

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

**ÖĞÜTÜLMÜŞ ÇELİKHANE CURUFU, KİREÇ VE DENİZ
SUYUNUN KİLLERİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANIMI**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Gamze BİLGEN

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Aydın Kavak

KOCAELİ, 2011

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÖĞÜTÜLMÜŞ ÇELİKHANE CURUFU, KİREÇ VE DENİZ
SUYUNUN KİLLERİN İYİLEŞTİRMESİNDE KULLANIMI**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Gamze BİLGEN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 10 EKİM 2011

Tezin Savunulduğu Tarih: 09 ARALIK 2011

**Tez Danışmanı
Yrd.Doç.Dr. Aydın KAVAK**

(.....)

**Üye
Yrd.Doç.Dr. S.Taner YILDIRIM**

(.....)

**Üye
Doç.Dr. Gülgün YILMAZ**

(.....)

**Üye
Yrd.Doç.Dr. Ö.Faruk ÇAPAR**

(.....)

**Üye
Prof.Dr. Gökhan BAYKAL**

(.....)

KOCAELİ, 2011

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Büyük can ve mal kaybına sebebiyet veren trafik kazalarının ve yaşanan depremlerin ardından yapılan incelemelerden ulaşılan ortak bir özellik vardır. Bu özellik daha iyi bir zemin olması halinde yaşanan kayıpların pek çoğunun gerçekleşmeyecek olmasıdır. Kısa bir süre öncesine kadar zemin iyileştirme pek çok kişi tarafından gereksiz bir masraf olarak algılanmakta idi. Artık yapıların dolayısı ile insanların can ve mal güvenliği için ne kadar önemli bir konu olduğunun, toplumun geniş bir kısmı tarafından da biliniyor olması sevindiricidir. Ancak hala zemin iyileştirme deyince arazinin çakıllarla doldurulması gerektiği gibi eksik bilgiler popülerliğini korumaktadır.

Killi zeminlerin iyileştirilmesinin incelenmesinde, bu amaçla atıkların geri dönüşümünün araştırılmasında ve deniz suyunun zemin çalışmalarında kullanımı konusunda bana çalışma fırsatı veren ve hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen, Sn. Yrd. Doç. Dr. Aydın KAVAK' a, Sn. Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk ÇAPAR' a, Sn. Yrd. Doç. Dr. Salih Taner YILDIRIM' a, Sn. Yrd. Doç. Dr. Hamit AYDIN' a; Sn. Doç. Dr. Gülgün YILMAZ' a, Sn. Prof. Dr. Gökhan BAYKAL' a, gösterdiği anlayışından ve tüm yardımlarından dolayı Sn. Yrd. Doç. Dr. Rıfki HENDEN' e, üzerimde emeği olan tüm hocalarıma, arkadaşlarıma ve öğrencilerime teşekkür ediyorum. Rahmetli babam, sevgili annem, kardeşlerim ve sevgili kızım Dila BİLGİN, ne mutlu ki sizin gibi bir aileye sahibim.

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|------|
| ÖNSÖZ | i |
| İÇİNDEKİLER | ii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | iv |
| TABLolar DİZİNİ | ix |
| SEMBOLLER | xi |
| ÖZET | xiii |
| İNGİLİZCE ÖZET | xiv |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. ZEMİN OLUŞUMU VE ZEMİN STABİLİZASYONU | 4 |
| 2.1. Zemin Oluşumu ve Killer | 4 |
| 2.2. Yapı ve Zemin | 5 |
| 2.3. Zemin İyileştirme | 8 |
| 2.4. Killi Zeminlerde Katkı Malzemeleri Kullanımının Tarihçesi | 11 |
| 2.5. Killerde Kimyasal Stabilizasyon ve Geri Dönüşüm | 13 |
| 2.6. Killerde Kimyasal Stabilizasyon ve Literatür Taramaları | 29 |
| 3. MALZEME VE YÖNTEM | 31 |
| 3.1. Kullanılan Malzemeler | 34 |
| 3.1.1. Karışım oranları seçimi | 34 |
| 3.1.2. Bentonit | 37 |
| 3.1.3. Uzunçiftlik kili | 39 |
| 3.1.4. Çelikhane curufu | 40 |
| 3.1.5. Kireç | 43 |
| 3.1.6. Karışım suları | 44 |
| 3.2. Deneysel Çalışmaların Ön Hazırlıkları | 45 |
| 3.3. Deneysel Çalışmalar | 46 |
| 3.3.1. Elek analizi ve hidrometre | 46 |
| 3.3.2. Özgül ağırlık | 49 |
| 3.3.3. Organik madde tayini | 49 |
| 3.3.4. Kıvam limitleri | 50 |
| 3.3.5. Kompaksiyon | 63 |
| 3.3.6. Serbest basınç | 73 |
| 3.3.7. Kaliforniya taşıma oranı (CBR) | 87 |
| 3.3.8. pH ölçümleri | 91 |
| 3.3.9. Sismik ölçümler | 96 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR | 101 |
| 4.1. Elek Analizi ve Hidrometre Deneyi Sonuçları | 101 |
| 4.2. Kıvam limitleri Sonuçları | 102 |
| 4.3. pH Değerleri | 110 |
| 4.4. Kompaksiyon | 113 |
| 4.5. CBR | 128 |
| 4.6. Serbest Basınç Sonuçları | 136 |
| 4.7. Elastisite Modülü | 148 |
| 4.8. Sismik Ölçümler | 157 |

| | |
|--|-----|
| 4.9. İstatistiksel Çalışmalar | 166 |
| 4.10. XRD (X Işın Kırınımı) | 173 |
| 4.11. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) | 185 |
| 5. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN GENEL DEĞERLENDİRME | 197 |
| 6. SONUÇLAR | 203 |
| KAYNAKLAR | 206 |
| EKLER..... | 220 |
| ÖZGEÇMİŞ | 278 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1: Yol kesitlerinin tanımlanması | 6 |
| Şekil 2.2: Uzunçiftlik civarında çökmüş bir yol | 7 |
| Şekil 2.3: Mekanik iyileştirme (dinamik kompaksiyon uygulaması) | 9 |
| Şekil 2.4: Hidrolik iyileştirme (wellpoint uygulaması) | 10 |
| Şekil 2.5: Yüksek basınç enjeksiyonu (Jet-grout) | 11 |
| Şekil 2.6: Kireç stabilizasyonunun uygulanaşı | 26 |
| Şekil 3.1: ASTM D4609'a göre düzenlenen laboratuvar çalışmaları akış şeması ... | 33 |
| Şekil 3.2: Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler | 34 |
| Şekil 3.3: Numune adlarının kodlanma açılımları | 35 |
| Şekil 3.4: Uzunçiftlik kili | 39 |
| Şekil 3.5: Curufun elde edilişı | 42 |
| Şekil 3.6: Çelikhane curufunu öğütmekte kullanılan makine | 42 |
| Şekil 3.7: Uzunçiftlik kilinin hazırlanışı | 45 |
| Şekil 3.8: BOS ve bentonit | 46 |
| Şekil 3.9: Kullanılan malzemelerin tane dağılımları (hidrometre yöntemi) | 47 |
| Şekil 3.10: Kullanılan malzemelerin tane dağılımları (lazer yöntemi) | 48 |
| Şekil 3.11: Kullanılan malzemelerin tane dağılımları (elek analizi ve lazer yöntemi) | 48 |
| Şekil 3.12: Kıvam limitleri deneyine ait çalışmalar | 50 |
| Şekil 3.13: Kıvam limitleri sonuçları (uzunçiftlik-çeşme suyu) | 51 |
| Şekil 3.14: Kıvam limitleri sonuçları (uzunçiftlik-deniz suyu) | 52 |
| Şekil 3.15: Kıvam limitleri sonuçları (bentonit-çeşme suyu) | 53 |
| Şekil 3.16: Kıvam limitleri sonuçları (bentonit-deniz suyu) | 54 |
| Şekil 3.17: Bentonit-çeşme suyu karışımları ve Atterberg çarkı (0 gün) | 55 |
| Şekil 3.18: Bentonit-çeşme suyu karışımları ve Atterberg çarkı (28 gün) | 56 |
| Şekil 3.19: Bentonit-deniz suyu karışımları ve Atterberg çarkı (0 gün) | 57 |
| Şekil 3.20: Bentonit-deniz suyu karışımları ve Atterberg çarkı (28 gün) | 58 |
| Şekil 3.21: Uzunçiftlik - çeşme suyu karışımları ve Atterberg çarkı (0 gün) | 59 |
| Şekil 3.22: Uzunçiftlik - çeşme suyu karışımları ve Atterberg çarkı (28 gün) | 60 |
| Şekil 3.23: Uzunçiftlik - deniz suyu karışımları ve Atterberg çarkı (0 gün) | 61 |
| Şekil 3.24: Uzunçiftlik – deniz suyu karışımları ve Atterberg çarkı (28 gün) | 62 |
| Şekil 3.25: Kompaksiyon cihazı | 63 |
| Şekil 3.26: Uzunçiftlik kili ile yapılan modifiye kompaksiyona ait su muhtevaları | 65 |
| Şekil 3.27: Uzunçiftlik kili ile yapılan modifiye kompaksiyona ait K.B.H.A | 66 |
| Şekil 3.28: Uzunçiftlik kili ile yapılan modifiye kompaksiyona ait değerler. | 66 |
| Şekil 3.29: Bentonit kili ile yapılan modifiye kompaksiyona ait su muhtevaları | 67 |
| Şekil 3.30: Bentonit kili ile yapılan modifiye kompaksiyona ait K.B.H.A | 68 |
| Şekil 3.31: Bentonit kili ile yapılan modifiye kompaksiyona ait değerler | 68 |
| Şekil 3.32: Uzunçiftlik kili ile yapılan standart kompaksiyona ait su muhtevaları .. | 69 |
| Şekil 3.33: Uzunçiftlik kili ile yapılan standart kompaksiyona ait K.B.H.A | 70 |
| Şekil 3.34: Uzunçiftlik kili ile yapılan standart kompaksiyona ait değerlerler | 70 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 3.35: Bentonit kili ile yapılan standart kompaksiyona ait su muhtevaları | 71 |
| Şekil 3.36: Bentonit kili ile yapılan standart kompaksiyona ait K.B.H.A | 72 |
| Şekil 3.37: Bentonit kili ile yapılan standart kompaksiyona ait değerler | 72 |
| Şekil 3.38: Karışımların hazırlanması ve sıkıştırılması | 73 |
| Şekil 3.39: Numunenin hazırlanması | 73 |
| Şekil 3.40: Numunenin kür edilmesi ve kırılması | 74 |
| Şekil 3.41: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (uzunçiftlik-çeşme suyu) | 75 |
| Şekil 3.42: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (uzunçiftlik-deniz suyu) | 76 |
| Şekil 3.43: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (bentonit-çeşme suyu) | 77 |
| Şekil 3.44: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (bentonit-deniz suyu) | 78 |
| Şekil 3.45: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (uzunçiftlik-çeşme suyu) | 79 |
| Şekil 3.46: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (uzunçiftlik-deniz suyu) | 80 |
| Şekil 3.47: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri(bentonit-çeşme suyu) | 81 |
| Şekil 3.48: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (bentonit-deniz suyu) | 82 |
| Şekil 3.49: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (Uzunçiftlik) | 83 |
| Şekil 3.50: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (Bentonit) | 84 |
| Şekil 3.51: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (Uzunçiftlik) | 85 |
| Şekil 3.52: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (Bentonit) | 86 |
| Şekil 3.53: CBR deneyinde kullanılan kalıplar | 87 |
| Şekil 3.54: Suda bekletilen CBR numunesi | 88 |
| Şekil 3.55: CBR deney cihazı | 89 |
| Şekil 3.56: Bentonit kili pH değerleri | 92 |
| Şekil 3.57: Uzunçiftlik kili pH değerleri | 93 |
| Şekil 3.58: Bentonit kili hazırlanan numunelerin pH değerleri | 95 |
| Şekil 3.59: Uzunçiftlik kili hazırlanan numunelerin pH değerleri | 95 |
| Şekil 3.60: Ultrasonik V-Meter III cihazı | 96 |
| Şekil 4.1: Hidrometre yöntemi ve lazer kırım yönteminin karşılaştırılması | 102 |
| Şekil 4.2: Kullanılan malzemelerin pH değerleri | 110 |
| Şekil 4.3: Bentonit kili ile ilgili karışımların pH değerleri | 111 |
| Şekil 4.4: Uzunçiftlik kili ile ilgili karışımların pH değerleri | 112 |
| Şekil 4.5: Uzunçiftlik kili modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu) | 114 |
| Şekil 4.6: 0L3.33BOSU modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu) | 115 |
| Şekil 4.7: 5LOBOSU modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu) | 116 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 4.8: 4K2.66BOSU modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu) | 117 |
| Şekil 4.9: 4K6BOSU modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu) | 118 |
| Şekil 4.10: 5L3.33BOSU modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu) | 119 |
| Şekil 4.11: 5L7.5BOSU modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu) | 120 |
| Şekil 4.12: 0L0BOSB modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu) | 121 |
| Şekil 4.13: 0L3.33BOSB modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu) | 122 |
| Şekil 4.14: 5L0BOSB modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu) | 123 |
| Şekil 4.15: 4K2.66BOSB modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu) | 124 |
| Şekil 4.16: 4K6BOSB modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu) | 125 |
| Şekil 4.17: 5L3.33BOSB modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu) | 126 |
| Şekil 4.18: 5L7.5BOSB modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu) | 127 |
| Şekil 4.19: Uzunçiftlik çeşme suyu karışımlarının 28 günlük CBR değerleri | 130 |
| Şekil 4.20: Uzunçiftlik deniz suyu karışımlarının 28 günlük CBR değerleri | 132 |
| Şekil 4.21: Bentonit çeşme suyu karışımlarının 28 günlük CBR değerleri | 133 |
| Şekil 4.22: Bentonit deniz suyu karışımlarının 28 günlük CBR değerleri | 135 |
| Şekil 4.23: Uzunçiftlik kili, çeşme suyu numunelerin serbest basınç değerleri | 136 |
| Şekil 4.24: Uzunçiftlik çeşme suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri | 137 |
| Şekil 4.25: Uzunçiftlik çeşme suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (1) | 138 |
| Şekil 4.26: Uzunçiftlik çeşme karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (2) | 138 |
| Şekil 4.27: Uzunçiftlik kili deniz suyu numunelerin serbest basınç değerleri (1)..... | 139 |
| Şekil 4.28: Uzunçiftlik deniz suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (2) | 140 |
| Şekil 4.29: Uzunçiftlik deniz suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (3) | 141 |
| Şekil 4.30: Uzunçiftlik deniz suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (4) | 141 |
| Şekil 4.31: Bentonit kili çeşme suyu numunelerin serbest basınç değerleri | 142 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 4.32: Bentonit çeşme suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (1) | 143 |
| Şekil 4.33: Bentonit çeşme suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (2) | 144 |
| Şekil 4.34: Bentonit çeşme suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (3) | 144 |
| Şekil 4.35: Bentonit kili deniz suyu numunelerin serbest basınç değerleri | 145 |
| Şekil 4.36: Bentonit kili deniz suyu numunelerin 28 günlük serbest basınç değerleri (1) | 146 |
| Şekil 4.37: Bentonit deniz suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (2) | 147 |
| Şekil 4.38: Bentonit deniz suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (3) | 147 |
| Şekil 4.39: İdealleştirilmiş gerilme – şekil değiştirme diyagramı | 148 |
| Şekil 4.40: Elastisite modülü tanımlamaları | 149 |
| Şekil 4.41: Uzunçiftlik çeşme suyu karışımlarının elastikiyet modülü değerleri .. | 152 |
| Şekil 4.42: Uzunçiftlik deniz suyu karışımlarının elastikiyet modülü değerleri | 153 |
| Şekil 4.43: Bentonit çeşme suyu karışımlarının elastikiyet modülü değerleri | 154 |
| Şekil 4.44: Bentonit deniz suyu karışımlarının elastikiyet modülü değerleri | 156 |
| Şekil 4.45: Bentonit çeşme suyu ile hazırlanan numunelere ait Vp hızları | 159 |
| Şekil 4.46: Bentonit deniz suyu ile hazırlanan numunelere ait Vp hızları | 160 |
| Şekil 4.47: Uzunçiftlik çeşme suyu ile hazırlanan numunelere ait Vp hızları | 161 |
| Şekil 4.48: Uzunçiftlik deniz suyu ile hazırlanan numunelere ait Vp hızları | 161 |
| Şekil 4.49: Uzunçiftlik çeşme suyu ile hazırlanan numunelerin E değerleri | 164 |
| Şekil 4.50: Uzunçiftlik deniz suyu ile hazırlanan numunelerin E değerleri | 164 |
| Şekil 4.51: Bentonit çeşme suyu ile hazırlanan numunelerin E değerleri | 165 |
| Şekil 4.52: Bentonit deniz suyu ile hazırlanan numunelerin E değerleri | 165 |
| Şekil 4.53: Gerçek değerleri ile modelden tahmin edilen serbest basınç değerleri | 172 |
| Şekil 4.54: Tipik bir X ışını spektrumu | 173 |
| Şekil 4.55: Bragg yasası | 177 |
| Şekil 4.56: Bentonit kil, çeşme suyu XRD analiz görüntüleri..... | 179 |
| Şekil 4.57: Uzunçiftlik kil, çeşme suyu XRD analiz görüntüleri..... | 179 |
| Şekil 4.58: Bentonit kili, deniz suyu XRD analiz görüntüleri | 180 |
| Şekil 4.59: Uzunçiftlik kili, deniz suyu XRD analiz görüntüleri..... | 180 |
| Şekil 4.60: Çeşme suyu, kireç ve BOS kullanılarak hazırlanmış uzunçiftlik kili karışımları XRD analiz görüntüleri | 181 |
| Şekil 4.61: Deniz Suyu, kireç ve BOS kullanılarak hazırlanmış uzunçiftlik kili karışımları XRD analiz görüntüleri..... | 182 |
| Şekil 4.62: Çeşme suyu, kireç ve BOS kullanılarak hazırlanmış bentonit kili karışımları XRD analiz görüntüleri | 183 |
| Şekil 4.63: Deniz suyu, kireç ve BOS kullanılarak hazırlanmış bentonit kili karışımları XRD analiz görüntüleri | 184 |
| Şekil 4.64: Katkısız uzunçiftlik ve bentonit numunelerine ait SEM fotoğrafları | 188 |
| Şekil 4.65: % 5 kireç katkılı uzunçiftlik kili numunelerine ait SEM fotoğrafları | 189 |
| Şekil 4.66: % 5 kireç katkılı bentonit kili numunelerine ait SEM fotoğrafları | 190 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 4.67: 5L3.33BOSUT ve 5L3.33BOSUS numunelerine ait SEM fotoğrafları | 192 |
| Şekil 4.68: 5L3.33BOSBT ve 5L3.33BOSBS numunelerine ait SEM fotoğrafları | 192 |
| Şekil 4.69: 0L3.33BOSUT ve 0L3.33BOSUS numunelerine ait SEM fotoğrafları | 194 |
| Şekil 4.70: 0L3.33BOSBT ve 0L3.33BOSBS numunelerine ait SEM fotoğrafları | 195 |

TABLolar DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Tablo 2.1: Zemin tiplerine göre uygun katkı malzemeleri | 13 |
| Tablo 3.1: Çalışmada kullanılan karışımlar ve içerikleri | 36 |
| Tablo 3.2: Bentonit kilinin karakteristik özellikleri | 38 |
| Tablo 3.3: Uzunçiftlik kili endeks özellikleri | 39 |
| Tablo 3.4: Çalışmalarda kullanılan BOS'a ait kimyasal analiz | 40 |
| Tablo 3.5: BOS'a ait karakteristik özellikler | 41 |
| Tablo 3.6: Kirece ait karakteristik özellikler | 43 |
| Tablo 3.7: Çeşme suyunun kimyasal analizi | 44 |
| Tablo 3.8: Deniz suyunun kimyasal analizi | 44 |
| Tablo 3.9: Elek analizi sonuçları | 46 |
| Tablo 3.10: Malzemelerin özgül ağırlık değerleri | 49 |
| Tablo 3.11: Kullanılan malzemelere ait organik madde miktarları | 49 |
| Tablo 3.12: Kıvam Limitleri Sonuçları (uzunçiftlik-çeşme suyu) | 51 |
| Tablo 3.13: Kıvam limitleri sonuçları (uzunçiftlik-deniz suyu) | 52 |
| Tablo 3.14: Kıvam limitleri sonuçları (bentonit-çeşme suyu) | 53 |
| Tablo 3.15: Kıvam limitleri sonuçları (bentonit-deniz suyu) | 54 |
| Tablo 3.16: Modifiye kompaksiyon sonuçları (uzunçiftlik kili) | 65 |
| Tablo 3.17: Modifiye kompaksiyon sonuçları (bentonit kili) | 67 |
| Tablo 3.18: Uzunçiftlik kiline ait standart kompaksiyon sonuçları | 69 |
| Tablo 3.19: Bentonit Kiline ait Standart Kompaksiyon Sonuçları | 71 |
| Tablo 3.20: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (uzunçiftlik-çeşme suyu) | 75 |
| Tablo 3.21: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (uzunçiftlik-deniz suyu) | 76 |
| Tablo 3.22: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (bentonit-çeşme suyu) | 77 |
| Tablo 3.23: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (bentonit-deniz suyu) | 78 |
| Tablo 3.24: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (uzunçiftlik-çeşme suyu) | 79 |
| Tablo 3.25: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (uzunçiftlik-deniz suyu) | 80 |
| Tablo 3.26: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (bentonit-çeşme suyu) | 81 |
| Tablo 3.27: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (bentonit-deniz suyu) | 82 |
| Tablo 3.28: Uzunçiftlik çeşme suyu numunelerinin 28 günlük ıslak CBR değerleri | 89 |
| Tablo 3.29: Uzunçiftlik deniz suyu numunelerinin 28 günlük ıslak CBR değerleri | 90 |
| Tablo 3.30: Bentonit çeşme suyu numunelerinin 28 günlük ıslak CBR değerleri ... | 90 |
| Tablo 3.31: Bentonit çeşme suyu numunelerinin 28 günlük ıslak CBR değerleri | 91 |
| Tablo 3.32: Bentonit kili ve uzunçiftlik kilinin pH deneyi sonuçları | 92 |
| Tablo 3.33: Bentonit kili, kireç ve BOS karışımlarının pH değerleri | 94 |

| | |
|--|-----|
| Tablo 3.34: Uzunçiftlik kili, kireç ve BOS karışımlarının pH değerleri..... | 94 |
| Tablo 3.35: Uzunçiftlik çeşme suyu ile hazırlanan karışımlarının P dalgası hızları. | 97 |
| Tablo 3.36: Uzunçiftlik çeşme suyu ile hazırlanan karışımlarının Ed değerleri | 97 |
| Tablo 3.37: Uzunçiftlik deniz suyu ile hazırlanan karışımların P dalgası hızları | 98 |
| Tablo 3.38: Uzunçiftlik deniz suyu ile hazırlanan karışımların Ed değerleri | 98 |
| Tablo 3.39: Bentonit deniz suyu ile hazırlanan karışımlarının P dalgası hızları | 99 |
| Tablo 3.40: Bentonit çeşme suyu ile hazırlanan karışımlarının Ed değerleri | 99 |
| Tablo 3.41: Bentonit deniz suyu ile hazırlanan karışımlarının P dalgası hızları ... | 100 |
| Tablo 3.42: Bentonit deniz suyu ile hazırlanan karışımlarının Ed değerleri..... | 100 |
| Tablo 4.1: Teknik şartnameye göre gereken kıvam limit değerleri | 103 |
| Tablo 4.2: Esnek üstyapılarda yol taban zemininin özellikleri | 129 |
| Tablo 4.3: Teknik şartnameye göre sınır CBR değerleri | 129 |
| Tablo 4.4: Farklı standartlarda verilen elastisite bağıntıları | 150 |
| Tablo 4.5: Uzunçiftlik kili çeşme suyu karışımlarına ait Es değerleri | 151 |
| Tablo 4.6: Uzunçiftlik kili deniz suyu karışımlarına ait Es değerleri | 152 |
| Tablo 4.7: Bentonit kili çeşme suyu karışımlarına ait Es değerleri | 154 |
| Tablo 4.8: Bentonit kili deniz suyu karışımlarına ait Es değerleri | 155 |
| Tablo 4.9: Değişik zeminlere ait Es değerleri..... | 157 |
| Tablo 4.10: Sismik dalga ölçümleri ile ilgili bağıntılar | 162 |
| Tablo 4.11: İstatiksel model ile ilgili program çıktıları | 169 |
| Tablo 4.12: Model ile ilgili istatistiksel test sonuçları..... | 169 |
| Tablo 4.13: İstatistiksel model ile ilgili katsayılar | 170 |
| Tablo 4.14: İstatistiksel model ile ilgili katsayıların yorumları | 171 |
| Tablo 4.15: Kalitatif faz analiz sonuçları | 175 |
| Tablo 4.16: Numunelerin içeriğinde bulunan elementlerin atomik ağırlıkça % değerleri | 187 |

