: 28 gün kür süresi sonrasında tüm dozajların serbest basınç mukavemetlerinin Likidite İndeksine bağlı değişimi (B Sahası).

Bu gruptaki 300 kg/m^3 çimento dozajında hazırlanmış numuneler için ODTÜ Merkez Laboratuvarında yaptırılan üç adet civalı porozimetre analizinden alınan eğriler aşağıda verilmektedir (Şekil 4.64). Yüksek su muhtevasının daha büyük boşluk çaplarına sebep olabildiği (>0.1 μm) görülmektedir. Bu numune için mukavemet değerlerinin de küçük olduğu Şekil 4.63'te görülmektedir. Maksimum mukavemetin ölçüldüğü (w_{in}=%53) numunesinde, boşlukların çapları belirli bir boşluk çapında yoğunlaşmaktadır, büyük boşluklar oluşmamıştır. w_{in}=%35 numunesinde de küçük boşlukların oluştuğu görülmektedir. Daha çok sayıda deneyin yapılması durumunda, mikro yapıya olan etki daha güvenilir olarak bulunabilir, ancak bu üç numune de, boşluk çapı dağılımının su muhtevası ile değiştiği konusunda önemli bilgiler vermektedir.



Şekil 4.64: 300 kg/m^3 çimento dozajında ve farklı başlangıç su muhtevasındaki numunelerin 28 gün sonrasında civalı porozimetri eğrileri (B Sahası).

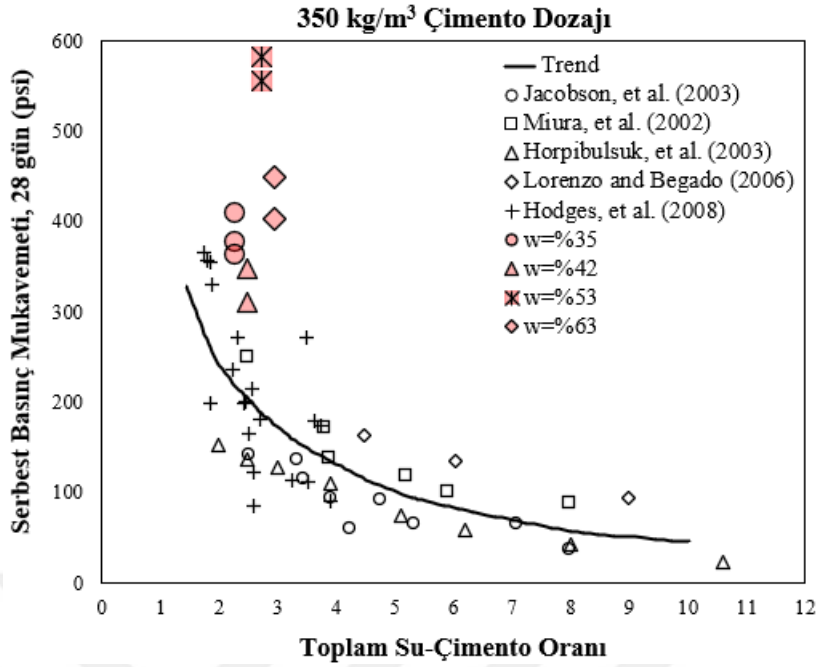
Şekil 4.65'te ise 300 kg/m^3 çimento dozajındaki numunelerin bir yılı aşkın kür süresi sonrasında serbest basınç mukavemetlerinin Likidite İndekslerine bağlı değişimleri 28 gün kür süresi ile birlikte gösterilmektedir ve bu numunelerde de aynı etki görülmüştür. Etkin karıştırmanın etkisi kür süresi ile birlikte değişmemektedir.



Şekil 4.65: 300 kg/m^3 çimento dozajındaki numunelerin 28 gün ve bir yıl kür süresi sonrasında serbest basınç mukavemetlerinin likidite indeksine bağlı değişimi (B Sahası).

- *FHWA (2013) ile Karşılaştırma*

Şekil 4.66'da görüldüğü gibi 350 kg/m^3 çimento dozajında hazırlanan numunelerde başlangıç su muhtevasının (w_{in}) %53 ve %63 olması durumunda FHWA (2013) verilerine göre daha yüksek mukavemet değerleri elde edilmiştir. Başlangıç su muhtevası, w_{in}=%42 olan numunelerin mukavemeti, su muhtevası diğer numunelerden daha düşük olmuştur. Başlangıç su muhtevasının w_{in}=%53 olması durumunda FHWA (2013) verilerine göre mukavemette çok yüksek değerler elde edilmiştir.

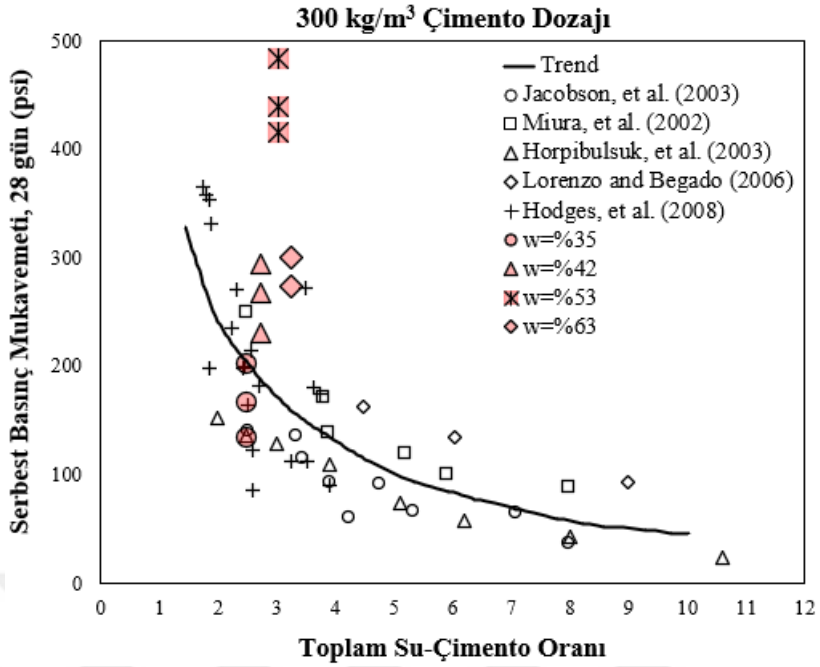


Şekil 4.66: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (**İnorganik**, 350 kg/m^3, CEM I, farklı başlangıç su muhtevası, B Sahası).

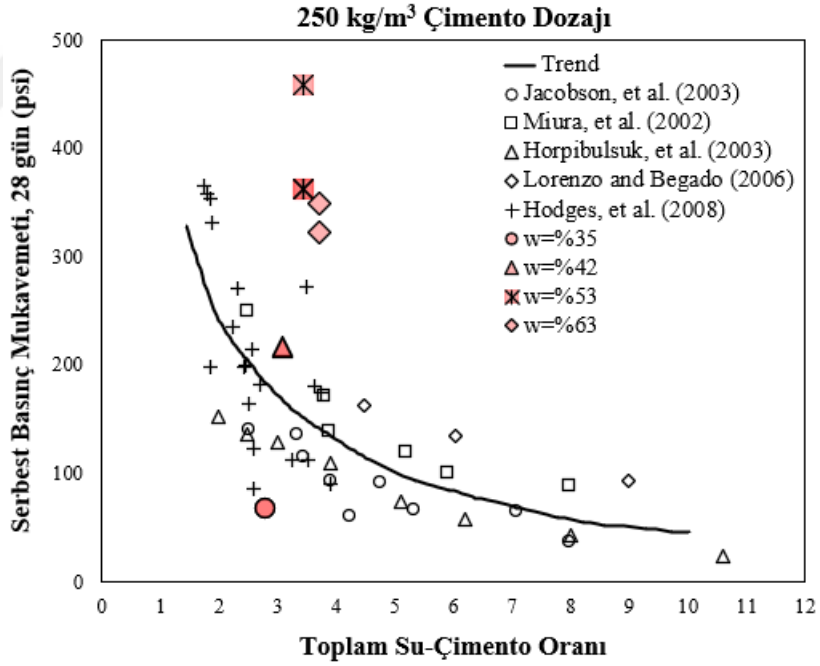
Şekil 4.67 görüldüğü gibi 300 kg/m^3 çimento dozajında hazırlanan numunelerde belirli bir seviyeye kadar zeminin başlangıç su muhtevasındaki artış ile mukavemet artışı olmaktadır. Ancak başlangıç su muhtevasının çok fazla olması durumunda ise mukavemette azalma gerçekleşmektedir. Bu numunelerde de başlangıç su muhtevasının w_{in}=%53 olması durumunda FHWA (2013) verilerine göre mukavemette çok yüksek değerler elde edilmiştir.

Şekil 4.68'de ise 250 kg/m^3 çimento dozajında hazırlanan numunelerde başlangıç su muhtevasının w_{in}=%35 olması durumunda FHWA (2013) verilerine göre düşük mukavemet değerleri elde edilmiştir. Başlangıç su muhtevasının w_{in}=%42 olması durumunda ise bu verilere uygun mukavemet değerleri elde edilmiştir. Diğer çimento dozajlarında da olduğu gibi w_{in}=%53 olması durumunda FHWA (2013) verilerine göre mukavemette çok yüksek değerler elde edilmiştir. Toplam su muhtevası-çimento eğrisi takip edilmemektedir.

Zeminin başlangıç su muhtevasının derin karışım numunelerinin mukavemet değerleri için çok önemli olduğu bu sonuçlarda da görülmektedir. Toplam su-çimento oranı arttığında, bu eğriden beklendiği gibi mukavemet değerlerinde düşüş olması gerekmez. Esasen karıştırma etkinliği bu eğrinin önemli bir parçasıdır.



Şekil 4.67: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (**İnorganik**, 300 kg/m^3, CEM I, farklı başlangıç su muhtevası, B Sahası).



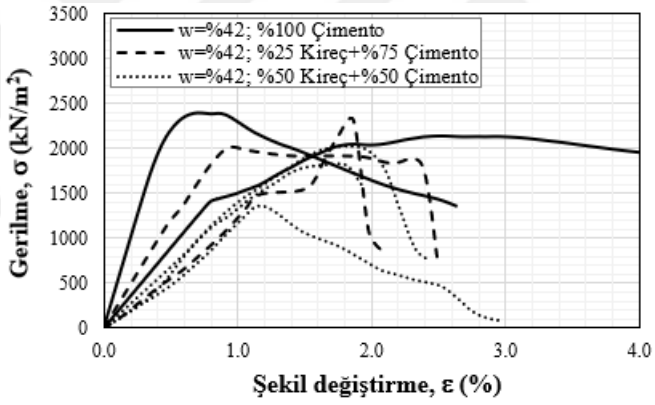
Şekil 4.68: Serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişimi (**İnorganik**, 250 kg/m^3, CEM I, farklı başlangıç su muhtevası, B Sahası).

Farklı Bağlayıcıların Kullanılmasının Derin Karışım Numuneleri Üzerindeki Etkisi

Bu sahadan alınan zemin ile de farkı kimyasalların etkilerini incelemek adına bağlayıcı malzemesi olarak kireç ve çimento birlikte kullanılarak hazırlanan derin karışım numuneleri üzerinde farklı kür günlerinde yapılan serbest basınç mukavemet deneyler sonuçları aşağıda

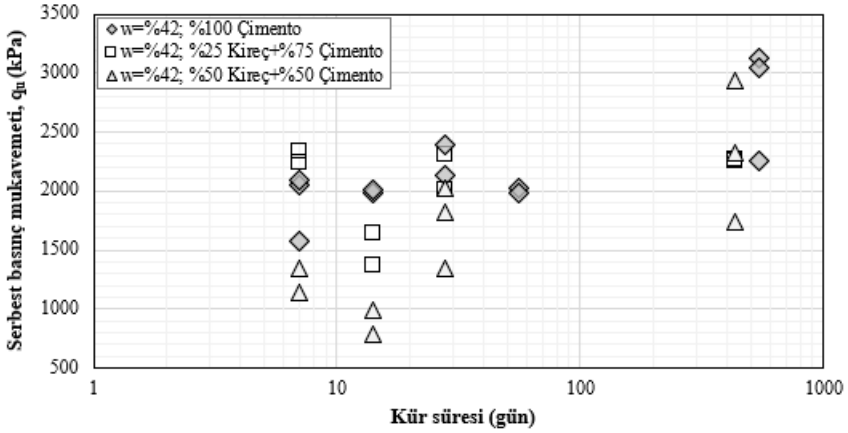
verilmektedir. Hazırlanan derin karışım numunelerinin bağlayıcı dozajı 350 kg/m^3 ve 300 kg/m^3 ve su/çimento oranları, w:c=1.0'dir.

Şekil 4.69'da bağlayıcı dozajı 350 kg/m^3, doğal zeminin su muhtevası, w_{in}=%42 olan ve katkı malzemeleri olarak %100 çimento, %25 kireç + %75 çimento ve %50 kireç + %50 çimento oranları kullanılarak hazırlanan numunelerin 28 gün kür süresi sonrasında yapılan serbest basınç mukavemet deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme (σ-ε) eğrileri verilmektedir. Şekil 4.70'te ise farklı bağlayıcı türü ve oranlarına sahip numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin kür gününe bağlı değişimleri gösterilmektedir. Bağlayıcı olarak kireç ve çimentonun birlikte kullanıldığı çoğu numunenin 28 gün ve bir yılı aşkın kür süresi sonunda sadece çimento kullanılarak hazırlanan numunelerden daha düşük mukavemet verdiği görülmektedir. Ancak 7 ve 14 gün sürelerinde dağılım daha dağınıktır. Kullanılan kireç miktarının artması ile de çoğu numunenin mukavemetinde azalım olmuştur.

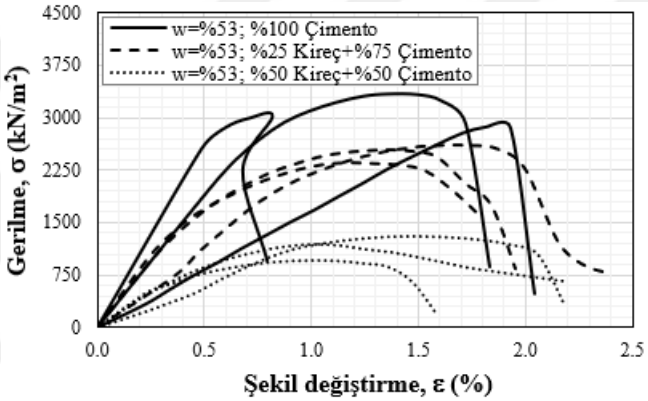


Şekil 4.69: 28 gün kür süresi sonrasında farklı oranlardaki katkı malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (**İnorganik**, 350 kg/m^3 dozaj, w:c=1.0, w_{in}=%42, B Sahası).

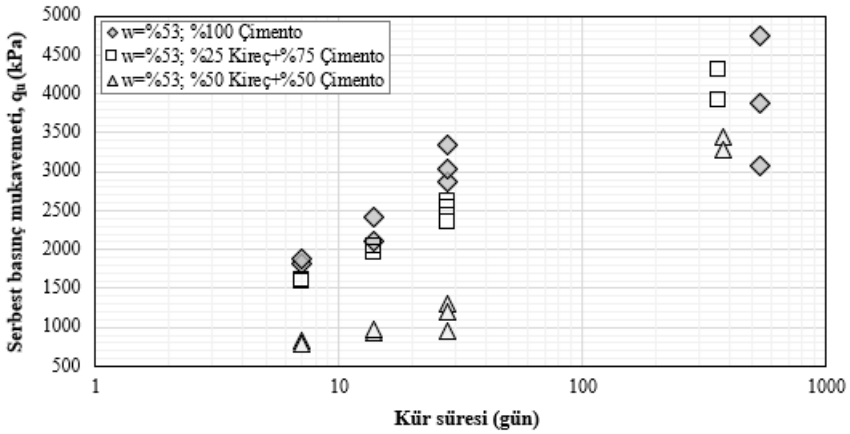
Şekil 4.71'de bağlayıcı dozajı 300 kg/m^3, doğal zeminin su muhtevası, w_{in}=%53 olan ve katkı malzemeleri olarak %100 çimento, %25 kireç + %75 çimento ve %50 kireç + %50 çimento oranları kullanılarak hazırlanan numunelerin 28 gün kür süresi sonrasında yapılan serbest basınç mukavemet deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme (σ-ε) eğrileri verilmektedir. Şekil 4.72'de ise farklı bağlayıcı türü ve oranlarına sahip numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin kür gününe bağlı değişimleri gösterilmektedir. Bu numunelerin çoğunda kireç ve çimentonun birlikte kullanıldığı numuneler sadece çimento kullanılan numunelerden daha düşük mukavemet vermiştir. Kullanılan kireç miktarının artması ile de mukavemetlerde azalım olmuştur.



Şekil 4.70: Farklı oranlardaki katkı malzemelerinin serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine bağlı değişimi (**İnorganik**, 350 kg/m^3 dozaj, w:c=1.0, w_{in}=%42, B Sahası).



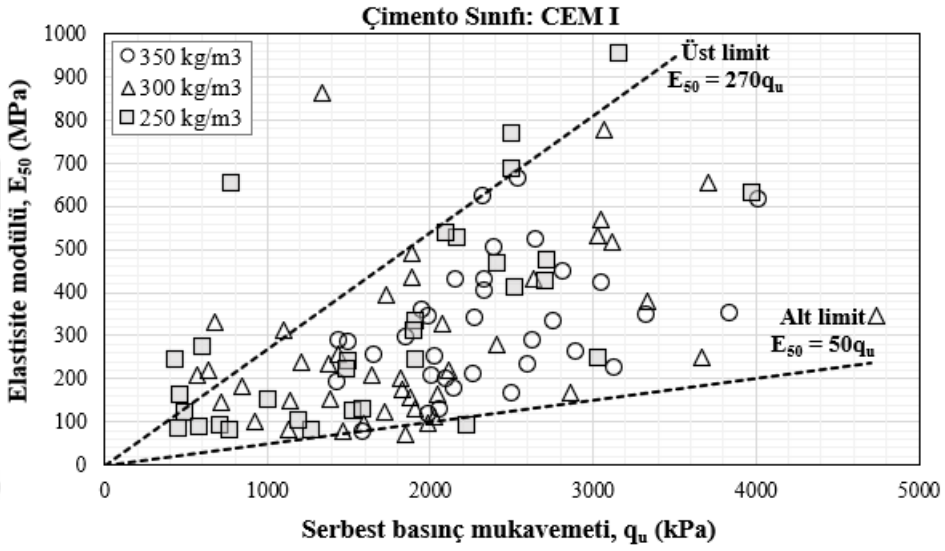
Şekil 4.71: 28 gün kür süresi sonrasında farklı oranlardaki katkı malzemelerinin gerilme-şekil değiştirme eğrileri (**İnorganik**, 300 kg/m^3 dozaj, w:c=1.0, w_{in}=%53, B Sahası).



Şekil 4.72: Farklı oranlardaki katkı malzemelerinin serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine bağlı değişimi (**İnorganik**, 300 kg/m^3 dozaj, w:c=1.0, w_{in}=%53, B Sahası).

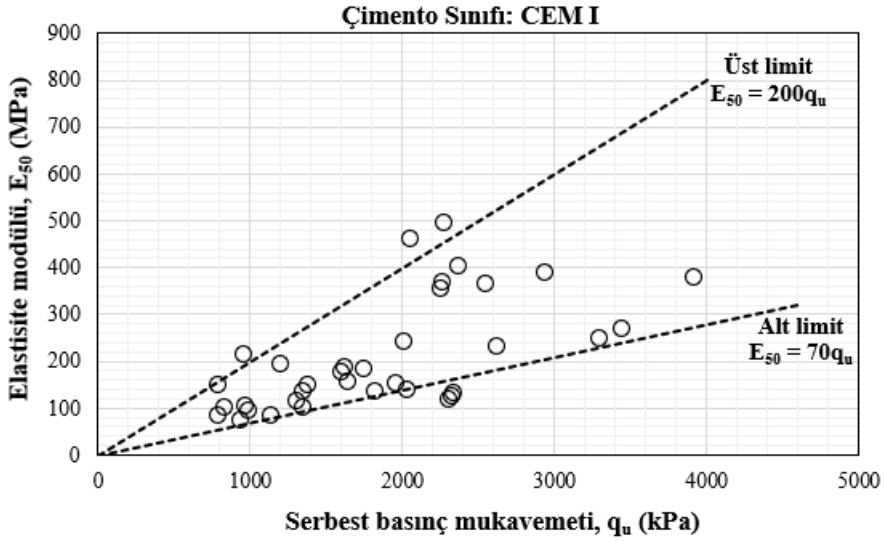
Derin Karışım Numunelerinin Elastisite Modülü-Serbest Basınç Mukavemeti İlişkisi

Bu sahada alınan inorganik doğal zemin ile laboratuvarda hazırlanan bütün numunelerin gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden elde edilen sekant elastisite modülleri, E_{50} hesaplanmıştır. Kullanılan bağlayıcıların türüne göre sekant elastisite modülü, E_{50} ile serbest basınç mukavemeti, q_u arasındaki ilişkiler değerlendirilerek alt ve üst limit değerleri verilmiştir. Şekil 4.73'te inorganik zemin ve bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılarak hazırlanan numunelerin sonuçları gösterilmektedir. Bu deney sonuçlarına göre E_{50} değerlerinin, q_u değerinin 50 ile 270 katı arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.73: Elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (İnorganik zemin, katkı türü sadece çimento, B Sahası)

Şekil 4.74'te ise inorganik zemin ve bağlayıcı olarak kireç ve çimento birlikte kullanılarak hazırlanan numunelerin sonuçları gösterilmektedir. Bu deney sonuçlarına göre E_{50} değerlerinin, q_u değerinin 70 ile 200 katı arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir. Genel olarak kireç ilave edilen numunelerde daha düşük modül değerlerinin 400 MPa ve altında olduğu görülmektedir. Bu sınırların 3000 kPa ve altındaki mukavemet değerleri için daha geçerli olduğu vurgulanmalıdır.



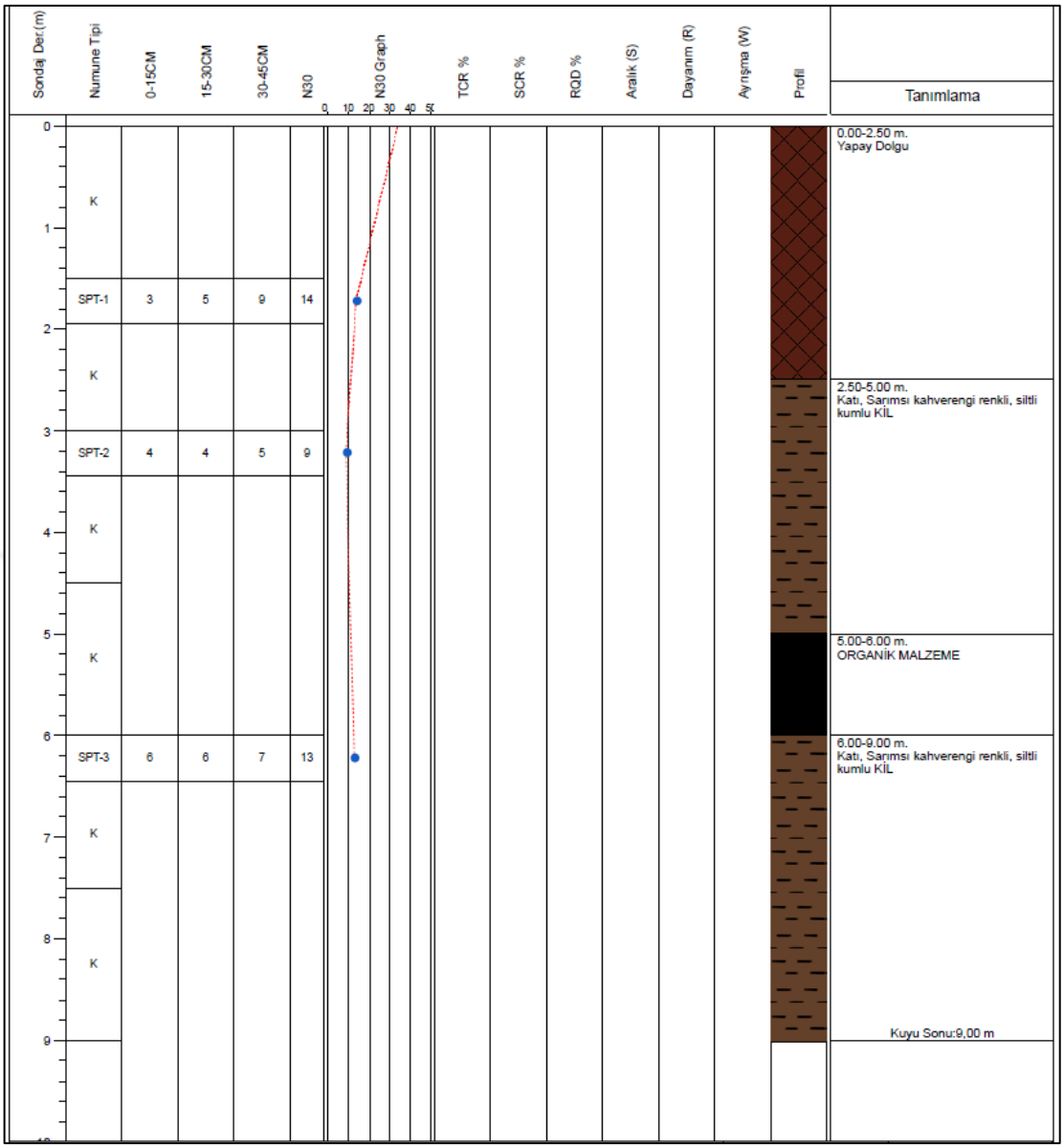
Şekil 4.74: Elastisite modüllerinin serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi (İnorganik zemin, katkı türü kireç+çimento, B Sahası)

4.2. ARAZİ ÇALIŞMALARINDAN ELDE EDİLEN BULGULAR

A ve B sahalarında deneme DSM kolon imalatları sırasında ıslak numune alıcı ile alınan numuneler üzerinde basınç deneyleri yapılmıştır. Deneme DSM kolon imalatları sonrasında yapılan kalite kontrol deneyleri kapsamında imal edilen bütün kolonlardan tam boy karot alınmıştır ve kolon içerisinde belirli derinliklerde presiyometre ve basınçlı su testi deneyleri yapılmıştır. Ayrıca kolon imalatlarının yapıldığı bölgeyi daha iyi karakterize edebilmek için her iki arazide de zemin sondajı yapılmıştır. Sondaj kuyusunda SPT ve presiyometre deneyleri yapılmıştır. Örselenmiş ve örselenmemiş numuneler alınmıştır. Bu numuneler üzerinde çeşitli laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Arazi çalışmalarından elde edilen bulgular aşağıda sunulmaktadır.

4.2.1. A Sahasında Yapılan Arazi Çalışmalarından Elde Edilen Bulgular

Bu sahada 9.0 metre derinliğinde zemin sondajı yapılmıştır ve sondaj kuyusunda belirli derinliklerde SPT ve presiyometre deneyleri tamamlanmıştır. Yapılan sondaj kuyusu verilerine bakıldığında; 0.0-2.5 metre aralığında yapay dolgu, 2.5-5.0 metre aralığında katı, sarımsı kahverengi renkli, siltli kumlu kil, 5.0-6.0 metre aralığında organik malzeme ve 6.0-9.0 metre aralığında katı, sarımsı kahverengi renkli, siltli kumlu kil birimler geçilmiştir. 1.50 metre derinlikteki SPT-1 değeri 14, 3.0 metre derinlikteki SPT-2 değeri 9 ve 6.0 metre derinlikteki SPT-3 değeri ise 13'tür. Sondaj logu Şekil 4.75'te gösterilmektedir.



Şekil 4.75: Sondaj logo (SK-1, A Sahası).

4.2.1.1. İmalat Sırasında Islak Numune Alıcı ile Alınan Numunelerin Deney Sonuçları

Arazide derin karıştırma imalatı sırasında ıslak numune alıcı ile numuneler alınmıştır ve bu numuneler üzerinde basınç testi yapılmıştır. Islak numune alıcı ile alınan numuneler üzerinde yapılan gözlemsel değerlendirmeler neticesinde, numune alıcı manuel kuvvet uygulanarak sadece 2.0-3.0 metre kadar derinliğe indirilebildiği için yüzeyden alınan ıslak numunelerin sadece enjeksiyon içerdiği görülmüştür. Şekil 4.76'da da görüldüğü gibi basınç testi sonucu kırılan numunelerin içeriğinin sadece enjeksiyondan oluştuğu görülmektedir. Numune alıcının içerisinde zemin olmadığı ve ilk birkaç metreden alınan ıslak numunelerin derin karıştırma uygulamasının iyileştirmeyi hedeflediği zemin-çimento karışımını temsil etmediği görülmektedir.

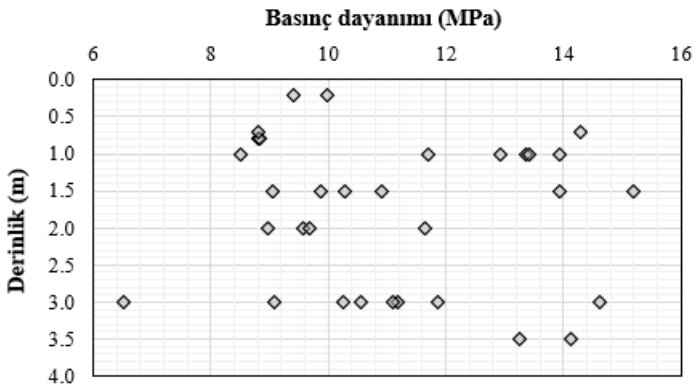


Şekil 4.76: Islak numuneler üzerinde yapılan basınç testi sonucu kırılan numuneler (A Sahası).

Her kolondan alınan iki adet ıslak numune üzerinde 90 gün sonunda yapılan basınç deneyi sonuçları Tablo 4.5'te sunulmaktadır. Şekil 4.77'de ise ıslak numunelerin mukavemetlerinin derinlikle dağılım grafiği verilmektedir. Bu numunelerin basınç değerlerinin 6.0 MPa ve üzeri olduğu görülmektedir.

Tablo 4.5: Kolonlardan alınan ıslak numuneler üzerinde yapılan basınç testi sonuçları (A Sahası).

Kolon No	Basınç Dayanımı (MPa)	
	1. Numune	2. Numune
DSM-1	10.0	9.4
DSM-2	9.9	10.3
DSM-3	9.1	11.1
DSM-4	9.6	11.6
DSM-5	6.5	11.9
DSM-6	10.3	14.6
DSM-7	11.2	10.6
DSM-8	13.3	14.1
DSM-9	13.9	13.4
DSM-10	12.9	11.7
DSM-11	13.4	8.5
DSM-12	13.9	15.2
DSM-13	8.8	8.8
DSM-14	14.3	8.8
DSM-15	10.9	9.1
DSM-16	9.7	9.0



Şekil 4.77: Islak numune alıcı ile alınan numunelerde mukavemet-derinlik değişimi (A Sahası).

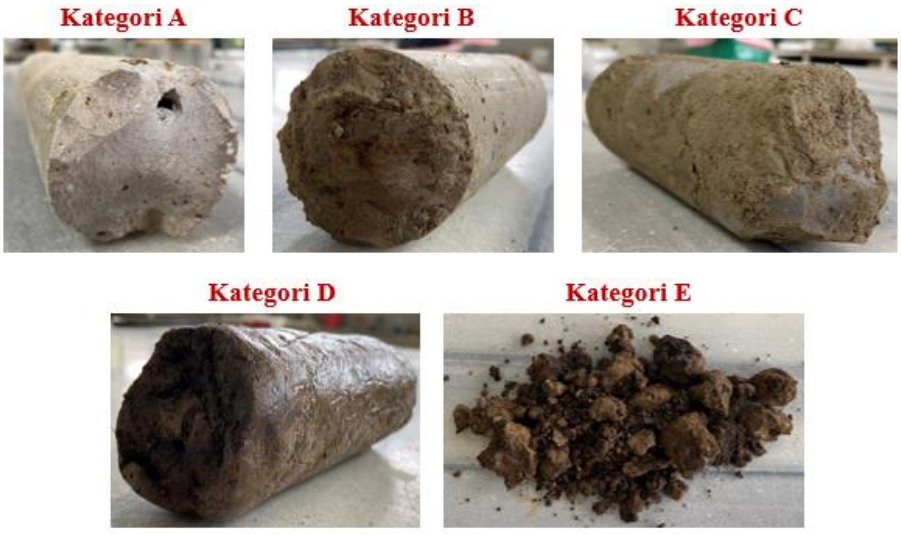
Islak numune alıcı ile alınan tüm sonuçların çok yüksek olduğu görülmektedir. Bu değerler laboratuvarda ölçülmüş DSM mukavemet değerlerinden çok yüksektir. Bu durum, numune alınabilen kotlarda, DSM karışımı değil, enjeksiyon numunesi alınabildiğini göstermektedir. Bu değerler, alınan karışımın DSM karışımını temsil etmediğini göstermektedir.

4.2.1.2. Alınan Tam Boy Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan Çalışmalar

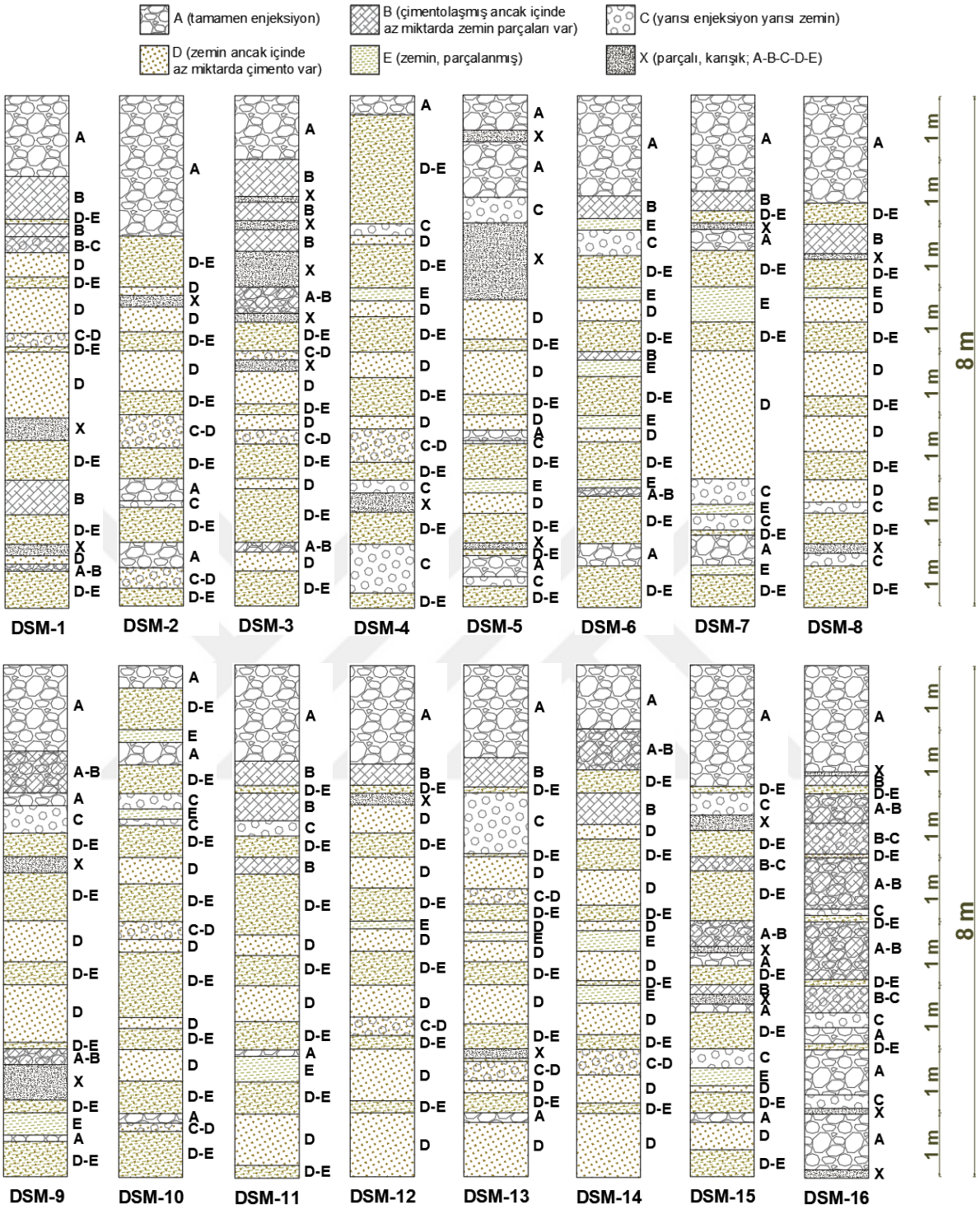
Arazide imalatı tamamlanan on altı adet derin karıştırma kolonlarında yapılan kalite kontrol deneyleri sonrasında bu sahadan alınan 33 adet karot sandığı laboratuvara getirilmiştir. Laboratuvara getirilen karot sandıkları ilk olarak detaylı bir şekilde değerlendirilmiş ve numuneler içeriğine göre görsel olarak sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmaya göre karot sandığındaki numuneler derinlik boyunca kategorize edilerek tüm kolonların profilleri çizilmiştir. Karot sandığındaki numuneler altı faklı kategoriye ayrılmıştır. Bu kategoriler Tablo 4.6'da verilmektedir. Kategorileri temsil eden karot fotoğrafları Şekil 4.78'de görülmektedir. Şekil 4.79'da ise çizilen kolon profilleri gösterilmektedir. Yeterli seviyede iyileşme sağlanamadığı için karot alımı sırasında parçalanan ve su ile birlikte eriyen numuneler kolon profillerinde "D-E" olarak kategorize edilmiştir.

Tablo 4.6: Görsel olarak sınıflandırılan numune kategorileri.

Kategori	Tanımı
Kategori A	Tamamen enjeksiyon
Kategori B	Çimentolaşmış ancak içinde az miktarda zemin var
Kategori C	Yarısı enjeksiyon, yarısı zemin
Kategori D	Zemin ancak içinde az miktarda çimento var
Kategori E	Zemin, parçalanmış
Kategori X	Parçalı, karışık; A-B-C-D-E



Şekil 4.78: Kategorileri temsil eden karot fotoğrafları (A Sahası).



Şekil 4.79: Çizilen kolon profilleri (A sahası).

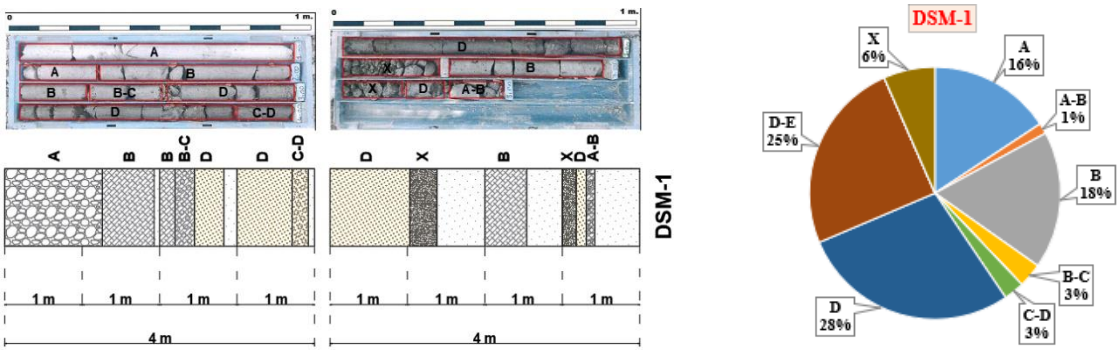
Şekil 4.79'da gösterildiği gibi her kolon için detaylı bir şekilde derinlik boyunca kolon numuneleri incelenmiştir. İnceleme sonucu değerlendirmeler şu şekilde oluşmuştur;

- Kolonlarda süreklilik mevcut olmayabilir. Bu durum kolonların yük altındaki davranışını etkileyecektir.

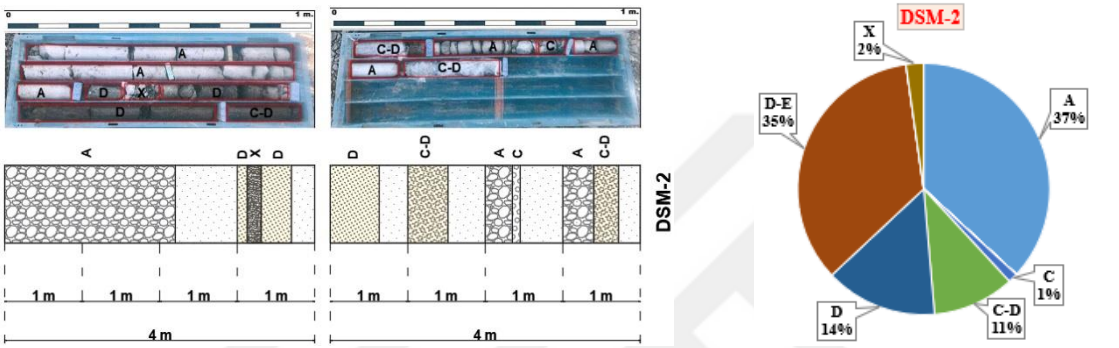
- DSM malzemesi olarak en uygun kategori sırasıyla C ve B olarak belirlenmiştir.
- Bu sahada yapılan kolonlarda ilk 2.0-3.0 m derinlik enjeksiyon malzemesinden (Kategori A) oluşmuştur. Bu durum imalat parametrelerinden bağımsızdır. A kategorisi esasen DSM olarak tanımlanamaz.
- DSM-16 kolonu hariç diğer kolonlarda DSM iyileştirmesi bakımından iyileşmemiş bölgeler (D, E, X, numune kaybı) bulunmaktadır.
- Örneğin doğal zemin profilinde bulunan turba tabakasının DSM-16 kolonu haricinde iyileştirilmediği görülmüştür. Bunun sebebinin imalat sürecinde iniş ve çıkış hızının ve derinlik boyunca zemine verilen enjeksiyon miktarının kontrol edilememiş olduğu düşünülmektedir.
- İki tarama ve dört tarama yapılmış olan son iki kolonda da iyileşme seviyeleri farklılaşmıştır. Son iki kolonda daha büyük miktarda posa oluşmuş olması nedeniyle zeminin dışarıya çıkması ve yerine enjeksiyon malzemesinin yerleşmesi özellikle DSM-16 kolonunun büyük oranla A kategorisinden oluştuğu görülmektedir.
- İmalat parametreleri aynı olan kolonların iyileşme oranlarında farklılık olabildiği görülmektedir. Bunun sebeplerinden birisi arazide imalat sırasında derinlik boyunca reel olarak gerçekleşen iniş hızı, çıkış hızı, dönme hızı, her derinlikte ne seviyede enjeksiyon gönderebildiğine ilişkin bir veri toplayıcıya bağlı olarak imalat yapılmamasıdır.
- İmalatın, parametreleri derinlik boyunca kontrol eden bir süreç içinde yapılmadığı sürece, hangi derinlikte ne olduğu, hangi seviyede gerçekte hangi hızda inildiği, çıkıldığı ve enjeksiyonun hangi seviyelerde yoğun olarak iletildiği veya hangi seviyelerde yeterli miktarda iletilemediğinin anlaşılması mümkün değildir. Bu tür bir kontrol mekanizması olmadığı için operatörün imalat sırasında önlem alması da mümkün olmamaktadır.

4.2.1.3. DSM Kolonlarında İyileştirme Yüzdelerinin Değerlendirilmesi

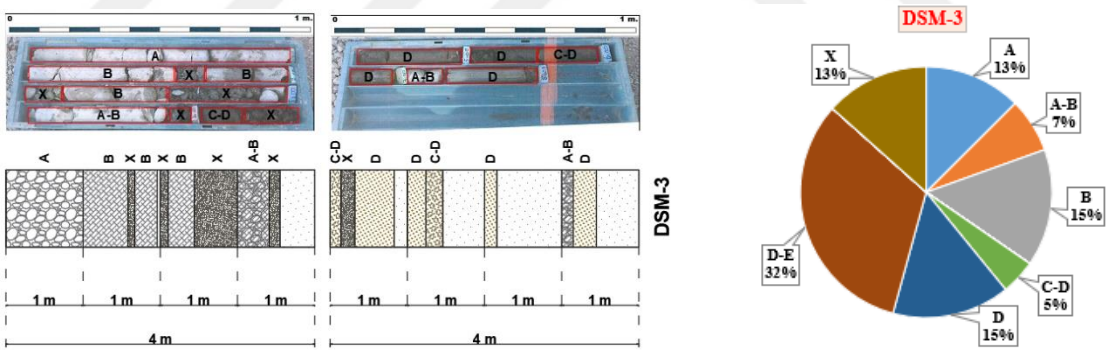
Tüm kolonlar için belirlenmiş kategoriler, karot sandıkları üzerine görsel olarak yerleştirilmiş ve iyileşme oranları yüzdesel olarak belirlenmiştir (Şekil 4.80-4.95). Bu bölgede yapılan çalışmada, kolonların büyük bölümünde BRN sayısından ve kullanılan çimento dozajından bağımsız olarak iyileşme sağlanamadığı görülmüştür. DSM-16 kolonunun karot sandığı hariç diğer karot sandıklarında, yeterli seviyede iyileşme sağlanamadığı için karot alımı sırasında parçalanan ve su ile birlikte eriyen numuneler (D-E) ve D olarak kategorize edilen iyileşmemiş tabii zemin kategorisine giren karotlar büyük bir bölümü oluşturmaktadır.



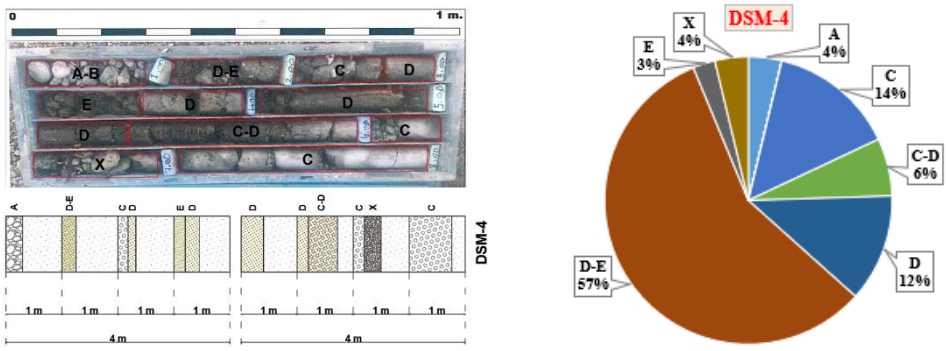
Şekil 4.80: DSM-1 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).



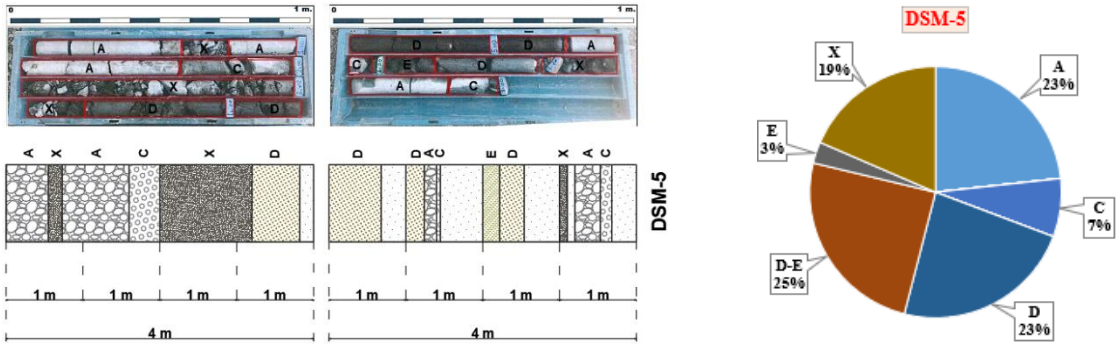
Şekil 4.81: DSM-2 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).



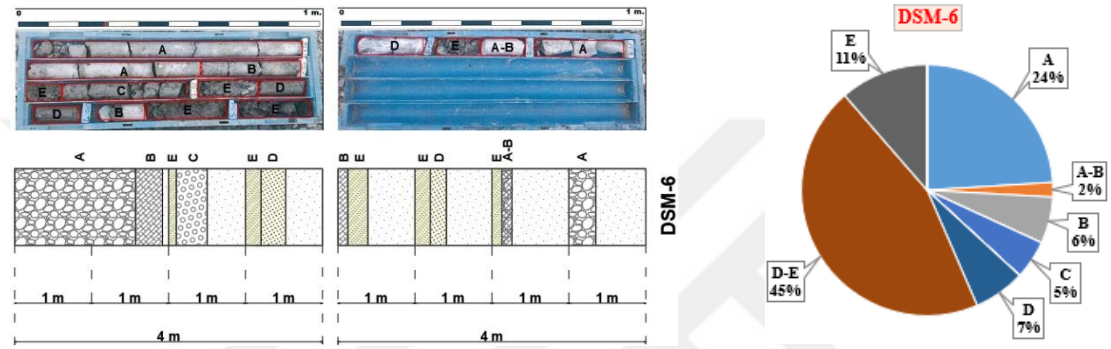
Şekil 4.82: DSM-3 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).



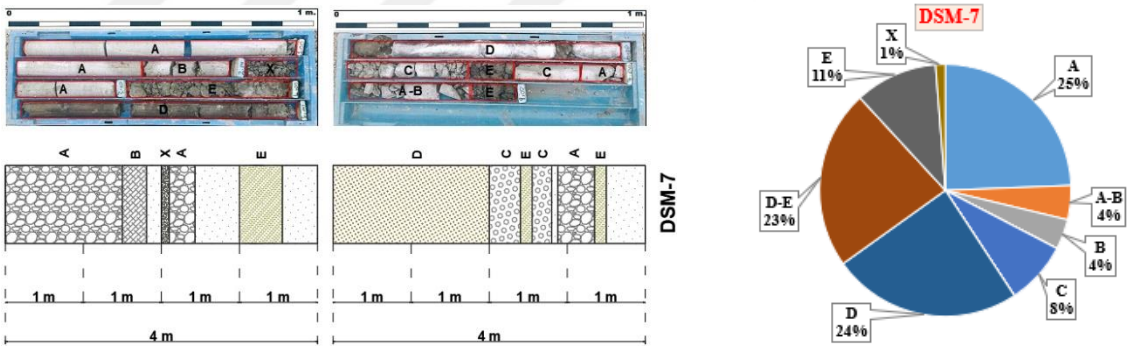
Şekil 4.83: DSM-4 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).



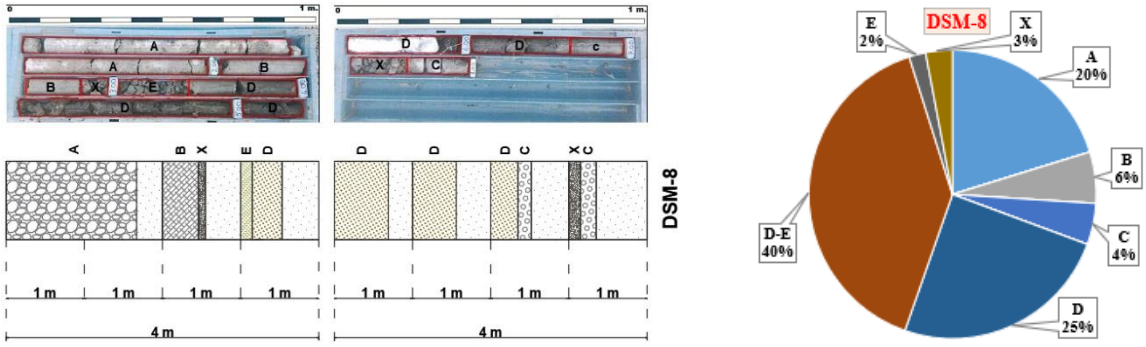
Şekil 4.84: DSM-5 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).



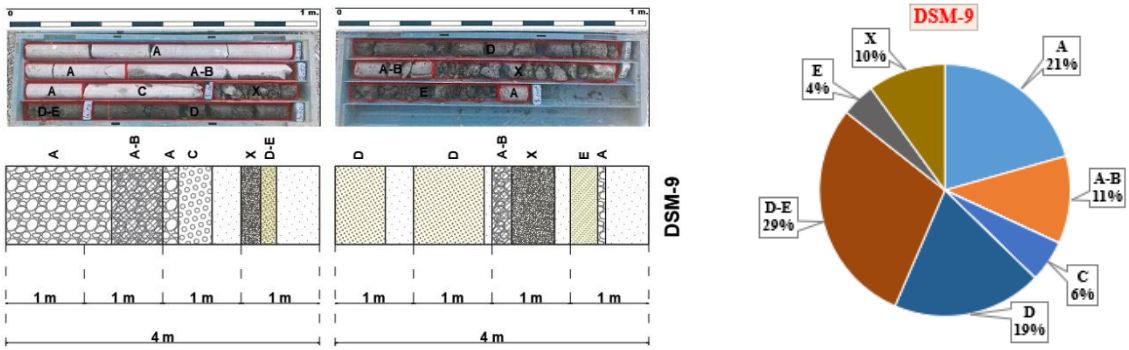
Şekil 4.85: DSM-6 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).



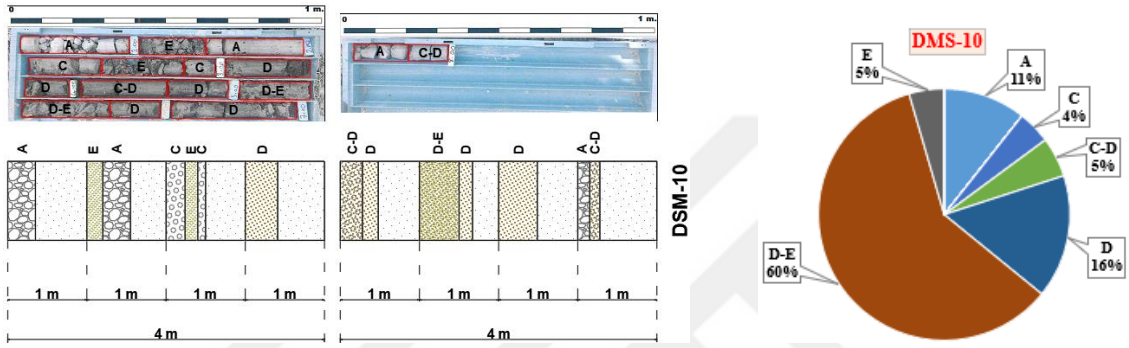
Şekil 4.86: DSM-7 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).



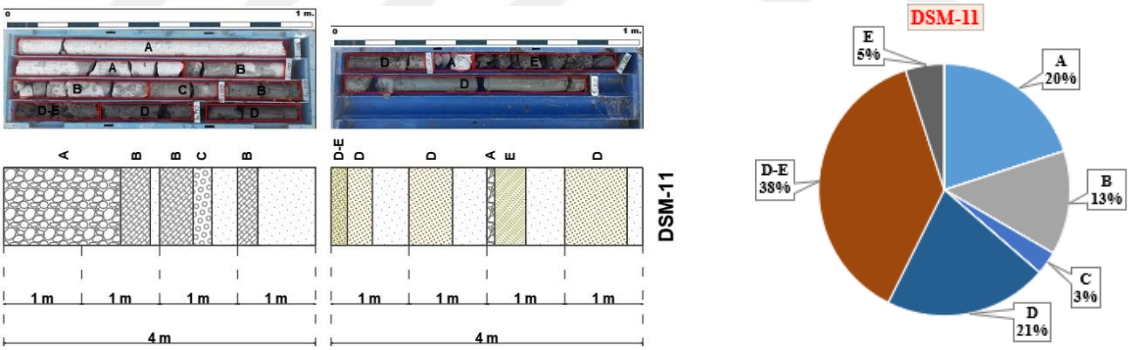
Şekil 4.87: DSM-8 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).



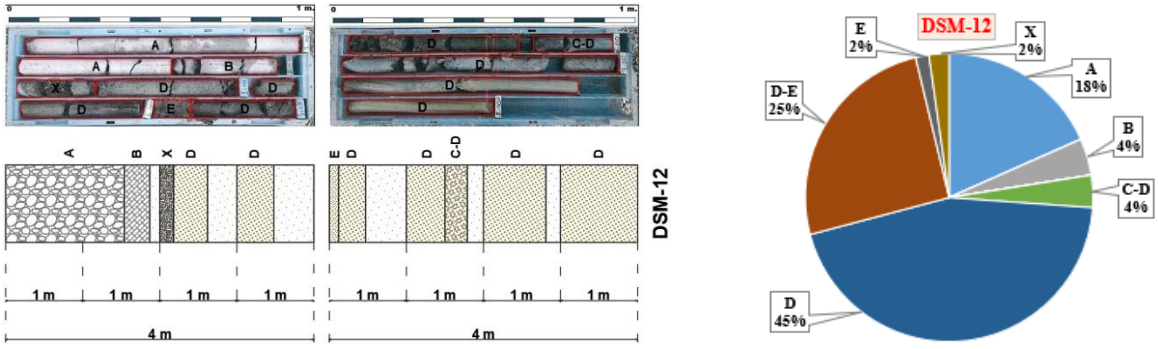
Şekil 4.88: DSM-9 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).



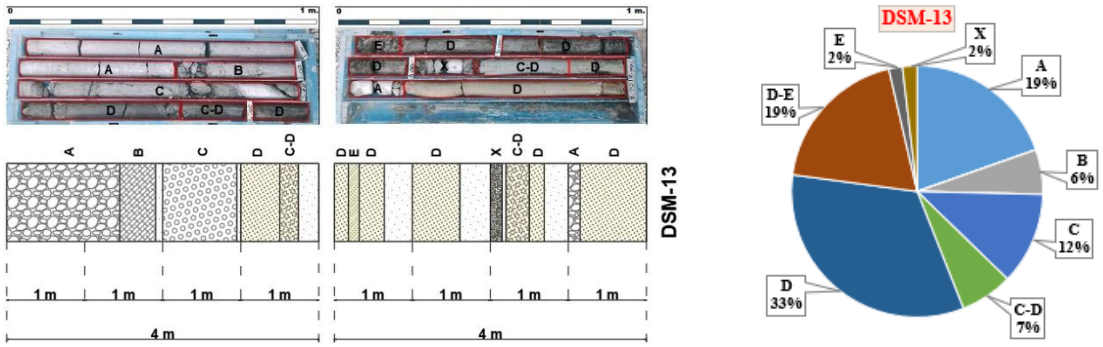
Şekil 4.89: DSM-10 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).



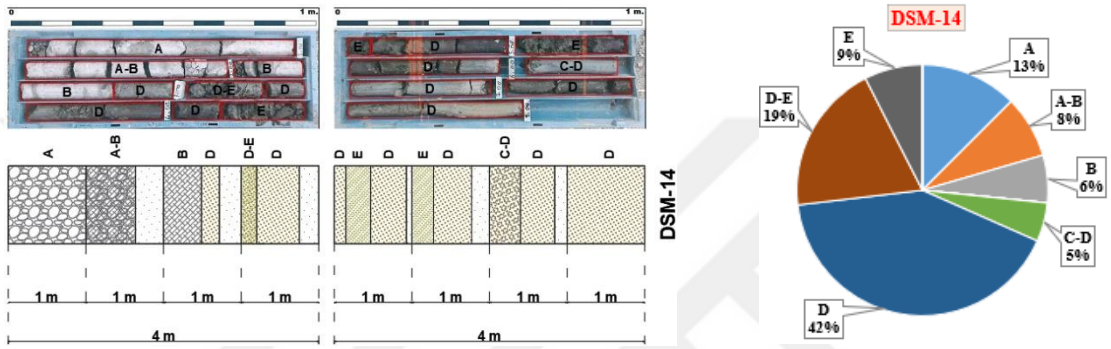
Şekil 4.90: DSM-11 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).



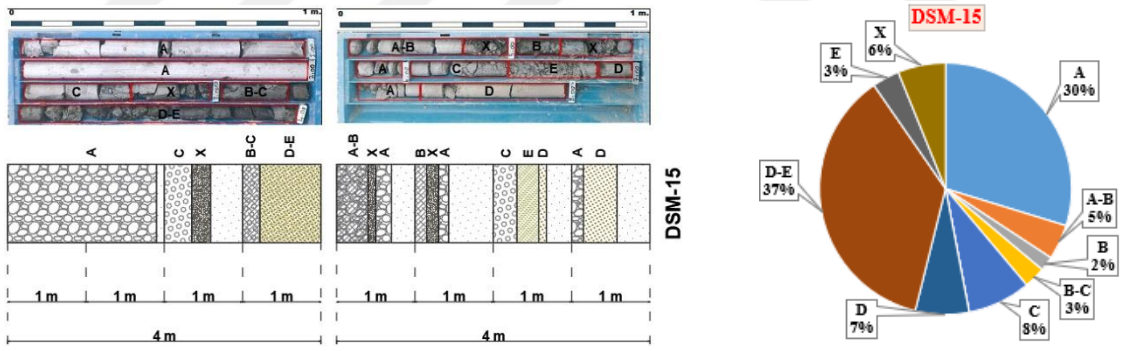
Şekil 4.91: DSM-12 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).



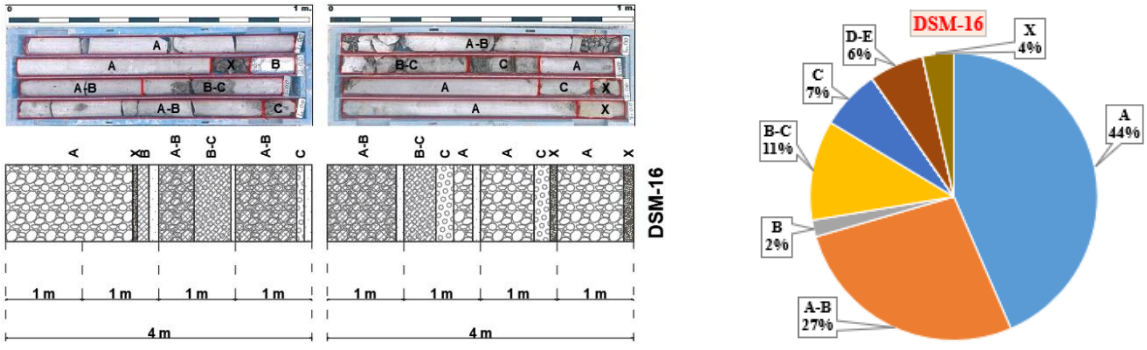
Şekil 4.92: DSM-13 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).



Şekil 4.93: DSM-14 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).



Şekil 4.94: DSM-15 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).



Şekil 4.95: DSM-16 kolonunun değerlendirilmesi (A Sahası).

4.2.1.4. Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan Deneyler

Karot sandıklarındaki numuneler derinlik boyunca tek tek incelenerek numuneler üzerinde hangi deneylerin yapılması gerektiğine karar verilmiştir. Karot sandığı içerisindeki tüm numuneler isimlendirilmiş ve laboratuvar deneyleri için kategorize edilmiştir (Şekil 4.96). Bu numuneler üzerinde yapılan deneyler aşağıda listelenmiştir.

- İndeks deneyleri, bu deneyler iyileştirilen ancak parçalanmış halde çıkarılmış olan numunelerden ve de iyileştirilememiş olan numunelerden yapılmıştır. Gradasyon eğrileri karşılaştırılarak iyileştirme seviyesi ile ilgili değerlendirme yapılmıştır.
- Serbest basınç mukavemeti deneyi, bu deneyler de zemin içeriği yüksek ya da enjeksiyona eşit olarak görünen numuneler üzerinde yapılmıştır. Karot sandıklarından serbest basınç mukavemet deneyi için ayrılan numunelerin yüzeyleri deney yapımına uygun hale getirilebilmek için seramik testeresi ile kesilmiştir. Bazı numuneler kesim aşamasında parçalanmıştır. Şekil 4.97'de bu numunelerin kesimine ait görseller gösterilmektedir.
- Nokta yükleme deneyi, iyileşmiş bölgelerden elde edilen numuneler üzerinde yapılmıştır.
- Zemin sondajından alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde indeks deneyleri ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır.



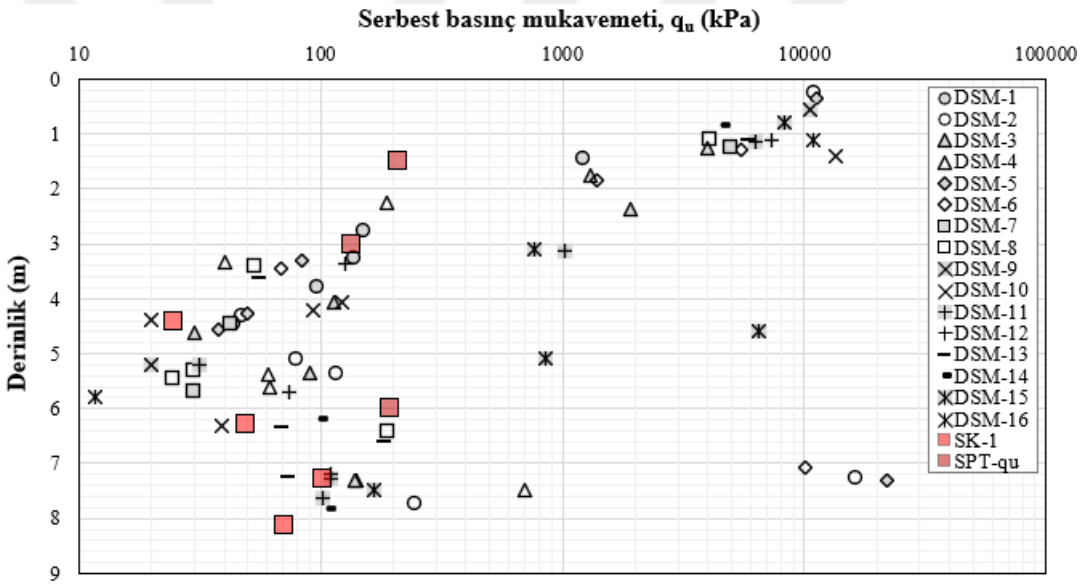
Şekil 4.96: Karot sandıklarındaki numunelerin ayrılması (A Sahası).



Şekil 4.97: Karot sandıklarındaki numunelerin kesimi.

4.2.1.5. Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan Basınç Deneylerinin Sonuçları

Bu sahadan alınan karot numuneleri üzerinde yapılan basınç testlerinin sonuçları aşağıda sunulmaktadır. Şekil 4.98'de bu numunelerin serbest basınç mukavemetlerinin derinlikle değişimi gösterilmektedir. Bu bölgede test edilmiş olan numunelerin büyük bir kısmında yüksek enjeksiyon içeriği olduğu görülmektedir. Daha derinlerdeki bir kısım numune ise enjeksiyonu alamamıştır. Bu durum enjeksiyonun zemin içerisinde homojen dağılamadığını göstermektedir. Enjeksiyon büyük bir ihtimalle (enjeksiyonun verilişi imalat sırasında derinlik boyunca kontrol edilemediği için) bazı bölgelerde toplanmakta, diğer bölgeler enjeksiyondan mahrum kalmaktadır. Bu durumda bu bölgelerdeki zemin, karot sandıklarında da görüldüğü gibi çok düşük mukavemet değerlerinde kalmaktadır. Bu durum, DSM imalatının kolonların büyük bir kısmında başarılı olamadığını göstermektedir.

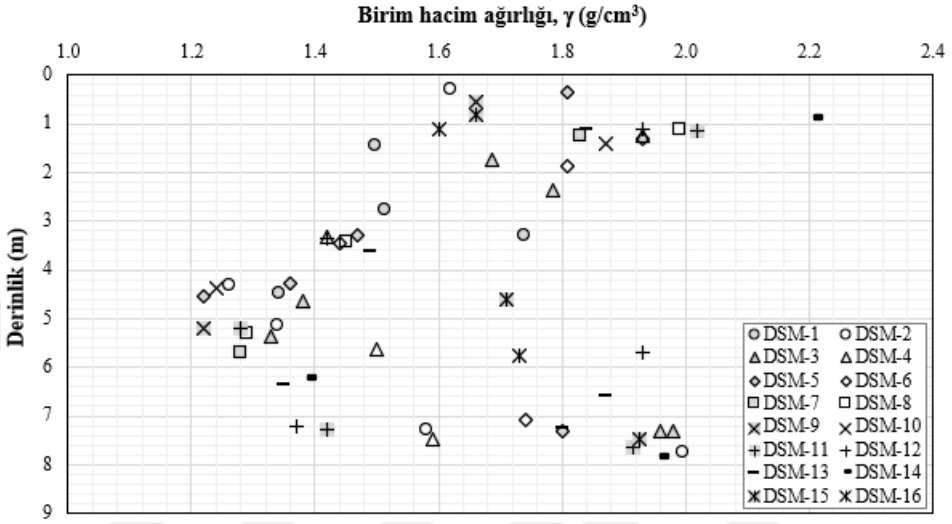


Şekil 4.98: Karot numunelerinin mukavemet değerlerinin derinlikle değişimi (A Sahası).

Şekil 4.99'da ise karot numunelerinin birim hacim ağırlıklarının derinlikle değişimi verilmektedir. Karot numuneleri üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen birim hacim ağırlık değerlerinin 1.2 ila 2.0 g/cm^3 arasında değiştiği görülmektedir ve bunların bir bölümü iyileştirilmemiş zemin örnekleridir.

İyileşmiş bölgelerden elde edilen karot numuneleri üzerinde nokta yükleme deneyleri de yapılmıştır (Şekil 4.100). Şekil 4.101'de karot numuneleri üzerinde yapılan nokta yükleme deney sonuçlarına göre mukavemetin derinlikle değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.102'de ise nokta yükleme deney sonuçları karot numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deney verileri ile birlikte verilmektedir. Şekil 4.102'de görüldüğü gibi bu arazide yapılan nokta yükleme

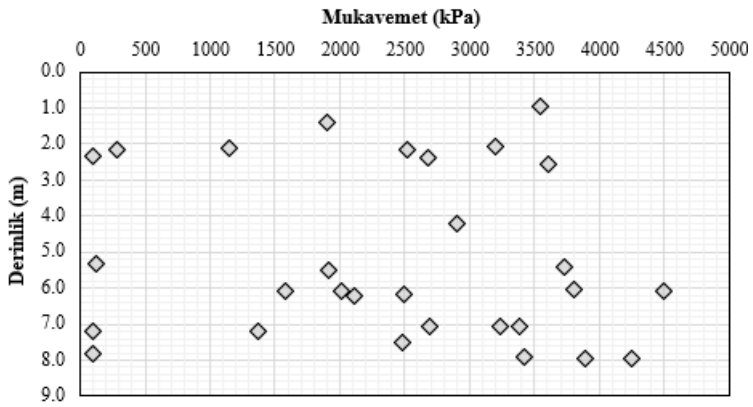
deney verileri çoğunlukla diğer deney sonuçlarına göre daha yüksek dayanım göstermektedir. Bunun nedeni bu arazide imal edilen kolonların bazı bölgelerinde az da olsa aralarda enjeksiyon birikmesidir. Sonuçlar, bu deneyin yapıldığı numunelerin ya sadece enjeksiyon olduğunu ya da zemin-enjeksiyon karışımı numuneler olduğunu göstermektedir. Enjeksiyonun tüm zemin ile homojen karışmadığı, zemin içerisinde yer yer enjeksiyon bölgeleri olduğu görülmektedir.



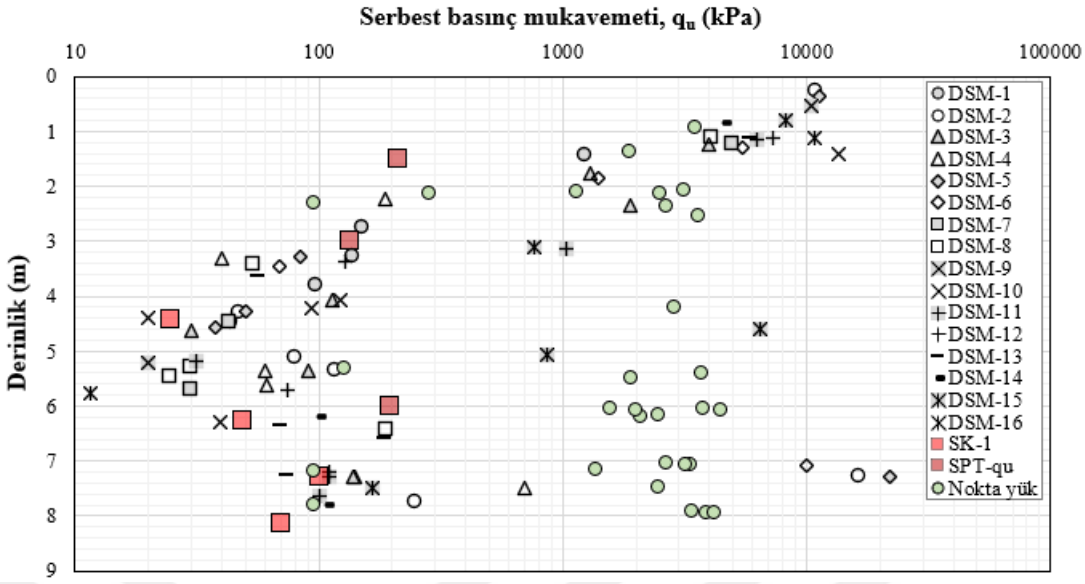
Şekil 4.99: Karot numunelerinin birim hacim ağırlıklarının derinlikle değişimi (A Sahası).



Şekil 4.100: Nokta yükleme deneyi.



Şekil 4.101: Nokta yükleme deney sonuçları (A Sahası).



Şekil 4.102: Nokta yükleme deney verilerinin diğer karot numunelerinin deney sonuçları ile birlikte değerlendirilmesi (A Sahası).