SEMBOLLER

| | |
|---------------|-----------------------------------|
| CBR | : Kaliforniya taşıma oranı |
| CEC | : Katyon değişim kapasitesi |
| CH | : Yüksek plastisiteli kil |
| CL | : Düşük plastisiteli kil |
| E | : Elastisite modülü |
| Ed | : Dinamik elastisite modülü |
| Es | : Statik elastisite modülü |
| L | : Geçiş uzunluğu |
| LL | : Likit limit |
| MH | : Yüksek plastisiteli silt |
| ML | : Düşük plastisiteli silt |
| OH | : Yüksek plastisiteli organik kil |
| OL | : Düşük plastisiteli organik kil |
| PI | : Plastisite indisi |
| PL | : Plastik limit |
| qu | : Serbest basınç değeri |
| T | : Geçiş süresi |
| Vp | : P dalgası hızı |
| Vs | : S dalgası hızı |
| ρ | : Yoğunluk (kg/m^3) |
| g | : Yer çekimi ivmesi |
| ε | : Deformasyon |
| μ | : Poisson oranını |
| σ | : Gerilme |

Kısaltmalar

| | |
|----------------|--|
| 0L0BOBOSBS | : % 0 Kireç + % 0 BOS + Bentonit Kili + Deniz Suyu |
| 0L0BOBOSBT | : % 0 Kireç + % 0 BOS + Bentonit Kili + Çeşme Suyu |
| 0L0BOSUS | : % 0 Kireç + % 0 BOS + Uzunçiftlik Kili + Deniz Suyu |
| 0L0BOSUT | : % 0 Kireç + % 0 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu |
| 0L3.33BOBOSBS: | : % 0 Kireç + % 0 BOS + Uzunçiftlik Kili + Deniz Suyu |
| 0L3.33BOBOSBT | : % 0 Kireç + % 3,33 BOS + Bentonit Kili + Çeşme Suyu |
| 0L3.33BOSUS | : % 0 Kireç + % 3,33 BOS + Uzunçiftlik Kili + Deniz Suyu |
| 0L3.33BOSUT | : % 0 Kireç + % 3,33 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu |
| 4L2.66BOBOSBS | : % 4 Kireç + % 2,66 BOS + Bentonit Kili + Deniz Suyu |
| 4L2.66BOBOSBT | : % 4 Kireç + % 2,66 BOS + Bentonit Kili + Çeşme Suyu |
| 4L2.66BOSUS | : % 4 Kireç + % 2,66 BOS + Uzunçiftlik Kili + Deniz Suyu |
| 4L2.66BOSUT | : % 4 Kireç + % 2,66 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu |
| 4L6BOBOSBS | : % 4 Kireç + % 6 BOS + Bentonit Kili + Deniz Suyu |
| 4L6BOBOSBT | : % 4 Kireç + % 6 BOS + Bentonit Kili + Çeşme Suyu |
| 4L6BOSUS | : % 4 Kireç + % 6 BOS + Uzunçiftlik Kili + Deniz Suyu |
| 4L6BOSUT | : % 4 Kireç + % 6 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu |

| | |
|----------------|--|
| 5L0BOBOSBS | : % 5 Kireç + % 0 BOS + Bentonit Kili + Deniz Suyu |
| 5L0BOBOSBT | : % 5 Kireç + % 0 BOS + Bentonit Kili + Çeşme Suyu |
| 5L0BOSUS | : % 5 Kireç + % 0 BOS + Uzunçiftlik Kili + Deniz Suyu |
| 5L0BOSUT | : % 5 Kireç + % 0 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu |
| 5L3.33BOSBS | : % 5 Kireç + % 3,33 BOS + Bentonit Kili + Deniz Suyu |
| 5L3.33BOSBT | : % 5 Kireç + % 3,33 BOS + Bentonit Kili + Çeşme Suyu |
| 5L3.33BOSUS | : % 5 Kireç + % 3,33 BOS + Uzunçiftlik Kili + Deniz Suyu |
| 5L3.33BOSUT | : % 5 Kireç + % 3,33 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu |
| 5L7.5BOSBS | : % 5 Kireç + % 7,50 BOS + Bentonit Kili + Deniz Suyu |
| 5L7.5BOBOSBT | : % 5 Kireç + % 7,5 BOS + Bentonit Kili + Çeşme Suyu |
| 5L7.5BOSUS | : % 5 Kireç + % 7,5 BOS + Uzunçiftlik Kili + Deniz Suyu |
| 5L7.5BOSUT | : % 5 Kireç + % 7,5 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu |
| 7.5L5BOBOSBS | : % 7,5 Kireç + % 5 BOS + Bentonit Kili + Deniz Suyu |
| 7.5L5BOBOSBT | : % 7,5 Kireç + % 5 BOS + Bentonit Kili + Çeşme Suyu |
| AASHTO | : Amerikan Karayolları ve Taşımacılık Ofisi Standartları |
| ASTM | : Amerikan Karayolu ve Taşımacılık Birliği Standartları |
| BOS | : Çelikhane Curufu |
| KGM | : Karayolları Genel Müdürlüğü |
| p | : Olasılık |
| R ² | : Belirlilik katsayısı |
| SEM | : Elektronik mikroskop görüntüsü |
| TS | : Türk standartları |
| TÜBİTAK | : Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu |
| USCS | : Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi |
| XRD | : X dalga kırınımı |

ÖĞÜTÜLMÜŞ ÇELİKHANE CURUFU, KİREÇ VE DENİZ SUYUN KİLLERİN İYİLEŞTİRİLMESİNDE KULLANIMI

Gamze BİLGEN

Anahtar Kelimeler: Kil, zemin stabilizasyonu, çelikhane curufu, kireç, deniz suyu

Özet: Killi zeminler, genel olarak inşaat uygulamalarının yapılacağı arazilerde olması istenmeyen zemin tipidir. Barajlar, köprüler, otopanlar, binalar gibi yapıların sahasını oluşturan zeminler, her zaman, arzu edilen özelliklere sahip olmayabilir. Bu nedenle dolgu malzemeleri ve zeminler, zemin iyileştirme teknikleri kullanılarak standartlara uygun hale getirilmektedir. Stabilizasyon, zemin iyileştirme yöntemleri içinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Zemin ıslahı, zemine istenilen geoteknik özelliklerin kazandırılması için yapılan çalışmalardır. Bu çalışmada, özellikle su tutma kapasitesi ve şişme potansiyeli yüksek olan killi zeminlerin katkı malzemesi ile iyileştirilmesi konusu üzerinde durulmuştur. Katkı malzemesi seçiminde, çağımızın en büyük sorunlarından olan küresel ısınma ve bunun en önemli sebeplerinden olan atıklar ve dolayısı ile çevre kirliliği konuları da göz önüne alınarak, hem atık malzemelerin geri dönüşümü hem de zemin iyileştirme amacı dikkate alınmıştır. İyileştirilecek kil malzemesi olarak, yüksek plastisiteli kil gurubunu temsilen “Bentonit” kili, düşük plastisiteli kil grubunu temsilen Kocaeli-Adapazarı güzergâhında bulunan “Uzunçiftlik Kili” kullanılmıştır. Katkı malzemesi olarak kireç ve endüstriyel bir atık olan çelikhane curufu (BOS) kullanılmıştır. Hazırlanan numunelerde yoğurma suyu olarak çeşme suyu ve deniz suyu kullanılmıştır. Laboratuvarında değişik oranlarda katkı malzemeleri ile karıştırılan ve 30 farklı karışım olarak hazırlanan killer üzerinde hidrometre, elek analizi, organik madde tayini, kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç, CBR, pH deneyleri gerçekleştirilmiş ayrıca sismik ölçümler yapılmıştır. Katkıların killer üzerindeki etkileri 0, 1, 7 ve 28 günlük periyotlarda irdelenmiştir. Katkı malzemelerinin killerin mikro yapılarındaki etkilerin incelenmesi amacı ile X ışın kırınımı (XRD) ve Elektro mikroskop görüntüleri (SEM) çektilmiştir. Yapılan araştırma sonucunda, düşük plastisiteli killer ile yüksek plastisiteli killerin katkı malzemelerine farklı tepkiler verdikleri görülmüştür. “%5 kireç, %3,33 çelikhane curufu ve deniz suyu” ile karıştırılan düşük plastisiteli killerde serbest basınç mukavemeti 16 kat artış göstererek 4600 kPa değerine ulaşmıştır. Yüksek plastisiteli killerde ise 10 kat artış gerçekleştirerek 6500 kPa değeri ile “%7,5 kireç, %3,33 çelikhane curufu ve deniz suyu” karışımı vermektedir. En büyük CBR değerini 15 kat artışla 135 olan “%5 kireç, %3,33 çelikhane curufu ve çeşme suyu” karışımı vermiştir. Yüksek plastisiteli killerin katkısız halinde 4 olan CBR değerini, “%7,5 kireç, %5 çelikhane curufu ve çeşme suyu” karışımı 19 kat arttırarak 77 değerine yükseltmiştir. Bu çalışmada, deniz suyu, öğütülmüş çelikhane curufu ve kireç karışımlarının killi zeminlerin geoteknik özelliklerinde iyileştirme sağlandığı görülmektedir.

USING GROUND STEEL SLAG, LIME AND SEA WATER IN CLAYEY SOIL STABILIZATION

Gamze BILGEN

Keywords: Clay, soil stabilization, steel slag, lime, seawater

Abstract: Clayey soils, the soil is a type of spam that lands be made in general construction applications. Dams, bridges, highways, buildings, structures such as floors that make up space, every time, it may not have the desired properties. For this reason, the soil improvement techniques are made using the fill material standards. Stabilization, soil improvement methods, used widely in the. Soil stabilization, the soil for the studies to gain the required geotechnical properties. In this study, especially in water-holding capacity and swelling clay soils with a high potential to contribute to improvement of material focused on the subject. Contribution to the selection of material, which is of the greatest challenges of our age is the most important causes of global warming and environmental pollution issues with the waste and thus, taking into account the recycling of waste materials as well as the soil work has been done with the purpose of improving. The material to be improved clay, high plasticity clay representing the group of "bentonite" clay, low plasticity clay to represent the group in Kocaeli and Adapazari route "Uzunçiftlik Clay" is used. Contribute to an industrial waste material and the steelmaking slag limes (BOS) were used. The prepared samples of tap water and seawater were used as mixing water. Additives in various amounts in the laboratory and prepared as a mixture of different clays karıştırılan30 on the hydrometer, sieve analysis, organic matter analysis, consistency limits, compaction, unconfined compressive, CBR, pH tests and seismic surveys were carried out. Contributions to their effects on clays 0, 1, 7 and 28 - day periods were examined. Microstructure effects also contribute clay materials with the aim of examining X-ray diffraction (XRD) and electron microscope images (SEM) was taken. As a result of the research, low-plasticity clays and clays of high plasticity materials contribute to different responses were given. 5% lime, 3.33% steelmaking slag, mixed with low-plasticity clays unconfined compressive strength increased 16 - fold and reached a value of 4600 kPa. High-plasticity clays by performing 10 - fold increase in the value of 6500 kPa with 7.5% lime, 3.33% steelmaking slag, a mixture of sea water. 15 - fold increase in the value of CBR is the largest 135%, 5% lime, 3.33% slag gave a mixture of tap water. High plasticity clay loam, as a mere 19 - fold increase of CBR value of 4, 77 and 7.5% of the value of steelmaking slag and 5% lime gave a mixture of tap water. Thus, using ground steel slag, lime and sea water, geotechnical properties of clayey soils has been improvement.

1. GİRİŞ

Stabilizasyon; tecrit ya da ıslah olarak da anılan iyileştirme çalışmalarıdır. İnşaat uygulamalarında, yapılacak çalışma her ne olursa olsun, ilk olarak, çalışmanın yapılacağı zemine ait parametrelerin, planlanan çalışmaya uygun olup olmadığının kontrolü gereklidir. Killi zeminler, genel olarak inşaat uygulamalarının yapılacağı arazilerde olması istenmeyen, inşaat faaliyetleri açısından son derece problemlili zeminlerdir.

Killi zeminlerin bulunduğu inşaat sahalarında, zeminin killi kısımlarının atılıp, yerine yeni granüle malzemenin getirilmesi yaygın olarak uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntem ciddi ekonomik sorunlar yaratmakta ve çevresel zararlar vermektedir. Yaygın olarak kullanılan killi zemini sahadan uzaklaştırılma yönteminin gerçekleştirilmesi amacı ile inşaat faaliyetlerinde birçok kamyon sürekli hareket etmekte, atık malzemeler toprak yığınları oluşturmakta, dağlar patlayıcılarla patlatılıp, makinelerle kazıldığından doğal yapı bozulmakta, ocakta malzeme hazırlamak için bir çok makine ve iş makinesi çalışmakta, egzoz gazı salınımı artmakta, akaryakıt fiyatlarının yüksekliği sebebiyle yapılan işler çok yüksek bedellere çıkmakta, iş yapan firmalar ile yerel sorumlularla tonaj konularında birçok problemler çıkmakta ayrıca çalışan kamyonlar yollara, diğer araçlara ve insanlara birçok zararlar verebilmektedir.

Bu tez, killerde katkı malzemeleri kullanarak, killi zeminlerin dolgu çalışmalarında, yol alt yapısında kullanılabilirliğini araştırmaktadır. Killerin geoteknik özelliklerinin, kimyasal yapıları farklı olan katkı malzemeleri kullanılarak iyileştirilmesi ve kullanılan katkı malzemelerinde, en uygun karışım oranlarının belirlenmesi hedeflenmektedir.

Tezin önemi; mühendislik, çevre ve sosyal açıdan olmak üzere üç farklı boyutlarda irdelenebilir.

Mühendislik açısından,

- Sorunlu bir zeminin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi
- Katkı malzemelerinin kullanımının istatistiksel olarak modellenmesi

Çevresel açıdan;

- Kullanılacak katkı malzemelerinin “atık” olarak anılan yan ürün olan malzemelerden seçilmiş olması ve doğrudan kullanım yolu ile geri dönüşümünün sağlanması
- Çeşme suyu yerine herhangi bir işleme tabii tutulmadan doğrudan deniz suyunun kullanılacak olması
- Mevcut duruma göre daha az araç, makina ve teçhizat kullanılacak olduğundan, egzoz salınımının, yakıt tüketiminin dolayısı ile çevre kirliliğinin azaltılması

Sosyal açıdan,

- Güvenli ve sağlam yolların daha rahat ve kolay yapılabilecek olması
- Maliyetin düşmesi şeklinde özetlenebilir.

Çalışmada ilk olarak “zemin iyileştirme” hakkındaki literatür konusunda, geniş bir araştırma yapılarak, killerin neden sorunlu zeminler olarak görüldüğü, zemin iyileştirmenin ne demek olduğu, önemi ve çeşitleri araştırılmış, bu güne kadar kimyasal stabilizasyon ile ilgili çalışmalar derlenmiştir.

Yapılan literatür çalışmaları doğrultusunda laboratuvar çalışmalarında katkı olarak kireç ve çelikhane curufunun (BOS) katkı olarak kullanılmasının araştırılmasına; yoğurma suyu olarak deniz suyu kullanılmasına karar verilmiştir. Literatür taramalarında, yüksek plastisiteli killer ve düşük plastisiteli killerin katkı malzemelerine farklı tepkiler verdiği görülmüştür. Bu sebeple tüm çalışmalar yüksek plastisiteli killer ve düşük plastisiteli killer üzerinde ayrı ayrı yapılmıştır. Yüksek plastisiteli killeri temsilen montmorilanit grubundan olan bentonit kili kullanılmıştır. Düşük plastisiteli killeri temsilen ise Kocaeli Adapazarı civarında bulunan Uzunçiftlik Beldesi’nden temin edilen kil kullanılmıştır.

Bentonit kili Eczacıbaşı Ersan A.Ş. den satın alınmıştır. Uzunçiftlik kili, beldeden tarafımızdan yapılan çalışmalarla temin edilmiştir. Uzunçiftlik kili 2 metre kadar kazılan yüzey toprağının altından, iş makineleri yardımı ile alınmış ve alınan zemin örnekleri tarafımızdan laboratuvarımıza getirilmiştir.

Her iki kil grubuna da literatür çalışmaları doğrultusunda belirlenen oranlarda, katkı malzemeleri eklenmiştir. Katkı malzemelerinin etkilerinin incelenmesi ve referans olarak kullanılması amacı ile bentonit kili ve uzunçiftlik kili katkısız olarak da deneylere tabii tutulmuştur. Deneysel çalışmalar için, toplamda 30 farklı numune kullanılmıştır.

Hazırlanan numuneler üzerinde; sınıflandırılma adına; elek analizi, kıvam limitleri ve hidrometre deneyleri; fiziksel iyileştirme ve su muhtevası kuru - birim hacim ağırlığı arasındaki ilişkiyi belirlemek adına, standart kompaksiyon ve modifiye kompaksiyon deneyleri; taşıma gücü özelliklerinin belirlenmesi adına, serbest basınç ve California taşıma oranı (CBR) deneyleri uygulanmıştır. Bunun yanı sıra deneysel çalışmalarda kullanılan killere ve katkı malzemelerine özgül ağırlık deneyleri de yapılmıştır. Ayrıca, pH ölçüm deneyleri ile numunelerin asitlik dengesi ölçülmüştür. Sismik dalga ölçümü deneyleri ile karışımların elstisite katsayıları hesaplanmıştır. Tüm deneyler ASTM ye ait ilgili standartlara uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Tarafımızdan yapılan deneylerin yanı sıra, katkı olarak kullandığımız çelikhane curufunun ve deniz suyunun kimyasal içeriğın belirlenmesi ile ilgili deneyler ERDEMİR fabrikalarına yaptırılmıştır. 75 mikron altı numunelerin dane dağılımın belirlenmesinde tarafımızdan yapılan hidrometre deneylerinin yanı sıra, Gazi Üniversitesi'nde "Lazer kırım yöntemi ile dane dağılımının belirlenmesi" deneyi yaptırılmıştır. TÜBİTAK Marmara Araştırma Enstitüsü (MAM) aracılığı ile numunelerin XRD leri yapılmış ve SEM fotoğrafları görüntülenmiştir. Bu şekilde karışımlarda katkıların etkileri mikro yapıda incelenmiştir. Ayrıca deney çalışmalarından elde edilen sonuçlar kullanılarak, katkı malzemelerin dayanıma etkisi istatistiksel olarak modellenmiştir.

2. ZEMİN OLUŞUMU VE ZEMİN STABİLİZASYONU

2.1. Zemin Oluşumu ve Killer

Yerkabuğu 10 ila 40 km. kalınlığında, granitik ve bazaltik kayalardan oluşmuştur. Yerkabuğunun yüzeyinde veya yüzeeye yakın kesimlerdeki kayalar, bozuşma ve diğer jeolojik süreçler etkisi ile zeminleri meydana getirmişlerdir. Isı değişimi, donma-çözülme, erozyon, bitkilerin ve hayvanların faaliyetleri sebebi ile meydana gelen bozuşma fiziksel bozuşmadır. Oksitlenme, indirgenme, karbonatlaşma ve diğer kimyasal süreçlerle kayalardaki mineral yapının değişmesi kimyasal bozuşma olarak adlandırılır. Zeminlerin oluşumunda kimyasal bozuşma, fiziksel bozuşmaya göre daha çok rol oynar (Holtz ve Kovacs., 1981).

Fiziksel ve kimyasal bozuşmalar sonucu oluşan zeminlerin dane boyutları, santimetreden mikron boyutuna kadar yayılan geniş bir dağılım gösterir. Zeminlerin sergilediği davranışların incelenmesinde dane boyutları, dane dağılımları önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir. Geoteknik mühendisliği, zeminleri, boyutları dahil olmak üzere değişik parametrelere göre sınıflandırılarak, davranışlarını inceler ve açıklamaya çalışır. Geoteknik mühendisleri tarafından en yaygın kullanılan sınıflandırma ASTM D2487 standardında ayrıntıları verilen sistem olan “Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılma Sistemi” (USCS) dir. Bu sisteme göre zeminler: çakıllar, kumlar, siltler ve killer olmak üzere dört ana grupta sınıflandırılırlar. Silt, kum veya çakıldan oluşan zeminler, gerçekte fiziksel ve orta derecede kimyasal bozuşma süreçlerinin sonucudur ve meydana geldikleri ana kayaların kimyasal yapılarının çoğunu muhafaza ederler. Ancak killi zeminlerde durum farklıdır. Killer, büyük kimyasal bozuşma geçirmişlerdir ve ana kayalarından oldukça farklı, yeni bir malzemeye dönüşmüşlerdir. Dolayısı ile killerin mühendislik özellikleri ve davranışları diğer zeminlerden oldukça büyük farklılıklar gösterir.

Killer çok küçük partiküllerden meydana gelmiştir ve levha benzeri şekillere sahiptirler. Bu sebeple yüzey alanlarının kütlelerine oranı çok büyüktür. “Özgül Yüzey” olarak bilinen bu değer, örneğin montmorillonit grubu killerde $800 \text{ m}^2/\text{g}$ dır. Killerin büyük özgül yüzeye sahip olması, partiküller arasında kuvvetlerin gelişmesi için fırsat yaratır. Ayrıca, su moleküllerinin bağlanması için fazlaca yer sağlar. Bu sebeple killer, suyu içine çekme eğilimindedirler. Su ile kil mineralleri arasındaki etkileşim oldukça karmaşıktır. İstisnai birkaç durum haricinde, çakıllarda ve kumlarda suyun varlığı önemsiz bir durumken; killerin geoteknik özellikleri, su içeriğine göre değişim göstermektedir (Coduto, 2006).

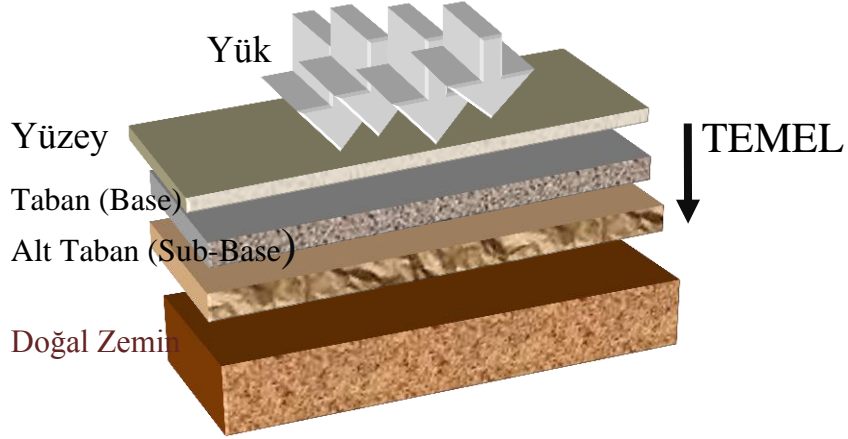
2.2. Yapı ve Zemin

Zeminler, inşaat malzemesi olarak ve üzerlerine inşa edilen yapıların temelleri altında taşıyıcı tabaka olarak karşımıza çıkmaktadır. Zeminlerin mühendislik özellikleri, zeminin cinsi yanında arazi koşullarına bağlı olarak (sıklık derecesi, su muhtevası, konsolidasyon basıncı, yükleme ve drenaj koşulları gibi) geniş bir aralık içinde değişmektedir Zeminler her zaman istenilen özelliklere sahip olmayabilirler (Demiröz, 2009). Geoteknik açıdan bakıldığında, zemine ait başlıca özellikler; permeabilite (geçirgenlik), elastisite, plastisite, kayma mukavemeti, sıkışabilme, hacim değiştirme, don duyarlılığı, taşıma gücü şeklinde sıralanabilir (Tunç, 2001).

Yükün aktarılacağı zeminin, geçirgenliğinin az, taşıma gücünün yüksek, hacim değişimi (şişme-kabarma) sorunun olmadığı, stabil bir yapıya sahip olması arzu edilir. Zira herhangi bir mühendislik yapısının performansı, ekonomisi ve emniyeti onun temeli, dolayısı ile oturduğu zeminden etkilenir, hatta zemin tarafından kontrol edilir (Holtz and Kovacs, 1981).