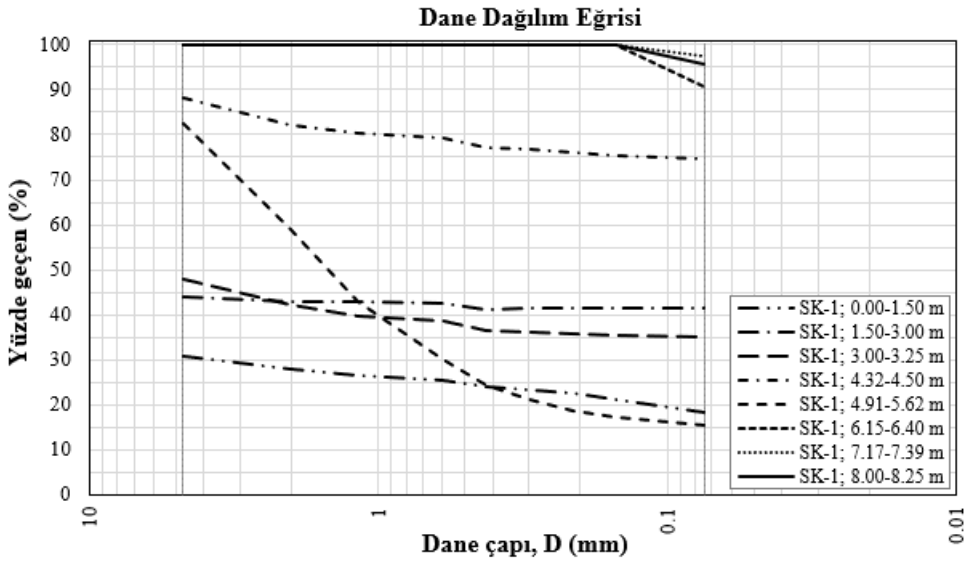
4.2.1.6. Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan İndeks Deneyleri

Zemin sondajından ve tam boy karot alınan kolonlardan seçilen numuneler üzerinde indeks deneyleri yapılmıştır. Sondaj kuyusundan alınan numuneler üzerinde elek analizi, kıvam limit deneyleri ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Kolonlardan seçilen numuneler üzerinde de elek analizi ve kıvam limit deneyleri yapılmıştır. Bu şekilde elek analizleri ve kıvam limiti değerlerinde oluşan farklılıkların iyileştirme seviyesini belirlemenin bir parçası olarak değerlendirilmesi mümkün olabilecektir.

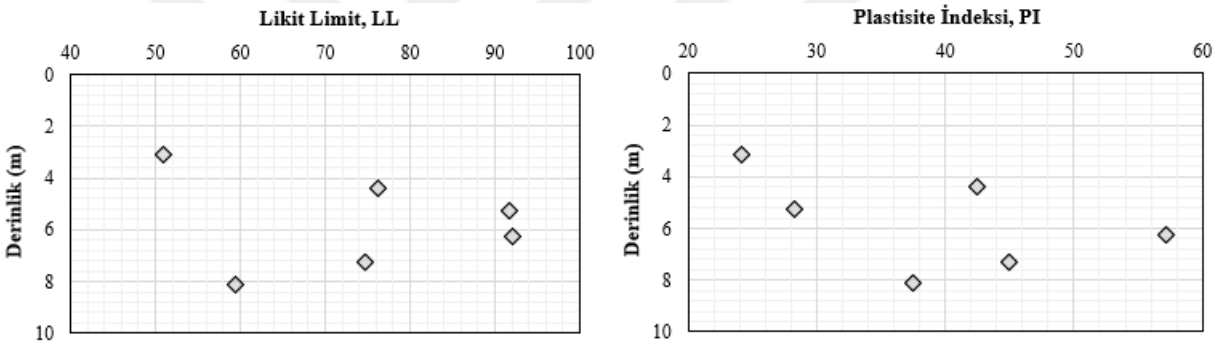
4.2.1.7. Sondaj Kuyusundan Alınan Numuneler Üzerinde Yapılan Deneylerin Sonuçları

Sondaj kuyusundan alınan farklı derinlikteki numuneler üzerinde indeks deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.103'te bu numunelerin elek analizi sonuçları, Şekil 4.104'te numunelerin derinlik boyunca likit limitlerinin ve plastisite indekslerinin değişimleri ve Şekil 4.105'te numunelerin plastisite kartındaki yerleri gösterilmektedir. Görüldüğü gibi sondaj kuyusundan alınan numunelerin neredeyse hepsi CH olarak sınıflandırılmaktadır. Likit Limit değerleri oldukça yüksektir ve %50 ila %100 arasında değişmektedir.

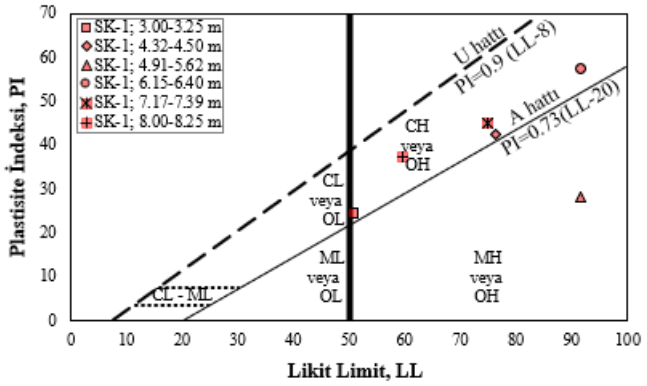
Sondaj sırasında alınan örselenmemiş numuneler üzerinde konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Organik zeminde başlangıç boşluk oranı 4.0 civarında, inorganik zeminde ise 1.2 civarındadır. Organik zeminde sıkışma indisi, C_c=1.1, inorganik zeminde C_c=0.2 olarak hesaplamıştır.



Şekil 4.103: Sondaj kuyusundan alınan farklı derinlikteki numunelerin elek analizi (A Sahası).



Şekil 4.104: Sondaj kuyusunda derinlik boyunca likit limit ve plastisite indeksi değişimi (A Sahası).

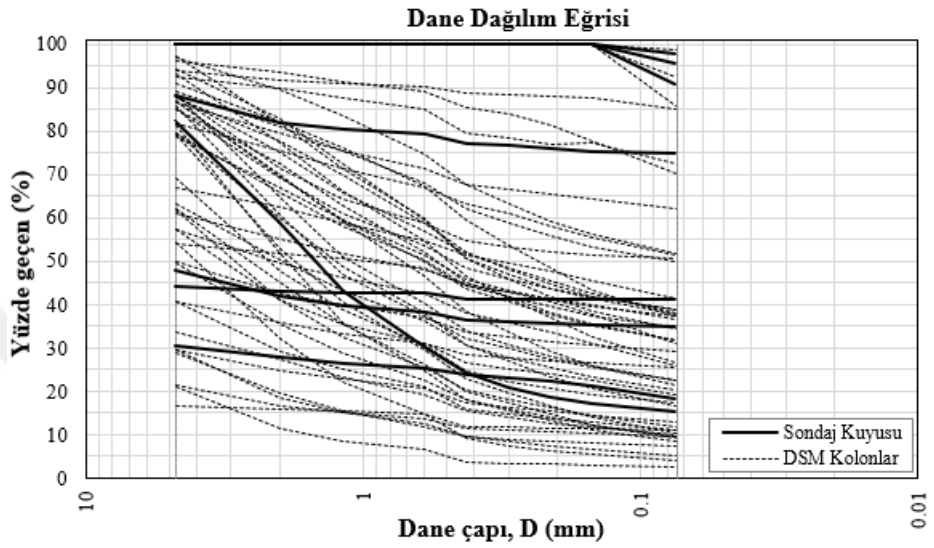


Şekil 4.105: Sondaj kuyusundan alınan farklı derinlikteki numunelerin plastisite kartındaki yerlerinin gösterimi (A Sahası).

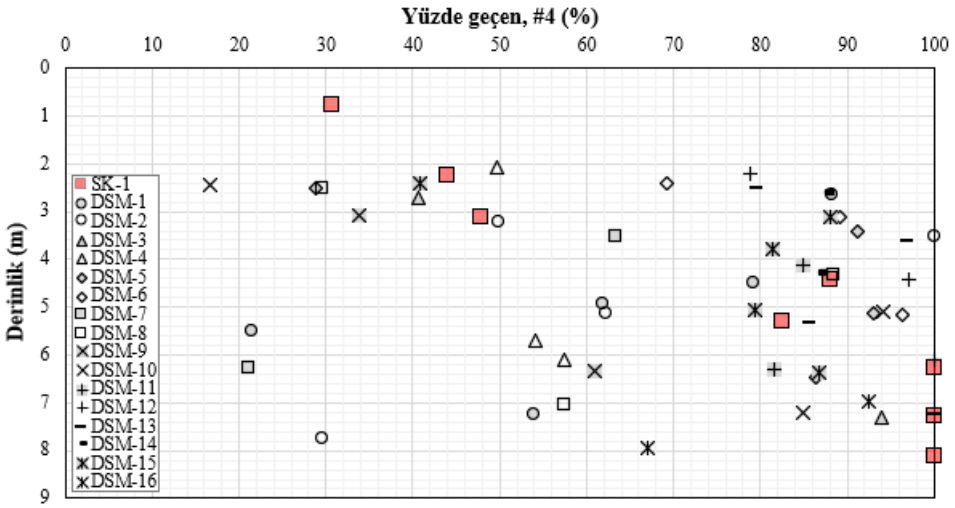
4.2.1.8. Kolonlardan Alınan Numuneler Üzerinde Yapılan İndeks Deneylerinin Sonuçları

İmal edilmiş olan kolonlardan belirli derinliklerde seçilen numuneler üzerinde indeks deneyleri yapılmıştır. Kolon numunelerinin çoğunda, sondaj kuyusundaki doğal zemin numunelerine

kıyasla dane çapı dağılımlarının ve kıvam limitlerinin değiştiği sonucuna varılmıştır. Şekil 4.106'da sondaj kuyusunun ve kolonların dane dağılım eğrileri birlikte gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi elek analizlerinde meydana gelen değişimler kolonlarda bir seviyede iyileşme olduğunu göstermektedir. Şekil 4.107 ve Şekil 4.108'de ise bu numunelerin, 4 nolu (#4) ve 200 nolu (#200) eleklerden geçen yüzdelerinin derinlikle değişimi verilmektedir.

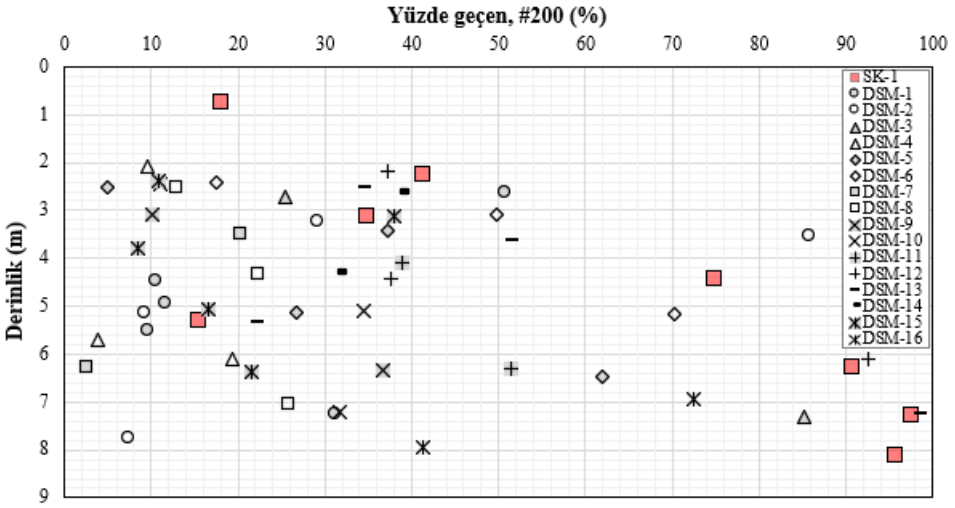


Şekil 4.106: Sondaj kuyusu ve kolon numunelerinin dane dağılım eğrileri (A Sahası).

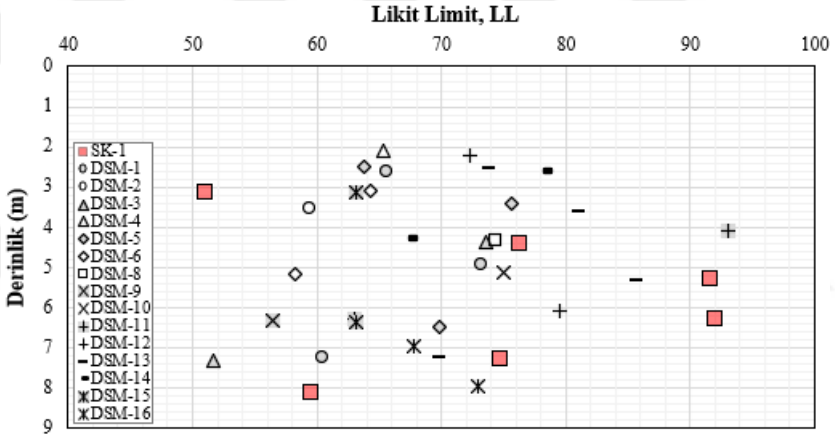


Şekil 4.107: Sondaj kuyusu ve kolon numunelerinin #4 nolu elekten geçen yüzdelerinin derinlikle değişimi (A Sahası).

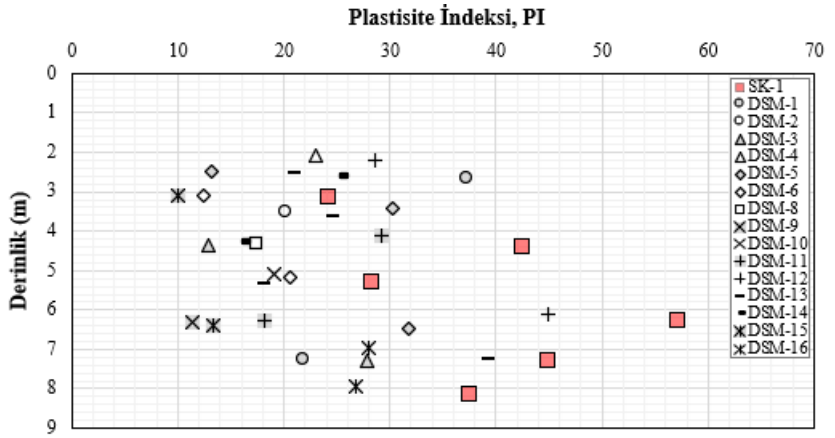
Kıvam limitlerindeki değişiklikler aşağıda verilmektedir. Zemin sınıflarının önemli ölçüde değiştiği görülmektedir (Şekil 4.109, 4.110, 4.111). Özellikle plastisite indeksi değerlerinde oluşan büyük miktardaki düşüşler, çimentonun zemin ile etkileşimi sonucunda oluşmuştur ve buna bağlı olarak zemin sınıfları CH'den, MH sınıfına düşmüştür.



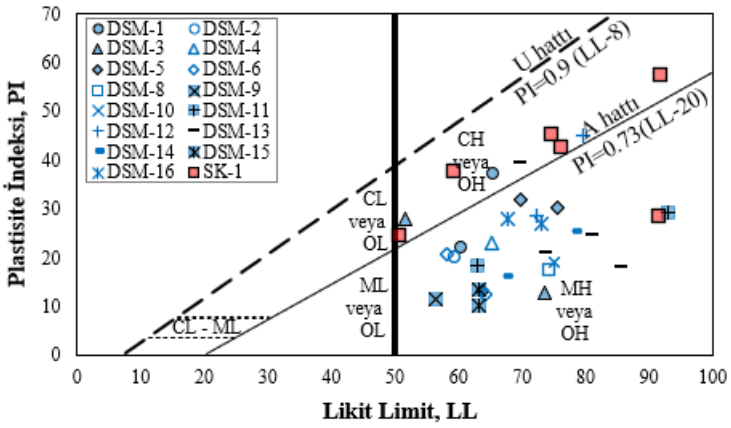
Şekil 4.108: Sondaj kuyusu ve kolon numunelerinin #200 nolu elekten geçen yüzdelerinin derinlikle değişimi (A Sahası).



Şekil 4.109: Numunelerin likit limitlerinin derinlikle değişimi (A Sahası).



Şekil 4.110: Numunelerin plastisite indekslerinin derinlikle değişimi (A Sahası).



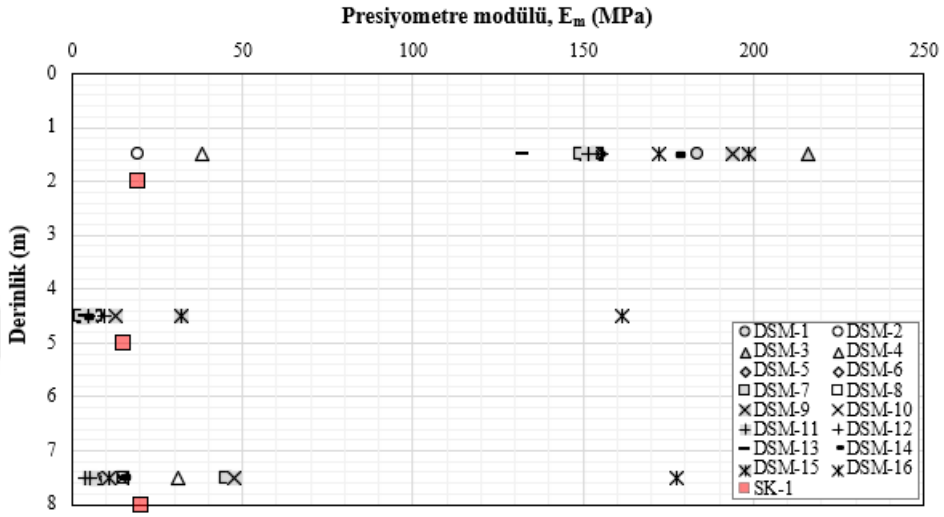
Şekil 4.111: Numunelerin plastisite kartındaki yerleri (A Sahası).

4.2.1.9. Arazide Yapılan Presiyometre Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

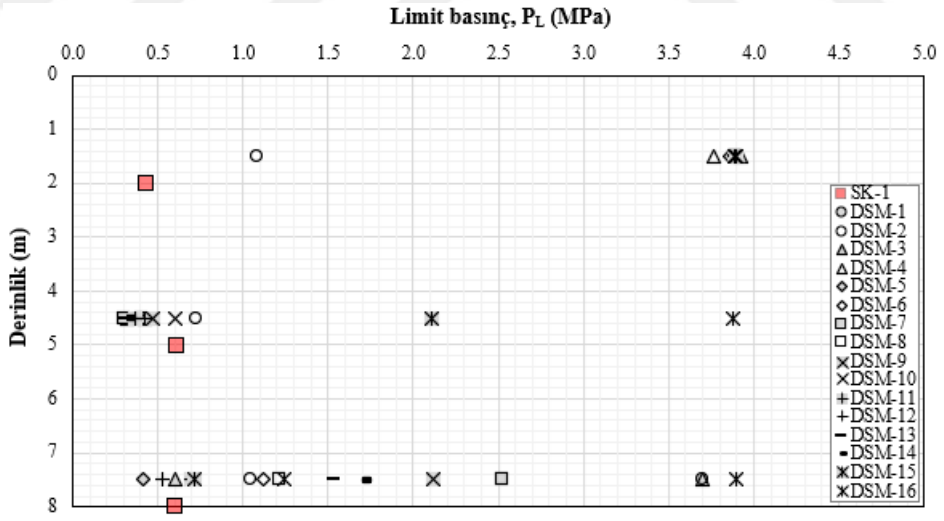
Arazide, kalite kontrol deneyleri kapsamında deneme DSM kolonlarında ve zemin sondajında presiyometre deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda farklı derinliklerde elde edilen presiyometre modülü, limit basınç ve net limit basınç değerleri Şekil 4.112 ve 4.114 arasında grafik olarak sunulmaktadır. Bu deneylerde de özellikle turbanın olduğu zemin tabakasında bir kolon dışında iyileştirme sağlanamadığı görülmektedir. Alt derinliklerde modül değerlerinde artış olmamakla birlikte, limit basınç değerlerinde bir miktar artış görülmektedir.

- DSM kolonlarının üst kotlarındaki yüksek presiyometre modül değerleri Kategori A sınıflandırması ile uyumludur. Esasen yapılan iyileştirme zemin enjeksiyon karışımı değil, enjeksiyonun kendisidir. Karotlarda da bu durum görülmektedir.
- Kategori A olarak sınıflandırılmış karotlarda modül değerlerinin 150 MPa ve üzerinde ve 250 MPa'ın altında olduğu görülmektedir. Aynı şekilde Kategori A için limit basınç değerlerinin 4.0 MPa civarında olduğu kabul edilebilir. Aynı kategori için net limit basınç değerleri de 3.0-4.0 MPa arasındadır.
- Yeterince iyileştirilemeyen zeminlerde yapılan ölçümlerde gerek presiyometre modülünün gerekse limit basınç ve net limit basınç değerlerinin doğal zeminde sondaj içerisinden alınan değerlerle benzer olduğu görülmektedir. Hatta kolon içerisinden ölçülen bazı değerler, doğal zemine nazaran daha küçük bile çıkmıştır. Bunun nedeninin karıştırma nedeniyle oluşan örselenme olduğu düşünülmektedir.
- Tüm bu değerler daha sonra Presiyometre modülü, E_m ile net limit basınç, P_L* ilişkisi için değerlendirilmiştir. Şekil 4.115'te net limit basınç-presiyometre modülü ile ilişkisi verilmektedir. Şekildeki çember içerisinde DSM-16 kolonu boyunca yapılan deney sonuçları ve diğer kolonlarda 1.5 m derinlikte yapılan deney sonuçları gösterilmiştir. Bu

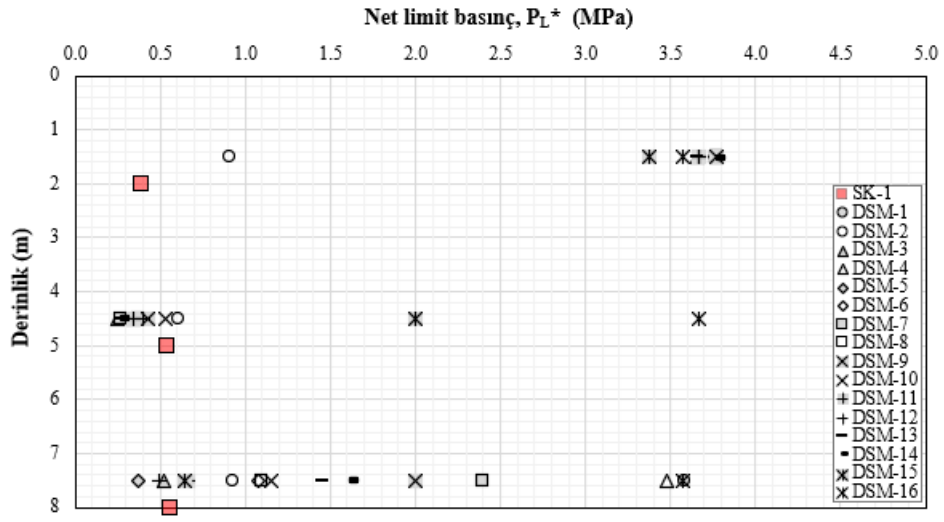
sahada kolon boyu alınan karot numunelerinin yaklaşık ilk 3.0 m'de yüksek bir enjeksiyon içerdiğini, daha derinlerdeki kısımların ise enjeksiyon alamadığı belirtilmişti. Çember içerisindeki bu değerler A grubu olarak tanımlanmış, tamamen enjeksiyon içeren zemini göstermektedir ve A kategorisi için net limit basınç ve presiyometre modülü bakımından tipik değerler olarak kabul edilebilir.



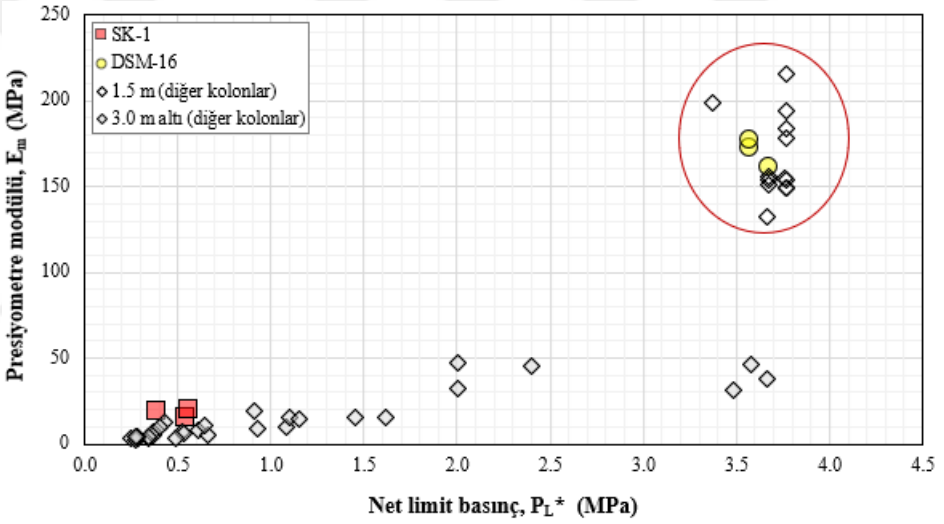
Şekil 4.112: Presiyometre modülünün derinlikle değişimi (A Sahası).



Şekil 4.113: Limit basıncın derinlikle değişimi (A Sahası).



Şekil 4.114: Net limit basıncın derinlikle değişimi (A Sahası).



Şekil 4.115: Presiyometre modülünün net limit basınca bağlı değişimi (A Sahası).

4.2.1.10. Arazide Yapılan Basınçlı Su Testi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

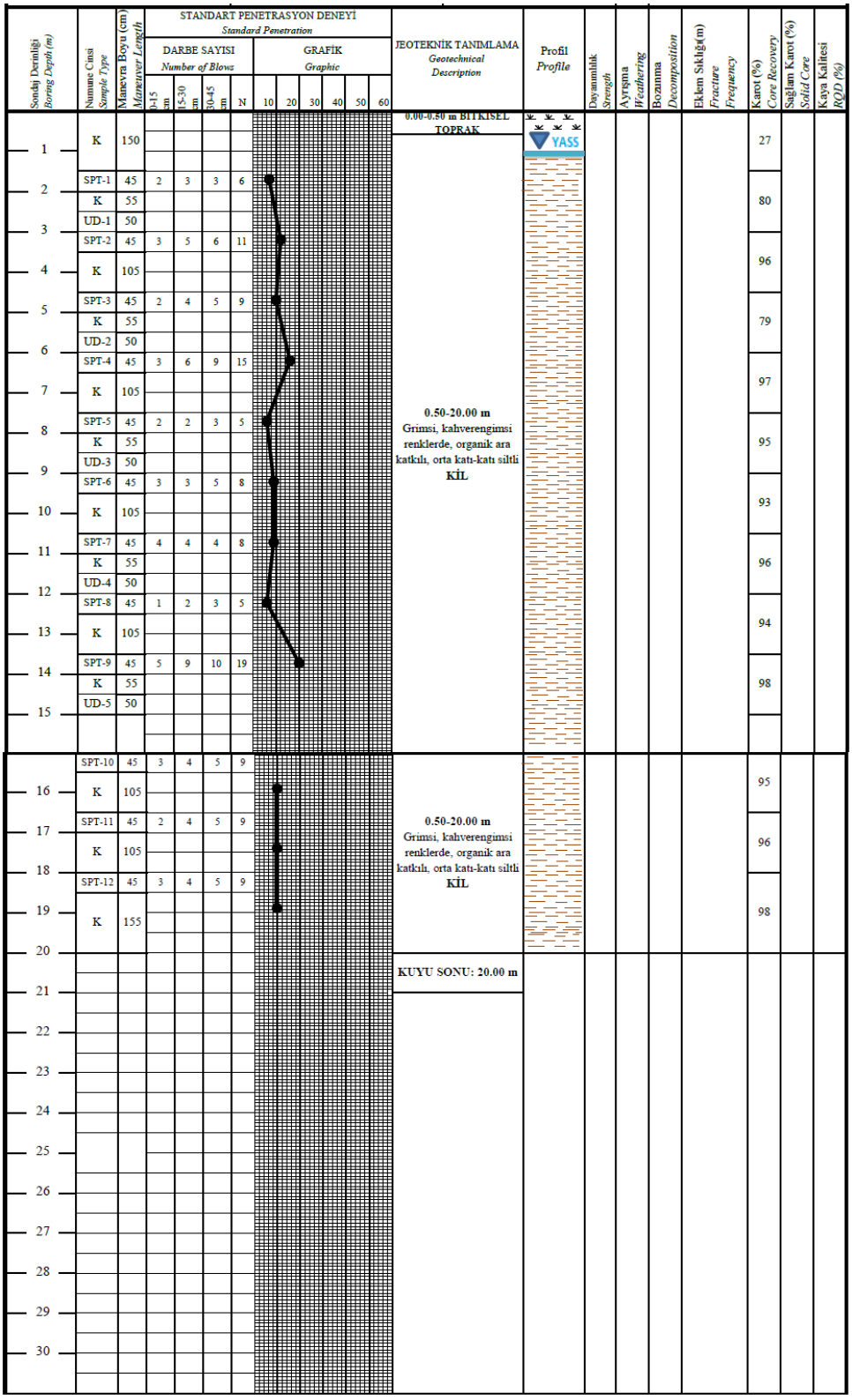
Arazide kalite kontrol deneyleri kapsamında basınçlı su testi deneyi de yapılmıştır. Bu sahada yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.7'de verilmektedir. Bu deney sonuçları permeabilite bakımından da kolonlarda homojenlik olmadığını göstermektedir. Az geçirimli olan bölgelerde çimentolaşmanın daha sağlıklı olduğu, çok geçirimli olan bölgelerde ise DSM'nin oluşmadığı kabul edilebilir.

Tablo 4.7: Basınçlı su testi deney sonuçları (A Sahası).

Kolon No	Derinlik (m)	Geçirimlilik Özelliği
DSM-1	3.00-3.50	Çok geçirimli
	6.00-6.50	Geçirimli
DSM-2	3.00-3.50	Çok geçirimli
	6.00-6.50	Geçirimli
DSM-3	3.00-3.50	Çok geçirimli
	6.00-6.50	Çok geçirimli
DSM-4	3.00-3.50	Çok geçirimli
	6.00-6.50	Geçirimli
DSM-5	3.00-3.50	Çok geçirimli
	6.00-6.50	Az geçirimli
DSM-6	3.00-3.50	Çok geçirimli
	6.00-6.50	Az geçirimli
DSM-7	3.00-3.50	Geçirimli
	6.00-6.50	Geçirimli
DSM-8	3.00-3.50	Az geçirimli
	6.00-6.50	Az geçirimli
DSM-9	3.00-3.50	Çok geçirimli
	6.00-6.50	Çok geçirimli
DSM-10	3.00-3.50	Çok geçirimli
	6.00-6.50	Geçirimli
DSM-11	3.00-3.50	Çok geçirimli
	6.00-6.50	Az geçirimli
DSM-12	3.00-3.50	Çok geçirimli
	6.00-6.50	Az geçirimli
DSM-13	3.00-3.50	Çok geçirimli
	6.00-6.50	Geçirimli
DSM-14	3.00-3.50	Çok geçirimli
	6.00-6.50	Geçirimli
DSM-15	3.00-3.50	Az geçirimli
	6.00-6.50	Geçirimli
DSM-16	3.00-3.50	Az geçirimli
	6.00-6.50	Az geçirimli

4.2.2. B Sahasında Yapılan Arazi Çalışmalarından Elde Edilen Bulgular

Bu sahada 20.0 m derinliğinde zemin sondajı yapılmıştır ve sondaj kuyusunda belirli derinliklerde SPT ve presiyometre deneyleri tamamlanmıştır. Yapılan sondaj kuyusu verilerine bakıldığında; 0.0-0.5 metre aralığında bitkisel toprak, 0.5-20.0 metre aralığında grimsi, kahverengimsi renklerde, organik ara katkılı, orta katı-katı siltli kil birimler geçilmiştir. 1.50 metre derinlikteki SPT-1 değeri 6, 3.0 metre derinlikteki SPT-2 değeri 11, 4.5 metre derinlikteki SPT-3 değeri 9, 6.0 metre derinlikteki SPT-4 değeri 15, 7.5 metre derinlikteki SPT-5 değeri 5, 9.0 metre derinlikteki SPT-6 değeri 8, 10.5 metre derinlikteki SPT-7 değeri 8, 12.0 metre derinlikteki SPT-8 değeri 5, 13.5 metre derinlikteki SPT-9 değeri 19, 15.5 metre derinlikteki SPT-10 değeri 9, 16.5 metre derinlikteki SPT-11 değeri 9 ve 18.0 metre derinlikteki SPT-12 değeri ise 9'dur. Sondaj logu Şekil 4.116'da gösterilmektedir.



Şekil 4.116: Sondaj logo (SK-1, B Sahası).

4.2.2.1. İmalat Sırasında Islak Numune Alıcı ile Alınan Numunelerin Deney Sonuçları

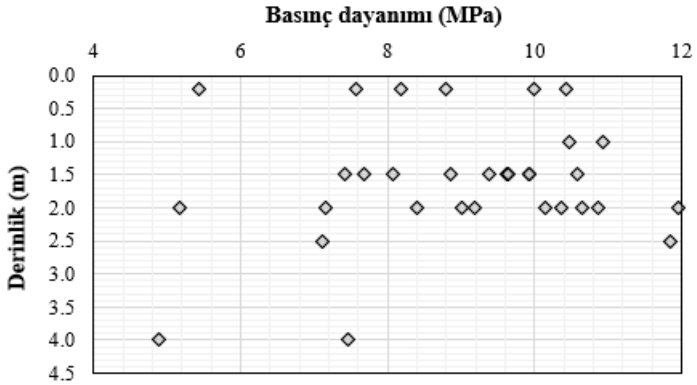
Bu sahada da ıslak numune alıcı ile alınan numuneler üzerinde yapılan gözlemsel değerlendirmeler neticesinde numune alıcı manuel kuvvet uygulanarak sadece 2.0-3.0 metre

kadar derinliğe indirilebildiği için yüzeyden alınan ıslak numunelerin sadece enjeksiyon içerdiği görülmüştür. Kırılan numunelerde de içeriğin büyük ölçüde enjeksiyondan oluştuğu görülmektedir. Numune alıcının içerisinde zemin olmadığı ve yüzeyden alınan ıslak numunelerin derin karıştırma uygulamasının iyileştirmeyi hedeflediği zemin-çimento karışımını temsil edemediği düşünülmektedir.

Bu sahada da her kolondan alınan iki adet ıslak numune üzerinde 90 gün sonunda yapılan basınç deneyi sonuçları Tablo 4.8'de sunulmaktadır. Şekil 4.117'de ise ıslak numunelerin mukavemetlerinin derinlikle dağılım grafiği verilmektedir. Numunelerin basınç değerlerinin genellikle 7.0 MPa ve üzeri olduğu görülmektedir. Esasen bu değerler DSM ile iyileştirilen numunelere göre çok yüksek değerlerdir, bu nedenle gerçek DSM malzemesini temsil ettiği düşünülmemektedir.

Tablo 4.8: Kolonlardan alınan ıslak numuneler üzerinde yapılan basınç testi sonuçları (B Sahası).

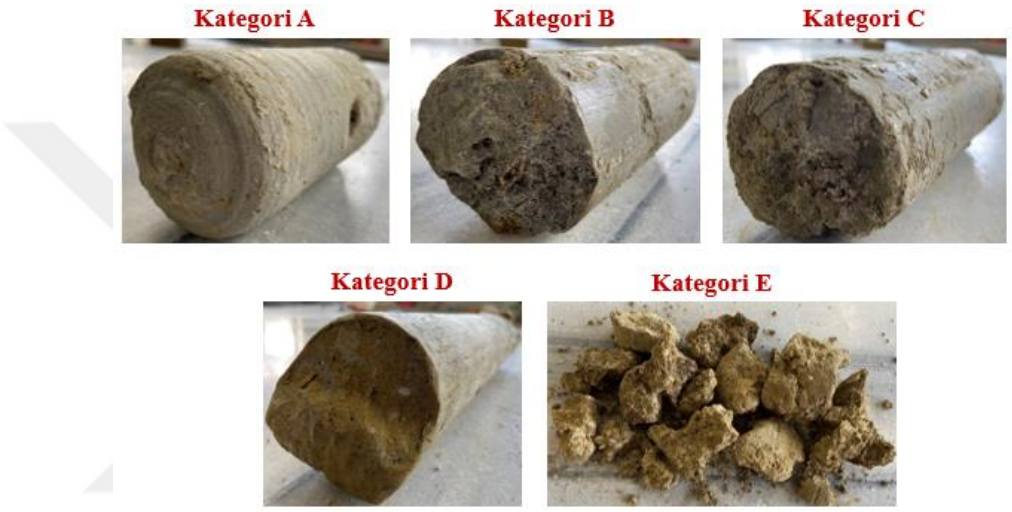
Kolon No	Basınç Dayanımı (MPa)	
	1. Numune	2. Numune
DSM-1	5.4	8.8
DSM-2	10.0	10.4
DSM-3	10.9	10.5
DSM-4	8.9	7.7
DSM-5	9.9	9.6
DSM-6	8.1	9.7
DSM-7	9.9	7.4
DSM-8	4.9	7.5
DSM-9	5.2	10.9
DSM-10	9.2	10.4
DSM-11	7.1	11.8
DSM-12	8.4	7.2
DSM-13	9.0	10.2
DSM-14	10.6	9.4
DSM-15	10.6	12.0
DSM-16	8.2	7.6



Şekil 4.117: Islak numune alıcı ile alınan numunelerde mukavemet-derinlik değişimi (B Sahası).

4.2.2.2. Alınan Tam Boy Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan Çalışmalar

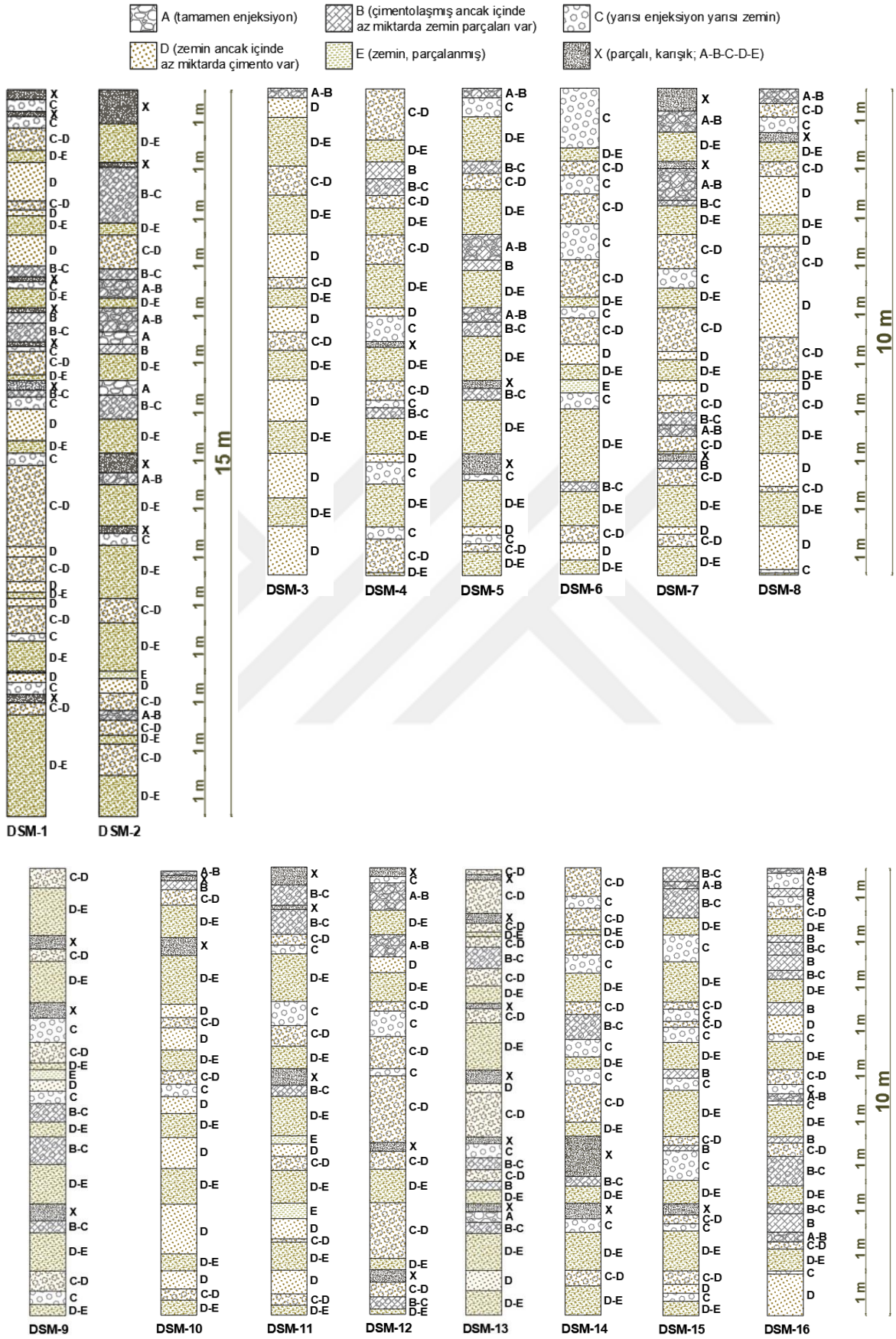
Arazide imalatı tamamlanan on altı adet derin karıştırma kolonlarında yapılan kalite kontrol deneyleri sonrasında bu sahadan 39 adet karot sandığı laboratuvara getirilmiştir. Bu karot sandıkları da ilk olarak detaylı bir şekilde incelenmiş ve numuneler içeriğine göre görsel olarak sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmaya göre karot sandığındaki numuneler derinlik boyunca Tablo 4.6'da belirtilen kategorilere göre ayrılmış ve kolonların profilleri bu sahadaki kolonlar için de çizilmiştir. Bu saha için kategorileri temsil eden karot fotoğrafları Şekil 4.118'de görülmektedir. Şekil 4.119'da ise çizilen kolon profilleri gösterilmektedir.



Şekil 4.118: Kategorileri temsil eden karot fotoğrafları (B Sahası).

Şekil 4.119'da gösterildiği gibi her kolon için son derece detaylı bir şekilde derinlik boyunca kolon numuneleri incelenmiştir. Bu sahada yapılan kolonlarda kolon derinlikleri boyunca iyileştirme olmuştur ancak iyileşme seviyeleri farklıdır. Genel değerlendirmeler aşağıda verilmektedir;

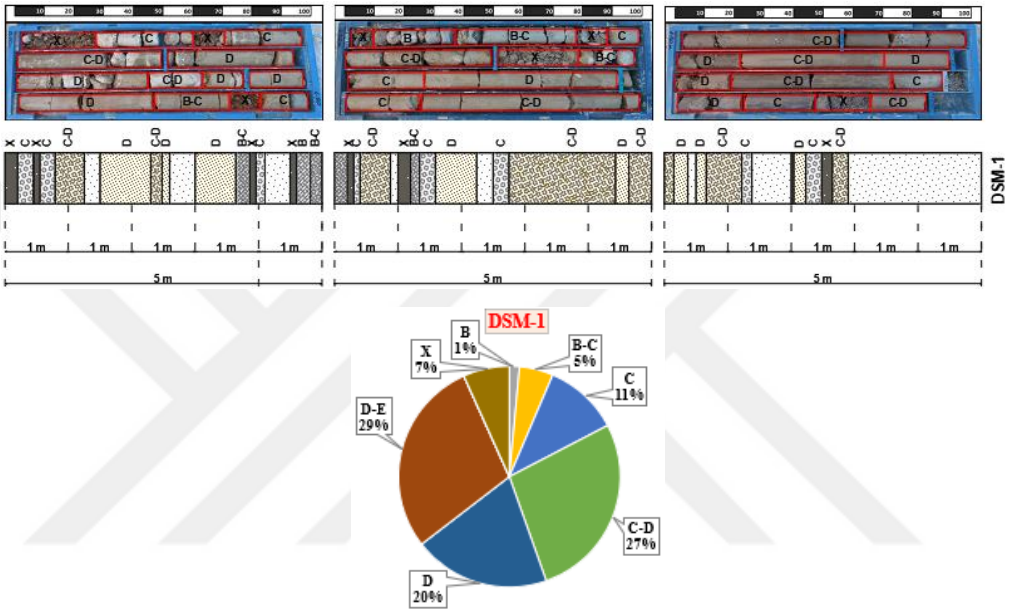
- Kolonların tümünde kolon boyunca iyileştirme seviyeleri farklıdır.
- İmalat değişkenlikleri ve oluşan kolon kalitesi arasında bir bağ görülmemektedir.
- Bazı kolonlarda iyileşmemiş ve D kategorisine giren çok sayıda derinlik mevcuttur.
- Daha fazla çimento kullanılması daha iyi kolon oluşmasını sağlayamamıştır.
- Üç numaralı kolonda (DSM-3) imalat sırasında çok miktarda enjeksiyon malzemesinin dışarıya çıktığı görülmüş idi. Bunun etkisi oluşan kolonda da görülmüştür. Üç numaralı kolonda büyük miktarda boşluklar ve iyileşmemiş zeminler görülmektedir.
- Taramalı olarak yapılan DSM-1 - DSM-2, DSM-5 - DSM-6 ve DSM-15 - DSM-16 nolu kolonlarda da süreklilik görülmemektedir.



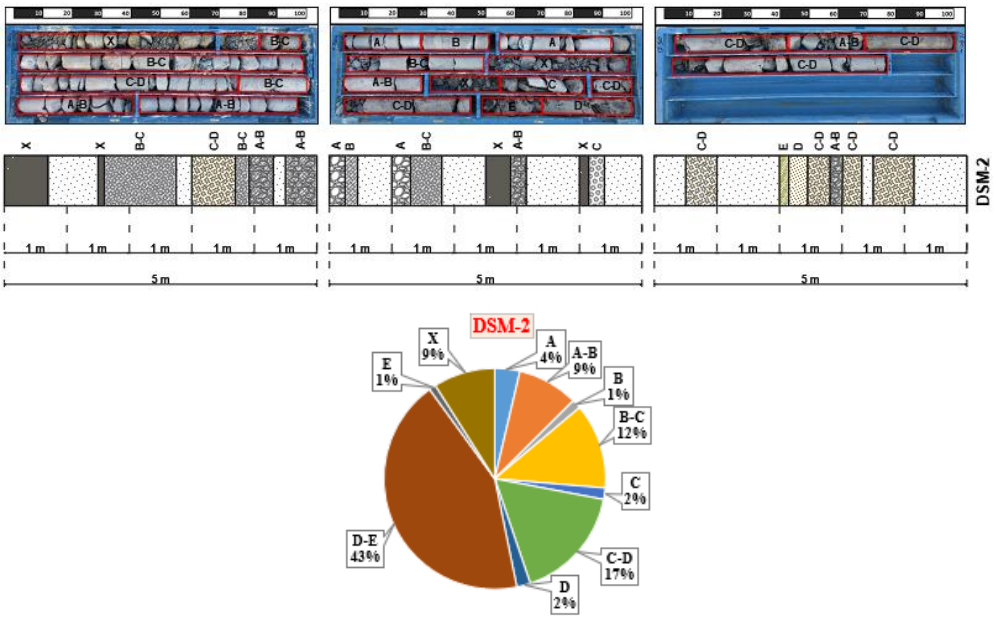
Şekil 4.119: Çizilen kolon profilleri (B sahası).

4.2.2.3. DSM Kolonlarında İyileştirme Yüzdelerinin Değerlendirilmesi

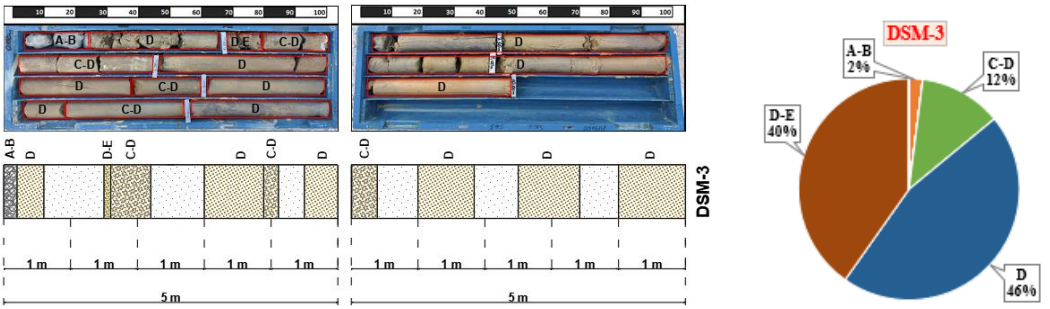
Bu sahada da tüm kolonlar için belirlenmiş kategoriler, karot sandıkları üzerine görsel olarak yerleştirilmiş ve iyileşme oranları yüzdesel olarak belirlenmiştir (Şekil 4.120-4.135). Görüldüğü üzere imalat parametresi aynı olan bazı kolonların iyileşme oranları farklılık göstermektedir. Bunun sebebinin arazide DSM makinesinin imalat sırasında derinlik boyunca reel olarak gerçekleşen iniş hızı, çıkış hızı, dönme hızı, her derinlikte ne seviyede enjeksiyon gönderebildiğine ilişkin bir veri toplayıcıya sahip olmadığı düşünülmektedir.



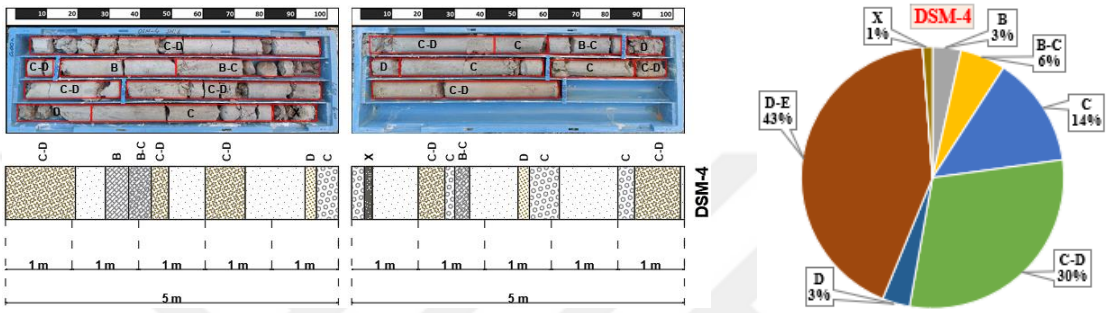
Şekil 4.120: DSM-1 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası).



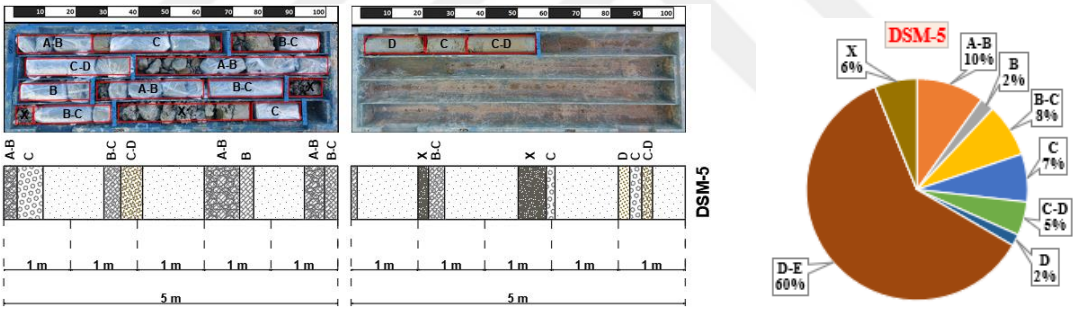
Şekil 4.121: DSM-2 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası).



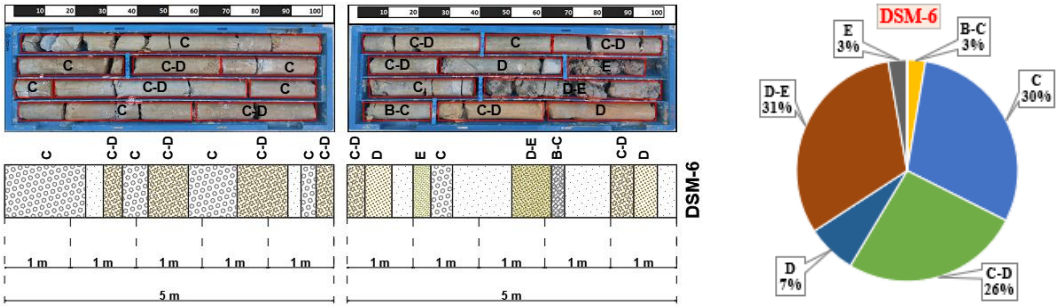
Şekil 4.122: DSM-3 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası).



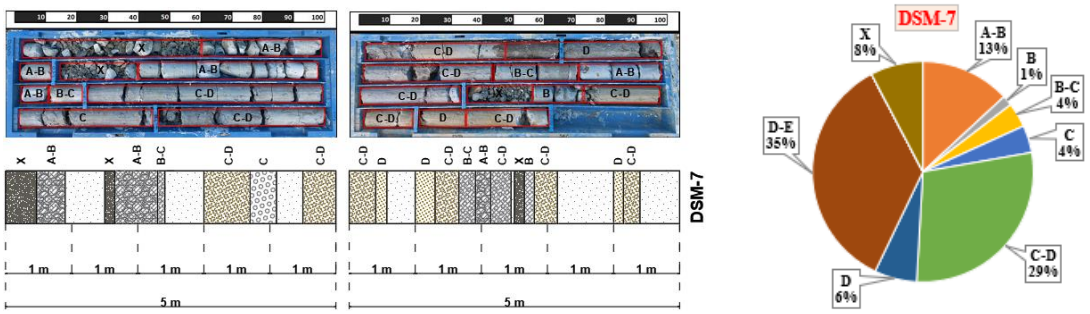
Şekil 4.123: DSM-4 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası).



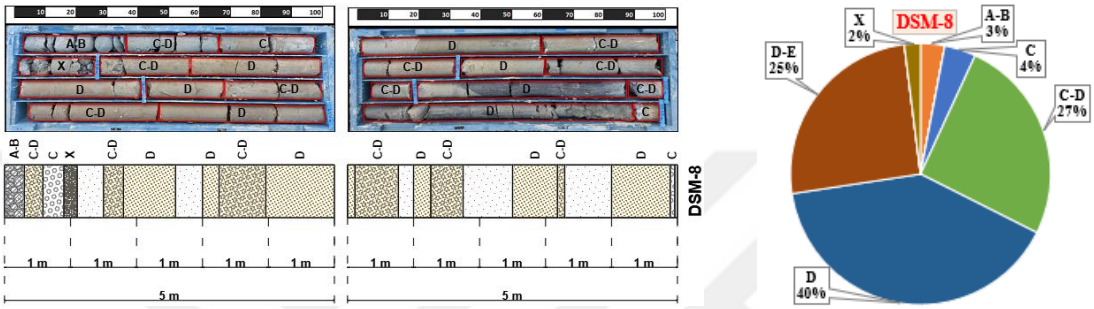
Şekil 4.124: DSM-5 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası).



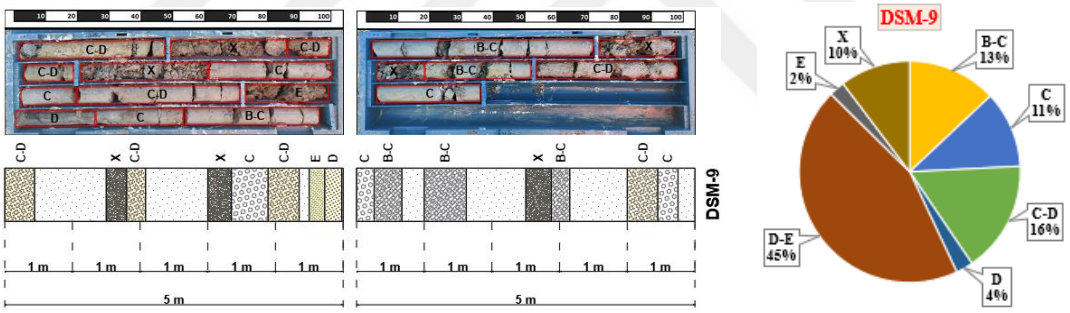
Şekil 4.125: DSM-6 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası).



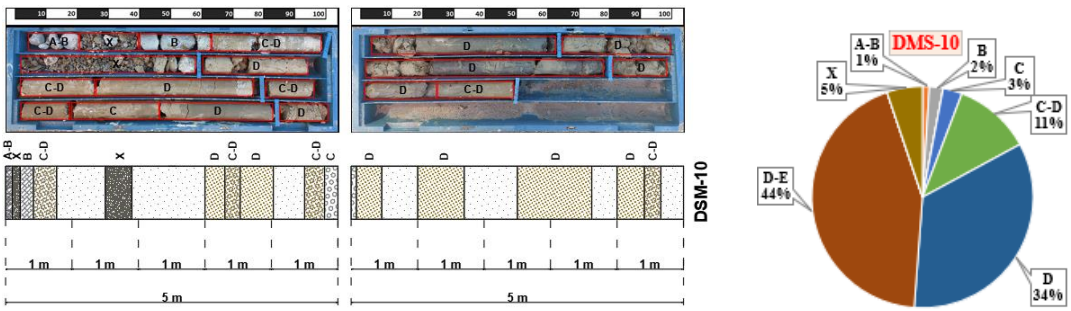
Şekil 4.126: DSM-7 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası).



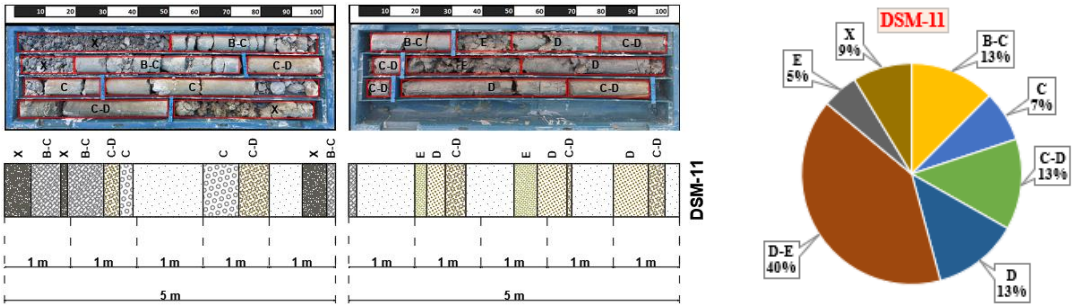
Şekil 4.127: DSM-8 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası).



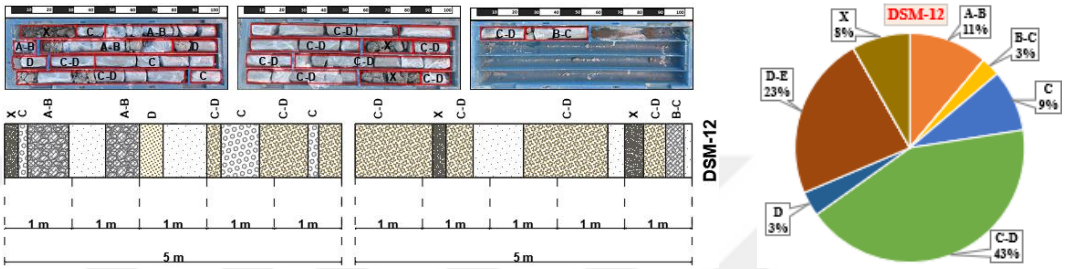
Şekil 4.128: DSM-9 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası).



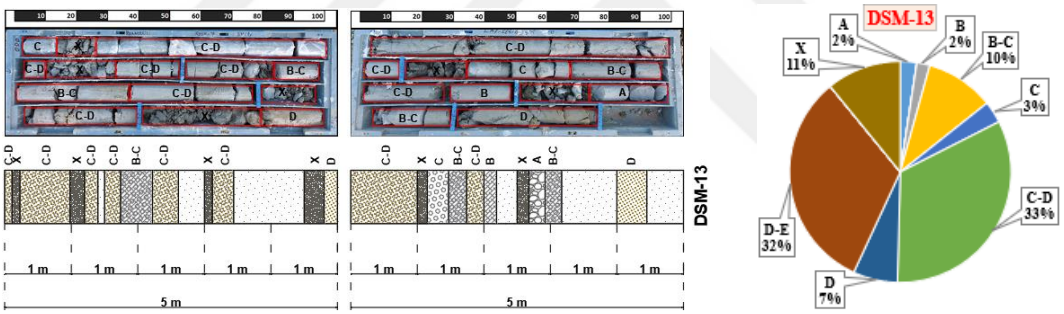
Şekil 4.129: DSM-10 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası).



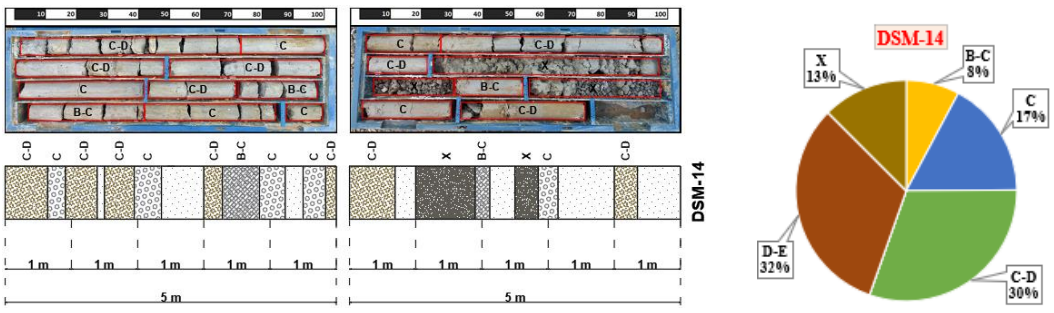
Şekil 4.130: DSM-11 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası).



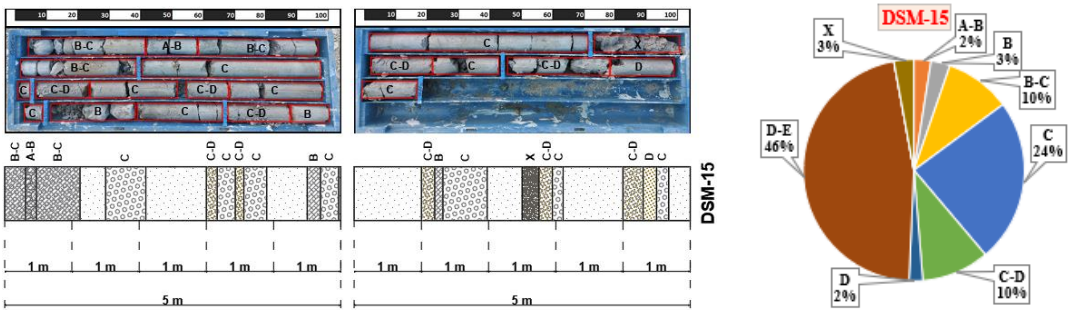
Şekil 4.131: DSM-12 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası).



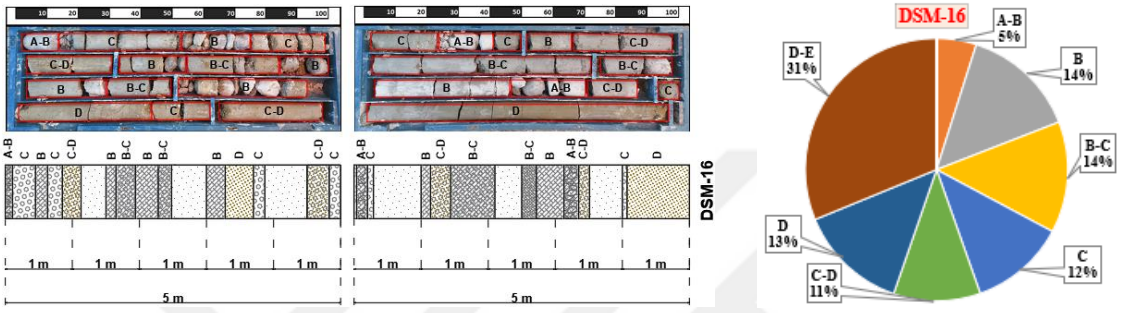
Şekil 4.132: DSM-13 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası).



Şekil 4.133: DSM-14 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası).



Şekil 4.134: DSM-15 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası).



Şekil 4.135: DSM-16 kolonunun değerlendirilmesi (B Sahası).

4.2.2.4. Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan Deneyler

Bu sahadan getirilen karot sandıklarındaki numuneler de derinlik boyunca tek tek incelenerek numuneler üzerinde hangi deneylerin yapılması gerektiğine karar verilmiştir. Karot sandığı içerisindeki tüm numuneler isimlendirilmiş ve laboratuvar deneyleri için kategorize edilmiştir (Şekil 4.136). Bu numuneler üzerinde yapılan deneyler aşağıda listelenmiştir.

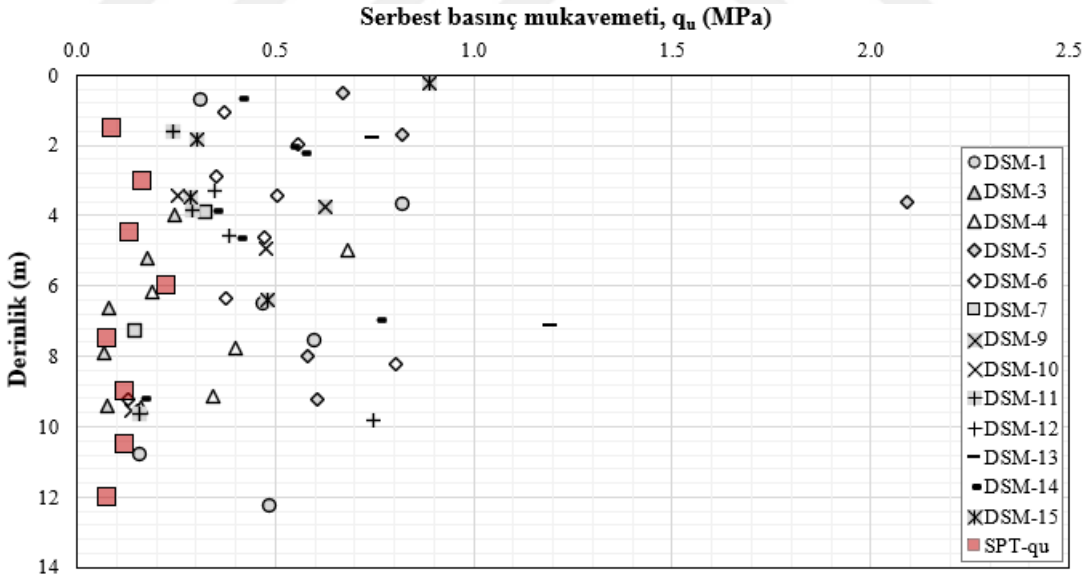
- İndeks deneyleri, bu deneyler iyileştirilen ancak parçalanmış halde çıkarılmış olan numunelerden ve de iyileştirilememiş olan numunelerden yapılmıştır. Gradasyon eğrileri karşılaştırılarak iyileştirme seviyesi ile ilgili bilgiler verilmiştir.
- Serbest basınç mukavemeti deneyi, bu deneyler de zemin içeriği yüksek ya da enjeksiyona eşit olarak görünen numuneler üzerinde yapılmıştır. Karot sandıklarından serbest basınç mukavemet deneyi için ayrılan numunelerin yüzeyleri deney yapımına uygun hale getirilebilmek için seramik testeresi ile kesilmiştir. Bazı numuneler kesim ise aşamasında parçalanmıştır.
- Nokta yükleme deneyi, iyileşmiş bölgelerden elde edilen numuneler üzerinde yapılmıştır.
- Zemin sondajından alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde indeks deneyleri ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır.



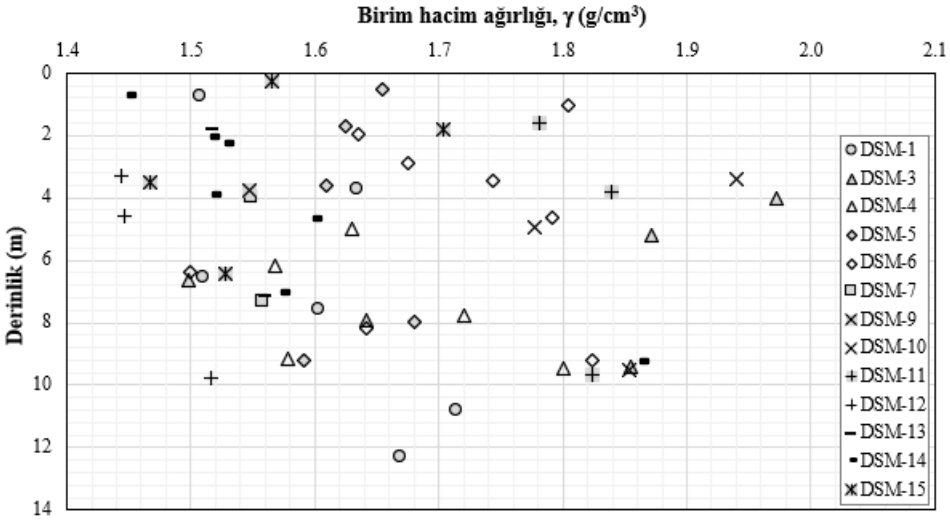
Şekil 4.136: Karot sandıklarındaki numunelerin ayrılması (B Sahası).

4.2.2.5. Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan Basınç Deneylerinin Sonuçları

Bu saha için karot numuneleri üzerinde yapılan basınç deneylerinin sonuçları aşağıda sunulmaktadır. Şekil 4.137'de ve Şekil 4.138'de bu numunelerin serbest basınç mukavemetleri ve birim hacim ağırlıklarının derinlikle değişimi verilmektedir. Genel olarak bakıldığında doğal zemine göre mukavemet değerlerinde iyileşme olduğu görülmektedir. Bazı derinliklerde ise iyileşmeler sınırlı olmuştur ya da hiç olmamıştır. Arazide elde edilen mukavemet değerlerinin 1.0 MPa ve altında olduğu görülmektedir. Karotların birim hacim ağırlık değerleri ise 1.4-2.0 g/cm^3 değerleri arasında değişmektedir.

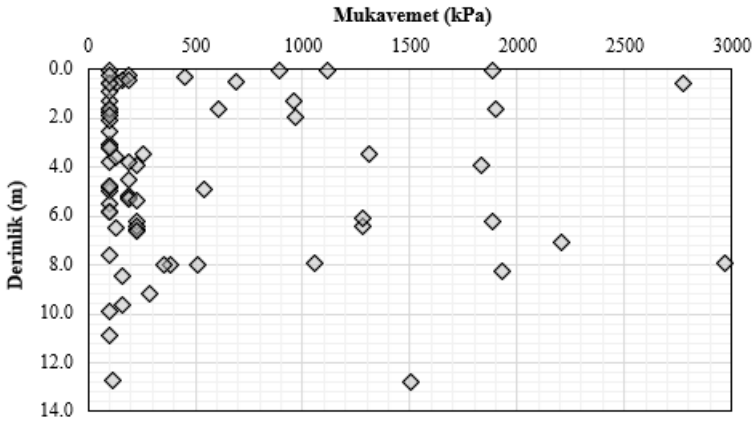


Şekil 4.137: Karot numunelerinin mukavemet değerlerinin derinlikle değişimi (B Sahası).

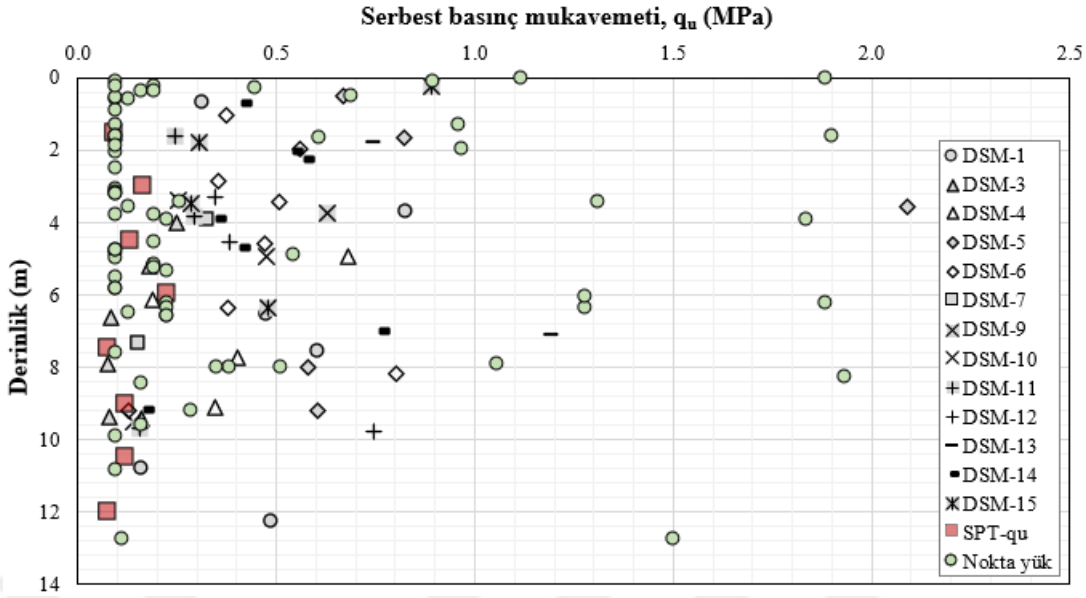


Şekil 4.138: Karot numunelerinin birim hacim ağırlıklarının derinlikle değişimi (B Sahası).

İyileşmiş bölgelerden elde edilen karot numuneleri üzerinde nokta yükleme deneyleri de yapılmıştır. Şekil 4.139'da karot numuneleri üzerinde yapılan nokta yükleme deney sonuçlarına göre mukavemetin derinlikle değişimi gösterilmektedir. Şekil 4.140'da ise nokta yükleme deney sonuçları karot numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deney verileri ile birlikte verilmektedir. Şekil 4.140'da görüldüğü gibi bu arazide yapılan nokta yükleme deney verileri çoğunlukla diğer deneyler ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Ancak nokta yükleme deney sonuçlarının bazılarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Kolonlarda oluşan mukavemet değerinin 2.0 MPa ve altında olduğu görülmektedir. Ancak değerlerin çok büyük bir kısmı 1.0 MPa değerinin altındadır. 1.0 MPa, kil içeren zeminlerde arazide elde edilebilecek mukavemet değerleri mertebesi ile uyum içerisindedir, ancak bu grafikte asıl sorun 0.5 MPa ve altında çok sayıda mukavemet değerine ulaşılabilmiş olmasıdır.



Şekil 4.139: Nokta yükleme deney sonuçları (B Sahası).



Şekil 4.140: Nokta yükleme deney verilerinin diğer karot numunelerinin deney sonuçları ile birlikte değerlendirilmesi (B Sahası).