Su içeriğinin artmasıyla birlikte hacminde artış, su içeriği azaldığında ise büzülme oluşan zeminlere “şişen zeminler” denilmektedir. Zeminlerin su içeriğindeki değişikliğin başlıca nedeni mevsim değişiklikleri olup, yağışlı mevsimlerde yüzeyde biriken yağış sularının zeminin içerisine infiltrasyon olmasıyla (sızmasıyla) zeminin su içeriği artmakta, sıcak mevsimlerde ise buharlaşma nedeniyle azalmaktadır. Su içeriğindeki bu değişikliğin sonucunda ise zeminde şişme-büzülme çevrimi

oluşmaktadır. Şişen killerdeki hacimsel değişmeden en çok etkilenen mühendislik yapıları; hafif yapılar (tek katlı az yüklü binalar), yollar ve tretuvarlar, havaalanları, park alanları, altyapı tesisleri (kullanım suyu ve atık su boruları), tüneller, sulama kanalları ve bahçe duvarlarından oluşmaktadır. Suyla temas ettiklerinde şişen zeminler çoğunlukla montmorillonit tipi kil minerali içeren zeminlerdir (Demir, 2010).



Şekil 2.1: Yol kesitlerinin tanımlanması

Öte yandan, dolgular ve yol yapıları, üzerine gelen yükleri güvenli bir şekilde taşıırken ekonomik bir şekilde tasarlanması gereken bir mühendislik yapısıdır. Şekil 2.1 de bir yol kesiti görülmektedir. Yollarda, her ne kadar granül malzeme (üst yapı) yük ile ilk temas eden kısım olsa da, yükü alttaki doğal zemine aktarmaktadır. Dolayısı ile üst yapının stabilitesi, üzerine oturduğu zeminin geoteknik özelliklerine bağlıdır (Brown, 1996).

Yol kesitinde kaplama tabakasından alt temel tabakasına kadar üst yapı olarak belirlenmiştir. Bu tabakalarda normal olarak yukarıdan aşağıya doğru inildikçe (yüzey, taban, alt taban) malzeme kalitesinde azalma olmaktadır. Üst yapıda taban zeminine göre iyi, kaliteli, seçme malzemelerden, ekonomik etkenler de göz önünde bulundurularak granüler malzemeler kullanılmaktadır. Taban zemininde, yol güzergâhının geçtiği yerdeki doğal zemin kullanılmaktadır. Trafik yükleri, üst yapıdan kaplama tabakasına intikal etmektedir. Yük üst yapının yanı sıra kaplama, temel ve alt temel tabakaları tarafından ve en son taban zemini tarafından taşınmaktadır. Bu nedenle, kullanılan zeminin özellikleri büyük önem arz etmektedir.

Başka bir deyişle taban yüzeyi altındaki zeminin özelliklerinin yol standartlarında olması gerekmektedir. Zeminin yol taban zemininde kullanılabilmesi için zeminin hangi zemin sınıfına girdiği belirlenmeli, taşıma gücü, granülometrisi gibi özellikleri bilinmelidir (Kavlak, 2008).

Otoyollar, toprak dolgu barajlar gibi büyük hacimli dolgu gerektiren yapılarda dolgu malzemesi olarak kullanılan zemin, genellikle dolgu standart özelliklerini sağlayacak kalitede olmamaktadır. Barajlar, köprüler, otobanlar, binalar gibi yapıların sahasını oluşturan zeminler, her zaman, arzu edilen özelliklere sahip olmayabilir. Bu nedenle zemin iyileştirme teknikleri kullanılarak dolgu malzemesi standartlara uygun hale getirilmektedir. Birçok durumda yapı temel zeminlerinde de iyileştirmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Kimyasal stabilizasyon, zemin iyileştirme yöntemleri içinde geniş bir şekilde kullanılmaktadır (Alkaya, 2009). Killi zeminler taşıma gücü açısından oldukça zayıftırlar ve büyük oturma potansiyeline sahip olabilirler (Das, 2004). Killi, dolgu malzemesi olarak veya yol temel malzemesi olarak şartnamelere uymadığı için tercih edilmeyen zeminlerdir (Atanur, 1983).

Şekil 2.2 de Kocaeli – Adapazarı arasında bulunan Uzunçiftlik beldesinden geçen çökmüş bir yol görülmektedir. Uzunçiftlik kili, çalışmalarımızda CL grubu killeri temsilen, ana malzeme olarak kullandığımız kildir.



Şekil 2.2: Uzunçiftlik civarında çökmüş bir yol

2.3. Zemin İyileştirme

Zeminde istenilen geoteknik özelliklerinin bulunmaması durumunda çeşitli seçenekler uygulanabilir. Birinci seçenek olarak, uygun olmayan zemin yerine uygun bir zemin koymak seçilebilir. Ancak, uygun olmayan zeminin kazılması, kazılan zeminin depolanması, yerine konacak zemin için uygun bir maden ocağı bulunması, nakliyesi, sıkıştırılması, hem çok külfetli hem çok zaman alıcı hem de maliyetinin yüksek olması, söz konusudur. İkinci seçenek olarak, uygun olmayan zeminin olduğu gibi kabul edilmesi tercih edilebilir. Bu durumda ise, üzerindeki yapının buna göre dizayn edilmesi gerekir ki bunun oldukça büyük maliyetli bir tasarım olması kaçınılmazdır. Ancak stabilite kadar ekonominin de göz önüne alınması gerektiği unutulmamalıdır. Üçüncü seçenek olarak, uygun olmayan zemini stabilizesi (ıslah, iyileştirme) yapılabilir. Üçüncü seçenek, zeminde istenilen geoteknik özellikleri elde etmek açısından da ekonomiklik açısından da çoğu kez diğer yöntemlere göre daha uygundur (Robinson ve diğ., 2004); (Moseley, 2004); (Demiröz ve diğ., 2009).

Zemin ıslahı, zemine istenilen geoteknik özelliklerin kazandırılması için yapılan çalışmalardır. Stabilizasyon için değişik yöntemler vardır. En genel hali ile dört ana başlıkta toplanan zemin iyileştirme yöntemleri şunlardır (Terrel ve diğ., 1984b):

- Mekanik yöntemler (değişik kompaksiyon yöntemleri)
- Hidrolik yöntemler (Drenaj, ön yükleme, yer altı suyunun kontrolü)
- Kimyasal yöntemler (Katkı malzemeleri kullanılması)
- Değişik enjeksiyon yöntemleri

Mekanik yöntemler olarak gurubunu oluşturan kompaksiyon (sıkıştırma) işlemi, fiziki bir zemin iyileştirme yöntemidir. Zemini sıkıştırmanın önemi ondokuzuncu yüzyılın başlarında fark edilmiştir. Hayvanlar 1893 de New Meksiko Santa Fe yakınında bir toprak dolgu barajı sıkıştırmak amacı ile kullanılmıştır. Keçilerden ve atlardan (yaklaşık 115 adet) oluşan hayvanlar, bazı projelerde donanım olarak kullanılmışlardır (Johnson ve diğ., 1960). Yaklaşık otuz yıl sonra ise (1920 lerde) traktörler hayvanların yerini almıştır. Günümüzde sıkıştırma amacı ile kullanılan pek çok gelişmiş arazi donanımı bulunmaktadır (Coduto, 2006).

Dinamik sıkıştırma, mekanik iyileştirme yöntemi gurubuna girmektedir. Şekil 2.3 (a) da arazide bir dinamik kompaksiyon uygulaması görülmektedir. Şekil 2.3 (b) de çalışma zemine daha yakın çekilmiş bir şekilde görüntülenmektedir (www.zetas.com.tr; kasktas.com.tr).



(a)



(b)

Şekil 2.3: Mekanik iyileştirme (dinamik kompaksiyon uygulaması)

İyi sıkışmış bir zeminde, sıkışmamış durumuna göre, porozite düşüktür ve kuru birim hacim ağırlık değerleri fazladır. Zeminin boşluk miktarını azaltmak, birim hacim ağırlığını yükseltmek gerekçesiyle yapılan sıkıştırma işleminde zemin cinsine göre farklı yöntemler uygulanır.

İri taneli zeminlerde sıkıştırmada bağıl yoğunluk değerleri kullanılır. İnce taneli (kohezyonlu) zeminlerde ise, dinamik yükün zeminin üzerine düşürülmesi yolu ile zemin taneleri birbirlerine yaklaşır ve kısmen üniformalık sağlanmış olur (ASTM 698).

Sıkıştırma konusunda, su özellikle ince daneli zeminlerde önemli bir etkidir. İnce taneli zeminlerde, eklenen su, zemin içerisindeki yüzey gerilim kuvvetlerini azaltarak, birbirleri üzerlerinden kaymalarını sağlar. Böylece hava boşluklarının kapladığı alan zemin taneleri ile doldurulur. Bu suretle zeminde sıkışma meydana gelerek birim hacim ağırlığında artma meydana gelir.

Ancak belli bir doygunluk yüzdesinden sonra eklenen su, zemin içindeki boşlukları bizzat kendisi doldurur. Büyük ölçüde hava yeri doldurulmadan kalır ve eklenen su tanelerin arasını açar. Bu nedenle zeminin kuru birim hacim ağırlığında azalma olur.

Los Angeles'lı bir mühendis olan R. R. Proctor, 1930 yılında, bu günde halen kullanılmakta olan evrensel bir sıkıştırma yöntemi geliştirmiştir (Coduto, 2006). Proctor yöntemi olarak da bilinen bu yöntemin amacı, laboratuvarında, zemin için belli bir sıkıştırma enerjisinde en iyi sıkışmayı sağlayacak olan su içeriğini (optimum su muhtevasını) ve ona bağlı olan en büyük kuru birim hacim ağırlığı belirlemektir (Aytekin, 2004).

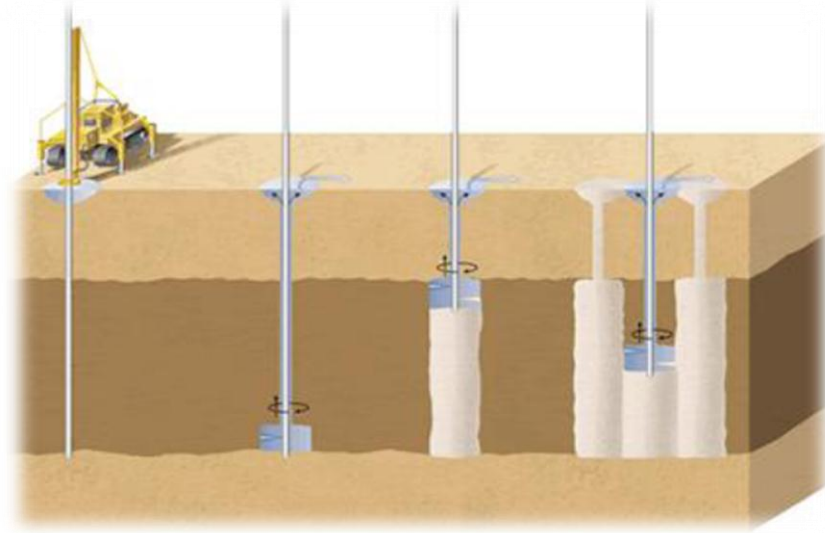
Diğer bir iyileştirme yöntemi olan hidrolik yöntemler, zeminde bulunan sularının kontrol edilmesi ile ilgili işlemlerdir. Drenaj, suyu kontrol altına alma tekniğidir. Drenaj yapıları, yeraltı ve yüzeysel olarak iki grupta toplanır. Bu yapıların yöntemi, yapı tipi ve teknolojisi farklılıklar gösterir (Tunç, 2001). Kazı alanlarından suyu uzaklaştırmak amacı ile uygulanan hidrolik yöntemlerden biri olan wellpoint uygulaması, Şekil 2.4 de görülmektedir (www.griffindewatering.com).



Şekil 2.4: Hidrolik iyileştirme (wellpoint uygulaması)

Diğer bir iyileştirme yöntemi olan enjeksiyonu yöntemi, zamanla sertleşen akışkan bir harcın, basınç ile zemin ya da çatlaklı kaya içerisine enjekte edilmesi şeklinde uygulanan bir yöntemdir. Zemin özelliklerinin iyileştirilmesi, temel takviyesi, oturma ve deformasyonların azaltılması için enjeksiyon uygulaması, özellikle çatlaklı kaya ve granüler zeminlerde, yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca barajlarda

sızdırmazlığın sağlanması, tünellerde yapı ile doğal zeminin birleştirilmesi için zemin enjeksiyonu uygulanmaktadır. Zemin enjeksiyonu, zeminin permeabilite değerinin düşürülmesi, kayma mukavemetlerinin artırılması veya deformasyonların azaltılması için kullanılır.



Şekil 2.5: Yüksek basınç enjeksiyonu (Jet-grout)

Perde enjeksiyonu, permeasyon enjeksiyonu, kompaksiyon enjeksiyonu, çatlatma enjeksiyonu, kontak enjeksiyonu, kaya enjeksiyonu, konsolidasyon enjeksiyonu, yüksek basınçlı enjeksiyonu gibi farklı enjeksiyon tipleri vardır. Bunlardan yaygın olarak kullanılan, yüksek basınç enjeksiyonu (Jet-grout) şekil 2.5 de gösterilmektedir (Mutman, 2007).

2.4. Killi Zeminlerde Katkı Malzemeleri Kullanımının Tarihçesi

Killi zeminlerin katkı malzemesi ile iyileştirilmesi konusu çok eski bir geçmişe dayanmaktadır. Süt, (2006) tarafından yapılan yüksek lisans tezinde ve Russell, (2003) de zemin stabilizasyonunun tarihçesinden bahsedilmektedir. İlgili kaynaklardan alınan bilgilere göre, 1959 da Mac Dowell tarafından, Mısır' da antik Mezopotamya döneminde kireçle iyileştirilmiş yolların kullanıldığını, Yunanlıların ve Romalıların zemin-kireç karışımlarını kullandıkları belirlenmiştir. Mimar Sinan, 16. yüzyıldan günümüze kadar sapaşğlam ayakta duran pek çok köprü, cami ve diğer yapılarının çalışmalarında, kireci çok farklı şekillerde kullandığı ve Mostar Köprüsünün yapımında kireç ile çalıştığı bilinmektedir (Sert, 2009).

Zemin iyileştirme ile ilgili deneyler 20. yüzyılın başlarında, Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılmıştır. 1924 de bir otoyolun yapımında zemin iyileştirme amacı ile kireç kullanılmıştır. 1930 lu yıllarda araç trafiğinin artması ile otoyollarda, pistlerde, demir yollarında, köprü ayaklarının yapımında kireç kullanımı geniş ölçüde yaygınlaşmıştır (Süt, 2006).

Zeminde istenilen geoteknik özelliklerin elde edilmesinde katkı kullanımı konusu 20. yüzyıl da ve 21. yüzyılda çok geniş şekilde irdelenmektedir. Birçok farklı malzeme zemin iyileştirmede kullanılmak amacı denenmiştir. Üzerinde çalışmalar yapılan malzemelerin bir kısmının katkı olarak kullanım alanlarındaki geçerliliği kesin olarak ispat edilmiş ve değişik ülkelerde konu ile ilgili standartlar hazırlanmış, stabilizasyon amacı ile yapılacak olan uygulama kıstasları kesinleşmiştir. İlk olarak ASTM C207 standardı ile kireç stabilizasyonunu standartlaştıran ASTM, o tarihten bu yana zemin iyileştirme de katkı malzemesi kullanımı konusunda pek çok standart yayınlamıştır. Bu standartlarda çimento, kireç, uçucu kül gibi katkıların kullanım şekilleri ve karışımlar üzerinde uygulanacak deneylerle ilgili ayrıntılarda verilmektedir (ASTM E1266 – 88,(2005)); (ASTM C25, (2006)); (ASTM C593, (2006)); (ASTM D5102-09); (ASTM D5202 – 08); (ASTM C51 – 07); (ASTM C977-03(2009)); (ASTM D3551 – 08); (ASTM D3155 – 98 (2006)); (ASTM D3877 – 08).

Türkiye’de Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 2005 de yayımlanan “Kireç stabilizasyonu ve çeşitli zayıf zemin stabilizatörleri teknik şartnameleri” konulu iç genelgede yol inşaatında karşılaşılabilecek zayıf zemin niteliğindeki dolgu tabanı, yarma malzemesi, ariyet ocağı veya taşıma gücü düşük üstyapı tabanı ve alt temel malzemelerinin kireç ile stabilizasyonu ve iyileştirilmesinin uygun olduğu belirtilmektedir.

Kirecin sönmesi esnasında ağırlıkça % 30 mertebesinde suyu bünyesine alma özelliği vardır. Doğal su içeriğinin optimum su içeriğinden çok yüksek olduğu durumlarda sönmemiş kireç tercih edilebilir ([http://www.nuhyapi.com.tr/ media/pdf/KirecTeknikSartname.pdf](http://www.nuhyapi.com.tr/media/pdf/KirecTeknikSartname.pdf)).

Tablo 2.1 de, Washington Ulusal Otoyolu Yönetimi Ulaşım Bölümü tarafından hazırlatılan “Zemin Stabilizasyonu Kullanıcı El Kitabı” ndan (1984) alınan, zemin tiplerine göre uygun katkı malzemeleri görülmektedir. Killerde, kireç, çimento, uçucu kül gibi katkı malzemeleri ile zemin stabilizasyonun önerildiği kitapta, çimento, kireç, uçucu kül gibi katkıların bir arada kullanımının da uygun olduğu belirtmekte ve kullanım ve uygulama konusunda ayrıntılar vermektedir.

Tablo 2.1: Zemin tiplerine göre uygun katkı malzemeleri (Terrel ve diğ., 1984)

| Zemin Tipi | En Çok Uygulanan İyileştirme Metotları |
|----------------------------|--|
| Kaba Granüller Zeminler | Mekanik Karıştırma, Zemin-Asfalt, Zemin - Çimento, Kireç, Uçucu Kül |
| İnce Granüller Zeminler | Mekanik Karıştırma, Portlant Çimento Stabilizasyonu, Kireç-Uçucu Kül, Zemin-Asfalt, Klor |
| Düşük Plastisiteli Killer | Kompaksiyon, Portlant Çimento Stabilizasyonu, Kireç, Kimyasallar |
| Yüksek Plastisiteli Killer | Kireç Stabilizasyonu |

Zemin Stabilizasyonunda katkı malzemesi kullanılması, geri dönüşüm malzemeleri üzerinde çalışan pek çok araştırmacının dikkatini çeken bir konudur. Özellikle çağımızın en büyük sorunlarından olan küresel ısınma ve bunun en önemli sebeplerinden olan atıklar ve dolayısı ile çevre kirliliği konuları da göz önüne alınarak, hem atık malzemelerin geri dönüşümü hem de zemin iyileştirme amacı ile pek çok çalışma yapılmıştır.

2.5. Killerde Kimyasal Stabilizasyon ve Geri Dönüşüm

Killerde kimyasal stabilizasyon konusu, çevre geotekniği konusu ile bütünleşmiş durumundadır. Konu ile ilgili çalışmalar, iki farklı amaca hizmet etmektedir. Bunlardan birisi zeminin geoteknik özelliklerinde istenilen değişiklikleri sağlamak, zemini güçlendirmek, diğeri ise katı atıkların geri dönüşümünü sağlamaktır. Katı atıkların çevre kirliliği ve küresel ısınma konusunda yarattığı etkiler bilinmektedir. Dünya nüfusu arttıkça üretilen atıkların miktarı ve çeşitleri de artmaktadır. Bu gün üretilen atıkların birçoğu yüzlerce ve hatta binlerce yıl çevre de kalacaktır. Tüketici

toplumun artması ile birlikte, yok olmayan atık malzemelerin oluşumu, atık krizine yol açmıştır. Atık malzemelerin yeniden yararlı bir şekilde kullanılması; atıkların yok edilmesine yardımcı bir yoldur (Schroeder, 1984).

Kazakistan'da yapılan yaklaşık 80.000 dolar bütçeli bir proje çalışmasından alınan bilgilere göre, 2002 yıl öncesinde Kazakistan'da 475 hektarlık bir alanda 12 milyon ton curuf atığı bulunmaktaydı. Bu atıklar, yer altı suyuna ve hava karışmak sureti ile tehlike oluştuyordu. Ancak bu curufa arıtma işlemlerinde bor cevheri eklenmek sureti ile çakıl haline getirilerek kullanılmaya başlandı. Bu çalışma sonrasında atık sahalarının %70'i boşalmıştır (Aktubinsk, 2002).

Polonya'da yapılan bir araştırmaya göre her 1 kW elektrik veya ısıtma enerjisi üretiminden, kullanılan kömürün kalitesine bağlı olarak 35 ile 220 gr. civarında uçucu kül ve curuf elde edilmektedir. Yine Polonya'da 1999 yılında yapılan bir araştırmada elektrik üretim istasyonları ve termal güç istasyonlarından dolayı toplam 267 milyon tonun üzerinde atık elde edilmiştir. Bu atıkların önemli bir kısmı kül ve curuftur. Bunlardan dolgu olarak ve sığ göllerde kullanılmaktadır (Steekiwicz, 1997).

Finlandiya'da 2001 yılında yapılan bir çalışmaya göre ise bu bölgede yılda 6 milyon tonun üzerinde atık oluşmaktadır. Bunlardan curuf beton ve yol yapımında kullanılmaktadır (Ulla-Maija, 2002).

Amerika Birleşik Devletlerinde 2001 yılında satılan 6 milyon ton çelikhane cürufunun parasal değeri 25 milyon dolardır. Bu curufun büyük kısmı yol temel altı malzemesi olarak kullanılmıştır (Erdemir, 2005).

Katı atıkların, Amerika Birleşik Devletleri'nin pek çok eyaletindeki otobanlarda kullanılabilirliğini, "Use Of Waste Materials In Highway Construction" isimli kitapta ekonomik, çevresel ve teknik yönden olacak şekilde pek çok açıdan irdelenmiştir (İmtiaz, 1993). Katkı olarak yüksek fırın curuf, uçucu kül, dip külü, lastik kırıntıları gibi katı atıkların kullanımını üzerine hazırlanan kitapta, curufun yol zeminini iyileştirme konusunda kullanımının mümkün olabileceği vurgulanmıştır.

Al-Rawas ve diğ., (2002), Kuzey Umman'da yapısal hasarların çok olduğu Al-Kohd şehrinde temin edilen killi zeminler üzerinde çalışılmalar yapmıştır. Yaptıkları çalışmada temin ettikleri bu zeminler üzerinde katı atıklarla iyileştirme konusunu araştırmışlardır. Yapılan çalışmalarda, inceltmiş çimentonun, bakır curufunun, öğütülmüş yüksek fırın curufunun ve çimento-curuf karışımının zeminlerin şişme potansiyeline ve plastisitesine etkileri incelenmiştir. Zemin, kuru ağırlığının %3, %6 ve %9 u oranlarında stabilizatörler ile karıştırılmıştır. Karışımların likit limitleri, plastik limitleri, şişme potansiyelleri ve şişme basınçları incelenmiştir. Bunun yanında iyon değişimi kapasitesi değişebilen iyonlar (Na, Ca, Mg ve K) ve asitlik dengesi (pH) değerlerindeki değişimler ölçülmüştür. Katkı olarak kullanılan bakır curufunun killerin şişme potansiyelini önemli ölçüde azalttığı, diğer stabilizatörlerin şişme potansiyelini ve plastisiteyi değişik derecelerde etkilediği gözlenmiştir. Çalışmanın sonucu olarak, curufun zemin iyileştirmede kimyasal stabilizatör olarak uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Larsson ve diğ., (2009) kaolin kili kullanarak yaptığı çalışmalarda, katkı olarak kireç ve çimento kullanmıştır. Çalışmalar sonucunda kireç-çimento kolonlarının zeminin kıvam limitleri, drenajsız kesme mukavemeti gibi zemin parametrelerine etkileri ve iyon değişim kapasitesi incelenmiştir. Testleri 7 günlük, 14 günlük, 30 günlük ve 90 günlük periyotlarda gerçekleştirdikleri çalışmada, Ca^{2+} , Na^{+} ve K^{+} iyonlarının değişimi ölçülmüştür. Çalışmalarda kaolin kiline ait drenajsız kesme mukavemetin Ca^{2+} , Na^{+} ve K^{+} iyonlarının değişiminden oldukça etkilendiği görülmüştür. Zemindeki Na^{+} ve K^{+} iyonları artarken, Ca^{2+} iyonları azalmaktadır. Kesme mukavemetinde çimento- kireç karışımının oranına ve tabaka kalınlığına bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir.

Chun ve diğ., (2003) çok yumuşak deniz killerini iyileştirmek amacı ile, curuf, uçucu kül, tuz, kireç gibi pek çok katkı malzemesi kullanmıştır. Karışımların serbest basınç değerleri ve optimum su muhtevası değerleri üzerinde yaptıkları araştırmada istatistiksel metotlar kullanarak uygun karışım oranını tespit etmeye çalışmışlardır.