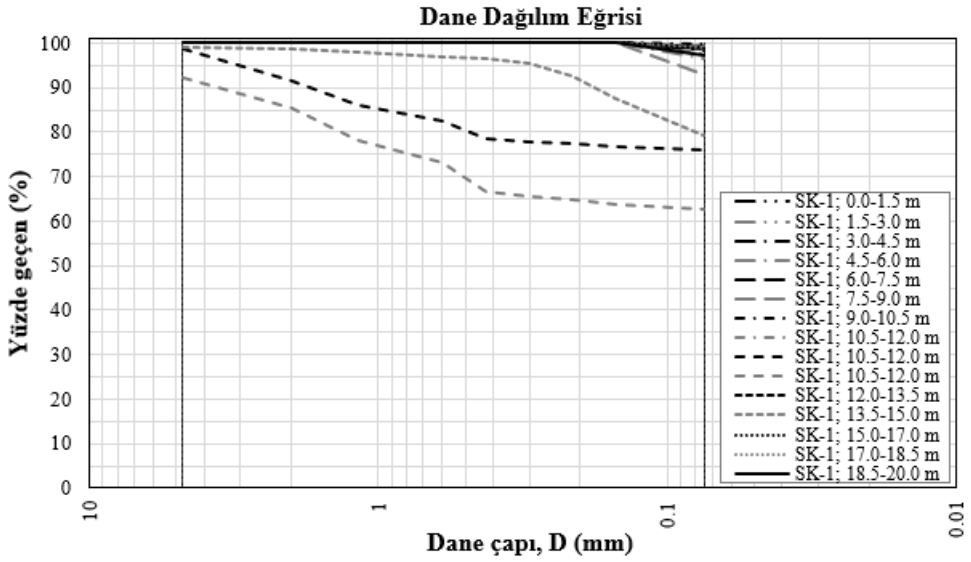
4.2.2.6. Karot Numuneleri Üzerinde Yapılan İndeks Deneyleri

Zemin sondajından ve tam boy karot alınan kolonlardan seçilen numuneler üzerinde indeks deneyleri yapılmıştır. Sondaj kuyusundan alınan numuneler üzerinde elek analizi, kıvam limit deneyleri ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Kolonlardan seçilen numuneler üzerinde de elek analizi ve kıvam limit deneyleri yapılmıştır. Bu şekilde elek analizleri ve kıvam limiti değerlerinde oluşan farklılıkların iyileştirme seviyesini belirlemenin bir parçası olarak değerlendirilmesi mümkün olabilecektir.

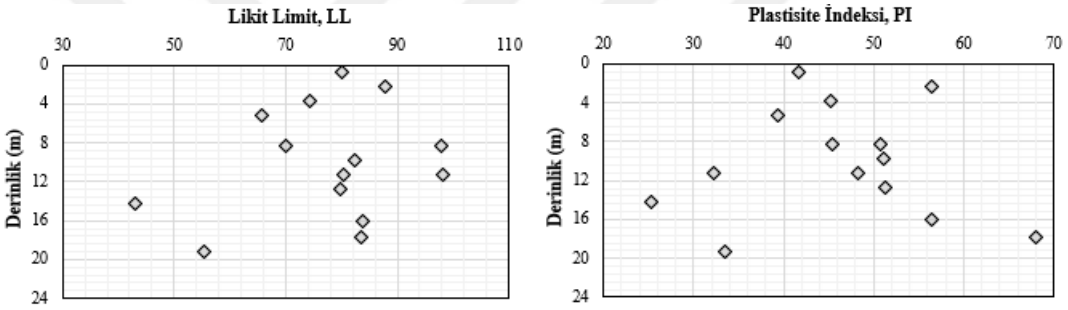
4.2.2.7. Sondaj Kuyusundan Alınan Numuneler Üzerinde Yapılan Deneylerin Sonuçları

Bu sahada da sondaj kuyusundan alınan farklı derinlikteki numuneler üzerinde indeks deneyleri yapılmıştır. Şekil 4.141'de bu numunelerin elek analizi sonuçları, Şekil 4.142'de numunelerin derinlik boyunca likit limitlerinin ve plastisite indekslerinin değişimleri ve Şekil 4.143'te numunelerin plastisite kartındaki yerleri gösterilmektedir. Görüldüğü gibi sondaj kuyusundan alınan numunelerin neredeyse hepsi CH olarak sınıflandırılmaktadır. Likit Limit değerleri oldukça yüksektir ve %40 ila %100 arasında değişmektedir.

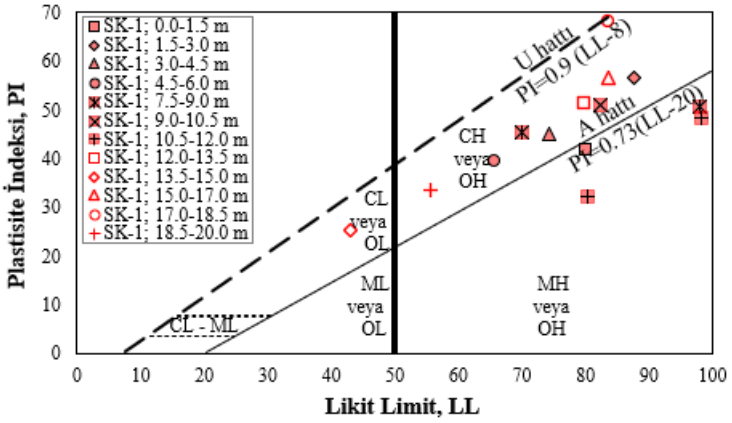
Sondaj sırasında alınan örselenmemiş numuneler üzerinde konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Başlangıç boşluk oranı 1.0 ila 2.2 arasındadır. Sıkışma indisi değerleri, c_c=0.16-0.35 arasında değişmektedir.



Şekil 4.141: Sondaj kuyusundan alınan farklı derinlikteki numunelerin elek analizi (B Sahası).



Şekil 4.142: Sondaj kuyusunda derinlik boyunca likit limit ve plastisite indeksi değişimi (B Sahası).

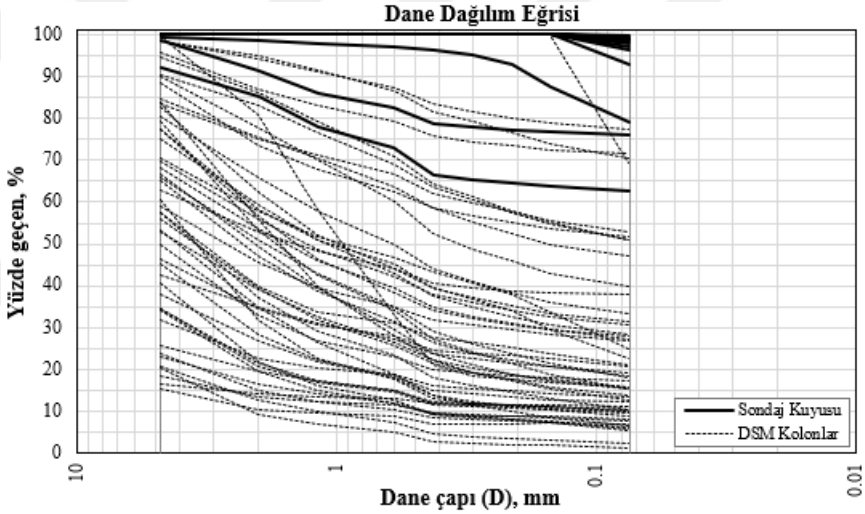


Şekil 4.143: Sondaj kuyusundan alınan farklı derinlikteki numunelerin plastisite kartındaki yerlerinin gösterimi (B Sahası).

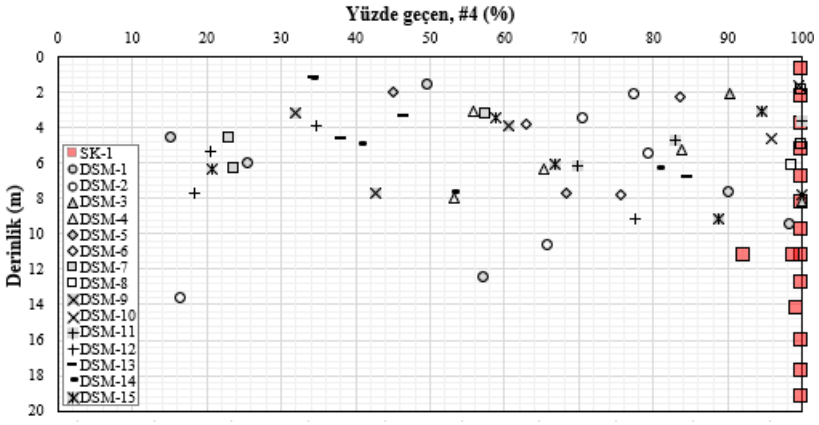
4.2.2.8. Kolonlardan Alınan Numuneler Üzerinde Yapılan İndeks Deneylerinin Sonuçları

İmal edilmiş olan kolonlardan belirli derinliklerde seçilen numuneler üzerinde indeks deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerle kolon numunelerinin çoğunda, sondaj kuyusundaki doğal zemin

numunelerine kıyasla dane çapı dağılımlarının ve kıvam limitlerinin değiştiği sonucuna varılmıştır. Şekil 4.144'te sondaj kuyusunun ve kolonların dane dağılım eğrileri birlikte gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi kolonlarda süreksizlik gösteren parçalanmış numunelerde ya da enjeksiyonun çok az olduğu tahmin edilen numunelerde de elek analizlerinde farklılaşma olmuştur. Şekil 4.145 ve Şekil 4.146'da bu numunelerin, 4 nolu (#4) ve 200 nolu (#200) eleklerden geçen yüzdelerinin derinlikle değişimi verilmektedir. Bu numunelerde iyileştirmeye bağlı olarak önemli granülometre değişiklikleri olduğu görülmektedir. Dane çaplarında büyük ölçüde irileşme görülmektedir. Zemin ortamında tam olarak bir iyileşme sağlanmasa dahi, ortamın çimento enjeksiyonundan etkilendiği görülmektedir. Ancak bu seviyede bir iyileşmenin mukavemet bakımından ne seviyede katkı sağladığı belirsizdir.

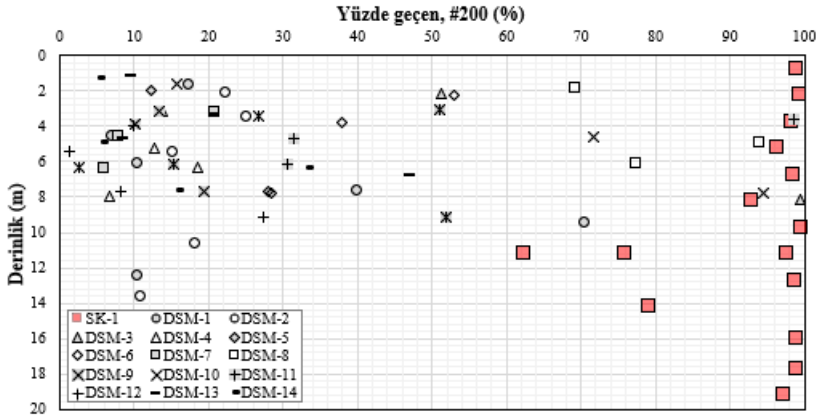


Şekil 4.144: Sondaj kuyusu ve kolon numunelerinin dane dağılım eğrileri (B Sahası).

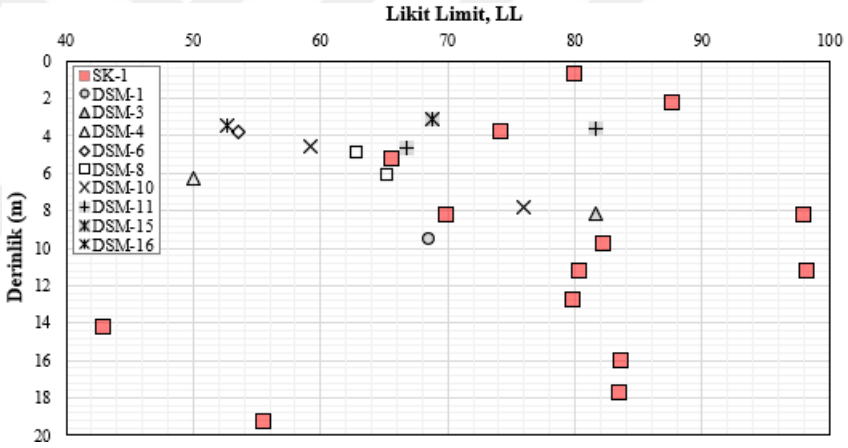


Şekil 4.145: Sondaj kuyusu ve kolon numunelerinin #4 nolu elekten geçen yüzdelerinin derinlikle değişimi (B Sahası).

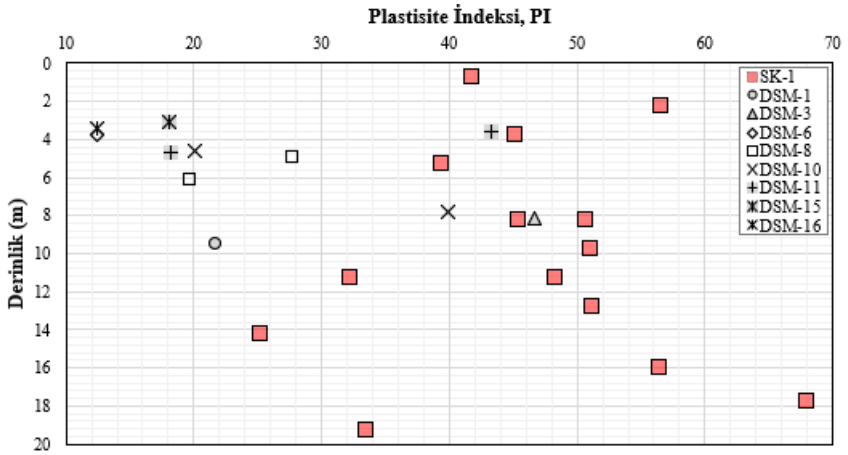
Kıvam limitlerindeki değişiklikler aşağıda verilmektedir. Zemin sınıflarının önemli ölçüde değiştiği görülmektedir (Şekil 4.147, 4.148, 4.149).



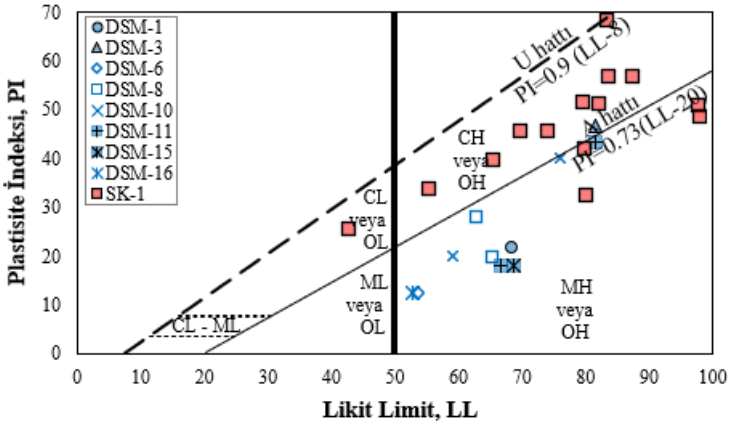
Şekil 4.146: Sondaj kuyusu ve kolon numunelerinin #200 nolu elekten geçen yüzdelerinin derinlikle değişimi (B Sahası).



Şekil 4.147: Numunelerin likit limitlerinin derinlikle değişimi (B Sahası).



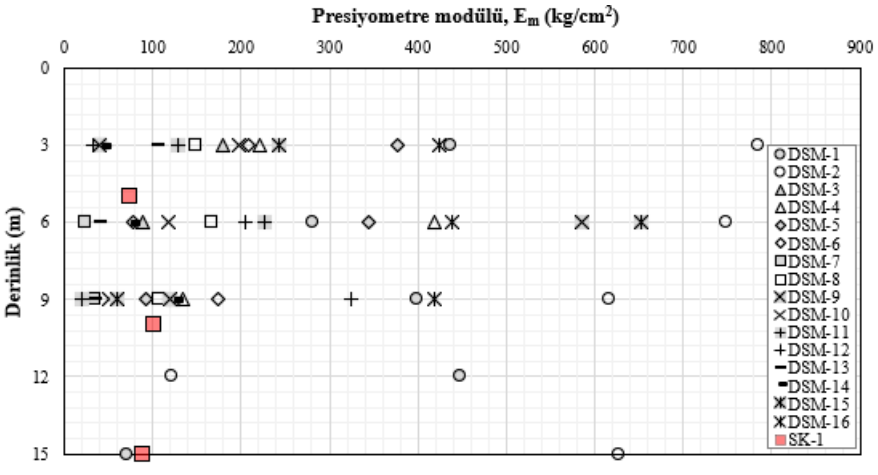
Şekil 4.148: Numunelerin plastisite indekslerinin derinlikle değişimi (B Sahası).



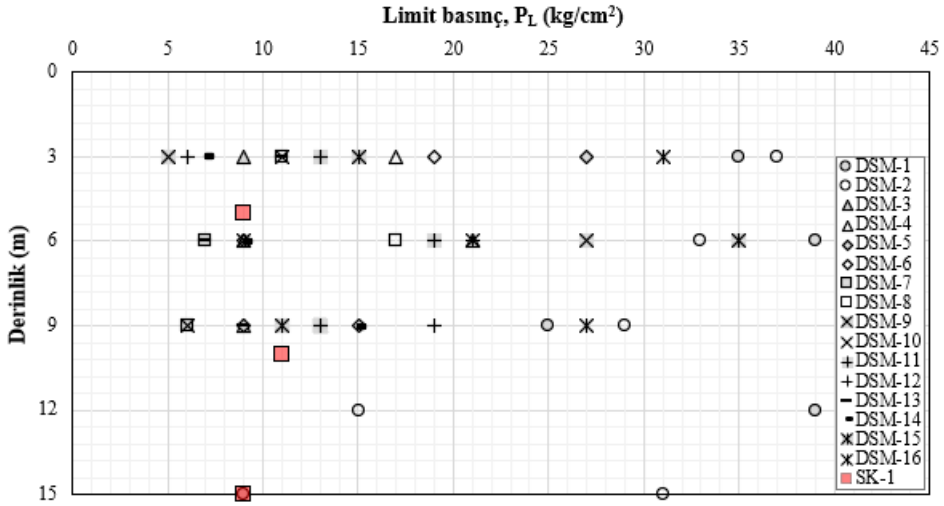
Şekil 4.149: Numunelerin plastisite kartındaki yerleri (B Sahası).

4.2.2.9. Arazide Yapılan Presiyometre Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

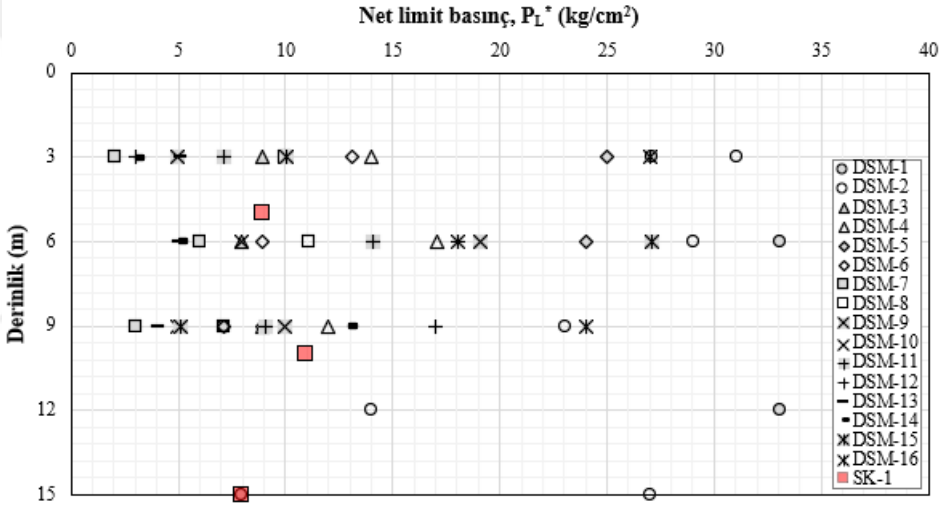
Bu arazide de kalite kontrol deneyleri kapsamında deneme DSM kolonlarında ve zemin sondajında presiyometre deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda farklı derinliklerde elde edilen presiyometre modülü, limit basınç ve net limit basınç değerleri Şekil 4.150 ve 4.152 arasında grafik olarak sunulmaktadır. Presiyometre modülü değerlerinin genellikle 400 kg/cm^2 (40 MPa) ile sınırlandırıldığı görülmektedir. Az sayıda ölçümde ise 800 kg/cm^2 (80 MPa) değerine ulaşan değerler ölçülmüştür. Arazide sondajda yapılan ölçümlerin 100 kg/cm^2 (10 MPa) civarında olduğu dikkate alındığında, bunun üzerindeki presiyometre modülü değerlerine DSM iyileştirmesi ile ulaşıldığı anlaşılmaktadır. Limit basınç değerlerinin doğal zemin için 10 kg/cm^2 (1 MPa) civarında olduğu, iyileştirilmiş zemin ise 40 kg/cm^2'ye (4 MPa) kadar çıkan değerlerin ölçüldüğü görülmektedir. Net limit basınç-presiyometre ilişkisi de Şekil 4.153'te sunulmaktadır. Presiyometre modül değerlerinin net limit basınç değerlerinin 15-25 katı arasında değişebildiği görülmektedir.



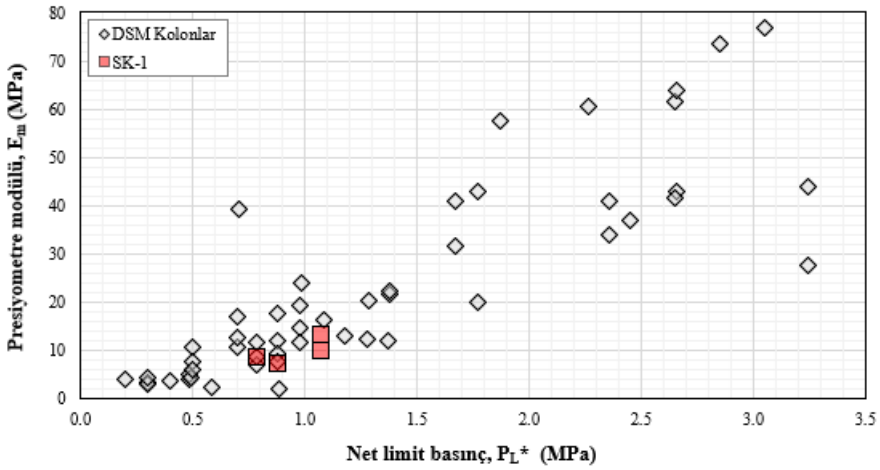
Şekil 4.150: Presiyometre modülünün derinlikle değişimi (B Sahası).



Şekil 4.151: Limit basıncın derinlikle değişimi (B Sahası).



Şekil 4.152: Net limit basıncın derinlikle değişimi (B Sahası).



Şekil 4.153: Presiyometre modülünün net limit basınca bağlı değişimi (B Sahası).

4.2.2.10. Arazide Yapılan Basınçlı Su Testi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Arazide kalite kontrol deneyleri kapsamında basınçlı su testi deneyi de yapılmıştır. Burada da iyileşmemiş bölgelerde permeabilite değerlerinin de yüksek olduğu görülmüştür.

5. TARTIŞMA

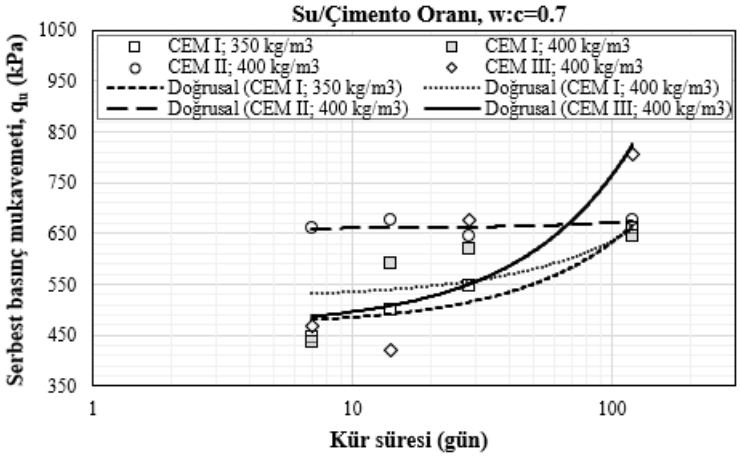
Bu bölümde laboratuvar ve arazi çalışmalarından elde edilen bulgular değerlendirilmiştir.

5.1. LABORATUVAR BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Laboratuvarda farklı organik ve inorganik zeminler ile, farklı çimento türleri ve dozajları ve farklı su/çimento (w:c) oranları kullanılarak hazırlanan derin karışım numuneleri üzerinde yapılan deney sonuçları bu bölümde değerlendirilmiştir.

5.1.1. Çimento Türünün Mukavemet Üzerindeki Etkisi

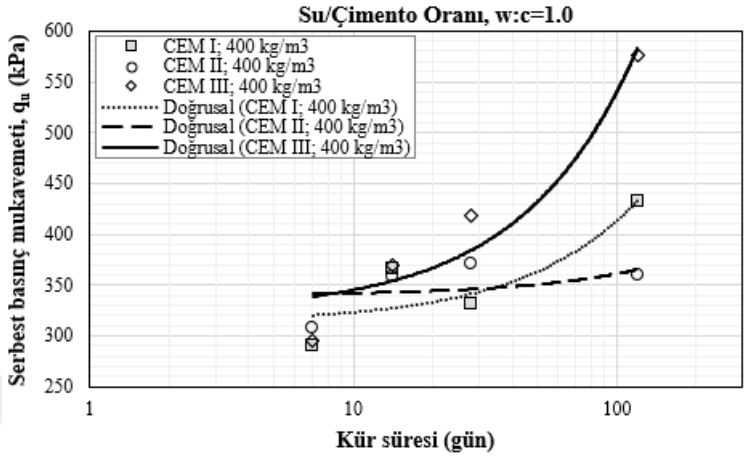
A sahasından alınan ve doğal su muhtevası, w_i=%250 olan turba zeminin farklı çimento türleri ile iyileştirilmesi sonucunda kullanılan çimento türünün iyileştirme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de laboratuvarda farklı çimento türleri kullanılarak hazırlanan derin karışım numunelerinin serbest basınç mukavemetlerinin kür süresine bağlı değişimleri gösterilmektedir. Bu şekildeki veriler her numune üzerinde yapılan deneyler sonucunda bulunan mukavemet değerlerinin ortalaması alınarak oluşturulmuştur.



Şekil 5.1: Turba zeminde farklı çimento türlerinin etkisi (w:c=0.7).

Şekillerde görüldüğü üzere bu zeminde, iki farklı su/çimento oranı için mukavemet kür ilişkisi benzerlik göstermektedir. CEM II tipi çimento, turba zeminde kısa zamanda bir mukavemete ulaşmakta, uzun vadede bu mukavemet değerinde büyük farklılık oluşmamaktadır. CEM III çimentosu ile uzun dönemde diğer çimento türlerine göre daha fazla mukavemet artışı olmuştur.

CEM I tipi çimentoda ise kür gününe bağlı mukavemet artışı olmaktadır, ancak uzun vadede CEM III'ü yakalayamamaktadır. Bu tür zeminlerde yapılacak kalite kontrol deneylerinde kür süresine bağlı mukavemet artışının dikkate alınması gerektiği görülmektedir.

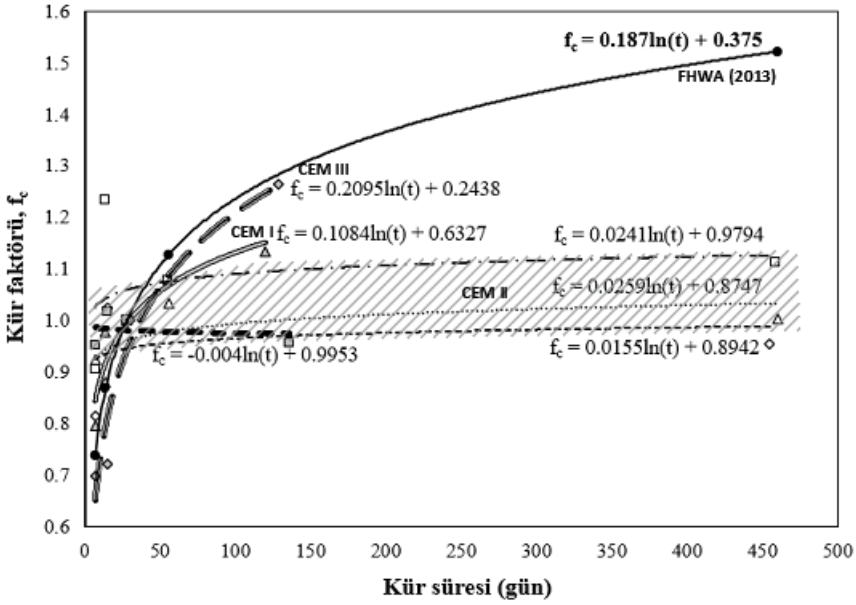


Şekil 5.2: Turba zeminde farklı çimento türlerinin etkisi (w:c=1.0).

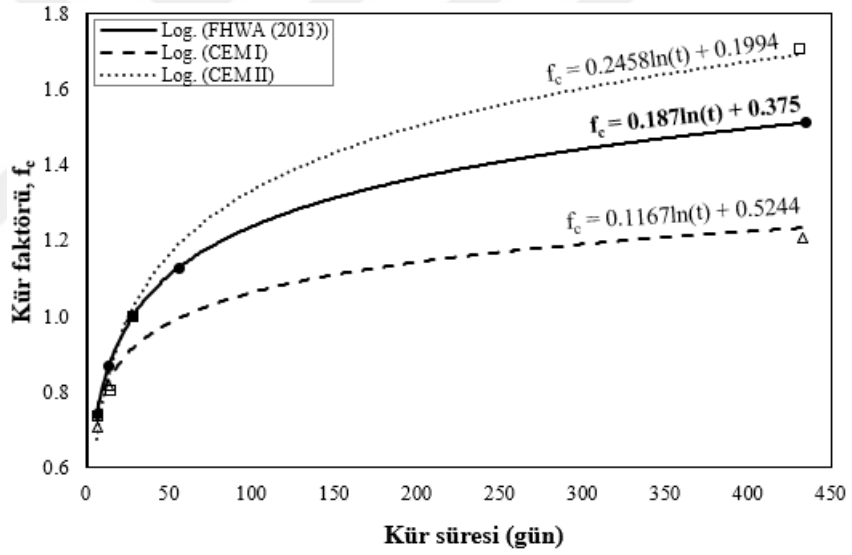
5.1.2. Kür Faktörünün Değerlendirilmesi

DSM'de uygulanan iyileştirme kimyasal bir reaksiyona bağlı olduğu için, mukavemet değerinin kür süresinin bir fonksiyonu olduğu bilinmektedir. FHWA (2013)'te, tasarım için kullanılan mukavemet değerinin bulunması için bir kür faktörü (f_c) kullanılmakta, bu faktörün yüksek organiğe sahip zeminler için kullanılmamasını önermektedir. Bu faktör Formül 2.1'de verilmektedir. Bu çalışmada farklı kür günlerinde elde edilen mukavemet değerleri kullanılarak f_c değeri hesaplanmış ve FHWA (2013) ile karşılaştırılmıştır. Grafikler aşağıda verilmektedir.

- Turba zemin için CEM II tipi çimentoda, f_c değerleri 0.9 ila 1.1 arasında değişmektedir. Bu değerler, kısa (7 gün) ve uzun vadede (bir yıl) benzer mukavemet değerlerine ulaşıldığını göstermektedir. CEM I tipi çimento için, f_c değerleri 0.85 ila 1.15 arasında, CEM III tipi çimento için 0.65 ila 1.30 arasında değişen kür faktörleri bulunmaktadır. FHWA (2013) ile en uyumlu olan kür faktörünü veren çimento tipi, bu çalışmada CEM III olarak bulunmuştur (Şekil 5.3).
- İnorganik zemin için elde edilen kür faktörleri bir sonraki grafikte verilmektedir (Şekil 5.4). Değerlerin FHWA (2013) ile trend bakımından uyumlu olduğu ancak f_c değerleri bakımından farklılıklar da oluştuğu görülmektedir.



Şekil 5.3: Turba zeminler için kür faktörünün FHWA (2013) ile karşılaştırılması.



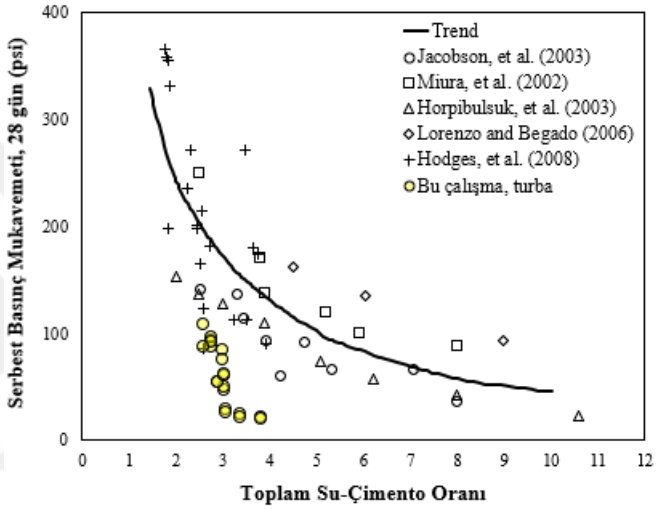
Şekil 5.4: İnorganik zeminler için kür faktörünün FHWA (2013) ile karşılaştırılması.

5.1.3. Serbest Basınç Mukavemeti-Toplam Su/Çimento İlişkisi

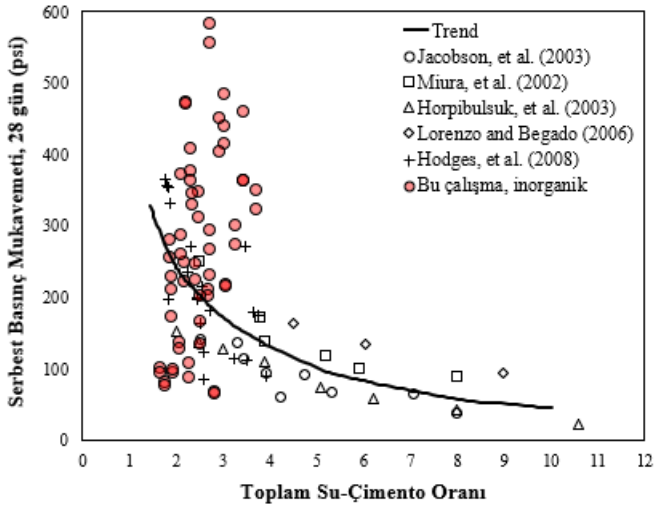
Bu çalışmada elde edilen veriler, FHWA (2013)'te inorganik zeminler için verilen toplam su/çimento grafiği kullanılarak karşılaştırılmıştır.

- Turba için elde edilen mukavemet değerlerinin, bu grafikte önerilen değerlere göre oldukça düşük değerler olduğu görülmektedir. Uygulamacıların da bu konuda dikkatli olması ve bu grafiği turba zeminler için kullanmamaları gerektiği görülmektedir. Alttaki grafik ise inorganik zeminleri göstermektedir (Şekil 5.5 ve Şekil 5.6).

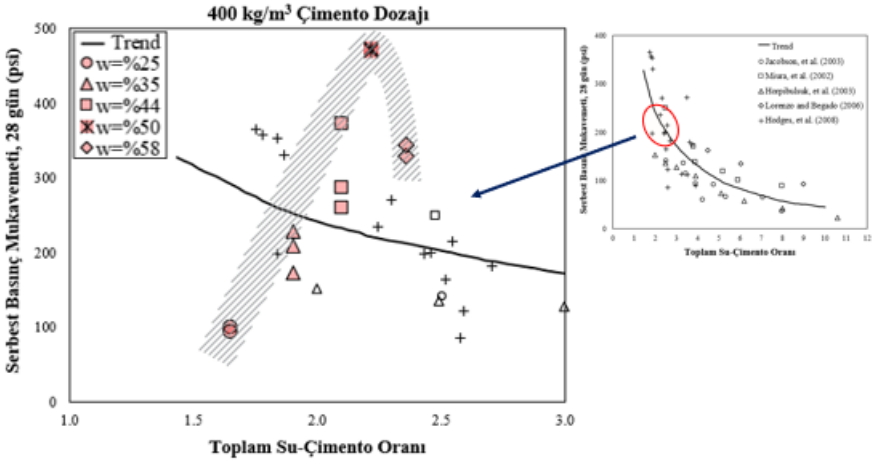
- İnorganik zeminlerde de dağılım görülmektedir. Zeminin başlangıç su muhtevası ve çimento tipi değiştiğinde mukavemet değerlerinin de değiştiği bu çalışmada gösterilmektedir. FHWA (2013)'e göre daha düşük değerler karıştırma etkinliğinin düşük olduğu numuneler, yüksek değerler ise karıştırma etkinliğinin daha iyi olduğu numunelerdir. Bu nedenle bu grafiğin karışma etkinliğini dikkate alamadığı görülmektedir. Şekil 5.7-5.10 arasında farklı başlangıç su muhtevaları kullanılarak hazırlanan numunelerin sonuçları verilmektedir. Bu tezin özgün sonuçlarından birisi de karıştırma etkinliğinin Likidite İndeksi aracılığı ile bu grafiğe entegre edilmiş olmasıdır.