Edil, (2004) yol kaplamalarında, dolgularda gerekli deneysel çalışmaların yapımını kolaylaştırmak amacı ile istatistiksel modellemeler yapmışlar ve SSG olarak adlandırdıkları bir alet kullanmışlardır. Mevcut mekanik deneysel tabanlı kaldırım tasarımı kaplamada kullanılacak malzemelerin mekanik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada malzemelerin değerlendirmesinde başka bir deyişle, mekanik özelliklerinin belirlenmesinde (sertlik ve mukavemet), arazi rijitlik ölçüm cihazı olarak, yeni geliştirilmiş olan (SSG) ve dinamik koni penetrasyon (DCP) kullanılmıştır. Böylece arazide kullanılan katkıların istenilen geoteknik özellikleri sağlayıp sağlamadığını arazide ölçmeyi mümkün hale getirmeye çalışılmıştır.

Saride, (2010) geri dönüşüm malzemeleri kullanarak, zemin iyileştirme çalışmaları yapmıştır. Çalışmada çimento ile iyileştirilmiş taş ocağı atıkları ve ıslah edilmiş asfalt kaplama malzemesi olmak üzere iki farklı atık malzeme, stabilizatör olarak seçilmiştir. Seçilen malzemeler, Arlington, Texas, ABD' de bir karayolu projesinde döşeme taban malzemesi olarak kullanılmıştır. Karışımlara, dayanım, kompaksiyon, şişme/büzülme deneyleri uygulanmıştır. Esneklik modülü hesaplanan malzemelerin kaldırım yapımı için temel malzeme olarak uygunluğu araştırılmıştır. Çalışmalar bu yeni temel malzemelerin uzun vadeli performansını izlemek için yatay eğim ve basınç hücreleri ile denenmiştir. Kaplama yüzeyi görünüş araştırmaları, kaldırım yüzeylerin birikmiş pürüzlülüğü izlemek için düzenli aralıklarla yapılmıştır. Hem laboratuvar ve saha izleme çalışmalarından elde edilen sonuçları, bu atık malzemelerin kaldırım çalışmalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

Yılmaz ve diğ., (2009) bentonit kili üzerinde katkı kullanarak iyileştirme çalışmaları yapmıştır. Yaptıkları çalışmada alçı taşını (Jips) katkı olarak kullanmıştır. % 2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında alçı taşını bentonit ile karıştırmıştır. Karışımları optimum su içeriğinde standart olarak sıkıştırdıktan sonra bir haftalık kür uygulamıştır. Hazırladığı numunelerin şişme potansiyelini ölçmüş ve üzerinde serbest basınç deneyleri uygulamıştır. Çalışmaların sonucu olarak, CH grubu killerin iyileştirilmesinde alçı taşının kullanımının uygun olduğunu tespit etmiştir.

Acar,(1998) tarafından hazırlanan yüksek lisans tezinde çinko-kurşun üreten fabrika atıkları olan farklı cürufaların zemin iyileştirme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tezde, doğal hali ile “Karayolları Fenni Şartnamesine” uyman zeminin, curuf ile stabilizasyonu yapılmıştır. Tez sonucunda %25 çinko-kurşun curuf ile stabilize edilen zeminin yüksek basınç dayanımları verdiği ve şartnameye uygun hale geldiği görülmüştür.

James R., ve diğ., (2008), bentonit kilinin özelliklerini, yüksek fırın curufu ve kireç kullanarak iyileştirmek üzere çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalarda, serbest basınç değerindeki artış gibi taşıma gücü özelliklerinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Bu iyileşme mikro yapıdaki değişimlerle birlikte açıklanmıştır. Mikro yapıdaki değişimlerle birlikte zemin davranışını inceleyen bu çalışmada yüksek fırın curufu ve kireç ayrı ayrı olacak şekilde değişik oranlarda bentonit kiline eklenmiş ve 0, 7, 28, 90 ve 150 günlük kür sürelerine tabii tutularak serbest basınç mukavemetlerindeki değişimler kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalar sonucunda %5 oranındaki kireç miktarının en kısa sürede ve en yüksek dayanımlara ulaşmada etkili olduğu, kireç oranın daha fazla artırılmasının dayanımı daha fazla yükseltmek yerine düşürdüğü gözlemlenmiştir. Yüksek fırın curufu miktarı % 3 den % 25 lere kadar arttırılmıştır. Curuf miktarı arttıkça dayanımın arttığı gözlenmiştir. Ahmaruzzaman, M., (2010) uçucu külün dolgu çalışmalarında kullanımı konusunda olumlu sonuçlar almıştır.

Ahnberg, (2003) araştırmasında ise kireç, yüksek fırın curufu, uçucu kül gibi katı katı atıklar kullanarak derin tabakalarda iyileştirme yapmıştır. Sonuç olarak kireç, yüksek fırın curufu ve uçucu külün katkı malzemesi olarak zemin iyileştirmede olumlu sonuçlar verdiğini ancak farklı zeminlerde farklı etkiler yaptığını gözlemlemiştir.

Aiban, S. A., (2006), çelik curufunun yol yapımında kullanılabilmesi üzerine yaptığı deneysel çalışmalarda çelikhane curufunun, yol çalışmalarında kullanılabilirliğinin mümkün olduğunu belirtmiştir.

Amu, O. ve diğ. (2005) zemin stabilizasyonunda kireç ve talaş kullanmıştır.%2, %4, %8 ve %10 oranlarında kireç ve talaş ile karıştırmıştır. Ayrıca katkısız kil numunesine de referans olarak kullanmak üzere aynı deneyleri uygulamıştır.

Numunelere üzerinde, özgül ağırlık, elek analizi, kıvam limitleri ve kompaksiyon ve CBR deneyleri uygulanmıştır. %4 kireç ve %4 talaş ile hazırlana numunelerden elde edilen CBR değerlerinin en iyi sonuçları verdiği gözlemlenmiştir.

Bilgen G., (2004) yüksek lisans tezde yüksek fırın curufu ve kireci farklı oranlarda karıştırılarak, bentonit üzerinde kullanılmıştır. Çalışma sonuçlarında yüksek plastisiteli killerde istenilen sonuçlara ulaşmak için en uygun kireç ile yüksek fırın curufunun oranının 1:1,5 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Chaurand, ve diğ. (2006) demir curufunun yol çalışmalarında kullanımı üzerine bir araştırma yapmıştır. Yaptığı çalışmada mikro yapısal incelemeler üzerinde durmuş, numunelerin pH ölçümleri ile Cr (krom) ve V (vandum) elementlerine dikkat çekmiştir. Çelikhane curufunun yol çalışmalarında kullanımını mikro yapıyı açıklayarak yaptığı çalışmalarında XRD ve SEM sonuçlarını kullanmıştır.

Choudhary ve diğ. (2010) uçucu kül ile zemin iyileştirme üzerinde çalışmalar yapmıştır. Yaptıkları çalışmada geogrid kullanılan şevlerde uçucu kül ile iyileştirme denemeleri gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla, uçucu kül ile stabilize edilmiş yamaçlarda, değişik boyutlarda (100, 200 ve 500 mm) geogridler kullanmışlardır. 2 farklı eğim açısında (45^0 ve 60^0) ve 3 farklı kesitte (B, 2B, 3B) modellemeler yapmışlardır. Çalışmaların sonucunda, uçucu külün başarıyla dolgu malzemesi bir set olarak kullanılabilir olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca uçucu kül ile stabilize edilen yamaçların daha dik ve daha sağlam olabileceğini çünkü uçucu külün sürtünme açısını yükselttiğini belirlemişlerdir.

Cioffi ve diğ. (2001) bentonit kili üzerinde curuf ile iyileştirme çalışmalar şu şekildedir: Organik içeren atıklar üzerinde çimento bazlı stabilizasyon uygulaması, organik maddelerin çimento hidratasyonu üzerindeki olumsuz etkilerinden dolayı çok zordur. Ancak su tutuma kapasitesi yüksek killerin kullanımı ve bu killerin çimento matris uyumluluğunu sayesinde ön işleme tabi tutulmuş organik bileşiklerin katılma sorunu azaltabilir. Bu çalışmada, çimento bazlı atık formlarının davranışları, hidrasyon kinetik, fiziko-mekanik özellikleri, bentonit kili kullanarak araştırılmıştır. Katkı olarak % 30 çimento, % 70 toz haline getirilmiş yüksek fırın

curufu eklenmiştir. Hazırlanan numunelerde organik maddelerin farklı konsantrasyonları kullanılmıştır. Hidrasyon kinetiği, kimyasal olarak bağlı su ölçümü ile termal ve kalorimetrik analizler ile incelenmiştir. Mikro yapı ve katılaşmış formlarının diğer fiziko-mekanik özellikleri, elektron mikroskobu ve serbest basınç dayanımı ölçümü tarama, civa saldırı porozimetresi yoluyla çalışılmıştır. Toz numuneleri üzerinde, diğer statik ve monolitik örnekler üzerinde, iki farklı filtreleme testleri ile kontrol edilmiştir. Çalışmaların sonucunda yüksek fırın cürufunun kullanımının uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Emery ve diğ. (1976) yüksek fırın cürufunun özellikle yol, dolgu çalışmalarında stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varan bir araştırma yapmıştır. Yaptığı çalışmalarda cürufun içeriğinde bulunan malzemelerin stabilizasyon amacı ile kullanılan diğer malzemelerin içeriğine benzerliğine ve kimyasal yapısındaki camsı oluşuma vurgu yapılmaktadır.

Ahnberg ve diğ., (2003) ve Ahnberg, H. (2004); İsveç'te yumuşak zeminlerin derin iyileştirme çalışmalarında, çimento ve sönmemiş kireç gibi bağlayıcıların halihazırda kullanıldığını söylemektedir. Çalışmalarında, yüksek fırın cürufu kullanılması durumunu incelemiştir. Ön yükleme yapılması ve cüruf kullanılması durumunda zeminde daha iyi bir iyileşme olduğunu belirtmişlerdir.

Eren ve diğ. (2009) Consolid444 ve Solidry olarak tanımladıkları iki farklı kimyasal katkı malzemesi ile Türkiye' nin Isparta Darendere bölgesinde iyileştirme çalışmaları yapmışlardır Bölgede bulunan zayıf zemini kazı çalışmaları yapmadan, özellikle yol yapımında kullanılmak üzere iyileştirmişler ve zeminlerin konsolidasyon sorunlarının çözüm getirmişlerdir. Zeminlerde alkali reaksiyonlar ve şişme sorununun kireç ile iyileştirilebileceği gözlemlenmiştir. Yaptıkları çalışmada ilk olarak Darendere zeminin geoteknik özelliklerini belirlemişlerdir. Darendere zeminin USC sınıflandırma sistemine göre SC grubu zemin sınıfına girdiğini ve yol çalışmalarına kullanımının uygun olmadığını belirlemişlerdir. Daha sonra %4 ila 10 arasında farklı oranlarda kireç ve Consolid444 ve Solidry ekleyerek hazırladıkları numuneler üzerinde tekrar laboratuvar deneylerini uygulamışlardır. Deneylerin sonucunda katkı malzemelerinin plastisiteyi ve şişme miktarını azalttığını, optimum

su içinde önemli bir değişikliğe sebep olmadığını ancak kuru birim hacim ağırlığında artış sağladığını, ıslak CBR değerinde önemli artışlar meydana getirdiğini tespit etmişlerdir.

Sivapullaiah, (2006), çalışmasında, killerin geoteknik özelliklerin iyileştirilmesinde kireç kullanmaktadır. Çalışmada %1 ve %3 oranlarında kireç ile denemeler yapılmıştır. %3 kireç ile elde edilen sonuçların, %1 kirece göre, daha iyi olduğu belirtilmiştir. Kireç oranının yükseltilmesi ile daha iyi sonuçlar elde edilebileceği tartışmaya açılmıştır.

Song ve diğ., (2003) katı atıkların yol yapımında kullanımı üzerine çalışmalar yapmıştır. Yaptıkları çalışmada, arazide atıkları kullanarak yaptığı iyileştirme çalışmaları sonrasında SPT değerlerini karşılaştırmış ve N değerlerinde yükselmeler olduğunu rapor etmiştir.

Kavak A. ve diğ., (2011), çalışmasında da düşük plastisiteli (CL) killer üzerinde iyileştirme çalışmaları yapmıştır. Yaptıkları deneysel çalışmalarda, kilin atterberg limitlerini, kompaksiyon değerlerini, serbest basınç değerlerini ve CBR değerlerini incelemişlerdir. %5 kireç ve %3,33 yüksek fırın curufunun kullanılması halinde CL grubu killerin optimum su muhtevalarında önemli bir değişiklik olmadığını ancak birim hacim ağırlığında artış meydana geldiğini, serbest basınç değerlerinde önemli yükselmeler olduğunu ve ıslak CBR değerlerinde artışlar meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Çalışmaların sonucunda özellikle düşük plastisiteli killerde %5 kireç ve %3,33 curufun geoteknik özellikleri iyileştirmekte en uygun oran olduğunu belirtilmektedir.

Akawwi E. ve Al-Kharabsheh A., (2000) yaptıkları çalışmada, %3 ila %5 oranında kirecin, killerin geoteknik özelliklerini iyileştirmede oldukça uygun olduğu söylenmektedir. Amman, Ürdün'ün başkentidir ve alanının yaklaşık% 40'ı geniş killi topraklarda kaplıdır. Bu bölgede bulunan zeminin geoteknik özellikleri üzerine kireç stabilizasyonu etkisinin incelendiği bu çalışmada zeminin marn, kireçtaşı ve çört kayalardan meydana geldiği belirtilmektedir. Zeminin mineralojik bileşenleri ve şişme ve büzülme potansiyeli sebebi ile bölgedeki inşaat çalışmalarında sorunlar

yarattığı ifade edilen zemin üzerinde, kıvam limitleri ve diğer fiziksel özellik testleri yapılmıştır. Plastisite indeksinin ve doğrusal büzülme limitinin sırasıyla (18,6-%20,7) ve (30-%38,9) olduğu bulunan zeminin sınıfının yüksek plastisiteli (CH) ile inorganik kil silt olduğu belirtilmektedir. X-Ray difraksiyon kullanarak belirlenen mineralojik çalışmalarda, zeminin kalsit, kuvars ve kil mineralleri meydana geldiğini belirlenmiştir. Değişik oranlarda kireç kullanarak zeminde bahsi geçen sorunların iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmalarda %3 ila %5 oranında kireç stabilizasyonun uygunluğu gözlemlenmiştir.

Bilgen ve Çapar, (2007) yüksek fırın curufu ve kirecin killer üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, Zonguldak-Devrek bölgesinden temin edilen düşük plastisiteli bir kil kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, kireç ve yüksek fırın curufunun, deney kilinin mühendislik parametrelerine etkisi incelenmiştir. Çalışma iki aşamada yapılmıştır. Deney zeminine, değişik oranlarda kireç ve 150 mikron çapındaki elekten elenmiş cüruf eklenerek deney numuneleri elde edilmiştir. Elde edilen deney örnekleri, 0, 7 ve 28 gün kür edilerek örneklerin dayanım ve şekil değiştirme değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Bu çalışmaların sonunda özellikle, % 5 cüruf ve % 7,5 kireç ile karıştırılan kilin serbest basınç değerinde, 28 gün sonunda 20 kata varan artışlar oluşmaktadır. Ayrıca, kırılma anındaki birim deformasyonların % 11 seviyelerinden % 1 seviyelerine düştüğü gözlenmektedir. Curuf, kireç ve kil karışımı, kilin optimum su içeriğini belirgin olarak etkilememekle birlikte, kuru birim hacim ağırlığını azaltmakta ve kompaksiyon eğrisini düzleştirmektedir. Böylece zemin rijit bir yapıya dönüşmekte ve statik elastisite modülü artmaktadır. Mühendislik uygulamalarında problemlili zemin sınıfına giren düşük plastisiteli kil zeminin bu artan mukavemeti ve deformasyona karşı direnci birçok geoteknik projelerinde kullanılabilmesine izin verir hale gelmiştir.

Wild, ve diğ., (1998) yaptıkları çalışmada farklı kil grupları üzerinde iyileştirme çalışmaları yapmışlardır. Çalışmada %0 dan %6 ya kadar değişen farklı oranlarda karışımları killi zeminlerle karıştırmışlardır. Katkı olarak kireç, yüksek fırın curufu, jips kullanmışlardır. Ayrıca karışımlara SO₃ ekleyerek farklı numuneler elde etmişlerdir.

Hazırlanan numuneleri 0, 7 ve 28 günlük kürler sonucunda serbest basınç deneylerine tabii tutmuşlardır. Çalışmaların sonucunda kilin %5 oranında kullanılmasının uygun olduğu ve yüksek fırın curufu ve kilin birlikte kullanılmasının oldukça uygun görüldüğü rapor edilmiştir.

Rogers ve diğ., (1997) kil kireç etkileşimini ve kirecin zemin iyileştirmede kullanımını araştırmışlardır. Değişik oranlarda kireç ile farklı killeri karıştırarak hazırladıkları numuneler üzerinde bir optimizasyona gitmişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda, kireç kil numunelerinin, kıvam limitlerini, pH değerlerini değişik zamanlarda kür ederek incelemişlerdir. Bu incelemeler sonucunda farklı killerin farklı zamanlarda tepkiler verdiğini ancak kirecin zemin iyileştirmesinde kesinlikle olumlu sonuçlar doğurduğunu gözlemlemişlerdir.

Akbulut S. ve diğ., (2007) seçtikleri üç farklı zemin üzerinde lastik ve sentetik fiber parçacıkları kullanarak zemin özelliklerinde iyileştirme yapmışlardır. 0,25 mm. çapında ve 5 ila 60 mm. arasında değişen uzunluklarındaki polietilen fiberler ve polipropilen fiberleri ağırlıkça %1 ila %5 oranlarında olacak şekilde killerle karıştırmışlardır. Hazırladıkları numuneleri optimum su muhtevasında karıştırdıktan sonra, kesme kutusu ve serbest basınç deneyleri uygulamışlardır. Çalışma sonucunda serbest basınç değerlerinde artışlar kaydetmişlerdir.

Veith, (2000) yaptığı çalışmada kaolin kili kullanarak iyileştirme üzerine çalışmalar yapmıştır. Yapılan çalışmada kaolin kili kullanarak % kireç ve %1, %2 gibi farklı oranlarda yüksek fırın curufu ekleyerek hazırladıkları numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri uygulamıştır. Ayrıca kaolin kili kullanarak hazırladıkları numunelerde şişme potansiyelini incelemiştir. Çalışmanın sonucunda kil ve yüksek fırın curufu karışımlarının kilin şişme potansiyelini azalttığı rapor edilmiştir.

Kızılcelik, (2010) yapılan yüksek lisans tezinde, stabilizasyonun gerçek anlamda yirminci yüzyılın mühendislik olayı olduğu söylenmektedir. Ayrıca, özellikle son yıllarda yeni yöntemler önerilmiş ve uygulanmış, yetersiz temel ortamının kullanılma zorunluluğu ve sağlam zemin bölgelerinin azalması ile yapıların boyutlarının artması sonucu yarattıkları büyük gerilmeler bunun nedenlerinden olduğu ve, bir ülkede

stabilizasyon teknolojisinin gelişmesi de endüstrinin gelişimine paralel olduğu vurgulanmıştır. Kızılçelik, yaptığı çalışmada Uzunçiftlik mevkiinden alınan yüksek plastisiteli ve yüksek su muhtevasına sahip killi zeminin kireç ile stabilizasyonu incelenmiştir. Çalışmada öncelikle kil numuneleri üzerinde Atterberg limitleri, elek analizi ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Sonrasında uygun kireç karışım oranı bulunarak karışım ve karışimsız serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Ayrıca deneylerde katkı malzemesi olarak doğal su muhtevasında hem sönmüş hem de sönmemiş kireç kullanılmıştır ve sonuçlar optimum su muhtevasında %5 kireçli durum ve doğal durumda bulunan mukavemetler ile karşılaştırılmıştır. Bu deneyler sonucunda 28 gün kür edilen kireç katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde 120 kPa' dan 1.730 kPa' a varan artışlar gözlemlenmiştir. Yapılan yaş CBR deneylerinde ise CBR değeri %4'ten %23'e kadar artmıştır. Ayrıca deneylerde kireç katkılı numunelerdeki boy kısalma oranı %15'ten %1,5'e azalmıştır. Sönmüş ve sönmemiş kireç ile yapılan deney birbirine yakın sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Çalışmalardaki sonuca göre artan mukavemet artışları ve deformasyonlardaki azalma sayesinde yol alt yapısında kullanılabilecek olan kireç karışımı bizlere yol kesitlerinde küçültme ve buna bağlı olarak maliyetlerde azalma sağlayabilecektir. Ayrıca kireç stabilizasyonu için su muhtevası, optimum su muhtevasından yüksek killi zeminlerde sönmüş kireç yerine sönmemiş kirecin kullanımı da uygun gözükmektedir. Sönmüş kireç zemindeki yüksek su muhtevasını düşürerek optimum su muhtevasına yaklaştırmakta ve mukavemetlerin zemini kurutmaya gerek kalmadan artmasını sağlamaktadır.

Kavak ve diğ., (2009) yaptıkları çalışmada polimerleri zemin iyileştirme amacı ile kullanmışlardır. Bu çalışmada dünyada birçok alanda kullanılan bir kimyasal olan polimer kullanılarak yol altyapı temel malzemesi iyileştirilmiştir. Çalışma Karayollarının bölünmüş yol çalışmaları kapsamında bulunan Keşan Uzunköprü 20.km de 100 metrelik bir kısımda uygulanmıştır. Polimer ile iyileştirilmiş zemin ve temel imalatı yapılmış zeminler üzerinde Plaka yükleme deneyleri ve arazi CBR deneyleri yapılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışmada karayollarında temel malzeme kriterlerini sağlayan kırma taş bir malzeme ağırlıkça %1 oranında polimer ile iyileştirilmiştir. Arazide yapılan plaka yükleme deney uygulamalarında 10 kg/cm² gibi çok yüksek gerilmeler altında oluşan deformasyonlar polimer katkısı ile

maksimum 3.77 mm'den 1.7 mm' ye, 2.1 mm olan kalıcı deformasyonlarda ise 1 mm'ye kadar düşmektedir. Elek analizi dağılımı sonuçları incelendiğinde polimerlerin çok ince malzemeleri bağlayarak zemin yapısını daha daneli bir yapıya getirdiği gözlenmektedir. Çalışmada %8 olan ince oranı polimer uygulaması sonrasında %1 değerlerine düşmüştür. Bu değişim özellikle düşük kaliteli malzemelerin mukavemetlerin ve CBR değerlerinin artması yanında ince oranını azaltarak uygun olmayan dolgu malzemelerini yol altyapısında kullanılabilen duruma getirebilecektir.

Çapar ve diğ., (2009) yaptıkları çalışmada demir çelik fabrikalarında atık bir ürün olan yüksek fırın curufunun yol dolgu çalışmalarında toz haline getirilerek kireç ile birlikte katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmaktadır. Çalışmada Kocaeli ilinde problemlili bir kil olan Uzunçiftlik kili kullanılmıştır. Curuf ve kireçle stabilize edilen Uzunçiftlik kilinde optimum su muhtevalarında kayda değer değişiklikler gözlenmemesine rağmen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde düşüş ve Proctor eğrisinde düzleşme gözlenmiştir. Karışım ve sıkıştırma sonrasında zemin daha mukavemetli ve statik elastisite modülü keskin bir şekilde artarak rijit bir yapıya kavuşmaktadır. Serbest basınç mukavemetleri ve ıslak CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) değerlerinde de keskin artışlar gözlenmiştir. Doğal kilde, standart Proctor enerjisinde hazırlanan serbest basınç değerleri 260-280 kPa arasında iken, “%5 kireç ve %3,33 yüksek fırın curufu” katkısı ile yapılan iyileştirme sonrasında 28 günde 1500 kPa seviyelerine çıkmaktadır. Kireç katkısı ile ıslak CBR değerleri ise 3 civarından 40'lı değerlere ulaşmaktadır. Yüksek fırın curufunun kireç ile birlikte kullanılması, kirecin yalnız kullanılmasına göre daha yüksek mukavemetler vermektedir. CBR deneyleri sırasında bulunan şişme değerleri 0'a yakın olarak bulunmuştur. Bu çalışmada yapılan iyileştirmeler sonucunda, yüksek fırın curufunun kireç ile birlikte yol altyapı çalışmalarında verimli olarak kullanılabilceği anlaşılmaktadır. Böylece yüksek fırın curufu, fabrikalardan uzak bölgelerde dahi yol dolgularında hacimli olarak kullanılarak atık bir üründen değerli bir katkı malzemesi haline dönüşebileceği vurgulanmaktadır.

Misra ve diğ., (2010) çalışmasında uçucu kül ile zemin iyileştirme çalışmaları gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada CPT ve DCP korelasyonları yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada uçucu kil ile stabilize edilmiş numuneler üzerinde Atterbeg limitleri, optimum su içeri kuru birim hacim ağırlığı ilişkisi ve California Taşıma Oranı değeri ile Dinamik Konik Penetrasyon değerleri incelenmiştir. Deneylein yapımı ASTM ve AASHTO standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Hazırlanan 15 örneğin 10 tanesi %10; 5 tanesi %20 uçucu kül içermektedir. Bu karışımlar değişik su muhtevalarında deneye tabii tutulmuşlardır. Çalışmada iki farklı uçucu kül tipi kullanılmıştır. Çalışmaların sonunda deney verileri ile korelasyon yapılmıştır. Bu korelasyonlar sonucunda en yüksek CBR değerinin optimum su içeriğinden daha yüksek bir su muhtevasında elde edildiği rapor edilmektedir.

Ramesh ve diğ., (1999) killeri üzerinde uçucu kül ve kireç katkısını sodyum tuzları ile birlikte kullanarak, zemin iyileştirme üzerine çalışmalar yapmışlardır. %3 kireç ile NaCl, NaOH ve Na₂SO₄ tuzlarını killeri iyileştirme amacı ile kullanmıştır. Çalışmaların sonucunda kullanılan katkıların puzolonik etki yaparak killerin iyileştiği gözlemlenmiştir.

ASTM C977 no lu standartta killerde katkı olarak kireç kullanımını asit denge (pH) yöntemi anlatılmaktadır. Standartta katkı olarak kullanılabilcek en uygun kireç oranının genelde %2 ila %6 oranında olacağı vurgulanmaktadır. Kavak, A. ve Akyarlı A., (2007) zemin iyileştirme amacı ile yapılan bir zemin iyileştirme çalışmasında %5 oranında kirecin istenen sonuçları verdiği belirtilmiştir. Çalışmada, Türkiye'de Ankara iline bağlı Yurtiçi kasabasında yapılan bir yol çalışmasında kil stabilizasyonu uygulanmıştır. 200 m uzunluğunda ve 30 cm kalınlığında bir yol üzerinde yapılan stabilizasyon sonucunda, ıslak CBR değerinin 21 kat arttığı gözlemlenmiştir.

Akyarlı, ve diğ., (2009) yaptıkları uygulamalı çalışmada taşıma gücü zayıf bir zemin üzerinde kireç stabilizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmadan alınan bilgilere göre, kireç stabilizasyonu uygulaması pratik olarak Şekil 2.6 de gösterildiği şekilde yapılabilir. Şekil 2.6 (a) da gösterildiği üzere kireç stabilizasyonunda ilk olarak zemin gevşetilir. (b) Kireç zemine yayılır. (c) Yayılan kireç zemin bir araç yardımı

ile karıştırılır. (d) Son olarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. Çalışmadan alınan resimlerde bir fabrika sahasını oluşturan, taşıma gücü düşük zemine kireç stabilizasyonunun uygulanışı göstermektedir. Kireç stabilizasyonu basit tarım aletleri ile de yapılabilmektedir. Zemin pulluk ile gevşetildikten sonra, uygun miktarda kireç serilir. Rotovator adı verilen tarım aleti ile de killi malzeme ve kireç karıştırılır. Gerekli hallerde sulama ve sonrasında sıkıştırma işlemi ile uygulama sona ermektedir. Uygulamada traktörlerden faydalandığı için akaryakıt giderleri düşmektedir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2.6: Kireç stabilizasyonunun uygulanışı

Kireç stabilizasyonu uygulaması için gerekli kireç miktarı zemindeki malzemenin kil oranına göre değişmekle beraber 1 ton malzemenin kireç ile iyileştirilmesi için yaklaşık 18-30 kg kireç yeterli olmaktadır. Uygulama sonrası malzemenin taşıma gücü yükselmektedir. Karayolları genel Müdürlüğü ile Ankara Bala ayrımı – Kulu ayrımı bölünmüş yolunda yapılan çalışmalarda kuru CBR değerlerinde 8 kat, yaş

CBR değerlerinde 34 kata varan artışlar gözlemlenmiştir. Yapılan stabilizasyon sonucu kalıcı deformasyon değerleri yaklaşık 8 kat azalma göstermiştir. (<http://www.kimtas.com/yolstabilizasyon.html>). Bu değerler yol yapımı için istenen gerekli değerleri rahatlıkla karşılayabilmektedir (http://www.kimtas.com/images/yolstabil/imo_sunum.pdf).

Rajasekaran, (2005) yaptığı çalışmada deniz killeri üzerinde kireç ve çimento katkısı kullanmış ve sülfat etkilerini incelemiştir. Çalışmada deniz kenarında bir bölgeye test tankları kurulmuştur. Kurulan test tankları derinliği 550 mm ve çapı 600 mm dir. Bu kurulan test tanklarının içine 50 mm çapında ve 500 mm derinliğinde kireç kolonları hazırlanmıştır. Hazırlanan kolonlara kireç enjekte edilmiştir. Hazırlanan kireç enjeksiyonuna farklı organik maddelerde eklenmiştir. Enjeksiyon sonrasında eleme teknikleri ve SEM yöntemi kullanarak yapısal değişiklikler araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda kireç enjeksiyonu ile killerin kum boyutuna ulaştığı yani çaplarında bir genişleme meydana geldiği ve geoteknik açıdan kum gibi davranış sergilediğini belirlenmiştir.

Sing ve diğ.,(2009) turba zeminler üzerinde, yüksek fırın curufu, çimento, kireç gibi farklı katkıları, değişik oranlarda karıştırarak iyileştirme amacı ile kullanmıştır. Çalışmalar sonucunda, karışımların farklı zeminlerde farklı etkiler yarattığı ancak genel olarak kireç ve curufun zeminin serbest basınç değerinde yükselmeyi sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Öte yandan zeminle ilgili tüm çalışmalarda, şu ana kadar çeşme suyu olarak adlandırdığımız normal su kullanılmaktadır. Bilindiği gibi dünyamızın dörtte üçünü denizler kaplamaktadır. Global ısınma etkisi ile deniz sularının miktarının hızla arttığı somut rakamlarla ifade edilmektedir (Nordell, 2003). Temiz su kaynaklarının hızla kirlendiği ve yok olduğu da bilinen bir gerçektir (Elhassadi, 2007); (Baoying ve diğ., 2007); (Dowda ve diğ., 2008). Bu kirlenme ve doğal dengedeki bozulma, doğal felaketlerin sayısının artmasına sebep vermektedir. Hatta bu doğal felaketlere karşı, evrensel çapta erken uyarı sistemleri kurulması üzerin çalışmalar yapılmıştır (Grasso ve Singh., 2008). Bu sebepler, bilim insanlarını bir yandan Elarbash, (1991), Khawaji ve diğ., (2008); Akili ve diğ., (2008) tarafında yapılan çalışmalarında olduğu gibi

deniz suyundan temiz su elde edilmesi konulu çalışmalar yapmaya, bir yandan da temiz su yerine deniz suyu kullanılmasının mümkün olduğu alanların araştırılmasına yönelmişlerdir. Çevre geotekniği ile ilgili olarak deniz suyunun farklı kullanım alanları üzerine olumlu çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin, Arasan ve diğ. (2008) killerin kıvam limitlerine inorganik tuzların etkisini araştırmışlardır. Düşük plastisiteli killerde tuz oranı arttıkça likit limitin arttığı, yüksek plastisiteli killerde ise daha farklı davranışlar görüldüğü gözlemlenmiştir. Ghadiri (2006), çalışmalarında deniz suyunu tarımsal alanda kullanımını araştırmıştır.

Kavak ve diğ. (2011) yaptıkları çalışmada, Kocaeli Uzunçiftlik Bölgesi'nden alınan kil zemin numunesi üzerinde, iyileştirme adına, deniz suyu etkilerinin incelenmesi amacı ile bir takım deneyler yapmıştır. Deniz suyu ile hazırlanan numuneler, çeşme suyu kullanılarak hazırlanan numuneler ile kıyaslanmaktadır. Çalışmada Karadeniz Denizi'nin, Zonguldak Alaplı - Karadeniz Ereğli arasındaki bölgesinden alınan deniz suyu kullanılmıştır. Deniz suyu ile çeşme suyunun zeminin bünyesel özellikleri, taşıma gücü gibi geoteknik özellikleri üzerinde etkisi incelenmek üzere sıkıştırma (kompaksiyon), Kıvam (Attarberg) Limitleri, Serbest Basınç, CBR zemin deneyleri yapılmış ve sonuçları kıyaslanmıştır. Killi zeminlerde kıvam limitleri, zeminin geçirgenliğinin az olması ve şişme potansiyelinin yüksek olmasını etkilediğinden önemli bir anlam taşımaktadır. Çalışmanın sonucunda, Deniz suyu kullanılan numunelerin plastisite değerlerin de önemli bir değişim olmadığı görülmüştür. Uzunçiftlik kili normal su ile karıştırıldığında CBR değeri 4 olarak bulunmuştur. Çeşme suyu yerine deniz suyu kullanılması bu değeri yaklaşık 7 kat arttırarak CBR değerini 27 ye yükseltmiştir. Bu değer yol alt temeli olarak kullanıma uygun bir değerdir. Uzunçiftlik kilinin çeşme suyu ile karşılaştırılması ile elde edilen serbest basınç değerleri 250-300 kPa değerlerinde kalırken deniz suyu ile hazırlanan numunelerde bu değer 800 kPa' a yükselmiştir. Tüm bu sonuçlara bağlı olarak kil numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda deniz suyu kullanılmasının, çeşme suyu kullanılmasına göre çok daha iyi sonuçlar vereceği şeklinde yorumlanmıştır.

Binod ve diğ., (2005) Japonya'da kayan şevlerle ilgili yaptıkları çalışmada, deniz suyunun zemin kayma dayanımını araştırmışlardır. Bu çalışmada deniz suyunun zeminin içsel sürtünme açısını arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır.

Yükselen ve diğ., (2008) organik madde miktarı yüksek olan killerin iyileştirilmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. İyon değişim kapasitelerini (CEC), organik madde miktarlarını ve kıvam limitlerini belirledikleri killerin üzerinde yaptıkları araştırmada, yoğurma suyu olarak Ege denizinden temin ettikleri deniz suyu kullanmışlardır. Çalışmalar sonucu, deniz suyunun farklı kil gruplarında farklı etkiler yarattığı sonucuna ulaşmışlardır.

Bilgen ve diğ., (2010) çalışmalarında düşük plastisiteli killer üzerinde deniz suyunun etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada deniz suyunun killerin kıvam limitine pek etkisi olmadığını ancak serbest basınç değerinde önemli bir yükselme sağladığını belirtmişlerdir.

2.6. Killerde Kimyasal Stabilizasyon ve Literatür Taramaları

Yapılan ön çalışmalar ve literatür taramaları ile ilgili ayrıntılar 2.5. nolu başlık altında verilmiştir. Bu bölümde elde edilen veriler özetlenmiş ve maddeler halinde toparlanmıştır. Literatür çalışmalarında:

- Stabilizatör olarak “kireç”, “uçucu kül”, “jips”, “yüksek fırın curufu”, “bakır curufu” gibi malzemelerin killerin geoteknik özelliklerine etkisi, çok farklı açılardan incelenmiştir.
- Taşıma gücünü arttıran, I. Madde de belirtilen stabilizatörlerin killi zeminlerin, şişme oranını azalttığı sabitlenmiştir.
- İnce daneli zeminlerin stabilizasyonunda, kirecin katkı olarak kullanımında, ağırlıkça %5 civarlarında kullanılması en uygun orandır.
- Farklı kimyasal katkı malzemelerinin birlikte kullanımı, yalnız olarak kullanımına göre daha üstün sonuçlar vermektedir.
- Kireç ile Yüksek Fırın curufunun karıştırılarak kullanılmasında en iyi değerleri veren karışım oranı 1:1,5 dur.
- “Çelikhane curufu” (BOS) nun kimyasal stabilizatör olarak kullanımı ile ilgili çalışmalar yok denecek düzeydedir.
- İyileştirme çalışmalarında, su olarak çeşme suyu kullanılmıştır.
- İyileştirme amacı ile deniz suyunun kullanımı üzerine az çalışma bulunmaktadır.

Görüldüğü üzere literatürde özellikle yüksek fırın curufunun, katkı olarak kullanımı üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar ışığında demir çelik fabrikaları için yüksek fırın curufu artık bir atık ürün sınıfından çıkmıştır. Zira Ereğli demir çelik fabrikalarından elde edilen bilgiye göre, ortaya çıkan yüksek fırın curufunun tamamı satılabilmekte, farklı sektörlerde kullanılmaktadır. Demir çelik fabrikalarında yüksek fırın curufu kadar çok miktarda ortaya çıkan ve henüz tam olarak bir kullanım alanı bulunmayan önemli bir atık çelikhane cürufudur. Çelikhane curufu üzerine yapılmış çalışmalar yok denilecek kadar azdır. Ayrıca, iyileştirme çalışmalarında kullanılan sular çeşme suyudur. Deniz suyunun killi zeminler üzerindeki etkilerinin incelenmesine ilişkin çalışmalar bulunmayan bir konudur.

Literatür taramalarından elde edilen sonuçlar ışığında tarafımızdan üzerinde daha çok durulması gereken ve daha ayrıntılı çalışılması gerekli bulunan konular maddeler halinde aşağıda verilmektedir. Literatür çalışmaları sonucunda:

- Düşük ve yüksek plastisiteli killerin katkı malzemelerine farklı tepkiler verdiği görüldüğünden bu tez çalışmasında yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli killerin ayrı ayrı incelenmesi sonucuna varılmıştır.
- Hemen hemen tüm çalışmalarda, yüksek plastisiteli kil grubunu temsilen bentonit kili kullanılmıştır. Bu çalışmada da yüksek plastisiteli kil olarak bentonit kili kullanılmasının; düşük plastisiteli kil grubunu temsilen bölgemizde bulunan bir kilin seçilmesinin uygun olacağı sonucuna varılmıştır.
- Endüstriyel atıklar olan, yüksek fırın curufu, uçucu kül malzemelerinin üzerinde çok çalışmalar yapıldığı ancak çelikhane curufunun katkı olarak zemin iyileştirmede kullanımı konusunda çok az çalışma olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada katkı malzemesi olarak çelikhane curufu (BOS) kullanılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.
- Yapılan iyileştirme çalışmalarında numunelerin çeşme suyu ve deniz suyu ile ayrı ayrı hazırlanıp, deniz suyunun killi zeminler üzerindeki etkilerinin incelenmesine karar verilmiştir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Killerin iyileştirilmesinde katkı malzemesi kullanımının incelenmesinde ilk olarak ayrıntıları ikinci bölümde verilen literatür çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Tezin ikinci kısmını laboratuvar çalışmaları oluşturmaktadır. Laboratuvar çalışmalarında ASTM D 4609 nolu standart referans alınmaktadır. İlk olarak 1986 da hazırlanan ve son olarak 2008 tarihinde güncellenen D 4609, killerde stabilizasyon çalışmalarında, kullanılan malzemeler üzerinde uygulanması gereken deneyleri ve bu deneylerle ilgili standartları işaret eder.

Laboratuvar çalışmalarından elde edilen veriler ile kullanılan katkı malzemelerinin en uygun oranın belirlenmesine çalışılmaktadır. Sonuçların istatistiksel yorumları ile killerde katkı maddesi kullanımının modellenmesi yapılmaktadır. XRD analizleri ve SEM görüntüleri ile mikro yapıdaki değişimler irdelenmektedir. Çalışmalarda yaklaşık olarak 1500 kg. bentonit, 1500 kg. Uzunçiftlik kili, 1000 kg. deniz suyu, 1000 kg. çeşme suyu, 600 kg. kireç, 500 kilo curuf kullanılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin temin edilişleri ve ayrıntılı bilgileri 3.1.2 ve 3.1.3 nolu alt başlıklarda verilmektedir. İki farklı kil grubundan seçilen killer, ayrıntıları 3.1.4 ve 3.1.5 de sunulan katkı malzemeleri ile değişik oranlarda karıştırılmışlardır. Karışım oranlarının seçimi ile ilgili ayrıntılar 3.1 de verilmektedir. Laboratuvar çalışmalarında; kullanılan malzemelere ilk olarak sınıflandırma amacı ile deneyler uygulanmaktadır. ASTM 422 standardına uygun olarak elek analizi, ASTM E 126 standardına uygun olarak hidrometre deneyleri yapılarak malzemelerin boyut analizi yapılmaktadır. Hidrometre deneyinin yanında, Gazi Üniversitesi' nde lazer kırma yöntemi ile de malzemelerin 75 mikron altı dane dağılımları belirlenmiştir. Bu analizler doğrultusunda USCS ve "AASHTO zemin sınıflandırma sistemlerine göre kullanılan killerin sınıfları belirlenmektedir. ASTM D854 standardına uygun olarak kullanılan malzemelerin özgül ağırlıkları belirlenmektedir.

Kıvam limitleri deneyleri, ASTM 4318 standardına uygun olarak karışımlara uygulanmaktadır. Kıvam limitleri her bir numune için ayrı ayrı olacak şekilde, 0 gün (hazırlandıkları gün), 1 gün, 7 gün ve 28 günlük olarak yapılmıştır. ASTM D2974 standardına göre malzemelerde organik madde tayini yapılmaktadır.

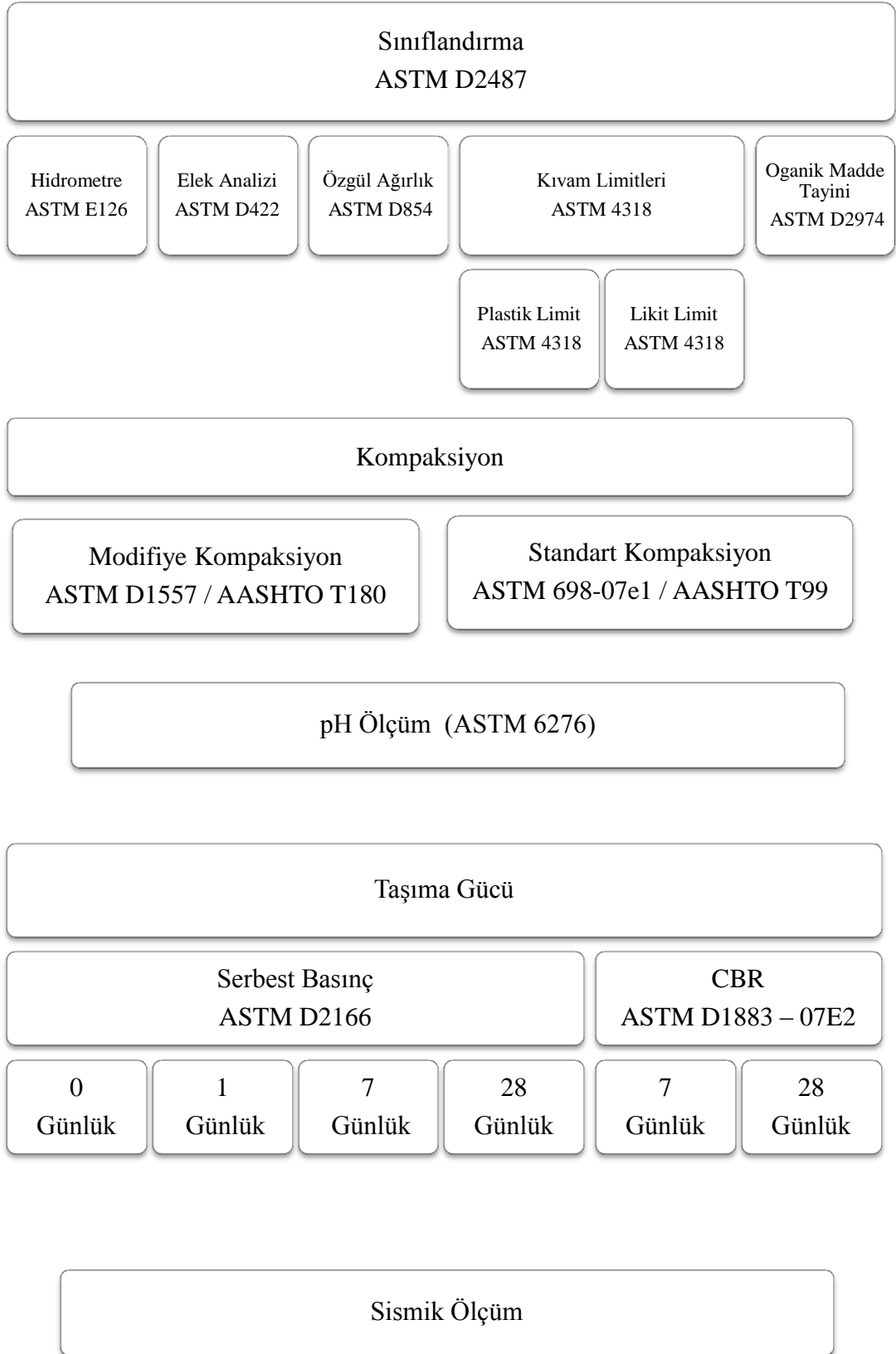
Sınıflandırma amacı ile yapılan deneylerinin akabinde karışımlara modifiye (ASTM D1557) ve standart (ASTM 698) olmak üzere kompaksiyon deneyleri uygulanarak, her iki durum için en uygun su içeriği ve buna bağlı olarak en büyük kuru birim hacim ağırlıkları tespit edilmektedir.

Taşıma gücü sonuçlarını görebilmek için karışımlar üzerinde ASTM D2166 standardına uygun olarak serbest basınç deneyleri yapılmaktadır. Bu deney 0, 1, 7 ve 28 günlük olarak hazırlanan numuneler için ayrı ayrı uygulanmaktadır.

Taşıma gücü değerleri ile ilgili olarak serbest basınç deneylerinin yanında ASTM D1883 standartları doğrultusunda ıslak CBR deneyleri de gerçekleştirilmektedir. CBR deneyleri 28 günlük olarak hazırlanan karışımlara uygulanmaktadır.

Karışımlara pH deneyi uygulanmıştır. pH deneyi, ASTM D6276 standardına göre stabilizasyon için en uygun kireç miktarının belirlenmesi amacı ile kullanılmaktadır. Laboratuvar çalışmalarında son olarak, hazırlanan numuneler üzerinden V METER MK III cihazı kullanılarak P dalgası geçirmek sureti ile ultrason ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak karışımlara ait Dinamik elastikiyet modülleri (Ed) hesaplanmıştır. Uygulanan deneylerin akış şeması Şekil 3.1 de gösterilmektedir.

Literatür taramaları ve laboratuvar çalışmalarına ek olarak, kullanılan malzemelerin kimyasal analizleri ile ilgili çalışmaların bir kısmı Ereğli Demir Çelik Fabrikası Laboratuvarında yapılmıştır. Ayrıca karışımlardaki mikro değişimlerin görülebilmesi amacı ile TÜBİTAK Marmara Araştırma Enstitüsü'nde x ışın kırınımı deneyleri yaptırılmış (XRD) ve elektro mikroskopik fotoğraflar (SEM) çektirilmiştir. Son olarak, deney sonuçları istatistiksel olarak da yorumlanmakta, katkı maddelerinin etkileri istatistiksel olarak modellenmektedir.

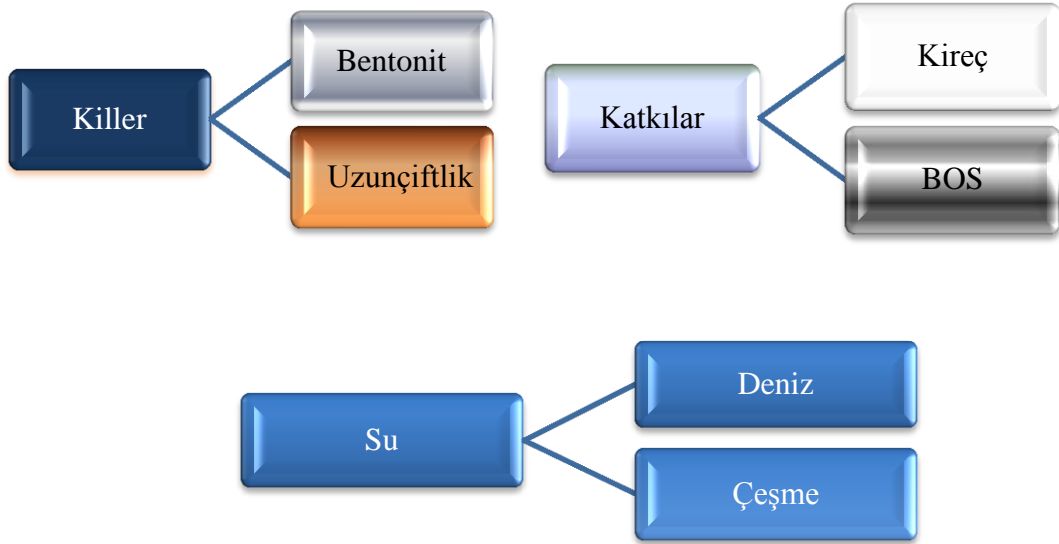


Şekil 3.1: ASTM D4609'a göre düzenlenen laboratuvar çalışmaları akış şeması

3.1. Kullanılan Malzemeler

Killerin iyileştirilmesi konusunun incelendiği bu tezde ana malzeme olarak, yüksek plastisiteli kil grubunu temsilen “Bentonit” kili, düşük plastisiteli kil grubunu temsilen Kocaeli-Adapazarı güzergâhında bulunan “Uzunçiftlik Kili” kullanılmıştır.