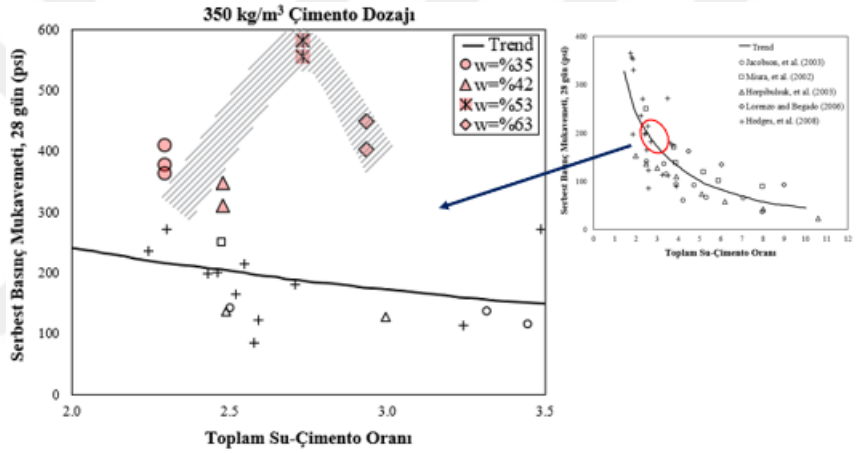
Şekil 5.5: Turba zeminin serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişiminin FHWA (2013) ile karşılaştırılması.



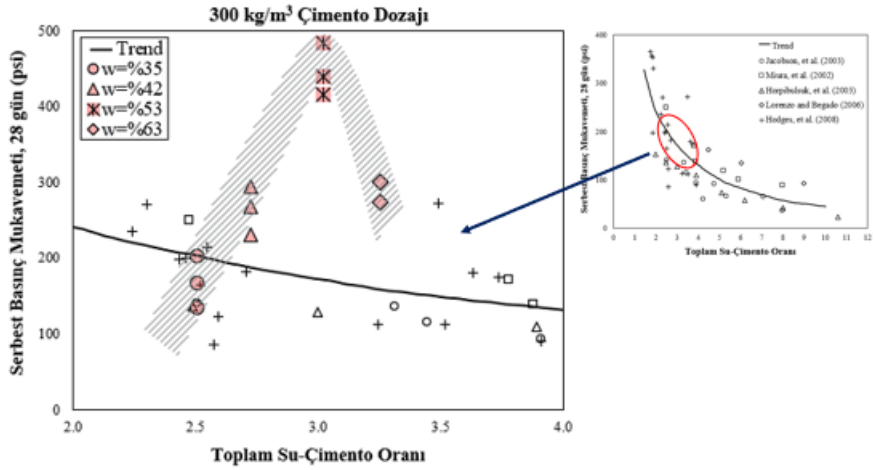
Şekil 5.6: İnorganik zeminin serbest basınç mukavemetinin toplam su-çimento oranına bağlı olarak değişiminin FHWA (2013) ile karşılaştırılması.



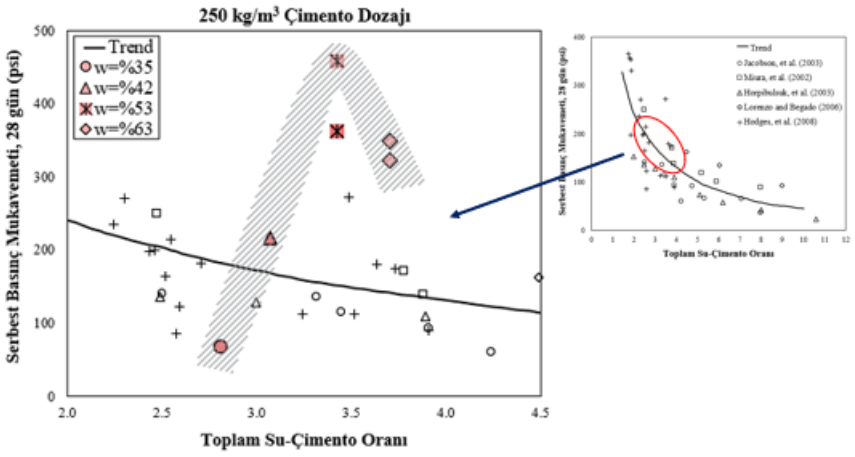
Şekil 5.7: Karıştırma etkinliğinin Likidite İndeksi aracılığı ile değerlendirilmesi ve FHWA (2013) ile karşılaştırılması (İnorganik, 400 kg/m^3, A Sahası).



Şekil 5.8: Karıştırma etkinliğinin Likidite İndeksi aracılığı ile değerlendirilmesi ve FHWA (2013) ile karşılaştırılması (İnorganik, 350 kg/m^3, B Sahası).



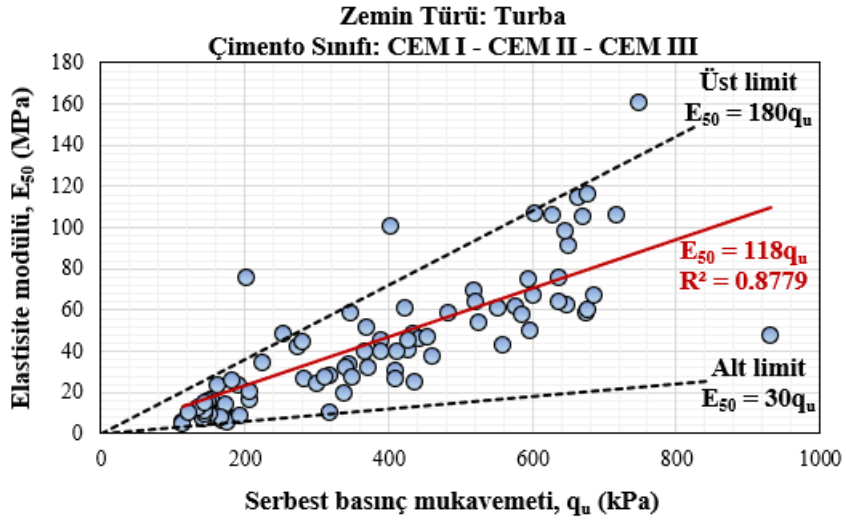
Şekil 5.9: Karıştırma etkinliğinin Likidite İndeksi aracılığı ile değerlendirilmesi ve FHWA (2013) ile karşılaştırılması (İnorganik, 300 kg/m^3, B Sahası).



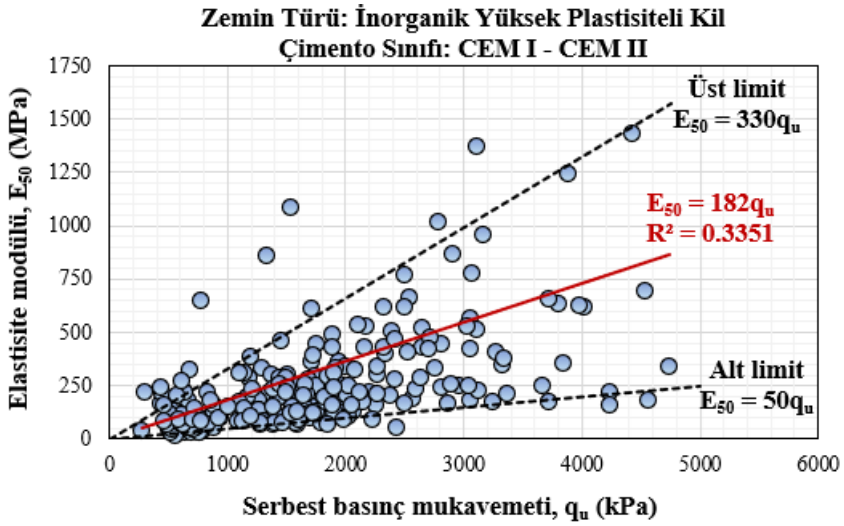
Şekil 5.10: Karıştırma etkinliğinin Likidite İndeksi aracılığı ile değerlendirilmesi ve FHWA (2013) ile karşılaştırılması (İnorganik, 250 kg/m^3, B Sahası).

5.1.4. Mukavemet-Elastisite Modülü Korelasyonları

Bu çalışmada elde edilen mukavemet ve modül değerleri turba ve inorganik zeminler için bir araya getirilmiştir. Elde edilen aralıklar Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de gösterilmektedir. Tablo 5.1'de de bu değerler verilmektedir. FHWA (2013)'te ıslak karıştırma için verilen modülün, mukavemetin 300 katı olması önerisinin ince daneli zeminler ve turbalar için kullanılmasının sakıncalı olabileceği görülmektedir. Elde edilen değerler daha düşük modül değerlerine işaret etmektedir. Bu konuda yapılacak en uygun adım, karotlar üzerinde sadece mukavemet değil, modül değerlerinin de ölçülmesini sağlamak ve bu şekilde bir veri tabanının oluşmasını sağlamaktır. Böylece bu değerler karot numunelerinden elde edilen değerler ile de karşılaştırılabilecektir.



Şekil 5.11: Bu çalışmada elde edilen mukavemet-modül korelasyonları (**Turba**, Katkı: çimento).



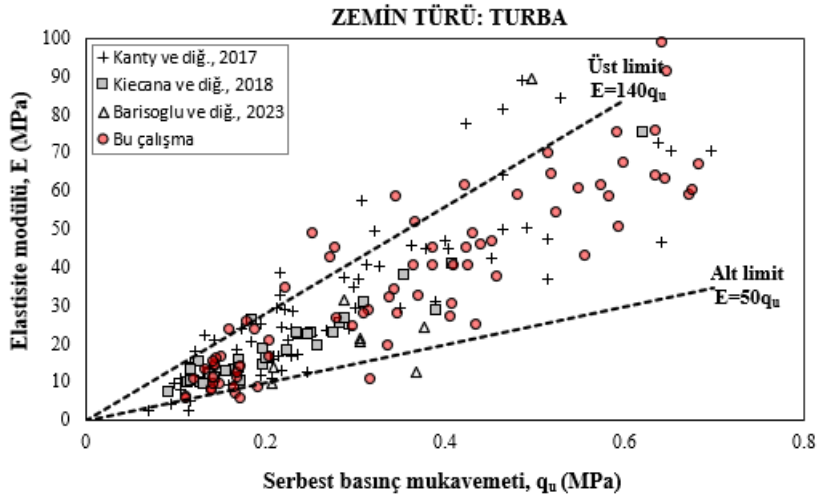
Şekil 5.12: Bu çalışmada elde edilen mukavemet-modül korelasyonları (**İnorganik yüksek plastisiteli kil**, Katkı: çimento).

Tablo 5.1: Bu çalışmada zemin türüne göre elde edilen E_{50}-q_u korelasyonları

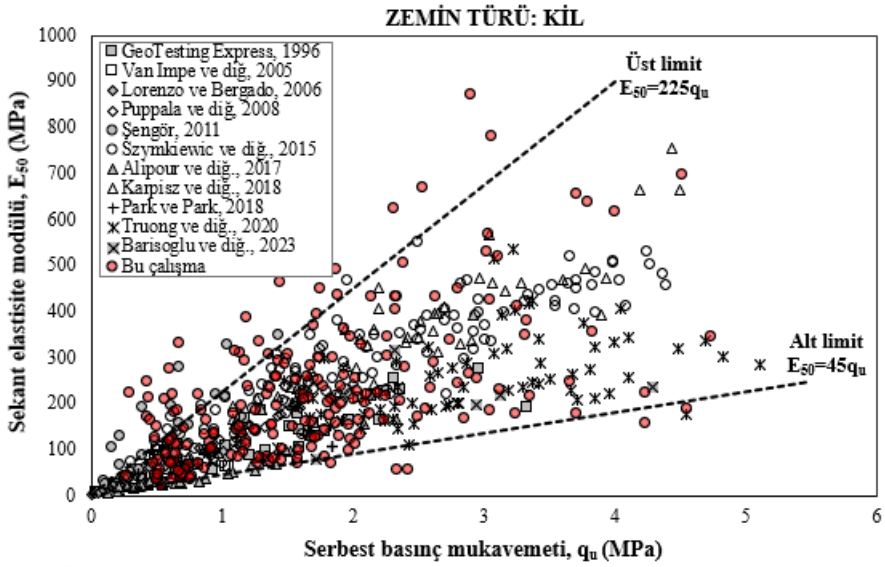
Zemin türü	Alt limit	Üst limit	Ortalama değer	Veri sayısı	R^2
Turba*	30	180	118	85	0.88
İnorganik yüksek plastisiteli kil	50	330	182	230	0.34

*q_u değerinin 1.0 MPa ve altı olması durumu için geçerlidir.

Bu çalışmada killi zeminler ve turba için elde edilen değerler, literatürdeki çalışmalar ile birlikte değerlendirildiğinde de uyum görülmektedir. Bu bakımdan mukavemet-modül ilişkilerinin zemin tipine göre kullanılması en uygun yöntem olarak görülmektedir (Şekil 5.13-5.14).



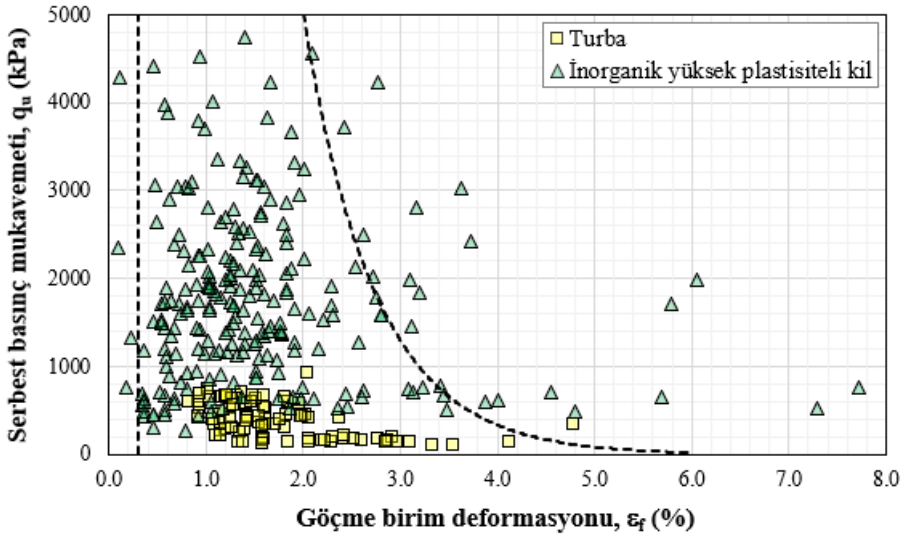
Şekil 5.13: Literatür ile karşılaştırma, turba zemin için (Katkı: çimento) mukavemet-modül korelasyonları (Çınar Özkan ve diğ., 2023).



Şekil 5.14: Literatür ile karşılaştırma, inorganik yüksek plastisiteli kil için (Katkı: çimento) mukavemet-modül korelasyonları (Çınar Özkan ve diğ., 2023).

5.1.5. Mukavemet-Şekil Değiştirme İlişkisi

Serbest basınç mukavemet deneyi yapılan tüm numunelerin göçme birim deformasyon değerleri ve serbest basınç mukavemet değerleri Şekil 5.15'te gösterilmektedir. Böylece DSM için beklenen q_u-ε_f değerleri görülebilir.



Şekil 5.15: Göçme birim deformasyonun serbest basınç mukavemetine bağlı değişimi.

5.1.6. Likidite İndisine Bağlı Karıştırma Etkinliği

Bu çalışmada yüksek plastisiteli killer için arazide etkin bir karıştırma sağlanmasının zorluğu görülmüştür. Buna istinaden laboratuvarda karıştırma etkinliğine dair deneyler düzenlemiştir. Farklı zeminler için ortak bir anlatım olabilmesi amacıyla, Likidite İndeksi (LI) bir değişken

olarak kullanılmıştır. İki farklı inorganik zemin için farklı çimento türü ve dozajı için deneyler yapılmıştır. Başlangıç su muhtevaları değiştiğinde, Likidite İndeksleri de değişmektedir. Düşük LI değerlerinde etkin bir karışım sağlanamamıştır. LI değeri 0.6-0.7 olduğunda karışım etkinliği maksimize olmaktadır. Daha yüksek LI değerlerinde ise artan su muhtevasına bağlı mukavemet düşüşleri oluşmaktadır. Yüksek plastisiteli killer için elde edilen iyileştirme seviyesi, karıştırma etkinliğine bağlıdır ve ondan bağımsız olarak değerlendirilmemelidir. FHWA (2013)'ün toplam su/çimento oranına bağlı olarak verdiği mukavemet değerlerinin de, bu karıştırma etkinliğini dikkate almadığı görülmektedir. Bu çalışmanın özgün bir bulgusudur.

5.2. ARAZİ BULGULARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Tez kapsamında A ve B sahalarında yapılan arazi çalışmalarından elde edilen bulgular bu bölümde değerlendirilmiştir.

5.2.1. Aynı İmalat Yöntemi ile İmal Edilen Kolonların Karşılaştırılması

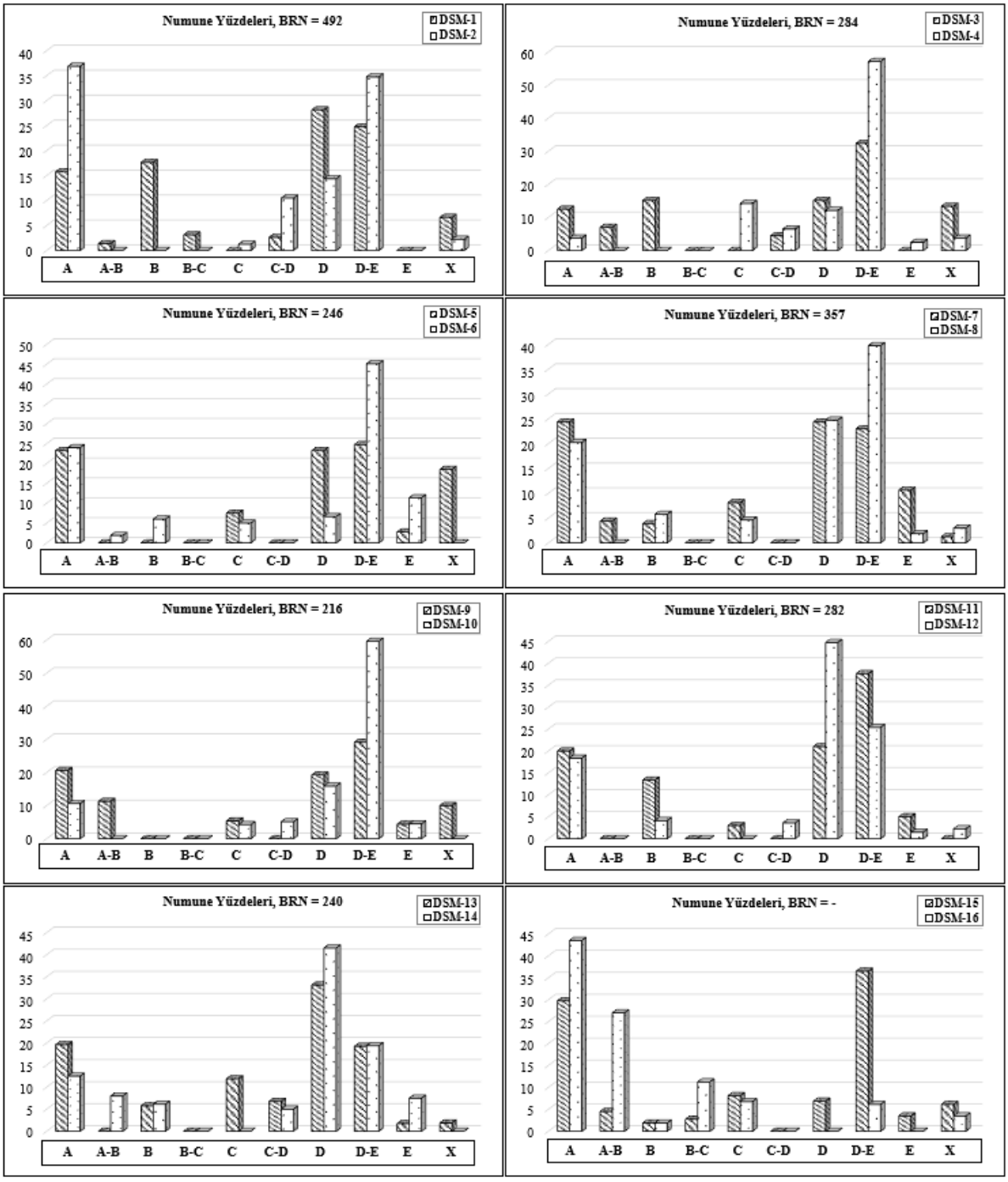
A ve B sahalarında aynı imalat parametreleri ile imal edilen kolonlarda elde edilen karot değerlendirmeleri aşağıdaki şekillerde sunulmaktadır (Şekil 5.16-5.17). Kolonlar birbirine benzer olabildiği gibi, çok farklı da olabilmektedir. Yani imalat ve zemin şartları aynı olan kolonlarda oluşan DSM profili aynı olmayabilmektedir. Derinlik boyunca kayıt alınmadan imal edilen kolonlarda hedeflenen kolonlara ulaşma konusunda sıkıntı yaşanabileceği görülmektedir.

5.2.2. Çimento Dozajının Etkisi

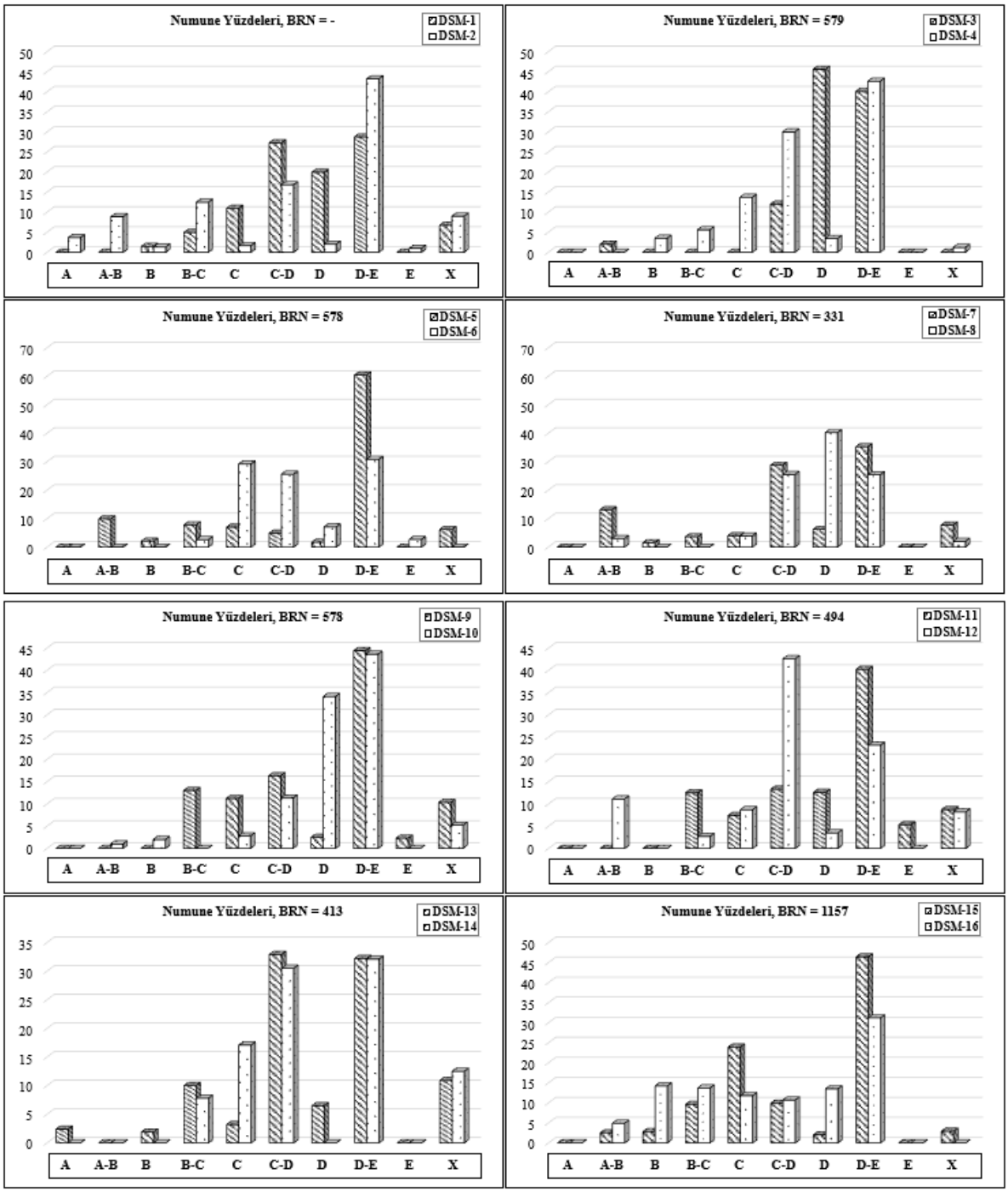
Şekil 5.18'de A sahasındaki kolon imalatlarında kullanılan çimento dozajına göre kolonların iyileşme oranları verilmektedir. Görüldüğü gibi farklı çimento dozajlarında kolonların iyileşme oranları genellikle benzer sonuçlar vermiştir. Çimento dozajının etkisi olmakla birlikte sınırlı seviyededir. Bu sahada turba zeminin olması nedeniyle oluşan imalat zorluğu ve DSM makinesinin imalatı gerçek zamanlı kayıtla yapmaması nedeniyle imalat şartlarının etkisi daha baskın olmuş, çimento dozajının artması iyileştirme seviyesini beklenilen seviyede artıramamıştır.

Şekil 5.19'da ise B sahasındaki kolon imalatlarında kullanılan çimento dozajına göre kolonların iyileşme oranları verilmektedir. Görüldüğü gibi kolonların iyileşme oranları farklı çimento dozajlarında benzer sonuçlar vermiştir. Bu sahada yüksek plastisiteli kil zeminin olması ve

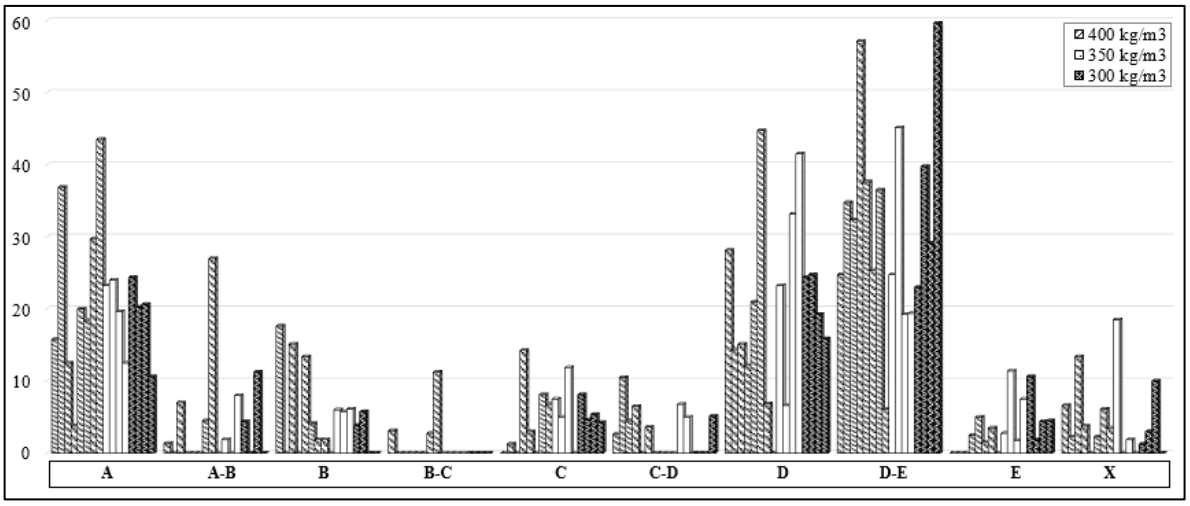
DSM makinesinden ölçüm alamamamız kolonlar arasında beklendiği seviyede fark yaratamamıştır.



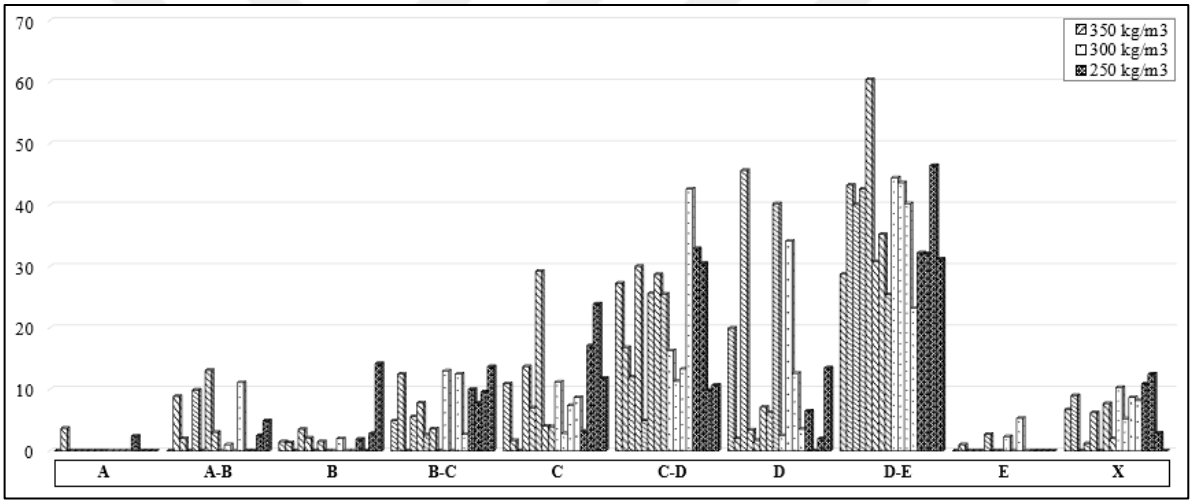
Şekil 5.16: İmalat parametreleri aynı olan kolonlarının iyileşme oranlarının karşılaştırılması (A Sahası).



Şekil 5.17: İmalat parametreleri aynı olan kolonlarının iyileşme oranlarının karşılaştırılması (B Sahası).



Şekil 5.18: Kolon imalatlarında kullanılan çimento dozajına göre kolonların iyileşme oranları (A Sahası).



Şekil 5.19: Kolon imalatlarında kullanılan çimento dozajına göre kolonların iyileşme oranları (B Sahası).

5.2.3. BRN Değerlerinin Oluşan Kolon Kalitesi Üzerinde Etkisi

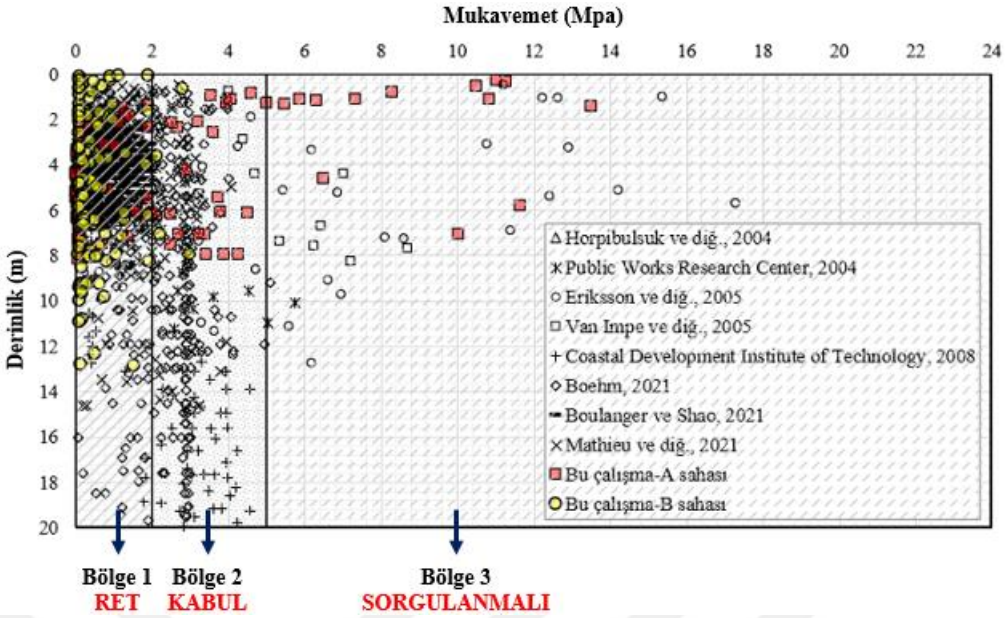
A sahasında pek çok kolonda homojen ve sürekli bir DSM elde edilemediği için BRN değerlerinin artması ya da azalmasının kolon kalitesi üzerinde bir etkisi olmamıştır.

B Sahasında ise pek çok kolonda homojen ve sürekli bir DSM elde edilememiştir. DSM'den beklenen kategoriye giren karotlar sırasıyla C, B-C ve B olarak değerlendirildiğinde, esasen BRN değeri ile birlikte bu kategorilerde artış olduğu ancak büyük saçılmaların oluştuğu görülmüştür. Yani yüksek plastisiteli bir kil içinde yapılan bu imalatta BRN değerinin büyük olmasının hedeflenen DSM kalitesine ulaşmak için yeterli olmadığı kolonlar olmuştur.

5.2.4. DSM Kolonlarının Kabul Değerleri

Arazide imal edilen kolonlar için genel uygulama karot numuneleri alınması ve mukavemet değerlerinin tek eksenli deneyler ile ölçülmesidir. Tasarım için kullanılan mukavemet değerinden daha büyük olan değerler "kabul" olarak, bu değerden daha küçük olan değerler ise kriteri sağlamadığı için "kabul edilemez" olarak değerlendirilmektedir. Bu tez sırasında yapılan literatür taraması ve arazide yapılan deneyler ise bu kriterlere ek olarak başka bir "sorgulanmalı" kriteri gelmesi gerektiğini göstermektedir. Buna göre üç farklı kriter bölgesi bulunması uygun olacaktır.

- Bölge 1 (RET): Bu bölgede yer alan numunelerin mukavemet değerleri, hedef olarak verilen tasarım mukavemet değerinin altındadır. Bu bölgedeki numuneler kriteri "mühendislik özellikleri" bakımından geçemez.
- Bölge 2 (KABUL): Bu bölgede yer alan numunelerin mukavemet değerleri hedef olarak verilen tasarım mukavemet değerinin üzerindedir. Ancak önerilen yeni kriterde burada bir üst limit de tanımlanmaktadır. Üst limit arazideki değişkenliği dikkate alarak belirlenir. Hedef mukavemet değerinin iki buçuk katı bir üst limit olarak önerilebilir. Bu bölgedeki numuneler kriteri "mühendislik özellikleri" bakımından geçer.
- Bölge 3 (SORGULANMALI): Bu bölgedeki numuneler hedef mukavemet değerinin çok üzerinde mukavemet değerine sahiptir. Mevcut kalite kontrol kriterleri bu numunelerin de kriterleri geçtiğini kabul etmektedir. Ancak, hedef değerin çok üzerinde mukavemet elde edilmesinin muhtemel sebepleri, enjeksiyon harcının mukavemetinin ölçülüyor olması, bu bölgede kullanılan enjeksiyon nedeniyle başka bir bölgede daha az enjeksiyon kullanılmış olmasıdır, çünkü bir kolon için kullanılacak enjeksiyon miktarı bellidir. Diğer bir sebep de, bu tür değerlerin sayısı çok fazla ise, kolon imalatı için gerekli olandan daha çok çimento kullanılmış olmasıdır, bu da ekonomik ve sürdürülebilirlik bakımdan imalat yönteminin sorgulanması gereken bir durumdur.
- Aşağıda verilen örnekte, önerilen değerlendirme hedef mukavemet değeri 2 MPa olarak verilen DSM kolonları için uygulanmıştır (Şekil 5.20).



Şekil 5.20: Önerilen DSM kolonlarının kabul değerine ait bir örnek.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan derin karıştırma yöntemi için kapsamlı bir laboratuvar ve arazi çalışmaları yapılmıştır. Elde edilmiş sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur.

- Laboratuvar çalışmaları kapsamında ilk olarak numune hazırlama prosedürünün belirlenmesi için literatürde mevcut olan dokümanlar incelenmiş ve numune hazırlama yöntemleri belirlenmiştir. Japon Geoteknik Topluluğu standardının uygun bir numune hazırlama yöntemi olduğu görülmüştür.
- A sahasından alınan turba ve inorganik doğal zeminler ile farklı çimento tipleri ve dozajları kullanılarak deneme deneyleri yapılmış ve diğer deneylerde izlenecek prosedürlere karar verilmiştir.
- Arazide deneme DSM kolon imalatlarının yapılacağı iki ayrı sahadan numune alınmış ve farklı çimento dozajları kullanılarak laboratuvar numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler için arazide kullanılan çimento tipleri ve su/çimento oranları laboratuvarda kullanılmıştır. Numuneler üzerinde farklı kür günleri sonunda serbest basınç mukavemet deneyleri yapılmıştır. Böylelikle arazide imal edilen deneme DSM kolonlarından alınan karot numunelerin mukavemet değerleri laboratuvarda hazırlanan numuneler ile karşılaştırılmıştır.
- Diğer bir grup numunede aynı su/çimento oranı için zeminin başlangıç su muhtevasının etkisi incelenmiştir.
- Bir deney grubunda da bağlayıcı olarak çimento ile birlikte kireç kullanılmıştır.
- Turba zemin için CEM I, CEM II ve CEM III tipi çimento kullanıldığında mukavemet-kür günü ilişkisinin farklılaştığı görülmektedir. CEM II tipi çimento, turba zeminde kısa zamanda bir mukavemete ulaşmakta, uzun vadede bu mukavemet değerinde büyük farklılık oluşmamaktadır. CEM III çimentosu ile uzun dönemde diğer çimento türlerine göre daha fazla mukavemet artışı olmuştur. CEM I tipi çimentoda ise kür gününe bağlı mukavemet artışı olmaktadır, ancak uzun vadede CEM III'ü yakalayamamaktadır. Bu nedenle arazide kullanılacak çimento tipi, kalite kontrol deneyleri için de önemli bir

parametredir ve imalat öncesinde laboratuvarda yapılacak çalışmalar ile kullanılan çimento tipi için mukavemet-kür günü ilişkisi görülmelidir.