Katkı malzemesi olarak kireç ve endüstriyel bir atık olan çelikhane curufu (BOS) kullanılmıştır. Hazırlanan numunelerde yoğurma suyu olarak çeşme suyu ve deniz suyu kullanılmıştır. Kullanılan malzemeler Şekil 3.2 de gösterilmektedir.



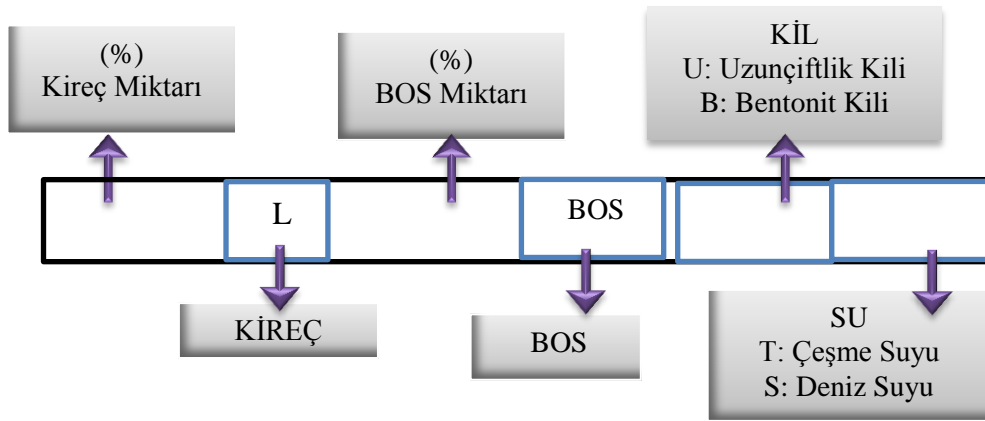
Şekil 3.2: Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler

3.1.1. Karışım oranlarının seçimi

Yapılan literatür çalışmaları ve bu çalışmalardan elde edilen bilgiler 2.5 nolu başlık altında verilmiştir. 2.5 nolu başlık altında sunulan veriler doğrultusunda; bu tezde, “Çelikhane Curufu” (BOS) üzerinde çalışılmaya, BOS’ un, killerin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılmasına karar verilmiştir. Öte yandan, IV. Maddede belirtilen, katkıların birlikte kullanılması halinde, killerin geoteknik özelliklerini iyileştirmede daha verimli olduğu yargısı ile çelikhane curufu, kireç ile karıştırılarak da kullanılmıştır. III. Madde doğrultusunda, kireç miktarı, kuru kil ağırlığının %4, %5 ve %7,5’ u oranlarında seçilmiştir. V. Madde doğrultusunda,

Kireç-BOS oranları “1:1,5” olacak şekilde oranlanmıştır. VIII. Madde doğrultusunda, çalışma suyu olarak çeşme suyunun yanında deniz suyu da kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde yapılan deneysel çalışmalara referans olması için, kullanılan killer katkısız olarak da deneylere tabii tutulmuştur.

Karışımlardaki kireç ve BOS miktarları kuru kil ağırlığının yüzdesi olarak kullanılmıştır. Hazırlanan karışım numunelerinin kodlanmasında, ilk olarak kireç miktarları, daha sonra curuf miktarları verilmiştir. Karışımların gösterim formatında bütünlük sağlamak adına, kireç kullanılmayan karışımlar için “0L” ibaresi kullanılmıştır. Aynı şekilde BOS kullanılmayan karışımlar için “0BOS” ibaresi kullanılmıştır. Katkısız olarak (saf hali ile) kullanılan bentonit ve uzunçiftlik killeri için “0L0BOS” tanımlanması yapılmıştır. L: Kireç miktarı, BOS: BOS miktarı, U: Uzunçiftlik kili, B: Bentonit, T: Çeşme suyu, S: Deniz suyu, miktarını göstermektedir. Belirtilen kireç ve BOS miktarları, kilin ağırlıkça yüzdeleridir. Karışım isimlerinin kodlanması ile ilgili açıklama Şekil 3.3 de verilmektedir. Karışım adları ve kodlamaları Tablo 3.1 de gösterilmektedir.



Şekil 3.3: Numune adlarının kodlanma açıklımları

Tablo 3.1: Çalışmada kullanılan karışımlar ve içerikleri

| No | Karışım İçeriği | Karışım Simgesi |
|----|--|-----------------|
| 1 | % 0 Kireç + % 0 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu | (0L0BOSUT) |
| 2 | % 4 Kireç + % 2,66 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu | (4L2.66BOSUT) |
| 3 | % 4 Kireç + % 6 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu | (4L6BOSUT) |
| 4 | % 5 Kireç + % 0 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu | (5L0BOSUT) |
| 5 | % 5 Kireç + % 3,33 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu | (5L3.33BOSUT) |
| 6 | % 5 Kireç + % 7,5 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu | (5L7.5BOSUT) |
| 7 | % 0 Kireç + % 3,33 BOS + Uzunçiftlik Kili + Çeşme Suyu | (0L3.33BOSUT) |
| 8 | % 0 Kireç + % 0 BOS + Uzunçiftlik Kili + Deniz Suyu | (0L0BOSUS) |
| 9 | % 4 Kireç + % 2,66 BOS + Uzunçiftlik Kili + Deniz Suyu | (4L2.66BOSUS) |
| 10 | % 4 Kireç + % 6 BOS + Uzunçiftlik Kili + Deniz Suyu | (4L6BOSUS) |
| 11 | % 5 Kireç + % 0 BOS + Uzunçiftlik Kili + Deniz Suyu | (5L0BOSUS) |
| 12 | % 5 Kireç + % 3,33 BOS + Uzunçiftlik Kili + Deniz Suyu | (5L3.33BOSUS) |
| 13 | % 0 Kireç + % 3,33 BOS + Uzunçiftlik Kili + Deniz Suyu | (0L3.33BOSUS) |
| 14 | % 5 Kireç + % 7,5 BOS + Uzunçiftlik Kili + Deniz Suyu | (5L7.5BOSUS) |
| 15 | % 0 Kireç + % 0 BOS + Bentonit Kili + Çeşme Suyu | (0L0BOSBT) |
| 16 | % 4 Kireç + % 2,66 BOS + Bentonit Kili + Çeşme Suyu | (4L2.66BOSBT) |
| 17 | % 4 Kireç + % 6 BOS + Bentonit Kili + Çeşme Suyu | (4L6BOSBT) |
| 18 | % 5 Kireç + % 0 BOS + Bentonit Kili + Çeşme Suyu | (5L0BOSBT) |
| 19 | % 5 Kireç + % 3,33 BOS + Bentonit Kili + Çeşme Suyu | (5L3.33BOSBT) |
| 20 | % 5 Kireç + % 7,5 BOS + Bentonit Kili + Çeşme Suyu | (5L7.5BOSBT) |
| 21 | % 7,5 Kireç + % 5 BOS + Bentonit Kili + Çeşme Suyu | (7.5L5BOSBT) |
| 22 | % 0 Kireç + % 3,33 BOS + Bentonit Kili + Çeşme Suyu | (0L3.33BOSBT) |
| 23 | % 0 Kireç + % 0 BOS + Bentonit Kili + Deniz Suyu | (0L0BOSBS) |
| 24 | % 4 Kireç + % 2,66 BOS + Bentonit Kili + Deniz Suyu | (4L2.66BOSBS) |
| 25 | % 4 Kireç + % 6 BOS + Bentonit Kili + Deniz Suyu | (4L6BOSBS) |
| 26 | % 5 Kireç + % 0 BOS + Bentonit Kili + Deniz Suyu | (5L0BOSBS) |
| 27 | % 5 Kireç + % 3,33 BOS + Bentonit Kili + Deniz Suyu | (5L3.33BOSBS) |
| 28 | % 5 Kireç + % 7,5 BOS + Bentonit Kili + Deniz Suyu | (5L7.5BOSBS) |
| 29 | % 7,5 Kireç + % 5 BOS + Bentonit Kili + Deniz Suyu | (7.5L5BOSBS) |
| 30 | % 0 Kireç + % 3,33 BOS + Bentonit Kili + Deniz Suyu | (0L3.33BOSBS) |

3.1.2. Bentonit

CH grubunu temsilen, Eczacıbaşı Esan Endüstriyel Maddeler San. Tic. A.Ş. Fabrikalarında öğütülüp paketlenerek hazırlanan “Bentonit Kili” kullanılmıştır. Bentonit kili, ilk olarak Wyoming’de (USA) Ford-Benton yakınlarında bulunmuştur. Bentonit ismini bulunduğu bölgeden almıştır. Plastisitesi yüksek, koloidal özelliğe sahip bir kil çeşididir. Daha sonra aynı kil çeşidi, Fransa’nın Montmorillon bölgesinde de bulunduğu için bu kil çeşidine Montmorillonit adı verilmiştir. Bentonit, alüminyum ve magnezyumca zengin volkanik kül, tuf ve lavların kimyasal ayrışması ile veya bozulmasıyla oluşmuş çok küçük kristallere sahip kil minerallerinden (başlıca montmorillonit) oluşan ve ağırlıklı olarak koloidal silis yapıda, yumuşak, gözenekli ve kolayca şekil verilebilir bir kayadır. Kimyasal Formülü, “ $Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$ ” şeklindedir. Yumuşak, plastik, poroz, açık renkli özellikte ana mineral olarak smektif grubu minerallerden oluşan içinde koloidal silis bulunan ve camsal magmatik kayaların, genellikle volkanik kül ve küflerin kimyasal ayrışmasına bağlı olarak devitrifikasyonu sonucu oluşmuştur. Rengi beyaz, gri, yeşil, sarı, pembe, mor ve kırmızı olabilir. İyonlaşma kapasitesi oldukça yüksektir (Arslan, 2010; Bucksch H., 1997; Seyhan İ., 1972).

Bentonitler, içerdikleri montmorillonit minerallerinin özelliğine göre su ile az veya çok şişerler. Saf bentonitler 10-20 kat şişer. Çok ender olarak 25-30 kat şişebilen bentonitler de vardır. Su ile şişme özelliği 600°C den sonra kaybolur. Bentonitlerin suya karşı duyarlı olmaları, kolay çözünüp dağılmaları ve hacimce genleşmeleri, sürekli bazik süspansiyon oluşturmaları, süspansiyonların genellikle bazik reaksiyon göstermesi gibi özellikleri, ayırt edici özellikleridir. Bentonitler ve bentonitik killer montmorillonit mineralinden gelen değişken plastisite özelliğine sahiptir.

Bentonit, inşaat mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle yüksek plastisiteli kil grubunu temsil etmesi açısından deneysel çalışmalarda da tercih edilen bir kildir (Bilgen, 2004; Aslan ve Yetimoğlu, 2007; Andrejkovičová ve diğ., 2008; Yükselen- Aksoy 2008; Yılmaz ve Civelekoğlu, 2009).

Tablo 3.2: Bentonit kilinin karakteristik özellikleri

| | | |
|--------------------------------|-----------------|--------------|
| Kasyon Değişim Kapasitesi | (meq/100 gr) | 85,0 ± 5,0 |
| CaCO ₃ | (%) | 0 |
| Şişme | (ml/2 gr) | 8,0 ± 2,0 |
| Sedimentasyon (72 saat) | (ml) | 10 |
| Sinterleşme Noktası | (°C) | 1200 |
| Yığın Yoğunluğu | (gr/lt) | 800 ± 30 |
| Topaklanma | | Pozitif |
| Topak Ağırlığı | (gr) | 55 ± 5 |
| Su Emme (Westinghouse) | (%) | 90 ± 5 |
| Su Emme Süresi | (sn) | max. 65 |
| NH ₃ Salınımı | (ppm) | 40 |
| Ağartma- Orijinal | Tonsil Eşdeğeri | 0,6 |
| Ağartma- Asit Aktive | | 0,7 |
| pH (%8 katı) | | 8,5 |
| Elek Bakiyesi (+75 µm) | (%) | <4 |
| Renk | | Beyaz |
| Nem | | <30 |
| KİMYASAL ANALİZ | | |
| A.Z. | (%) | 7,50 ± 1,00 |
| SiO ₂ | (%) | 71,00 ± 1,00 |
| Al ₂ O ₃ | (%) | 14,00 ± 1,00 |
| Fe ₂ O ₃ | (%) | 0,70 ± 0,10 |
| TiO ₂ | (%) | 0,05 ± 0,01 |
| CaO | (%) | 1,10 ± 0,30 |
| MgO | (%) | 3,20 ± 0,20 |
| Na ₂ O | (%) | 0,25 ± 0,05 |
| K ₂ O | (%) | 1,00 ± 0,10 |
| MİNERALOJİK ANALİZ | | |
| Montmorillonit | (%) | 80 |
| Kristobalit-Opal C | (%) | 17 |
| K-Feldspat | (%) | 3 |
| Plajiyoklaz | (%) | Eser |

Bu çalışmada kullanılan bentonit kiline ait özellikler Tablo 3.2 de verilmiştir. Tablodaki değerler üretici firmadan temin edilmiştir. Tarafımızdan Tubitak Marmara Araştırma enstitüsüne yaptırılan X ışın kırınım yöntemi analizlerinde de bentonit kilinin kimyasal ve mineralojik analizi yapılmıştır.

3.1.3. Uzunçiftlik kili

Tezde, CL grubunu killeri temsilen kullanılan kil Uzunçiftlik kilidir. Kocaeli, Adapazarı illeri arasında bulunan, Uzunçiftlik beldesinden temin edilmiştir. Bölge zeminini yaygın olarak bu kilden ibarettir. Şekil 3.4 de alınan örnekler görülmektedir.

Tablo 3.3: Uzunçiftlik kili endeks özellikleri

| Özellikler | Uzunçiftlik |
|------------------------------------|-------------|
| Zemin Sınıfı | |
| USCS Sınıflandırması | CL |
| AASHTO (GI) Sınıflandırması | A-7-6 (12) |
| Atterberg limitleri | |
| LL (%) (Çeşme Suyu) | 48 |
| PL (%) (Çeşme Suyu) | 20 |
| PI (%) (Çeşme Suyu) | 28 |
| USCS Elek Analizi | |
| Taş (%) (> 76,2 mm) | 0 |
| Çakıl (%) (76,2 mm - 4.76 mm) | 2 |
| Kum (%) (4.76mm-0,074) | 9 |
| Silt (%) (< 0.074) | 89 |
| Özgül Ağırlık (Mg/m ³) | 2.56 |
| Organik Madde Miktarı (%) | 2 |

Uzunçiftlik kili yüzeyin 2-2,5 m altından alınmıştır. Açık sarı görünümünde, organik madde miktarı %2 dir. USCS “Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi” ne (ASTM D2487) göre CL (Düşük plastisiteli kil) grubuna girmektedir. Amerikan karayolları sistemine göre (AASHTO T27) ise A-7-6 (12) olarak tanımlanmaktadır. Uzunçiftlik kilinin endeks özellikleri, Tablo 3.3 de listelenmiştir.



Şekil 3.4: Uzunçiftlik kili

3.1.4. Çelikhane curufu (BOS)

Killi zeminlerin iyileştirilmesinde, katkı malzemesi olarak Ereğli Demir Çelik Fabrikalarında bir yan ürün olan “Çelikhane Curufu” (BOS) curufu kullanılmıştır. Bazik oksijen fırınları, (BOF) ya da diğer adıyla LD konverterleri yüksek fırında üretilen sıvı ham demirin çeliğe dönüştürülmesinde kullanılan fırınlardır. LD konverterleri adını Avusturya'nın Linz ve Donawitz (Leoben) şehirlerinin baş harflerinden almaktadır. Yöntem, bu şehirlerin yakınındaki Voest-Alpine firması tarafından bulunmuş olmakla birlikte, sistemi Bessemer Konverterinin modernleştirilmiş şekli olarak tanımlamak daha doğrudur. Kullanılan refrakterin türünden ötürü konverter "bazik" adını alır.

Tablo 3.4: Çalışmalarda kullanılan BOS' a ait kimyasal analiz

| Element | Fe | SiO ₂ | MnO | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO | P ₂ O ₅ | S | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ |
|---------|-------|------------------|------|--------------------------------|-------|------|-------------------------------|------|-------------------|------------------|------------------|
| % | 20,49 | 13,30 | 2,70 | 5,02 | 46,57 | 5,25 | 0,02 | 0,32 | 0,14 | 0,17 | 0,47 |

Yüksek fırından alınan sıvı ham demire, uygulanan yüksek fırın sonrası-çelikhane öncesi işlemlerden sonra (kükürt, fosfor, silisyum v.b. giderme), bazik oksijen fırınlarında saf oksijen üflenerek bünyedeki karbonun uzaklaştırılması sağlanır. Demir - Çelik üretiminde yüksek fırınlardan sıvı pik üretiminde ve sıvı pikten çelik üretiminde “Çelikhane Curufu” olarak nitelendirilen farklı oksitlerden oluşan bir atık malzeme açığa çıkmaktadır. Tablo 3.4 de bu tez çalışmasında kullanılan BOS'a ait kimyasal analiz verilmiştir.

Çelikhane curufu, çelik üretimi esnasında çelik içerisindeki empüritelerin oksidasyonu sonucu oluşan oksit ve silikatların oluşturduğu karmaşık bir kimyasal yapıya sahip, metalik olmayan yan ürünler olarak tanımlanmaktadır. Fiziksel olarak çelik curufları koyu gri renkte, kübik şekilli, yüzeyi pürüzlü bir görünüme sahiptirler. Yüksek fırın curufuna kıyasla çok sert ve sıkıdırlar ve yoğunlukları %20-25 daha büyüktür (Erdemir, 2005).

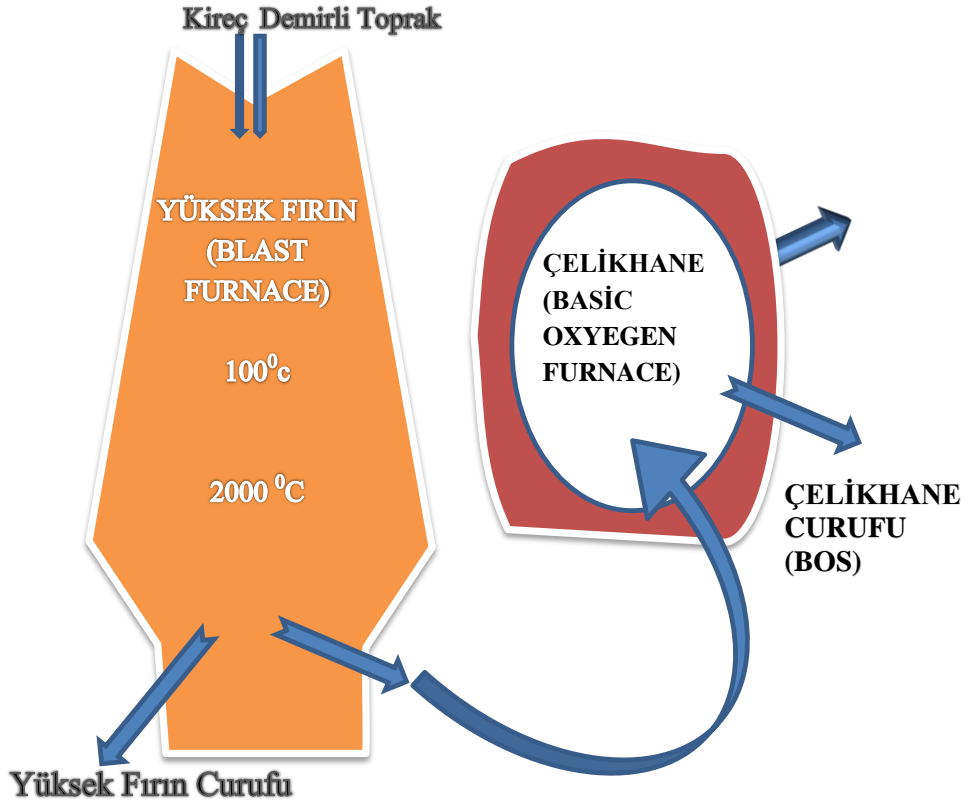
Basic Oxygen Furnace teknolojisi ile çelik üreten Erdemir tesislerde 1 ton çelik üretiminde yaklaşık olarak 125 kg. BOF curufu ortaya çıkmaktadır. (Yıldırım, 2001) Erdemir’de çelik üretimi sonucu yılda yaklaşık 300 bin ila 350 bin ton arasında çelikhane curufu açığa çıkmaktadır (Erdemir, 2005).

Tablo 3.5 de sunulan veriler Erdemir Demir ve Çelik Fabrikaları ve TUBİTAK ortak çalışmaları sonucunda hazırlanmış ve sunulmuştur. Bu çalışmalardan elde edilen verilere göre, BOS’ un aşınma direnci (%) 15,5 değerindedir. Bu değer normal agregalarla kıyaslandığında yüksek bir değerdir. Başka bir deyişle BOS aşınmaya karşı dayanıklıdır. Aynı çalışmada belirtildiği üzere Bos un patinaj direnci 52-58 arasındadır. Bu değer doğal agregalara göre yüksek bir değerdir. (Erdemir, 2005)

Tablo 3.5: BOS’a ait karakteristik özellikler (Erdemri,2005)

| Özellikler | Çelikhane Curufu (BOS) |
|--|--|
| Yığın Yoğunluğu (gr/cm ³) | 3,71 (25-19mm) 3,69 (40-25mm) |
| ÖzgüL Ağırlık (gr/cm ³) | 3,12 (+4 mm) 3,08 (-4+0,075mm.) 2,95 (-0,0075 mm) |
| Gözeneklilik (%) | 2,01 (25-19mm) 1,50 (40-25mm) |
| Su Emme (%) | 0,95 (+4 mm) 0,83 (-4+0,075mm.) |
| Soyulma Dayanımı (%) | 75-85 |
| Yassılık İndeksi (%) | 20 |
| Dayanıklılık (Don Kaybı) (%) | 8,56 (+5 mm) |
| Los Angeles Aşınma Kaybı (%) | 15,5 |

Bu tezde kullanılan BOS, Tablo 3.5 de özellikleri verilen çelikhane curufunun öğütülmüş halidir. BOS’ un doğal hali ile 4 cm civarında dane boyutuna sahiptir ve 75 mikron altına geçen kısmı % 6 dir. Bu boyutu ile 75 mikrondan küçük boyutlara sahip killi zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılması uygun değildir. Şekil 3.5 de BOS’un elde edilişi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.5: Curufun elde edilişi

Tez çalışmasında kullanılan BOS, Z.K.Ü. Alaplı M.YO laboratuvarlarında, Erdemir tarafından yaptırılan öğütme cihazında tamamı 75 mikrondan küçük olacak şekilde öğütülmüştür. Kullanılan öğütme cihazı Şekil 3.6 da gösterilmektedir. Toz haline getirildikten sonra BOS üzerinde hidrometre ve özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları ilgili deneylerin ayrıntılarında verilmiştir.



Şekil 3.6: Çelikhane curufunu öğütmekte kullanılan makine

3.1.5. Kireç

Katkı olarak kullanılan kireç, piyasalara 50 kg. lık torbalarda satılan söndürülmüş kireçtir. Bu çalışma için Paksan Marka kireç tercih edilmiştir. Zemin stabilizasyonunda katkı olarak kullanılması planlanan kireçlerin taşınması gereken özellikler, ASTM C 977-10 da verilmektedir. C977-10 da, stabilizasyonda kullanılacak kirecin kimyasal kompozisyonunda “Kalsiyum Oksit” ve “Magnezyumu Oksit” toplam miktarının % 90 olması, 75 mikrondan küçük tanelerin %25 den fazla olmaması uygun görülmektedir. Çalışmada kullanılan kireç ile ilgili özellikler Tablo 3.6 de verilmiştir Tablo 3.6 de verilen değerler, standartta istenen değerler ile örtüşmektedir, başka bir deyişle stabilizasyon amacı ile kullanımı uygundur.