- Laboratuvar deneylerinde turba zemin için elde edilen mukavemet değerleri oldukça düşük seviyelerde kalmış, 400 kg/m^3 çimento dozajı için bile düşük mukavemet değerleri oluşmuştur. FHWA (2013)'ün önerdiği mukavemet-toplam su/çimento grafiğinin organik zeminler için kullanılmasının sakıncalı olabileceği görülmüştür.
- Yüksek plastisiteli inorganik kil (CH) için elde edilen değerler 28 gün sonunda 1500-2000 kPa seviyelerine yükselmiştir. Bu zemin için FHWA (2013) ile uyumlu değerler bulunmuştur. FHWA (2013) tarafından önerilen grafiğin, ön tasarım için kullanılabileceği ancak laboratuvarda ve arazide deney yapmadan kullanılmasının sakıncalı olabileceği bazı numunelerde elde edilen değerler bakımından vurgulanmıştır.
- Bu çalışmadan elde edilen verilerde FHWA (2013)'e göre daha düşük değerler karıştırma etkinliğinin düşük olduğu numuneleri, yüksek değerler ise karıştırma etkinliğinin daha iyi olduğu numuneleri temsil etmektedir. Bu nedenle bu grafiğin karışma etkinliğini dikkate alamadığı görülmektedir. Bu tezin özgün sonuçlarından birisi de karıştırma etkinliğinin Likidite İndeksi aracılığı ile bu grafiğe entegre edilmiş olmasıdır.
- Her deney grubu için serbest basınç mukavemeti-sekant elastisite modülü ilişkileri bulunmuş, bu konuda öneriler yapılmıştır. Bu ilişkiler için tek bir denklem verilemeyeceği, ancak geniş bir aralık tanımlanabileceği görülmektedir. Elde edilen alt ve üst limit değerler turba zemin ve inorganik kil zemin için farklılaşmaktadır. Turba zeminler için önerilen aralıklar (30-180)q_u'dur. Çok yüksek su muhtevalarında modül değerlerinin 25 MPa ile, diğer su muhtevalarında 120 MPa ile sınırlandırılması uygundur. İnorganik yüksek plastisiteli killer için (50-330)q_u aralığı tavsiye edilir. Kireç ve çimento içeren numunelerde bu aralık (60-200)q_u olarak verilebilir. Bu korelasyonlar literatür ile uyumlu sonuçlardır. Korelasyonların bu tezde çalışılan zemin tipi ve bağlayıcılar için uygun olduğu vurgulanmaktadır.
- Laboratuvarda bir grup deney de yüksek plastisiteli zeminlerin tabii su muhtevasının mukavemet değerlerini nasıl etkilediğini incelemek amacıyla yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda iyileşmiş zeminlerin benzer Likidite İndekslerinde artış ve azalma bakımından benzer mukavemet davranışı gösterdiği görülmüştür. Düşük başlangıç su muhtevalarının karıştırmayı zorlaştırdığı, etkin karıştırma sağlanmadığı ve bu nedenle düşük mukavemet değerleri elde edildiği belirlenmiştir. Yüksek su muhtevasına sahip

zeminler için ise homojenlik sağlanmakla birlikte düşük mukavemet değerleri ölçülmüştür, çünkü su miktarının artması boşlukları artırmaktadır. Bu durum civalı porozimetre sonuçları ile de ilişkilendirilmiştir. En yüksek mukavemet değerlerine her iki zeminde de Likidite İndeksi değerinin 0.6-0.7 olduğu seviyelerde ulaşılmıştır. Bir yıl kür süresi sonunda da aynı davranış devam etmiştir. Bu özgün bulgu ince daneli killerin DSM ile iyileştirilmesi bakımından büyük önem taşımaktadır. Likidite İndisinin 0.3'ten küçük olduğu durumlarda karıştırma etkinliği ve mukavemet kazanımı sınırlı olmuştur.

- Sonuçlar, çimento ile birlikte kirecin kullanıldığı numunelerde de yüksek mukavemetlere ulaşılabileceğini ve ayrıca kireç ilavesinin, tüm karışımın işlenebilirliğini artırdığını göstermiştir. Kireçli karışımlarda numune hazırlama süreci çok daha kolay olmuş, karışım miksere daha az yapışmıştır. Kireç ilavesinin yüksek plastisiteli killerin işlenebilirliğini katyon değişimi nedeniyle artırdığı bilinmektedir. Bu durum, arazide DSM uygulamalarında yüksek plastisiteli killerde karşılaşılan karıştırma etkinliği sorunu için bir çözüm olabilir.
- Serbest basınç mukavemet deneyi yapılan tüm numunelerin göçme birim deformasyon (ε_f) değerleri bulunmuştur. DSM için beklenen göçme birim deformasyon değerleri genellikle %0.3-2.5 arasında değişmektedir.
- Arazide iki farklı sahada deneme DSM kolonları imal edilmiştir. Bir sahada turba zemin, diğer sahada da yüksek plastisiteli kil bulunmaktadır. Her ikisinin de DSM bakımından problemli zeminler olduğu görülmüştür. Turbanın çok boşluklu bir yapıda olması ve laboratuvar şartlarında dahi sınırlı iyileşme sağlanması, arazideki problemlerin yaşanmasında önemli bir etkendir. Yüksek plastisiteli killerde ise, bıçak yapısı ve su muhtevası nedeniyle karıştırmanın etkinliğini sağlamak çok zor olmuştur.
- Bu kolonlar imal edilirken, farklı imalat parametreleri ve farklı çimento dozajları kullanılmıştır. Deney sırasında ıslak numune alıcı ile kolonlardan üst seviyelerden numune alınmış, bu numuneler üzerinde daha sonra laboratuvarda basınç deneyleri yapılmıştır.
- Arazide kalite kontrol çalışmaları kapsamında kullanılan ıslak numune alıcı numuneleri genellikle enjeksiyon numunesini içerdiği için çok yüksek mukavemet değerlerine ulaşılmıştır. Bu değerler laboratuvarda ölçülmüş DSM mukavemet değerlerinden çok yüksektir. Bu durum, numune alınabilen kotlarda, DSM karışımı değil, enjeksiyon numunesi alınabildiğini göstermektedir. Bu nedenle alınan numuneler DSM malzemesini temsil edememiştir.

- İmalat parametrelerinin, elde edilen kolon özellikleri üzerindeki etkisi yaklaşık bir ay sonunda yerinde yapılan kalite kontrol deneyleri ile ölçülmüştür. Deneme kolonlarından tam boy karot alınmış ve kolonların içinde belirli derinliklerde basınçlı su testi ve presiyometre deneyleri yapılmıştır. Aynı zamanda doğal zemini karakterize edebilmek amacıyla iki sahada da zemin sondajı yapılarak, SPT ve presiyometre deneyleri uygulanmıştır. Her iki sahada karot sandıkları oluşturulmuş ve laboratuvara getirilmiştir.
- Laboratuvara getirilen karot sandıkları detaylı bir şekilde değerlendirilmiş ve DSM kolonları oluşan iyileştirme seviyesine göre gözlemsel olarak sınıflandırılmıştır. Araziden gelen karot numuneleri ve doğal zemin numuneleri ile laboratuvar çalışmaları yapılmıştır. Bazı kolon derinliklerin tamamen enjeksiyon malzemesinden oluştuğu, bazı derinliklerde ise iyileşme olmadığı görülmüştür. Bu iki uç durum arasında farklı seviyelerde iyileşme seviyeleri kategorik olarak tanımlanmıştır. Her kolon için kolon profili bu kategorilere göre oluşturulmuştur.
- Yüksek plastisiteli killerin olduğu zeminlerde, kilin bıçaklara yapıştığı ve birkaç metreye varan zemin kolonları oluştuğu görülmüştür. Bu kolonlar nedeniyle zeminde etkin karıştırma sağlanmamış ve süreklilik gösteren DSM kolonları oluşamamıştır. Özellikle yüksek plastisiteli killerde bıçak geometrisinin çok önemli olduğu ve yapışmayı engelleyecek daha sofistike bıçaklar kullanılması gerektiği görülmüştür.
- Çimento dozajının artması ile daha iyi kolonların oluşması sağlanamamıştır. İmalatın kalitesi ve imalat detayları çimento dozajı kadar, hatta daha çok önemlidir. BRN değerleri ile kolon kalitesi arasında her zaman bir korelasyon kurulamamıştır. Karıştırmanın tam olarak sağlanmaması durumunda BRN değerlerinin direkt olarak iyileştirmenin artması bakımından etkili olmadığı görülmüştür.
- İmalat parametreleri aynı olan kolonların iyileşme oranlarında da farklılık olabildiğini görülmüştür. Bunun sebeplerinden birisi, imalat sırasında derinlik boyunca reel olarak gerçekleşen iniş hızı, çıkış hızı, dönme hızı, her derinlikte ne seviyede enjeksiyon gönderebildiğine ilişkin verinin imalat sürecine paralel olarak kullanılmamasıdır. Bu tür önemli parametreleri imalat sırasında kontrol ve kayıt eden bir kayıt sistemi kullanılmadığı sürece, hangi derinlikte ne olduğu, hangi seviyede gerçekte hangi hızda inildiği, çıkıldığı ve enjeksiyonun hangi seviyelerde yoğun olarak iletildiği veya hangi seviyelerde yeterli miktarda iletilemediğinin anlaşılması mümkün değildir. Bu tür bir kontrol mekanizması olmadığı için operatörün imalat sırasında önlem alması da

mümkün olmamaktadır. DSM imalatı sırasında bu gerçek zamanlı takip sisteminin olması büyük önem taşımaktadır.

- Laboratuvara getirilen karot numuneleri üzerinde çok sayıda laboratuvar deneyi yapılmış ve arazi-laboratuvar değerleri karşılaştırılmıştır. Parçalanmış numunelerde elde edilen elek analizi ve kıvam limit değerleri iyileştirmenin olmasa da DSM ile zeminde oluşan değişimin bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir.
- Karotların mukavemet ve birim hacim ağırlık değerleri derinlik boyunca çizilmiş, değerlendirmeler yapılmıştır.
- Arazide yapılan presiyometre deneyleri, presiyometrenin DSM kolonlarında elde edilen iyileştirme seviyesi için kalite kontrol aşamasında kullanılabileceğini göstermektedir.
- DSM için presiyometre modül değerlerinin net limit basınç değerlerinin 15-25 katı arasında değişebildiği görülmektedir. Yeterince iyileştirilemeyen zeminlerde yapılan ölçümlerde gerek presiyometre modülünün gerekse net limit basınç değerlerinin doğal zeminde sondaj içerisinden alınan değerlerle benzer olduğu görülmektedir. Hatta kolon içerisinden ölçülen bazı değerler, doğal zemine nazaran daha küçük bile çıkmıştır. Bunun nedeninin karıştırma nedeniyle oluşan örselenme olduğu düşünülmektedir.
- Kolonlarda yapılan yerinde permeabilite deneyleri de kolonların tam olarak oluşmadığını permeabilite bakımından da göstermiştir.
- Bu tez sırasında yapılan literatür taraması ve arazide yapılan deneyler sonucunda DSM kolonlarının kabul kriterlerine ek olarak başka bir “kabul edilemez” kriteri gelmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu kriterdeki numuneler, hedef mukavemet değerinin çok üzerinde mukavemet değerine sahip olan numuneleri oluşturmaktadır.Mevcut kalite kontrol kriterleri bu numunelerin de kriterleri geçtiğini kabul etmektedir. Ancak, hedef değerin çok üzerinde mukavemet elde edilmesinin muhtemel sebepleri, enjeksiyon harcının mukavemetinin ölçülüyor olması, bu bölgede kullanılan enjeksiyon nedeniyle başka bir bölgede daha az enjeksiyon kullanılmış olmasıdır, çünkü bir kolon için kullanılacak enjeksiyon miktarı bellidir. Diğer bir sebep de, bu tür değerlerin sayısı çok fazla ise, kolon imalatı için gerekli olandan daha çok çimento kullanılmış olmasıdır, bu da ekonomik ve sürdürülebilirlik bakımdan kabul edilmemesi ve cezalandırılması gereken bir durumdur.

KAYNAKLAR

Åhnberg, H., 2006, *Strength of stabilized soils:A laboratory study on clays and organic soils stabilized with different types of binder*, (Doctoral thesis), Department of Construction Sciences, 197 pages, ISBN: 78-91-628-6790-4.

Åhnberg, H. ve Holmen, M., 2008, Laboratory determination of small-strain moduli in stabilized soils, *Swedish Geotechnical Institute (SGI)*, Sweden, 291-297.

Alipour, R., Khazaei, J., Pakbaz, M.S. ve Ghalandarzadeh, A., 2017, Settlement control by deep and mass soil mixing in clayey soil, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 170(1), 27-37.

Amin, D., (2015). *Triaxial testing of lime-cement stabilized clay, a comparison with unconfined compression tests*, (Yüksek Lisans Tezi), KTH Royal Institute of Technology, 91 p.

Babasaki, R., Terashi, M., Suzuki, T., Maekawa, A., Kawamura, M. ve Fukazawa, E., 1996, Factors influencing the strength of improved soil, grouting and deep mixing, *2nd International Conference on Ground Improvement Geosystems*.

Baker, S., 2000, *Deformation behaviour of lime/cement column stabilized clay*, (Doctoral Thesis), Linköping: Swedish Deep Stabilization Research Centre Chalmers University of Technology.

Barisoglu, E.N., Meeusen, J., Snoeck, D., Verástegui-Flores, R.D. ve Di Emidio, G., 2023, Feasibility of using recycled construction and demolition materials for deep soil mixing, *Sustainability*, 15(6), 5223.

Boehm, D.W., 2021, The integral role of the contractor in achieving the desing properties of soil mixed material (soilcrete), *Deep Foundation Institute*, 1203-1218.

Boulanger, R.W. ve Shao, L., 2021, Liquefaction mitigation with deep mixing, *Deep Foundation Institute*, 1146-1202.

Bozbey, İ., Çınar Özkan, F.T. ve Keleşoğlu, M., 2022a, *Karayolu zayıf zemin geçişlerinde derin zemin karıştırma uygulaması el kitabı*, Karayolları Genel Müdürlüğü, 97 sayfa.

Bozbey, İ., Çınar Özkan, F.T., Keleşoğlu, M., Sarğın, S. ve Öztoprak, S., 2022b, *Derin karıştırma yönteminde elde edilen iyileştirilmiş zemin özelliklerinin laboratuvar ve arazi şartlarında tayini ve derin karıştırma şartnamesi hazırlanması*, KGM-ARGE/2019-8, Ar-Ge Projesi Sonuç Raporu, Karayolları Genel Müdürlüğü, 485 sayfa.

Broms, B.B., 1999, Keynote lecture: Design of lime, lime/cement and cement columns, *International Conference on Dry Mix Methods: Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 125-153.

Bruce, D.A., 2001, Practitioner's guide to the deep mixing method, *Ground Improvement,* 5(3): 95-100.

Bruce, D.A., Bruce M.E., 2003, The practitioner's guide to deep mixing, *Grouting and Ground Treatment*, 474-488.

Bruce, M.E.C., Berg, R.R., Collin, J.G., Filz, G.M., Terashi, M. ve Yang, D.S., 2013, *Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support*, (No. FHWA-HRT-13-046).

Carlsten, P. ve Ekstrom, J., 1995, Lime and lime cement columns, guide for project planning, construction and inspection, *Swedish Geotechnical Society Report 4:95E*.

CDIT (Coastal Development Institute of Technology), 2002, *The deep mixing method: principle, design and construction*, Balkema, Lisse, Netherlands.

CDM (Cement Deep Mixing), 1985, *Design and construction manual for CDM institute*, partial english translation, Cement Deep Mixing Association of Japan, Tokyo, Japan.

Cement Deep Mixing Method Association, 1999, *Cement deep mixing method (CDM),* Design and Construction Manual (in Japanese).

Coastal Development Institute of Technology, 2008, *Technical manual of deep mixing method for marine works*, 289p., (in Japanese).

Çınar Özkan, F.T. ve Bozbey, İ., 2022, Derin karıştırma yöntemi ile organik zeminin iyileştirilmesi: Laboratuvar çalışması, *Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği 18. Ulusal Konferansı*, 29-30 Eylül, Kayseri, Türkiye.

Çınar Özkan, F.T., Korkmaz, G. ve Bozbey, İ., 2023, Derin karıştırma yöntemi (DSM) için serbest basınç mukavemeti-modül korelasyonları, *9. Geoteknik Sempozyumu*, 22-24 Kasım, İstanbul.

Enami, A., Yoshino, M., Hibino, S., Takahashi, M. ve Akiya, K., 1985, Basic properties of soil cement columns produced by teno column method (Deep Mixing Method) using free blades, *Proceedings of the 20th Annual Conference of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1755-1758 (in Japanese).

Eriksson, H., Gunther, J. ve Ruin, M., 2005, MDM combines the advantages of dry and wet mixing, *International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances,* Stockholm, Sweden. (Volume 1.2, 509-520).

EuroSoilStab, 2002, *Development of design and construction methods to stabilize soft organic soils: Design guide soft soil stabilization*, CT97-0351, Project No. BE-96-3177, European Commission, Industrial and Materials Technologies Programme (Rite-EuRam II) Brysell.

Farouk, A., Shahien, M.M., 2013, Ground improvement using soil-cement columns-experimental investigation, *Alexandria Engineering Journal*, (2013)52, 733-740.

FHWA, 2013, *Federal Highway Administration Design Manual: Deep Mixing for Embankment and Foundation Support*, FHWA-HRt-13-046.

GeoTesting Express, 1996, *Geotechnical tests on soil cement mix for central artery/tunnel project*, GeoTesting Express, final report to Bechtel/Parsons Brinckerhoff.

Ghirardini, C., 2016, *A case study of soil reinforcement with the lime-cement columns method: Dalvagen road*, Stockholm, (Tesı Dı Laurea Magıstrale In Geologıa E Geologıa Tecnıca), Unıversıtà Deglı Studı Dı Padova, 345 p.

Hebib, S. ve Farrell, E.R., 2003, Some experiences on the stabilization of Irish peats, *Canadian Geotechnical Journal*, 40 (1), 107-120.

Hirade, T., Futaki, M., Nakano, K. ve Kobayashi, K., 1995, The study on the ground improved with cement as the foundation ground for buildings, Part 16, Unconfined compression test of large scale column and sampling core in several fields, *Proc. Of the Annual Conference of Architectural Institute of Japan*, Japanese, 861-862.

Hodges, D.K., Filz, G.M. ve Weatherby, D.E., 2008, *Laboratory mixing, curing, and strength testing of soil-cement specimens applicable to the wet method of deep mixing*, CGPR Report No. 48, Virginia Tech Center for Geotechnical Practice and Research, Blacksburg, VA.

Holm, G., 1999, *Keynote lecture: applications of dry mix methods for deep soil stabilization*, Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, Bredenberg, Holm, Broms, 1999/Balkema, Rotterdam, Brookfield, The International Conference on Deep Mixing - Recent Advances and Best practice, Stockholm 1999, 3-13.

Horpibulsuk, S., Miura, N. ve Bergado, D.T., 2004, Undrained shear behavior of cement admixed clay at high water content, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130 (10), 1096-1105.

Horpibulsuk, S., Miura, N. ve Nagaraj, T.S., 2003, Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis, *Geotechnique*, 53(4), 439-444.

Horpibulsuk, S., Miura, N., Koga, H. ve Nagaraj, T.S., 2004, Analysis of strength development in deep mixing: A field study, *Ground Improvement*, 8(2), 59-68.

Jacobson, J.R., Filz, G.M. ve Mitchell, J.K., 2003, Factors affecting strength gain in lime-cement columns and development of a laboratory testing procedure, *Virginia Transportation Research Council*, Charlottesville, VA.

Jacobson, J.R., Filz, G.M. ve Mitchell, J.K., 2005, Factors affecting strength of lime-cement columns based on a laboratory study of three organic soils, *Proceedings of Deep Mixing*, 2005, 87-94.

Janz, M. ve Johansson, S.E., 2002, The function of different binding agents in deep stabilization, *Swedish Deep Stabilization Research Centre*, Report 9.

Japanese Geotechnical Society (JGS), 2000, *Practice for makingand curing stabilized soil specimens without compaction*, JGS, Tokyo, Japan, JGS T 0821-2000, in Japanese.

Kanty, P., Rybak, J. ve Stefaniuk, D., 2017, Some remarks on practical aspects of laboratory testing of deep soil mixing composites achieved in organic soils, *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, (Vol. 245, No. 2, p. 022018). IOP Publishing.

Karpisz, I., Pyda, J., Cichy, L. ve Sobala, D., 2018, Study of the effect of cement amount on the soil-cement sample strength, *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, (Vol. 365, No. 4, p. 042061). IOP Publishing.

Kawamura, M., Hibino, S., Tamura, M., Fujii, M. ve Watanabe, K., 2001, Perspective of performance-based deep-mixing method, *Tsuchi to Kiso*, 1-3 (in Japanese).

Kiecana, M., Kanty, P. ve Łużyńska, K., 2018, Optimal control time evaluation for "Dry DSM" soil-cement composites, *In MATEC Web of Conferences*, (Vol. 251, p. 01023). EDP Sciences.

Kitazume, M., 2022, *Quality control and assurance of the deep mixing method*, CRC Press, Balkema, ISBN: 978-1-032-12104-8.

Kitazume, M. ve Nishimura, S., 2009, Influence of specimen preparation and curing conditions on unconfined compression behaviour of cement-treated clay, *In: Proceedings of the International Symposium on Deep Mixing and Admixture Stabilization*, 155-160, Deep Mixing'09, Japan.

Kitazume, M., Nishimura, S., Terashi, M. ve Ohishi, K., 2009, International collaborative study Task 1: Investigation into practice of laboratory mix tests as means of Qc/Qa for deep mixing method, *Proceedings of the Deep Mixing 2009 Okinawa Symposium*, 107-126.

Kitazume, M., Grisolia, M., Leder, E., Marzano, I.P., Correia, A.A.S., Oliveira, P.J.V., Åhnberg, H. ve Andersson M., 2015, Applicability of molding procedures in laboratory mix tests for quality control and assurance of the deep mixing method, *Soils and Foundations*, 55, 761-777.

Kitazume, M. ve Terashi, M., 2013, *The Deep Mixing Method*, CRC Press, Balkema, ISBN: 978-1-138-00005-6.

Kitazume, M., Terashi, M. ve Tokunaga, S., 2021, Importance of water/cement ratio concept in quality control and assurance of deep mixed soil, *Deep Foundations Institute, Deep Mixing an Online Conference*, Poland.

Lade, P.V. ve Overton, D.D., 1989, Cementation effects in frictional materials, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 115 (10), 1373-1387.

Larsson, S., 2005, State of practice report-execution, monitoring and quality control, *Deep Mixing, 5,* 732-785.

Larsson, R., 2006, *Djupstabilisering med bindemedelsstabiliserade pelare och masstabilisering*, Linköping: Swedish Deep Stabilization Research Centre.

Lorenzo, G.A. ve Bergado, D.T., 2003, New consolidation equation for soil-cement pile improved ground, *Canadian Geotechnical Journal*, *40*, 265-275.

Lorenzo, G.A. ve Bergado, D.T., 2004, Fundamental parameters of cementad mixed clay-a new approach, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130 (10), 1042-1050.

Lorenzo, G.A. ve Bergado, D.T., 2006, Fundamental characteristics of cement-admixed clay in deep mixing, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(2), 161-174.

Massarsch, K.R. ve Topolnicki, M., 2005, Regional report: European practice of soil mixing technology, *International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances*, Stockholm, Sweden. (Volume 1.1, pp. R19-R45).

Mathieu, F., Streets, R. ve Nix, P., 2021, Laboratory and field tests comparison: Case history of portage lakes east reservoir dam, *Deep Foundation Institute*, 690-698.

McGinn, A.J. ve O'Rourke, T.D., 2003, *Performance of Deep Mixing Methods at Fort Point Channel*, Federal Highway Administration, Washington, DC.

Miura, N., Horpibulsuk, S. ve Nagaraj, T.S., 2002, Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content, *Soils and Foundations*, 41(5), 33-45.

Nishibayashi, K., Matsuo, T., Hosoya, Y. ve Umetsu, K., 1985, *Improvement of Deep Soft Ground by Cement Mixing (Part 7)*, Report of Obayashi Corporation Technical Research Institute. No. 31, 114-118 (in Japanese).

Nozu, M., Anh, N.T., Shinkawa, N. ve Matsushita, K., 2012, Remedy of deep soil mixing quality for montmorillonite clay deposited in the Mekong and Mississippi deltas, *Rroc. of the International Symposium Recent Research, Advances & Execution Aspect of Ground Improvement Works*, Vol. 2, 443-449.

Nozu, M., Sakakibara, M. ve Anh, N.T., 2015, Securing of in-situ cement mixing quality for the expansive soil with the 'montmorillonite' inclusion, *Rroc. of the International Symposium on Deep Mixing, Deep Mixing 2015*, 845-852.

Pantazopoulos, I.A., Markou, I.N., Christodoulou, D.N., Droudakis, A.I., Atmatzidis, D.K., Antiohos, S.K. ve Chaniotakis, E., 2012, Development of microfine cement grouts by pulverizing ordinary cements, *Cement and Concrete Composites*, 34(5), 593-603.

Park, C.S. ve Park, H.K., 2018, An experimental study on the elastic modulus of deep mixing ground specimen, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 34(10), 39-49.

Perret, S., Ballivy, G., Khayat, K. ve Mnif, T., 1997, Injectability of fine sand with cement-based grout, *In Grouting: Compaction, Remediation and Testing*, ASCE, 289-305.

Porbaha, A., 1998, State of the art in deep mixing technology, Part I: Basic concepts and overview, *Ground Improvement*, Ed. Thomas Telford Ltd., 2, 81-92.

Porbaha, A., Shibuya, S. ve Kishida, T., 2000, State of the art in deep mixing technology, Part III: Geomaterial characterization of deep mixing, *Ground Improvement*, 4, 91-110.

Porbaha, A., Tanaka, H. ve Kobayashi, M., 1998, State of the art in deep mixing technology: Part II: Applications, *Ground Improvement*, Ed. Thomas Telford Ltd., 2, 125-139.

Porbaha, A., Weatherby, D., Macnab, A., Lambrechts, J., Burke, G., Yang, D. ve Puppala, A.J., 2005, Regional report: North American practice of deep mixing technology, *International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances*, R47-R73, Swedish Deep Stabilization Research Centre, Stockholm, Sweden.

Public Works Research Center, 2004, *Technical manual on deep mixing method for on land works*, 334p., (in Japanese).

Puppala, A.J., Madhyannapu, R.S., Nazarian, S., Yuan, D. ve Hoyos, L., 2008, *Deep Soil Mixing Technology for Mitigation of Pavement Roughness*, Texas Department of Transportation Research and Technology, (No. FHWA/TX-08/0-5179-1).

Sarıkahya, N., 2023, *Killi zeminlerin kireç ile stabilizasyonuna sülfat içeriğinin etkisi*, (Doktora tezi), İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

SD, 2005, *Deep stabilisation with binder-mixed columns and mass stabilization-Guidelines*, Swedish Deep Stabilization Research Centre (SD) Report No. 17. (In Swedish).

SGI (Swedish Geotechnical Institute), 1997, *Lime and Lime Cement Columns-Guide for Project Planning*, Construction and Inspection, Swedish Geotechnical Society, Linko ¨ping, Sweden, SGF Report 4:95E, 111 pp.

Shrestha, R., 2008, *Soil mixing: A study on brusselian sand mixed with slag cement binder*, (M.Sc. Thesis), University of Ghent, Belgium, 2008, 80p.

Stab, E.S., 2002, *Development of design and construction methods to stabilize soft organic soils: Design guide soft soil stabilization*, Industrial and Materials Technologies Programme (Brite-EuRam III), European Commission. CT97-0351, Project No. BE, 96-3177.

Szymkiewicz, F., Guimond-Barrett, A., Le Kouby, A. ve Reiffsteck, P., 2012, Influence of grain size distribution and cement content on the strength and aging of treated sandy soils, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(7), 882-902.

Szymkiewic, F., Barrett, A.G., Marino, J.P., Le Kouby, A. ve Reiffsteck, P., 2015, *Assessment of strength and other mechanical properties of the deep mixing material*, HAL Id: hal-01597675, https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01597675.

Şengör, M.Y., 2011, *The deformation characteristics of deep mixed columns in soft clayey soils: A model study*, Doctor of Philosophy in Civil Engineering Department, Middle East Technical University.

Şenkaya, A., 2019, *Farklı çimento tipleriyle oluşturulmuş jet grout kolonlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve ultra ses yöntemiyle incelenmesi*, (Yüksek lisans tezi), Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitiüsü.

TBT Makine Limited Şirketi, 2021, *Dünyada uygulanan zemin karıştırma metodları-soil mixing*, İstanbul.

Terashi, M., 1997, Theme lecture: Deep Mixing method, brief state of the art, *Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 4, Hamburg, Germany, 2475-2478.

Terashi, M., 2003, The state of practice in deep mixing methods, *Grouting and Ground Treatment: Proceedings of the Third International Conference, Geotechnical Special Publication,* 120, 25-49, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.

Terashi, M., 2009, Current practice and future perspective of QA/QC for deep-mixed ground, *Okinawa Deep Mixing Symposium*.

Terashi, M., Okumura, T. ve Mitsumoto, T., 1977, Fundamental properties of lime treated soil (1st report), *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol. 16, No. 1, 3-28 (in Japanese).

Topolnicki, M., 2004, In situ soil mixing, In: Moseley MP, Kirsch K, editors, *Ground Improvement*, New York, USA: Spon Press, 331-423.

Topolnicki, M., 2016, General overview and advances in deep soil mixing, *In XXIV Geotechnical Conference of Torino Design, Construction and Controls of Soil İmprovement Systems*, 25-26.

Truong, Q.T., Nguyen, N.L. ve Nguyen, T.Q.N., 2020, Mechanical behavior of Vinh Long soil mixed with cement, *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, (Vol. 869, No. 7, p. 072004). IOP Publishing.

TS EN 14679, 2006, *Özel Jeoteknik Uygulamalar-Derin Karıştırma*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 197-1, 2012, *Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri,* Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TS EN ISO 10390, 2021, *Toprak Kalitesi pH Tayini*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

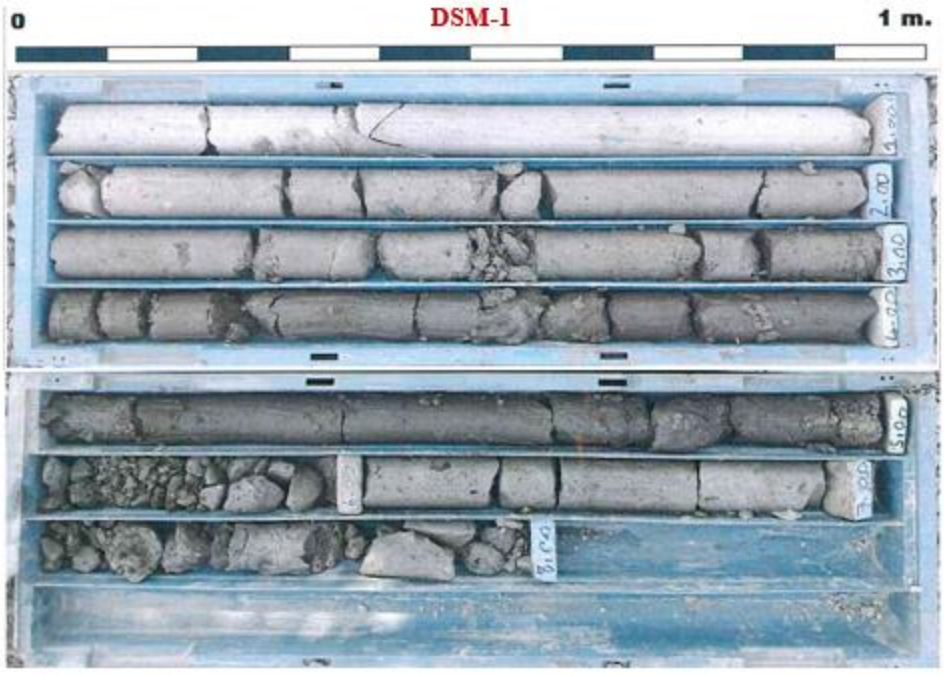
TS EN ISO 10304-1, 2010, *Su Kalitesi-Çözünmüş Florür, Klorür, Nitrit, Ortofosfat, Bromür, Nitrat ve Sülfat İyonlarının Sıvı İyon Kromatografisi ile Tayini Bölüm-1 Az kirlenmiş Sular için Metot,* Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

Van Impe, W.F., Verástegui Flores, R.D., Mengé, P. ve Van den Broeck, M., 2005, Considerations on laboratory test results of cement stabilised sludge, *In Proc. of the International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advance*, (Vol. 1, pp. 163-168).

Vipulanandan, C. ve Shenoy, S., 1992, Properties of cement grouts and grouted sands with additives, *In Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, ASCE, 500- 511.

EKLER

EK-1: A SAHASINDAN ALINAN KAROT SANDIKLARI





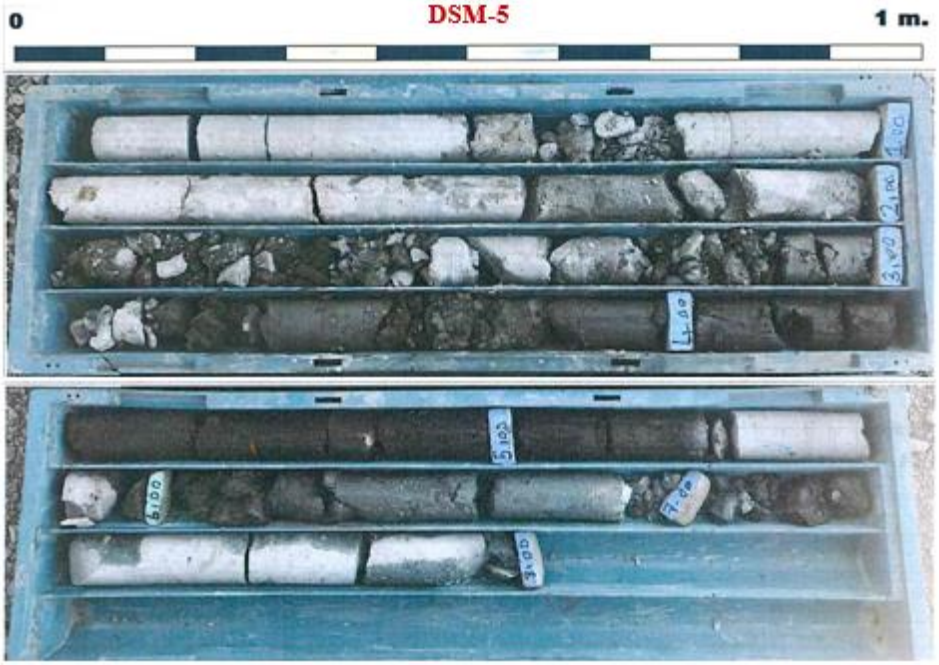
DSM-3



DSM-4



DSM-5




0
DSM-6
1 m.


0
DSM-7
1 m.


0
DSM-8
1 m.

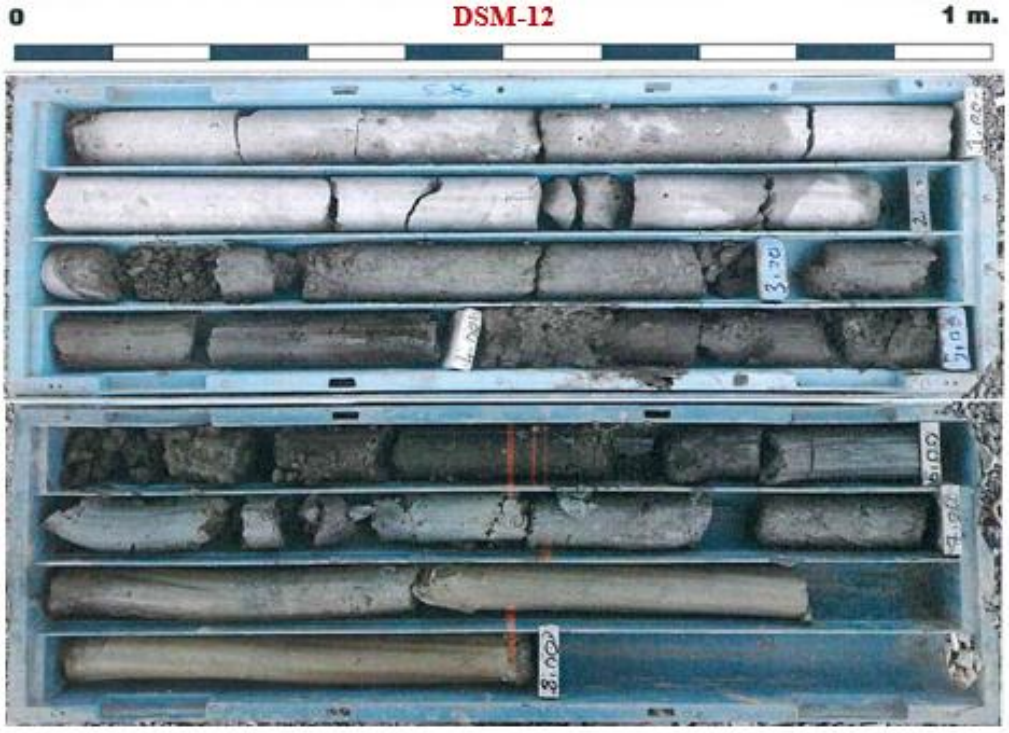

0
DSM-9
1 m.

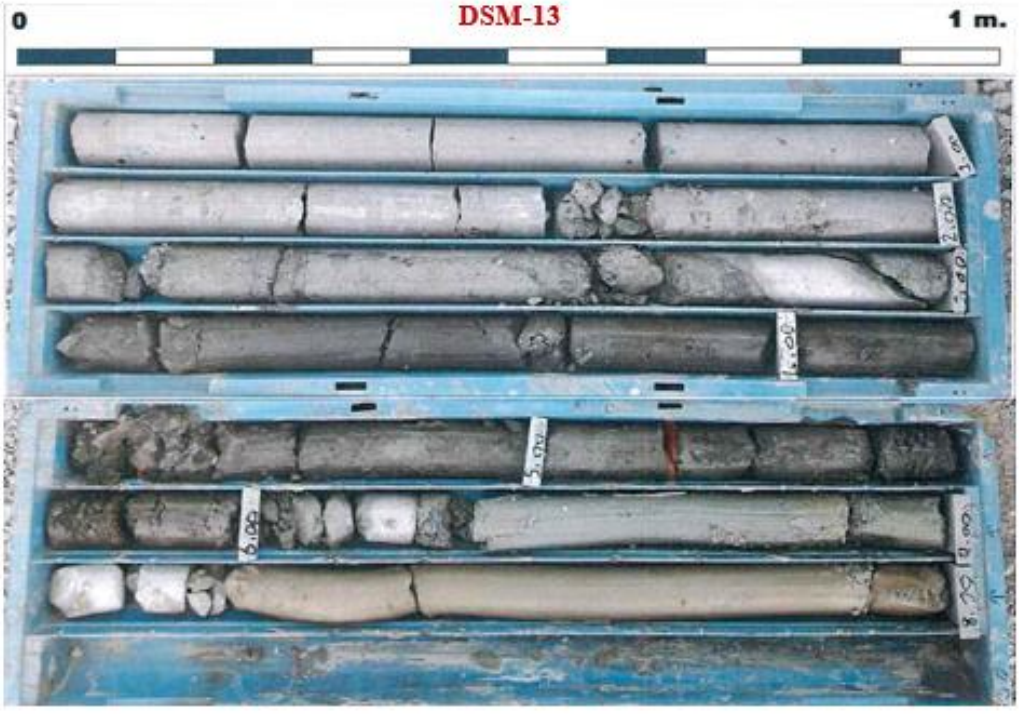
0 **DSM-10** 1 m.



0 **DSM-11** 1 m.

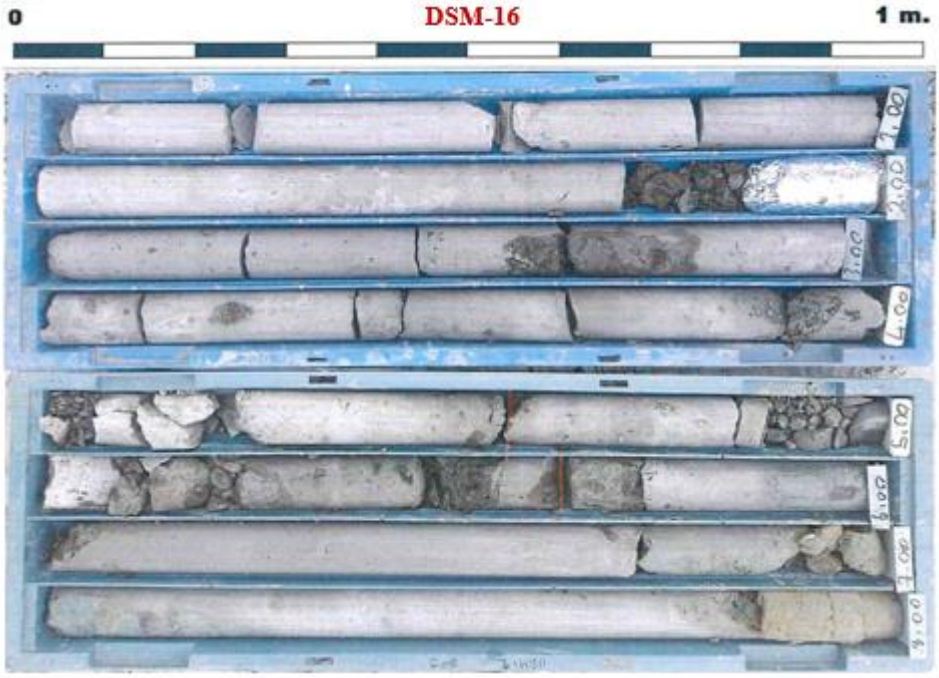



0
DSM-12
1 m.


0
DSM-13
1 m.


0
DSM-14
1 m.

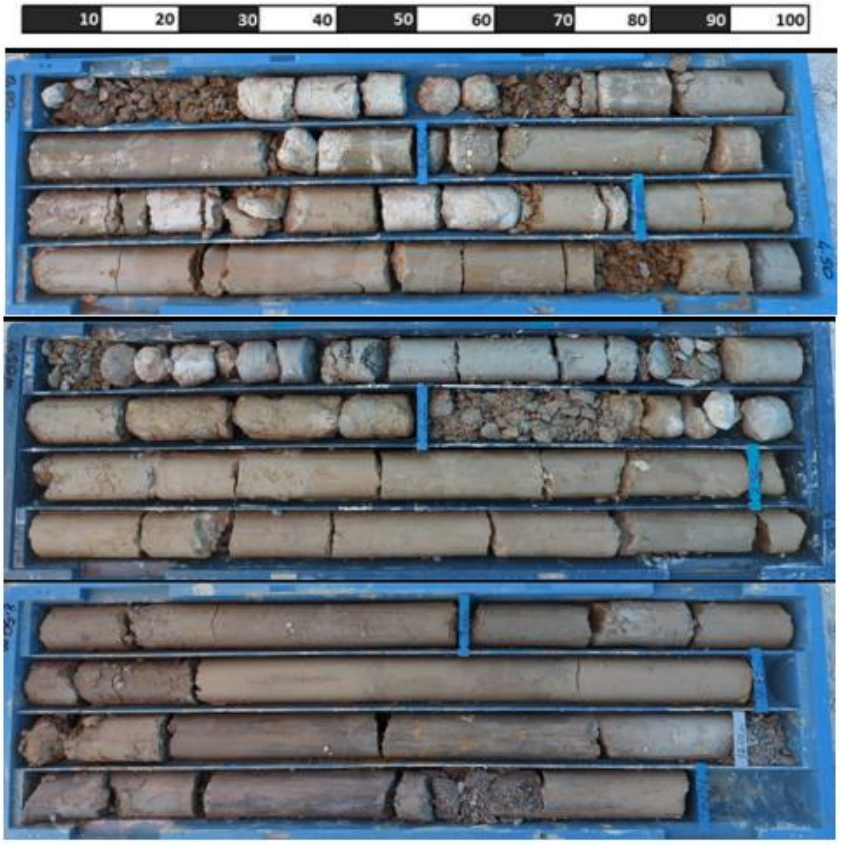

0
DSM-15
1 m.



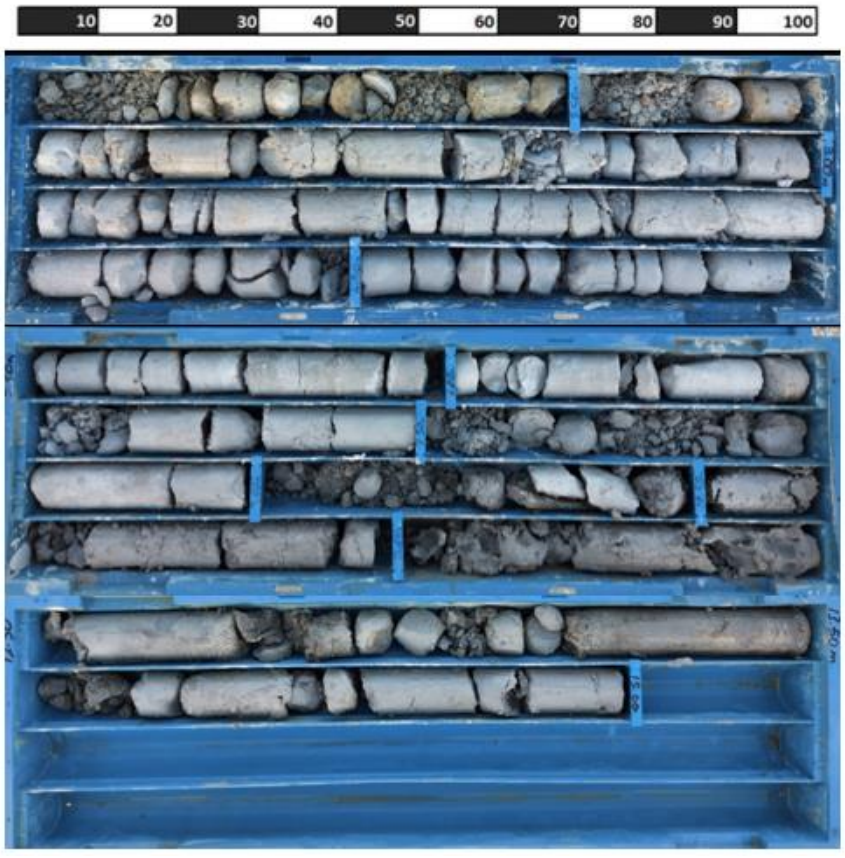
EK-1: B SAHASINDAN ALINAN KAROT SANDIKLARI



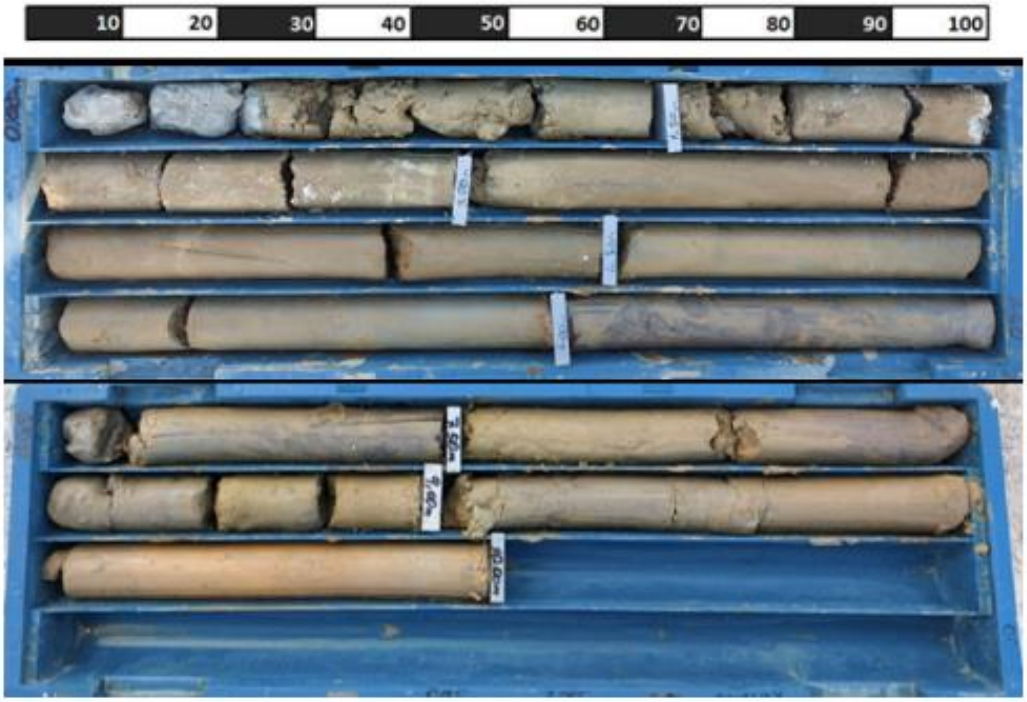
DSM-1



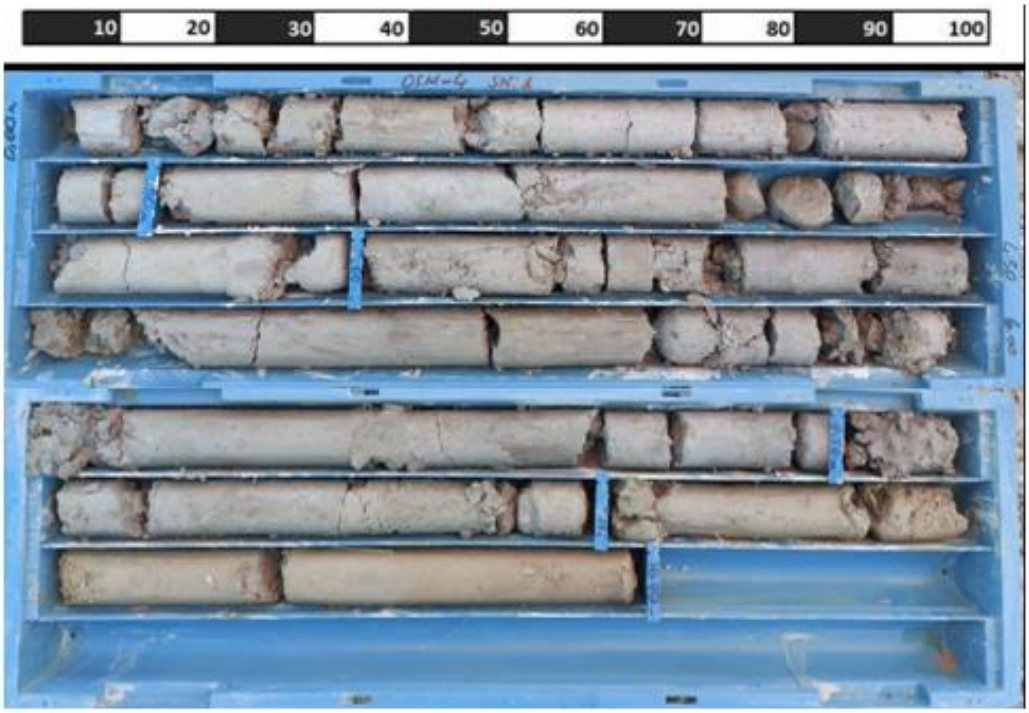
DSM-2



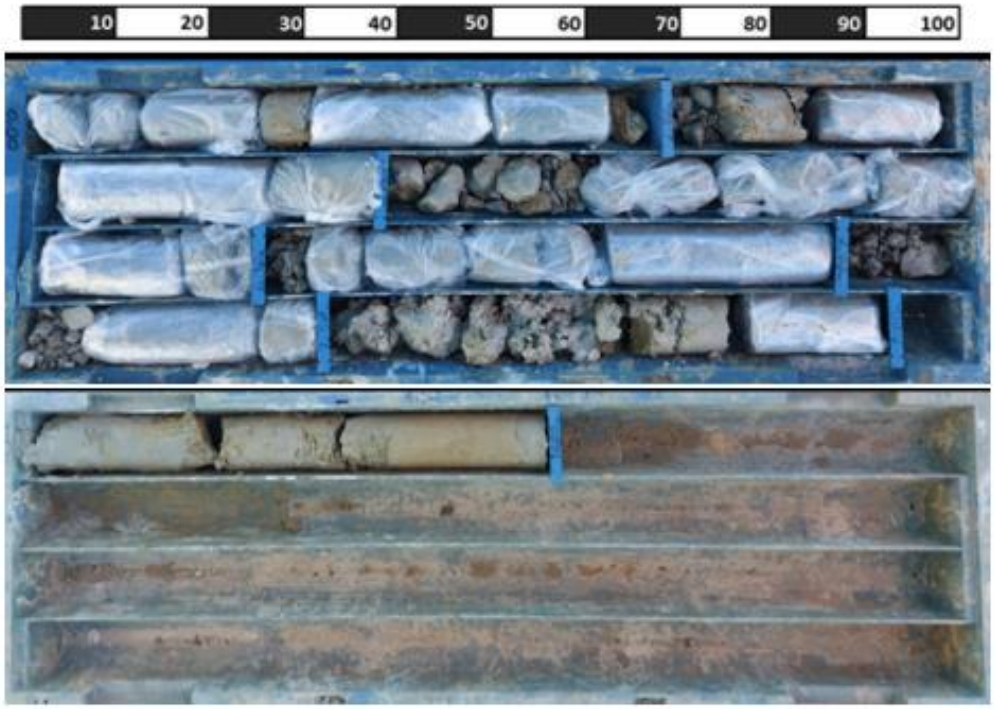
DSM-3



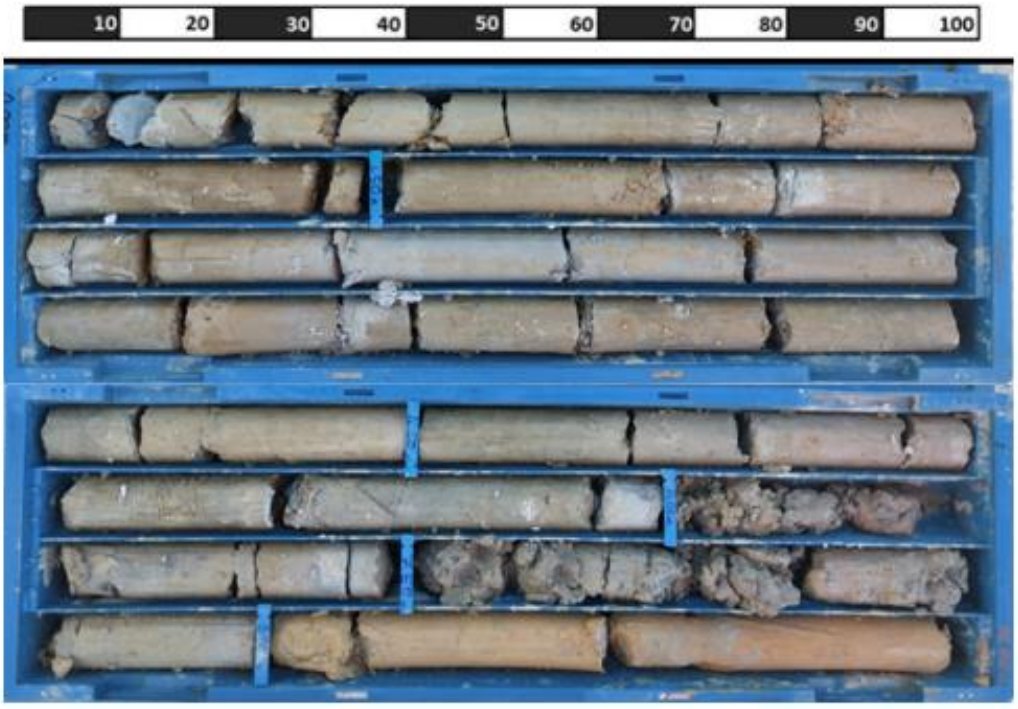
DSM-4



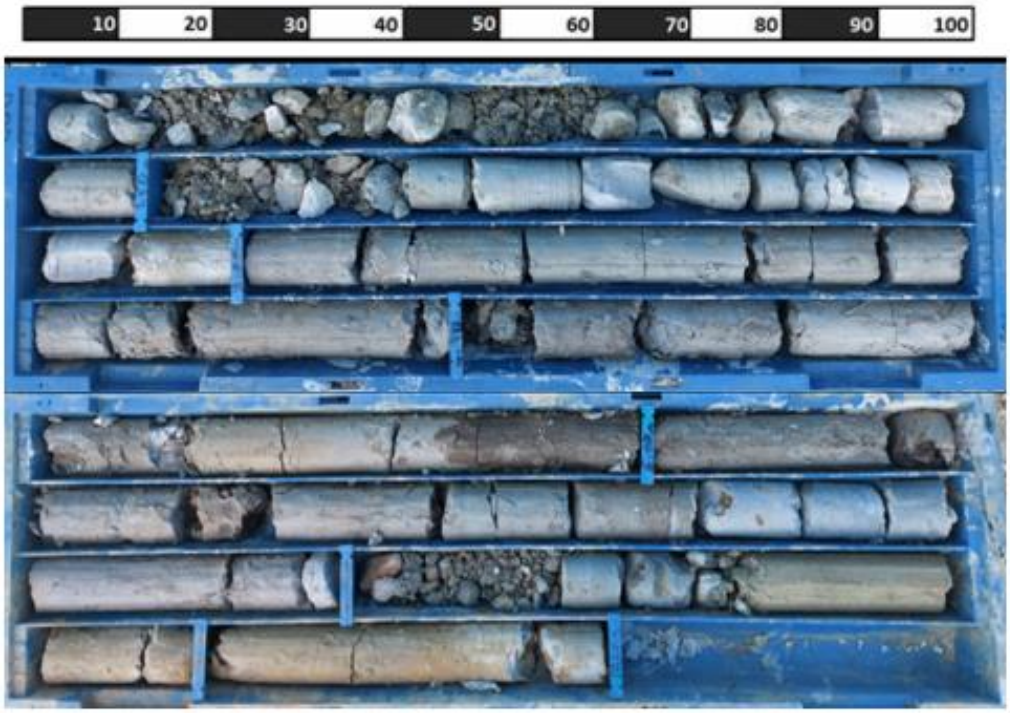
DSM-5



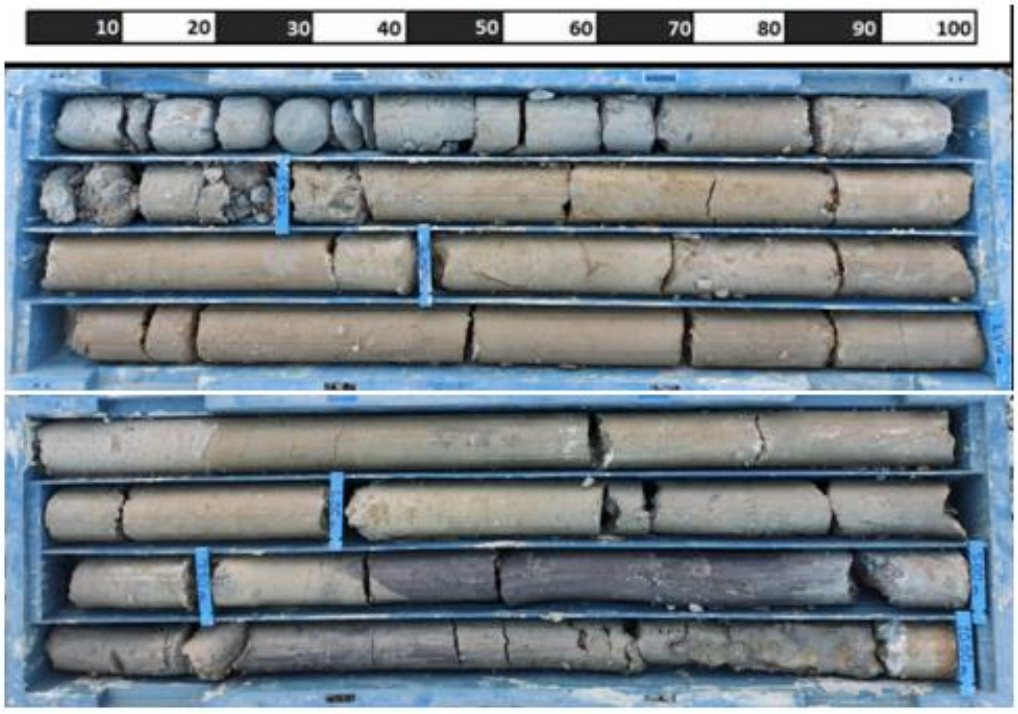
DSM-6



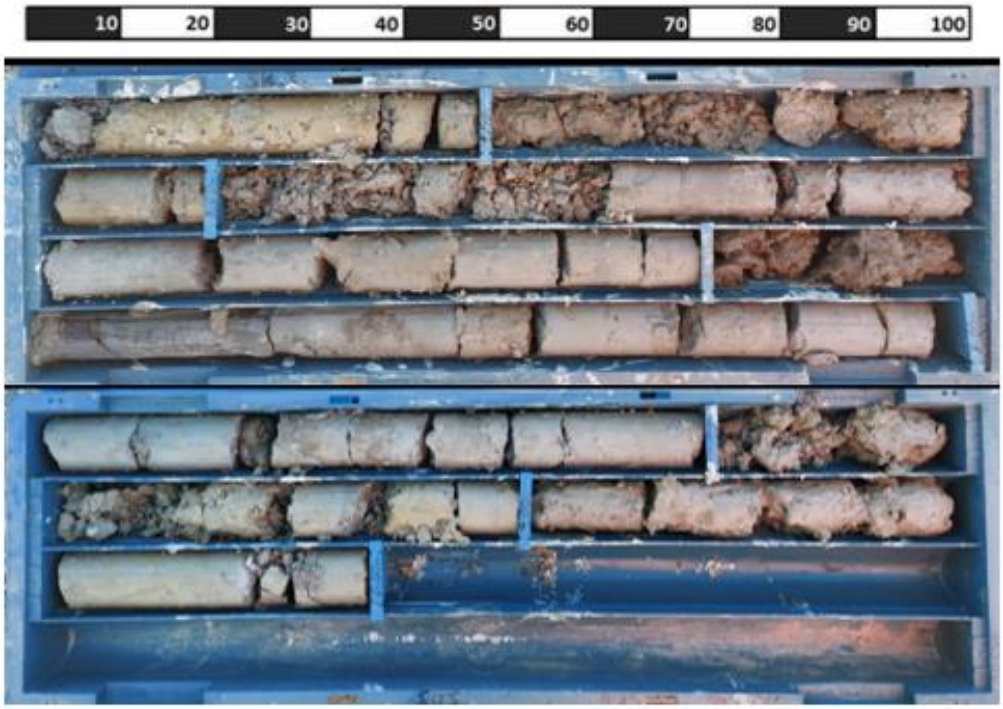
DSM-7



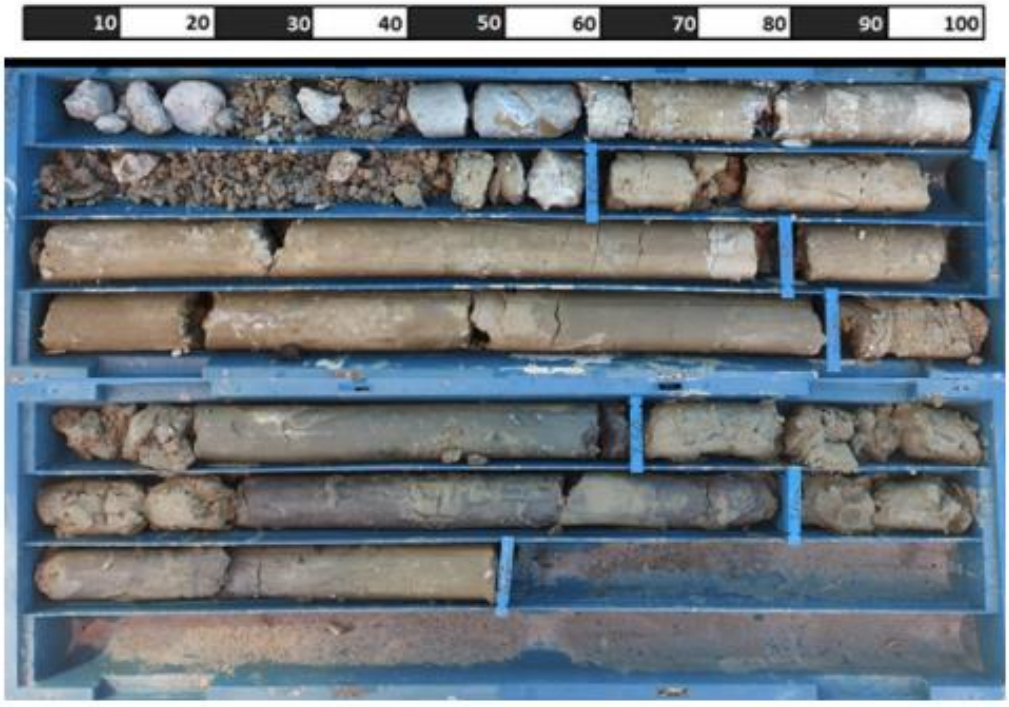
DSM-8



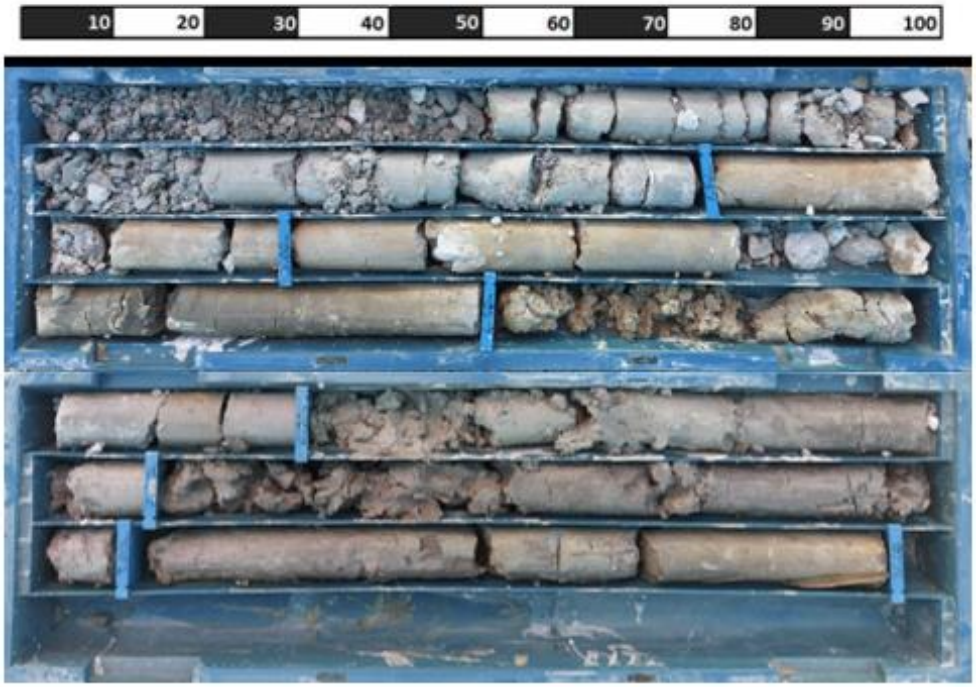
DSM-9



DSM-10



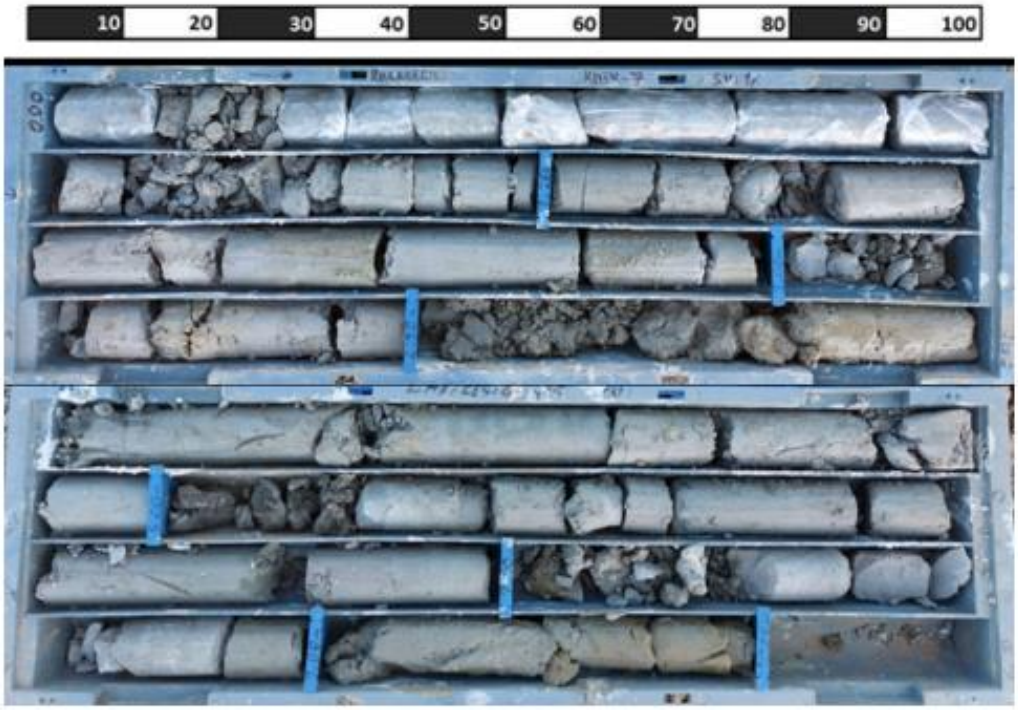
DSM-11



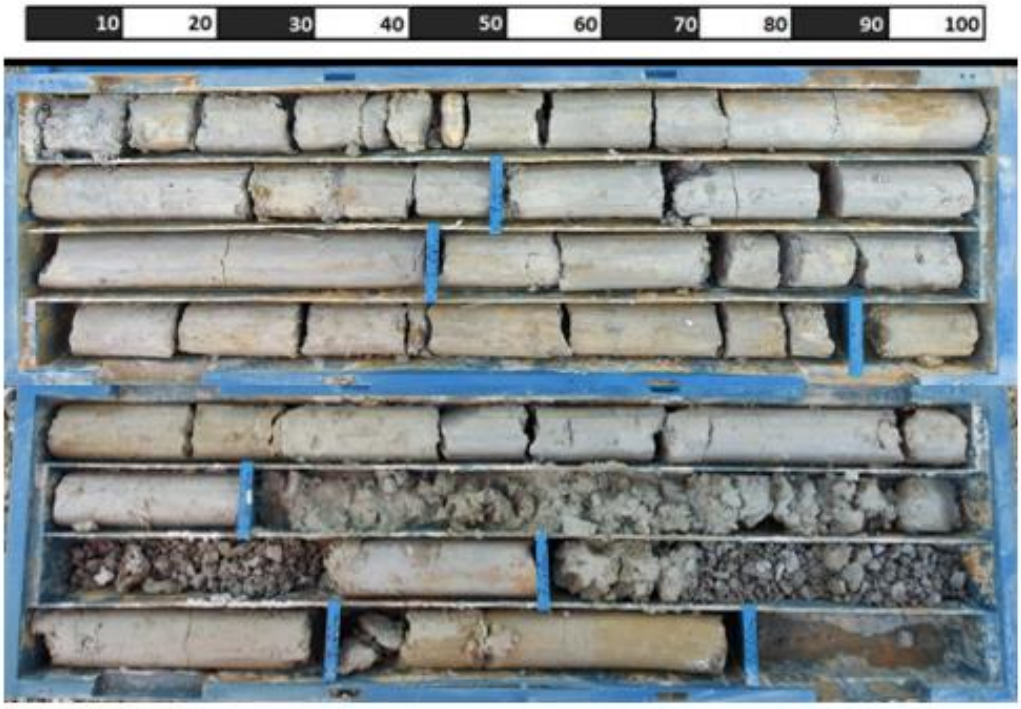
DSM-12



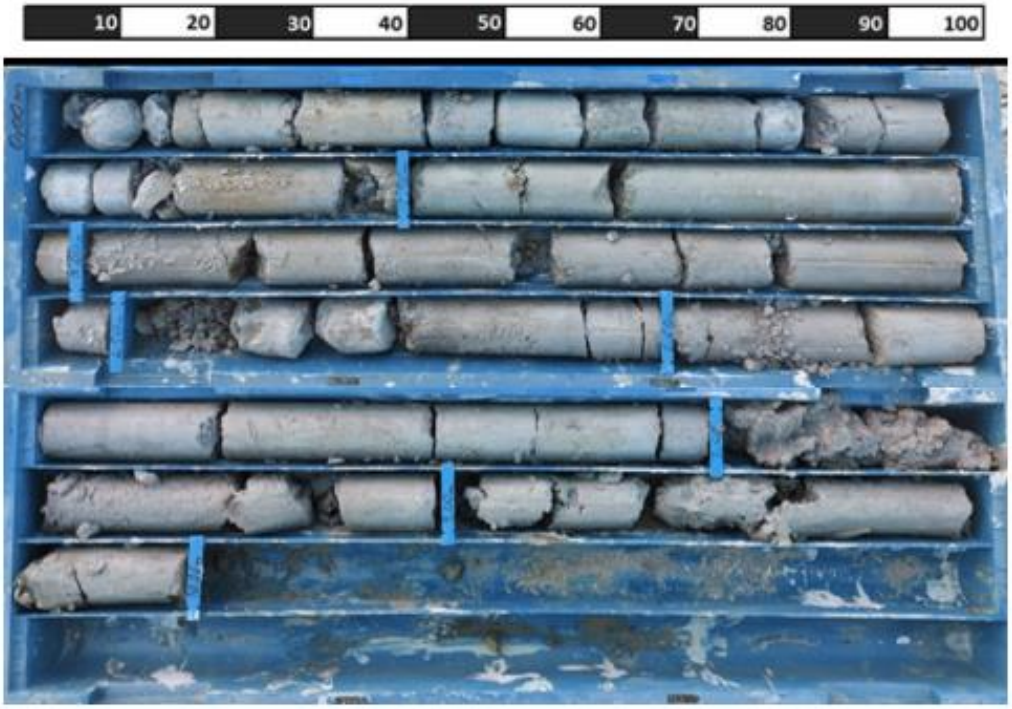
DSM-13



DSM-14



DSM-15



DSM-16