Tablo 3.6: Kirece ait karakteristik özellikler

| Özellikler | Kireç |
|--|----------------|
| Fiziki Görünüş | Kuru beyaz toz |
| Kaynama Derecesi,(°C) | 100 |
| Ergime Derecesi,(°C) | 580 |
| Yoğunluk,(kg/m ³) | Max. 500 |
| Specific Gravity | 1.2 – 1.5 |
| (>90 µm),(%) | 3 – 6 |
| (>63 µm),(%) | 7 – 10 |
| pH,(25°C) | 12.4 |
| Ca(OH) ₂ ,(%) | 80 – 86 |
| Aktif CaO,(%) | 60.6 – 65.15 |
| CaO + MgO,(%) | 90 – 93 |
| MgO | 1 – 2 |
| Çözülemeyen Madde,(%) | Max. 1 |
| Sınırlı H ₂ O | 19.4 – 20.85 |
| S | Max. 0.5 |
| R ₂ O ₃ (Al ₂ O ₃ +F ₂ O ₃),(%) | Max. 1 |

T.C Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 2005 de yayımlanan “Kireç stabilizasyonu ve çeşitli zayıf zemin stabilizatörleri teknik şartnameleri” konulu iç genelgede, stabilizasyon amacı ile kullanılacak sönmüş kirecin özelliklerinin TS EN 459-2 ye uygun olarak, CO₂ (Kızdırma Kaybı) <%7, toplam (CaO+MgO) > %80, S₀₃<%1, MgO < %10, SIO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃+SO₃ <%5, ağırlıkça elekte kalan kısmın 0.09 mm için < %7 ve 0.2 mm için < %2 olması gerektiği söylenmektedir. Çalışmamızda kullanılan kireç bu özellikleri taşımaktadır.

3.1.6. Karışım suları

Çalışmalarda hazırlanan numunelerde, çeşme suyu ve deniz suyu kullanılmaktadır. Çeşme suyu olarak, Karadeniz bölgesinde bulunan Zonguldak Alaplı ilçesindeki çeşme suları kullanılmıştır. Kullanılan sulara ait analizler Erdemir’ de yapılmıştır. Kullanılan çeşme suyuna ait kimyasal analiz sonuçları Tablo 3.7 da verilmektedir.

Tablo 3.7: Çeşme suyunun kimyasal analizi

| Element | Cu | Fe | Li | Mn | Ni | Si | Zn | Ca | K | Mg | S | Sr | Cl | Salt |
|------------------|----|----|----|----|----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Tap water (mg/l) | 26 | 39 | 0 | 5 | 0 | 759 | 41 | 67 | 1,4 | 4,3 | 5,6 | 0,3 | 0,3 | ** |

Deniz suyu olarak, Zonguldak Alaplı ilçesi civarından, Karadeniz denizinden temin edilen deniz suyu kullanılmaktadır. Kullanılan sulara ait analizler Erdemir Demir ve Çelik Fabrikaları’nda yapılmıştır. Kullanılan çeşme suyuna ait kimyasal analiz sonuçları Tablo 3.8 de verilmektedir.

Tablo 3.8: Deniz suyunun kimyasal analizi

| Element | Cu | Fe | Li | Mn | Ni | Si | Zn | Ca | K | Mg | S | Sr | Cl | Salt |
|-----------------|----|----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Seawater (mg/l) | 12 | 6 | 162 | 4,9 | 11 | 111 | 34 | 182 | 262 | 596 | 415 | 2,6 | 2,6 | %1,49 |

3.2. Deneysel Çalışmaların Ön Hazırlıkları

Deneysel çalışmalarda, geoteknik özelliklerini iyileştirmek amacı ile CH grubu killeri temsilen kullanılan Bentonit, Şekil 3.8 de fotoğraflandırıldığı üzere, öğütülüp, toz haline getirilmiş olarak 30'ar kiloluk poşetlerle satın alındığı için üzerinde herhangi bir işlem yapmadan doğrudan deneylerde kullanılmaya başlanmıştır. Aynı şekilde, BOS Erdemir firmasından, kireç piyasadan toz halinde poşetlenmiş olarak temin edilmiştir.



Şekil 3.7: Uzunçiftlik kilinin hazırlanışı

CL kil grubunu temsilen kullanılan Uzunçiftlik kili ise, arazide 2.~2,5 m yapılan kazıdan sonra, kepçeler yardımı ile bidonlara doldurulup, tarafımızca laboratuvarımıza getirilmiştir. Gelen malzemelerden numuneler alınıp tabii su muhtevasını ve organik madde miktarları deneylerine tabii tutulmuştur. Ancak, killer doğal durumda toz halinde değil, topaklar halinde bulunmaktadır. Gerçek boyutunda ve toz halinde kullanabilmek için bir takım ön işlemlere tabii tutulmuştur. Uzunçiftlik kili doğal yollarla kurutulmak için ilk olarak geniş kaplara yayılmıştır. 1-2 gün bekletilerek kurutulan kilin topakları eleme yöntemi ile dağıtılıp toz haline getirilmiştir. Uzunçiftlik kilinin deneysel çalışmalara hazırlanması ile ilgili eleme işlemi Şekil 3.7 da görülmektedir.



Şekil 3.8: BOS ve bentonit

3.3. Deneysel Çalışmalar

Laboratuvar çalışmalarında, Tablo 3.1 de gösterilen 30 farklı numuneye, Şekil 3.1 de akış şeması verilen deneyler uygulanmıştır. Uzunçiftlik ve Bentonit killeri, katkısız olarak ve kireç-BOS karışımları ile birlikte, sınıflandırma deneylerine, kompaksiyon deneylerine ve taşıma gücü deneylerine, pH deneyine tabi tutulmuşlardır.

3.3.1. Elek analizi ve hidrometre

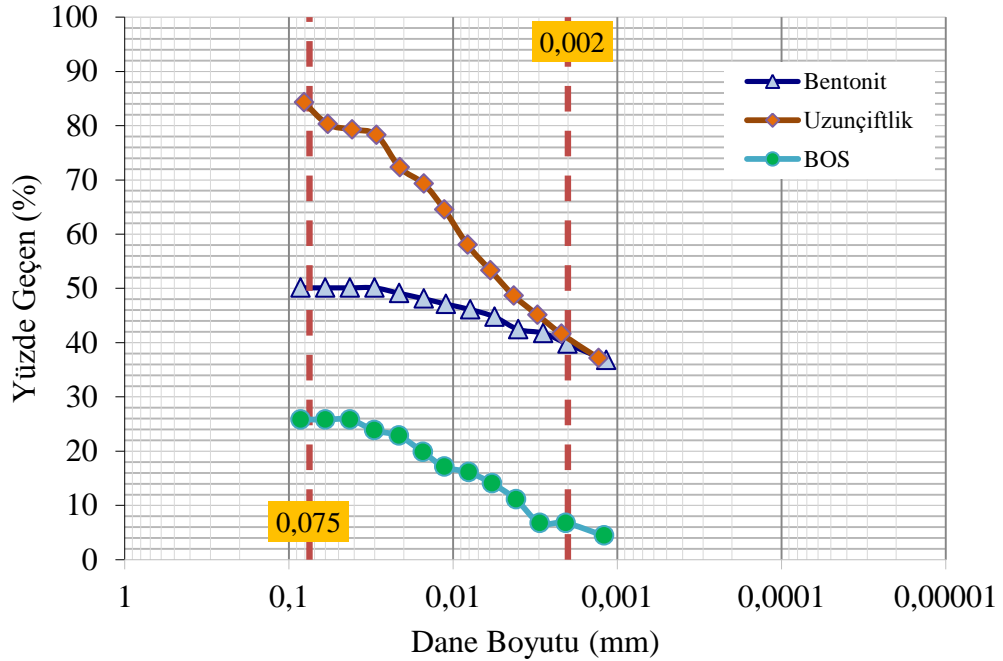
Tezde kullanılan malzemelerin, ihtiva ettikleri tanelerin boyutlarının belirlenmesi ve tane dağılımı eğrisinin (granülometre) çizilmesi amacı ile elek analizi deneyine tabii tutulmuştur. Zemin içindeki tane boyutları birleştirilmiş zemin sınıflandırma yöntemine göre (USCS), iri daneli (kum, çakıl) ve ince daneli (silt, kil) olarak sınıflandırılabilir.

Tablo 3.9: Elek analizi sonuçları

| | Uzunçiftlik Kili | Bentonit Kili | BOF Curufu | Kireç |
|----------------------------|---------------------|------------------|---------------|-------|
| Taş(blok) (%) (>76.2 mm) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Çakıl (%) (76.2 - 4.76 mm) | 9 | 0 | 0 | 0 |
| Kum(%) (4.76 - 0,074 mm) | 2 | 0 | 2 | 0 |
| Silt ve Kil (%) (<0.074mm) | 89 | 100 | 98 | 100 |

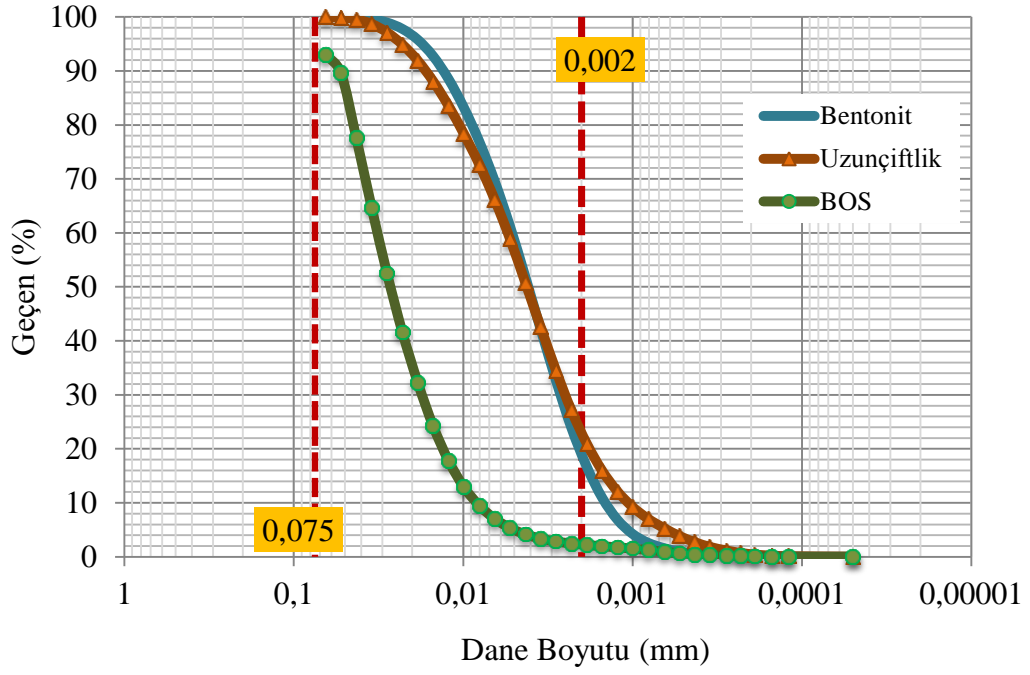
Bu çalışmada yapılan elek analiz deneyleri, ASTM C136-06 standardına uygun olarak yapılmıştır. Elek analizi sonuçları, hidrometre sonuçları ve lazer yöntemi sonuçları, Tablo 3.9, Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve şekil 311 de gösterilmiştir. 4.75 mm. “Kum” sınırını, 0.075 mm. “Silt” sınırını, 0.02 mm. “Kil” sınırını göstermektedir. Elek analizi sonucunda çakıl miktarı % 2, kum miktarı % 9 ve kil miktarı % 89 olarak belirlenmiştir. Bentonit kilinde çakıl ve kum boyutu % 0 dır. BOS, %2 oranında kum boyutundadır ve % 98 oranında 200 nolu elek altına geçmiştir. Bentonit kili ve kireç % 100 oranında 200 nolu elek altına geçmiştir. Sonuçlar Tablo 3.9 da gösterilmektedir.

200 nolu elek (0.075 mm.) altına geçen malzeme “ince” malzeme olarak adlandırılır. Bu boyut siltin üst sınırındır. Kilin üst sınırı ise 0.002 mm.(2 µm.) dir. Kil yüzdesi, elek analizi ile belirlenemediği için hidrometre deneyi yapılmıştır.



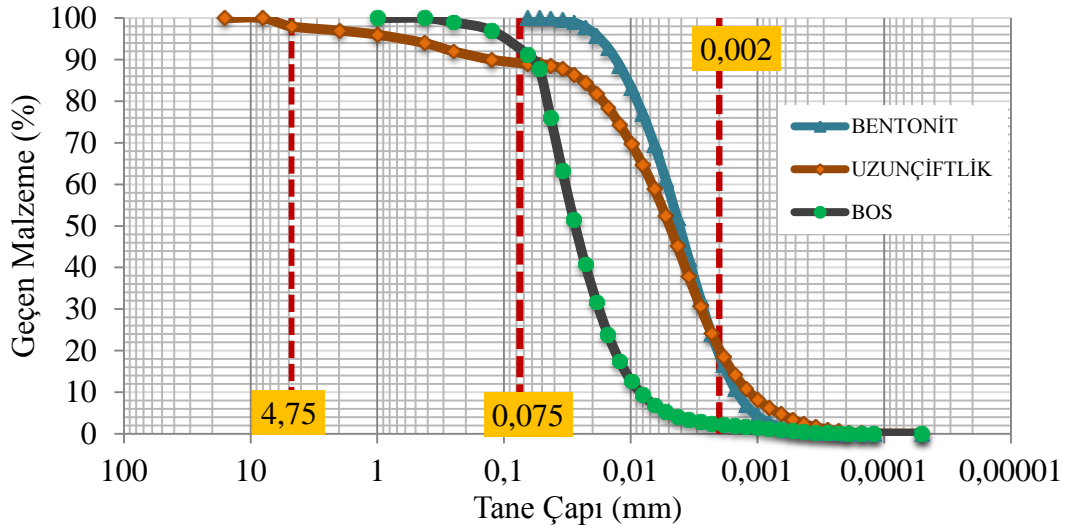
Şekil 3.9: Kullanılan malzemelerin tane dağılımları (hidrometre yöntemi)

Yapılan hidrometre deneyleri sonucunda bentonit ve uzunçiftlik kilinin 2 µm altı kil miktarı, % 39 civarlarında, BOSun ise % 7 civarlarında olduğu tesbit edilmiştir. Şekil 3.9 da deneyin ayrıntılı grafiği görülmektedir. Gazi Üniversitesinde “Lazer Kırma Yöntemi” ile de dane dağılımı belirlenmiştir.



Şekil 3.10: Kullanılan malzemelerin tane dağılımları (lazer yöntemi)

Lazer kırma yöntemi ile yapılmış dane dağılımı grafiği Şekil 3.10 da ayrıntılı olarak görülmektedir. Bentonit kilinin 2 μ m altı kil miktarı % 20 civarlarında, uzunçiftlik kilinin 2 μ m altı kil miktarı % 20 civarlarında ve BOS'un 2 μ m altı kil miktarı ise % 2 civarlarındadır.



Şekil 3.11: Kullanılan malzemelerin tane dağılımları (elek analizi ve lazer yöntemi)

3.3.2. Özgül ağırlık

Çalışmada kullanılan malzemelere ASTM D 854 – 10 standardına uygun olarak özgül ağırlık deneyleri uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda Tablo 3.10 da verilmiştir. Uzun çiftlik kilinin özgül ağırlığı 2.56 gr/cm³ değerindedir. Bentonit kilinin ise özgül ağırlığı 2.1 gr/cm³ değerindedir. İçerisinde bulunan elementlerin daha ağır olduğu BOS un özgül ağırlığı 3 gr/cm³, kirecin ise 2.3 gr/cm³ değerindedir.

Tablo 3.10: Malzemelerin özgül ağırlık değerleri

| | BOS | Uzunçiftlik Kili | Kireç | Bentonit Kili |
|-------------------------------------|------|------------------|-------|---------------|
| Özgül Ağırlık (gr/cm ³) | 3.00 | 2.56 | 2.30 | 2.1 |

3.3.3. Organik madde tayini

Çalışmada kullanılan malzemelere ASTM D 2974-07 standardına uygun olarak organik madde tayini deneyleri uygulanmıştır. Standart gereği, kullanılan malzemelerden alınan örneklerin ilk olarak su muhtevaları belirlenmiştir. Daha sonra 440⁰C lik bir fırında yakılan malzemelerin organik madde miktarları tespit edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda Tablo 3.11 da verilmiştir.

Tablo 3.11: Kullanılan malzemelere ait organik madde miktarları

| | BOS | Uzunçiftlik Kili | Kireç | Bentonit Kili |
|---------------------------|------|------------------|-------|---------------|
| Organik Madde Miktarı (%) | 0.00 | 2,2 | 0.0 | 0.0 |

T.C Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 2005 de yayımlanan “Kireç stabilizasyonu ve çeşitli zayıf zemin stabilizatörleri teknik şartnameleri” konulu iç genelgede, stabilize edilecek malzemede organik madde miktarının %4 den az olması gerektiği söylenmektedir. Kullandığımız malzemeler stabilizasyona uygundur.

3.3.4. Kıvam limitleri

Tezde kullanılan 30 karışımın her biri için, ASTM 4318 – 10 standardına uygun olarak kıvam limitleri (Atterberg Limitleri) yapılmıştır. Kıvam limitleri deneyi plastik limit ve likit limit adı verilen iki sınır su muhtevasını bulmak için yapılır. Kıvam limitleri deneyleri, zeminin, hangi su muhtevasında, nasıl davrandığını tanımlamamıza yardımcı olması amacı ile yapılmıştır. Şekil 3.12 de deneyin yapılışı ilgili fotoğraflar gösterilmektedir. Şekil 3.12 (a) da kıvam limiti, (b) de plastik limit, (c) de ise numunelerin etüt de kurutulduğu görülmektedir.

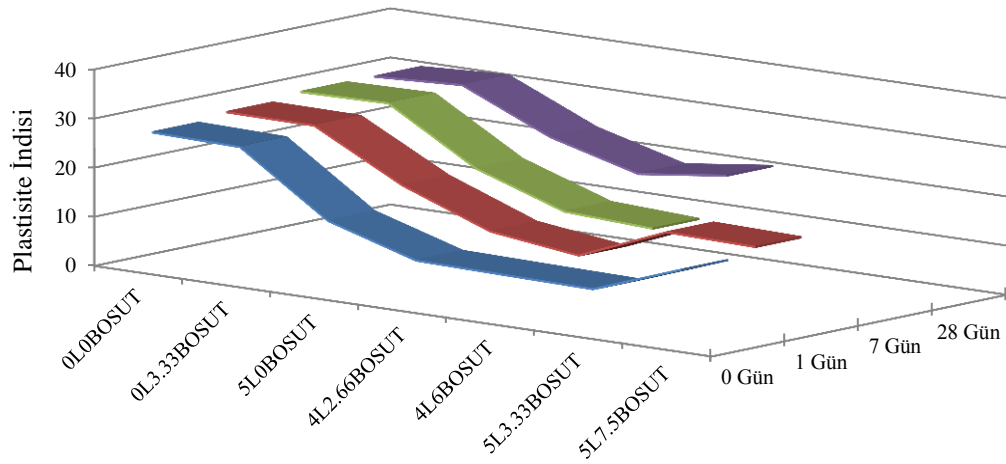


Şekil 3.12: Kıvam limitleri deneyine ait çalışmalar

Deniz ve çeşme suyu ile hazırlanan, toplam 14 farklı karışım üzerinde 0, 1, 7 ve 28 günlük olmak üzere 56 kıvam limiti Uzunçiftlik kili için, 56 kıvam limiti deneyi bentonit kili için olmak üzere toplamda 112 likit limit ve 112 plastik limit deneyi yapılmıştır. Uzunçiftlik kili ve çeşme suyu ile yapılan kıvam limiti deneyine ait sonuçlar Tablo 3.12 de ve Şekil 3. 13 de, deniz suyu ile yapılan kıvam limiti deneyine ait sonuçlar ise Tablo 3.12 de ve Şekil 3.14 de gösterilmektedir. Bentonit kili ve çeşme suyu ile yapılan kıvam limiti deneyine ait sonuçlar Tablo 3.14 de ve Şekil 3. 15 de, deniz suyu ile yapılan kıvam limiti deneyine ait sonuçlar ise Tablo 3.15 de ve Şekil 3.16 de gösterilmektedir.

Tablo 3.12: Kıvam Limitleri Sonuçları (uzunçiftlik-çeşme suyu)

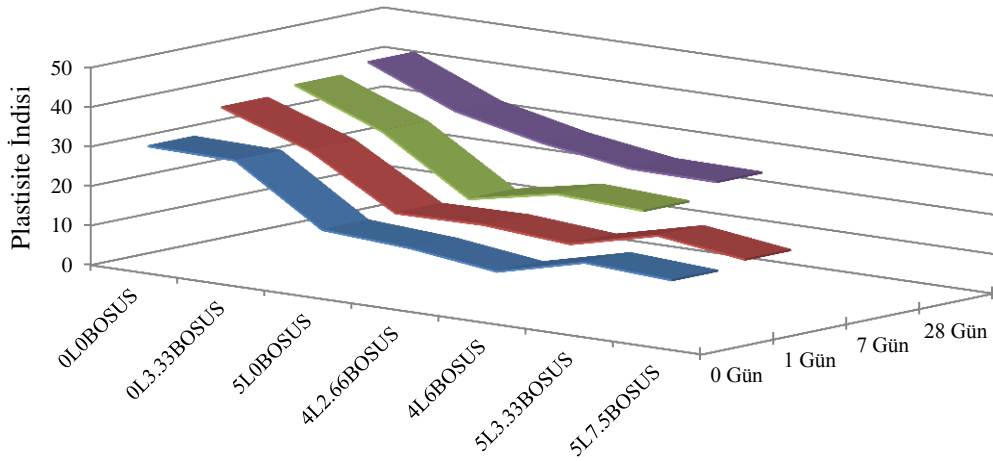
| | | 0 Gün | 1 Gün | 7 Gün | 28 Gün |
|-------------|--------|-------|-------|----------------|----------------|
| 0L0BOSUT | LL (%) | 48 | 49 | 50 | 50 |
| | PL (%) | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | PI | 28 | 29 | 30 | 30 |
| 0L3,33BOSUT | LL (%) | 42 | 43 | 46 | 49 |
| | PL (%) | 14 | 14 | 16 | 18 |
| | PI | 28 | 29 | 30 | 31 |
| 5L0BOSUT | LL (%) | 43 | 45 | 48 | 52 |
| | PL (%) | 28 | 26 | 28 | 29 |
| | PI | 15 | 19 | 20 | 23 |
| 4L2,66BOSUT | LL (%) | 38 | 40 | 41 | 45 |
| | PL (%) | 28 | 28 | 28 | 27 |
| | PI | 10 | 12 | 13 | 18 |
| 4L6BOSUT | LL (%) | 38 | 39 | 41 | 41 |
| | PL (%) | 29 | 29 | 28 | 21 |
| | PI | 9 | 10 | 13 | 20 |
| 5L3,33BOSUT | LL (%) | 38 | 43 | NON PLASTİK | NON PLASTİK |
| | PL (%) | 28 | 25 | | |
| | PI | 9 | 18 | | |
| 5L7,5BOSUT | LL (%) | 43 | 45 | 48 | 51 |
| | PL (%) | 27 | 28 | 27 | 26 |
| | PI | 16 | 17 | 20 | 25 |



Şekil 3.13: Kıvam limitleri sonuçları (uzunçiftlik-çeşme suyu)

Tablo 3.13: Kıvam limitleri sonuçları (uzunçiftlik-deniz suyu)

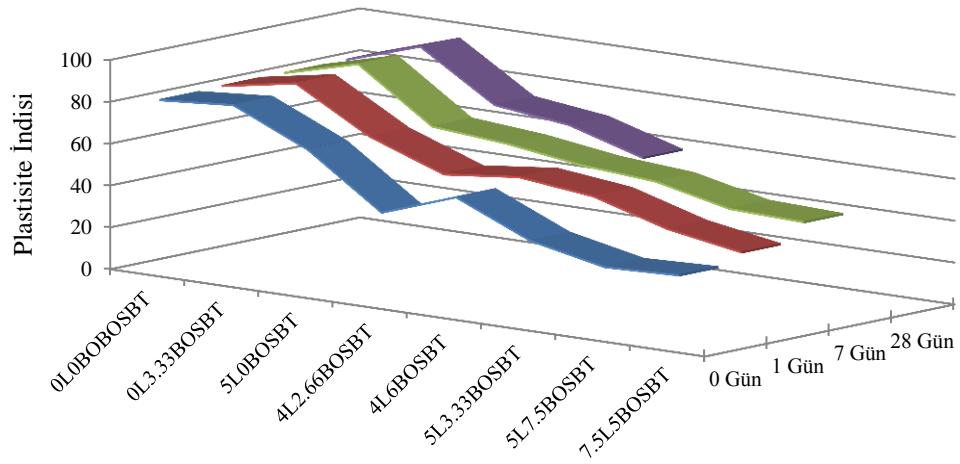
| | | 0 Gün | 1 Gün | 7 Gün | 28 Gün |
|-------------|--------|-------|-------|----------------|----------------|
| 0L0BOSUS | LL (%) | 49 | 52 | 51 | 53 |
| | PL (%) | 18 | 15 | 12 | 12 |
| | PI | 31 | 37 | 39 | 41 |
| 0L3,33BOSUS | LL (%) | 46 | 48 | 48 | 49 |
| | PL (%) | 15 | 19 | 18 | 17 |
| | PI | 31 | 29 | 30 | 32 |
| 5L0BOSUS | LL (%) | 44 | 45 | 45 | 56 |
| | PL (%) | 28 | 28 | 29 | 29 |
| | PI | 16 | 17 | 16 | 27 |
| 4L2,66BOSUS | LL (%) | 43 | 43 | 47 | 48 |
| | PL (%) | 28 | 26 | 26 | 24 |
| | PI | 15 | 17 | 21 | 24 |
| 4L6BOSUS | LL (%) | 39 | 43 | 49 | 52 |
| | PL (%) | 27 | 28 | 29 | 29 |
| | PI | 12 | 15 | 20 | 23 |
| 5L3,33BOSUS | LL (%) | 47 | 50 | NON PLASTİK | NON PLASTİK |
| | PL (%) | 29 | 29 | | |
| | PI | 18 | 21 | | |
| 5L7,5BOSUS | LL (%) | 42 | 44 | 46 | 51 |
| | PL (%) | 26 | 26 | 26 | 26 |
| | PI | 16 | 18 | 20 | 25 |



Şekil 3.14: Kıvam limitleri sonuçları (uzunçiftlik-deniz suyu)

Tablo 3.14: Kıvam limitleri sonuçları (bentonit-çeşme suyu)

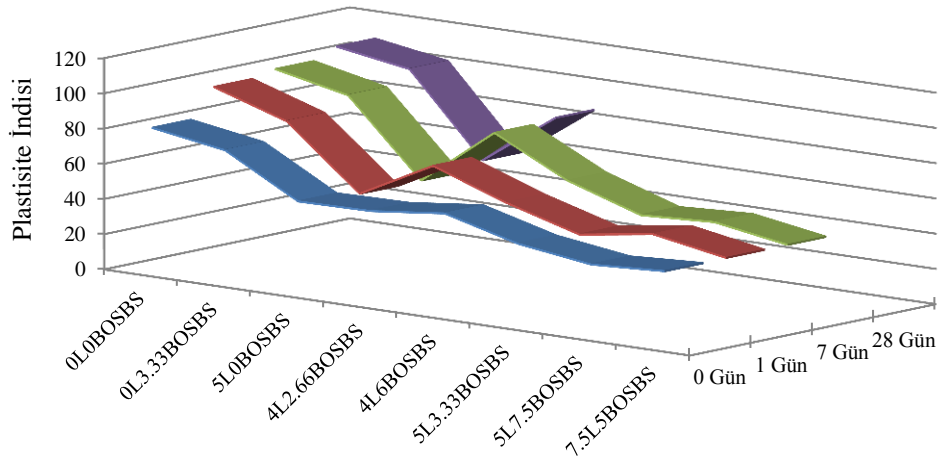
| | | 0 Gün | 1 Gün | 7 Gün | 28 Gün |
|-------------|--------|-------|-------|-------|----------------|
| 0L0BOBOSBT | LL (%) | 114 | 116 | 116 | 116 |
| | PL (%) | 32 | 33 | 33 | 33 |
| | PI | 82 | 83 | 83 | 83 |
| 0L3,33BOSBT | LL (%) | 129 | 134 | 136 | 140 |
| | PL (%) | 44 | 45 | 44 | 46 |
| | PI | 85 | 89 | 92 | 94 |
| 5L0BOSBT | LL (%) | 119 | 120 | 122 | 127 |
| | PL (%) | 50 | 51 | 54 | 55 |
| | PI | 69 | 69 | 68 | 72 |
| 4L2,66BOSBT | LL (%) | 93 | 104 | 113 | 116 |
| | PL (%) | 49 | 48 | 48 | 49 |
| | PI | 44 | 56 | 65 | 67 |
| 4L6BOSBT | LL (%) | 100 | 109 | 110 | 112 |
| | PL (%) | 43 | 49 | 50 | 55 |
| | PI | 57 | 60 | 60 | 57 |
| 5L3,33BOSBT | LL (%) | 100 | 110 | 108 | NON PLASTİK |
| | PL (%) | 59 | 54 | 51 | |
| | PI | 41 | 56 | 57 | |
| 5L7,5BOSBT | LL (%) | 83 | 96 | 99 | NON PLASTİK |
| | PL (%) | 49 | 50 | 50 | |
| | PI | 34 | 46 | 49 | |
| 7,5L5BOSBT | LL (%) | 96 | 101 | 109 | 109 |
| | PL (%) | 61 | 61 | 61 | 62 |
| | PI | 35 | 40 | 48 | 47 |



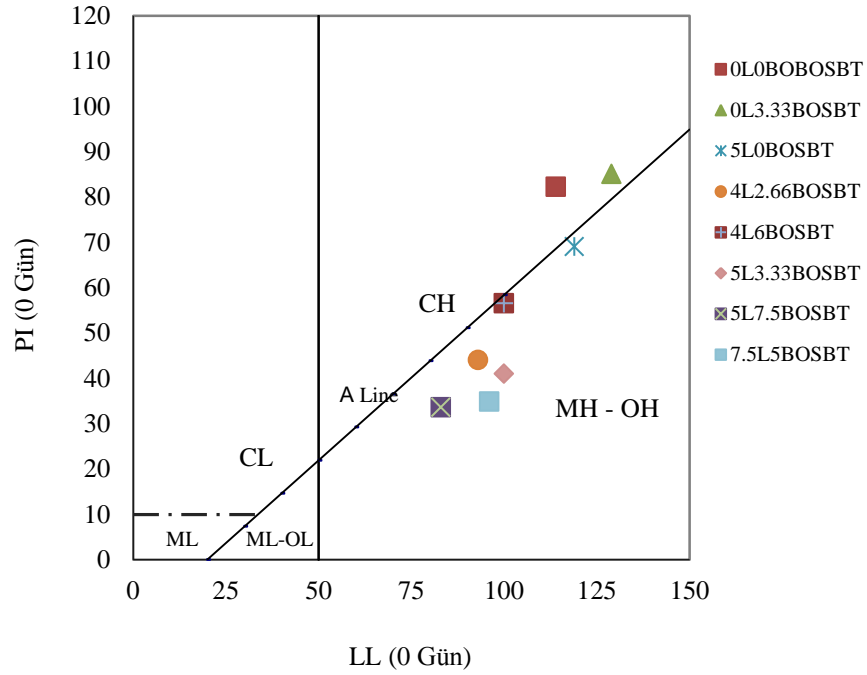
Şekil 3.15: Kıvam limitleri sonuçları (bentonit-çeşme suyu)

Tablo 3.15: Kıvam limitleri sonuçları (bentonit-deniz suyu)

| | | 0 Gün | 1 Gün | 7 Gün | 28 Gün |
|-------------|--------|-------|-------|-------|----------------|
| 0L0BOSBS | LL (%) | 115 | 129 | 132 | 140 |
| | PL (%) | 33 | 31 | 31 | 33 |
| | PI | 82 | 98 | 101 | 107 |
| 0L3,33BOSBS | LL (%) | 119 | 129 | 135 | 138 |
| | PL (%) | 44 | 44 | 43 | 38 |
| | PI | 75 | 85 | 92 | 100 |
| 5L0BOSBS | LL (%) | 102 | 103 | 103 | 104 |
| | PL (%) | 50 | 53 | 53 | 50 |
| | PI | 52 | 50 | 50 | 54 |
| 4L2,66BOSBS | LL (%) | 95 | 114 | 129 | 133 |
| | PL (%) | 42 | 43 | 46 | 49 |
| | PI | 53 | 71 | 83 | 84 |
| 4L6BOSBS | LL (%) | 98 | 102 | 111 | NON PLASTİK |
| | PL (%) | 40 | 45 | 49 | |
| | PI | 58 | 57 | 62 | |
| 5L3,33BOSBS | LL (%) | 99 | 101 | 104 | NON PLASTİK |
| | PL (%) | 52 | 56 | 56 | |
| | PI | 47 | 45 | 48 | |
| 5L7,5BOSBS | LL (%) | 92 | 102 | 102 | NON PLASTİK |
| | PL (%) | 51 | 51 | 51 | |
| | PI | 41 | 51 | 51 | |
| 7,5L5BOSBS | LL (%) | 104 | 104 | 105 | 106 |
| | PL (%) | 61 | 60 | 61 | 61 |
| | PI | 43 | 44 | 44 | 45 |

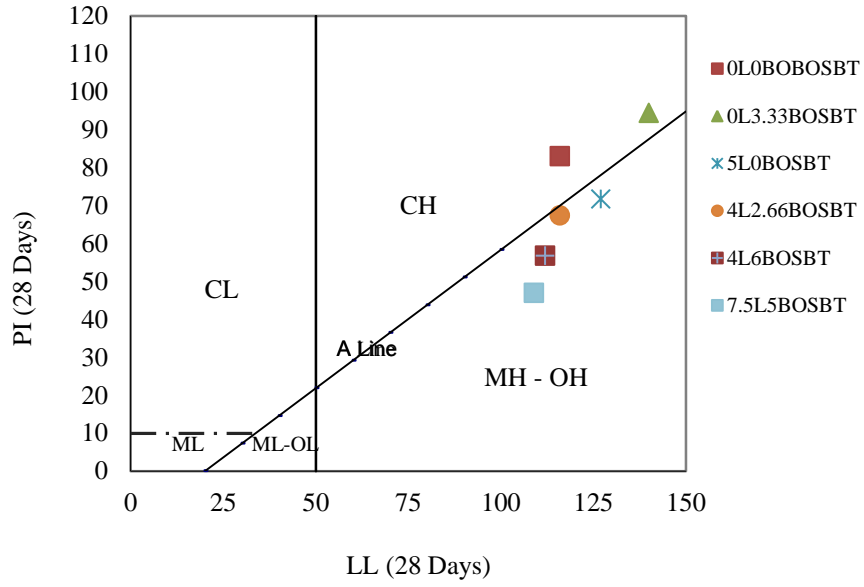


Şekil 3.16: Kıvam limitleri sonuçları (bentonit-deniz suyu)



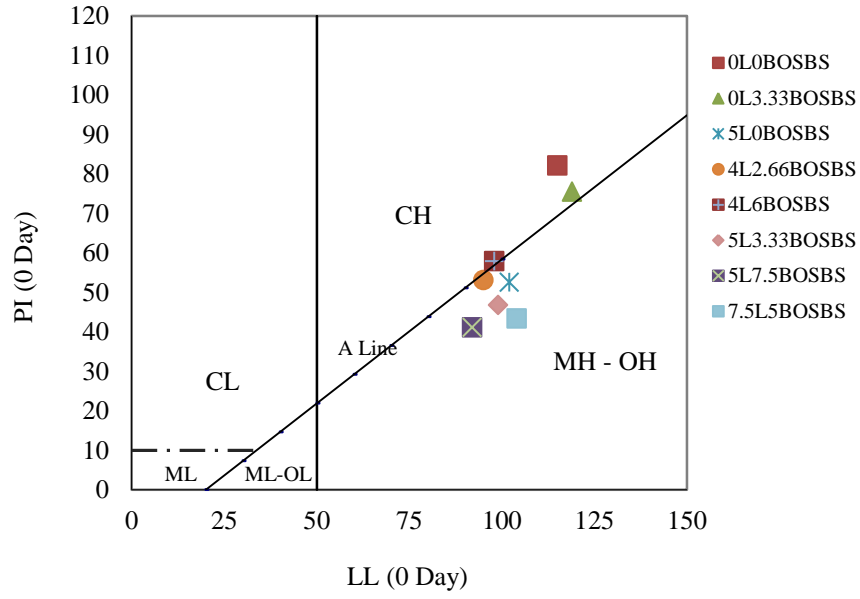
Şekil 3.17: Bentonit-çeşme suyu karışımları ve Atterberg çarkı (0 gün)

Bentonit kili ve çeşme suyu ile hazırlanan karışımların 0 günlük (karışımın hazırlandığı gün) değerleri Şekil 3.17 de verilmiştir Bentonit Kili, saf olarak çeşme suyu ile karıştırıldığında (0LOBOSBT) Atterberg çarkında CH (yüksek plastisiteli kil) sınıfına girmektedir. 0L3.33BOSBT numunesinin, saf bentonite göre likit limiti daha fazla olmakla birlikte CH sınıfına girmektedir. 5L0BOSBT karışımı, bentonit kilini CH sınıfında MH-OH (yüksek plastisiteli, siltli-organik kil) sınıfına geçirmektedir. 4L2.66BOSBT, 4L6BOSBT, 7.5L5BOSBT, 5L3.33BOSBT karışımı ve 5L7.5BOSBT karışımları değişik oranlarda kireç ve BOS ile birlikte hazırlanan karışımlar da MH-OH sınıfına geçmiştir.



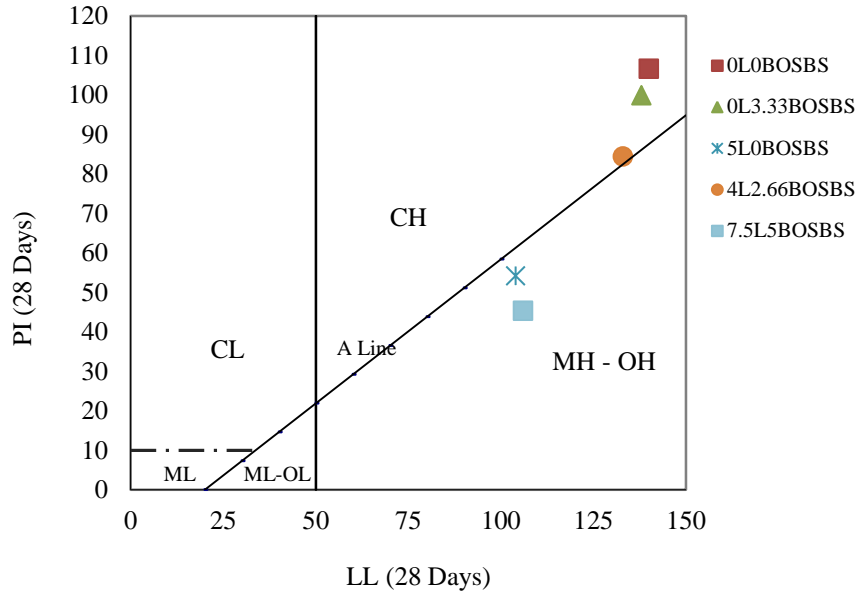
Şekil 3.18: Bentonit-çeşme suyu karışımları ve Atterberg çarkı (28 gün)

Bentonit kili ve çeşme suyu ile hazırlanan karışımların 28 gün sonra Atterberg çarkındaki değerleri Şekil 3.18 de verilmektedir. 28 gün sonunda 0L0BOSBT ve 0L3.33BOSBT numunelerinin yerleri değişmemekte ve CH sınıfında kalmaktadırlar. 5L0BOSBT karışımında da önemli bir değişiklik olmamakta ve MH-OH sınıfında durmaktadır. 4L2.66BOSBT karışımı 28 gün sonunda MH-OH sınıfında durmakta ve sınıf değiştirmemektedir ancak likit limitinde önemli bir artış meydana gelmektedir. 0 günde, CH ve MH sınırını belirleyen A hattının üzerinde değerlere sahip olan 4L6BOSBT karışımı 28 gün sonunda MH sınıfına geçmiştir. 7.5L5BOSBT karışımı, 4L2.66BOSBT karışımına benzer bir davranış sergilemektedir. 0 Günde MH sınıfında olan 7.5L5BOSBT, 28 gün sonunda aynı sınıfta kalmakta ancak likit limitinde önemli bir artış meydana gelmektedir. 5L3.33BOSBT karışımı ve 5L7.5BOSBT karışımı ise 28 gün sonunda plastiklik özelliğini kaybetmektedir.



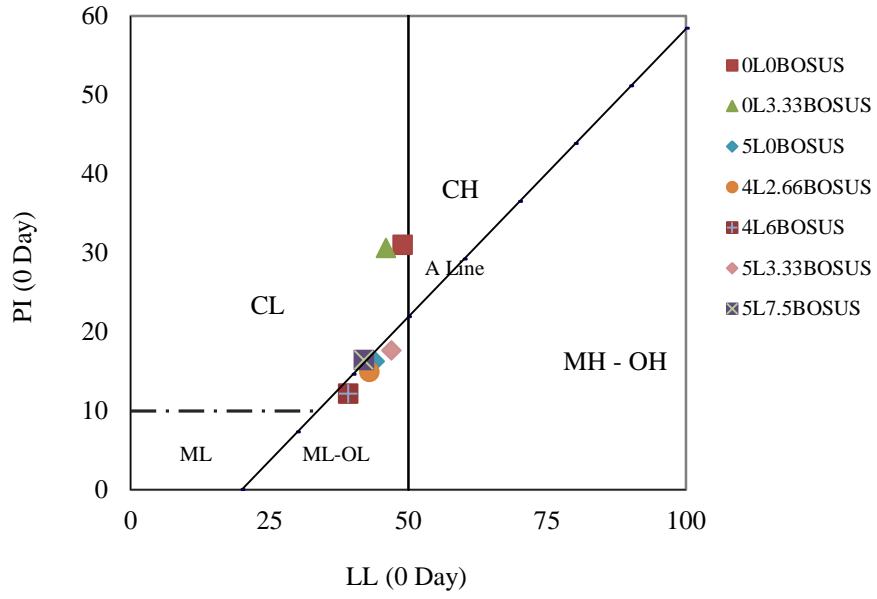
Şekil 3.19: Bentonit-deniz suyu karışımları ve Atterberg çarkı (0 gün)

bentonit kili ve deniz suyu ile hazırlanan karışımların 0 günlük (karışımın hazırlandığı gün) değerleri Şekil 3.19 da verilmektedir. Bentonit Kili, saf olarak deniz suyu ile karıştırıldığında (0LOBOSBs) Atterberg çarkında CH (yüksek plastisiteli kil) sınıfına girmektedir. 0L3.33BOSBS numunesi, saf bentonite çok yakın değerler almakta ve CH sınıfına girmektedir. 5L0BOSBS, 4L2.66BOSBS, 4L6BOSBS, 7.5L5BOSBS, 5L3.33BOSBS karışımı ve 5L7.5BOSBS karışımı, bentonit kilini CH sınıfında MH-OH (yüksek plastisiteli, siltli-organik kil) sınıfına geçirmektedir.



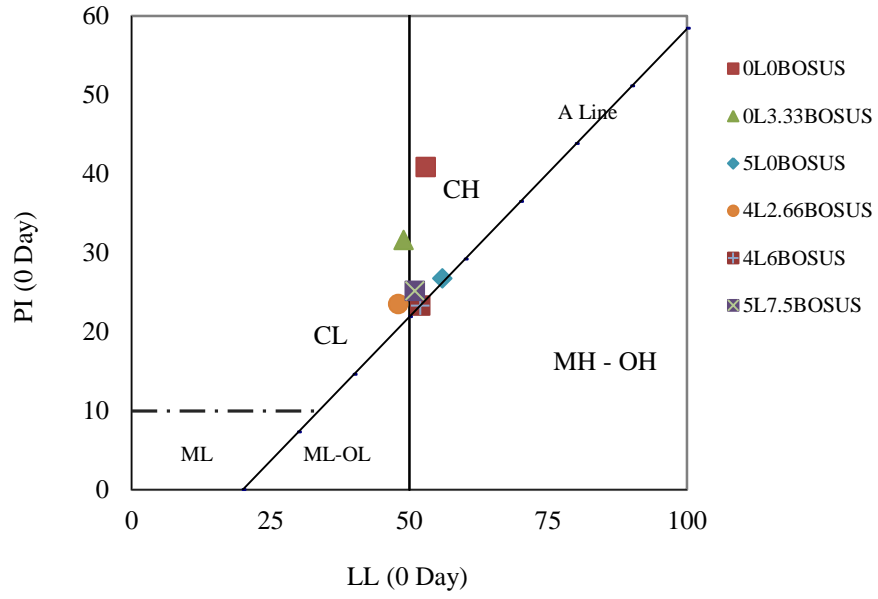
Şekil 3.20: Bentonit-deniz suyu karışımları ve Atterberg çarkı (28 gün)

Bentonit kili ve deniz suyu ile hazırlanan karışımların 28 günlük (karışımın hazırlandığı gün) değerleri Şekil 3.20 de verilmektedir. 28 gün sonunda 0LOBOSBS ve 0L3.33BOSBS numunesi yerlerinde değişmemekte ve CH sınıfında kalmaktadırlar ancak likit limitlerinde önemli miktarda artış olmaktadır. 5L0BOSBS karışımında da önemli bir değişiklik olmamakta ve MH-OH sınıfında durmaktadır. 4L2.66BOSBS karışımı 28 gün sonunda MH-OH sınıfından CH sınıfına geçmektedir. 0 Günde MH sınıfında olan 7.5L5BOSBS, 28 gün sonunda aynı sınıfta kalmakta değerlerinde hemen hiç fark olmamaktadır. 4L6BOSBS, 5L3.33BOSBS ve 5L7.5BOSBS karışımı ise 28 gün sonunda plastiklik özelliğini kaybetmektedir.



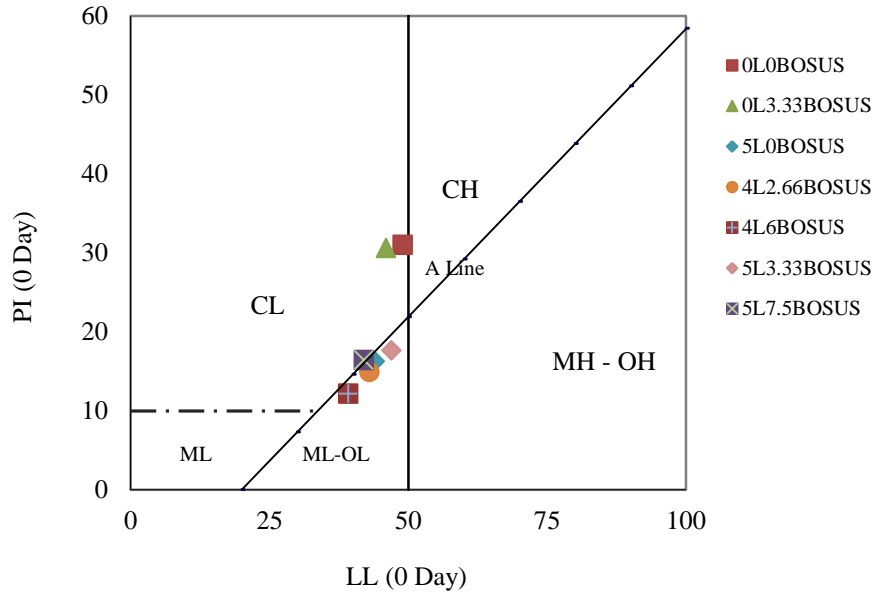
Şekil 3.21: Uzunçiftlik - çeşme suyu karışımları ve Atterberg çarkı (0 gün)

Uzunçiftlik kili ve çeşme suyu ile hazırlanan karışımların 0 günlük değerleri Şekil 3.21 de verilmiştir Uzunçiftlik kili, saf olarak çeşme suyu ile karıştırıldığında (0LOBOSUT) Atterberg çarkında CL (düşük plastisiteli kil) sınıfına girmektedir. 0L3.33BOSUT numunesinin, saf uzunçiftlik göre likit limiti daha az olmakla birlikte CL sınıfına girmektedir. 5L0BOSUT, 4L2.66BOSUT, 5L7.5BOSUT karışımları hemen hemen aynı değerlere sahiptir ve uzunçiftlik kilini CL sınıfında ML-OL (siltli-organik düşük plastisiteli kil) sınıfına geçirmektedir. 4L6BOSUT ve 5L3.33BOSUT karışımı hemen hemen aynı değerlere sahiptir ve uzunçiftlik kilini CL sınıfında ML-OL (siltli-organik düşük plastisiteli kil) sınıfına geçirmektedir.



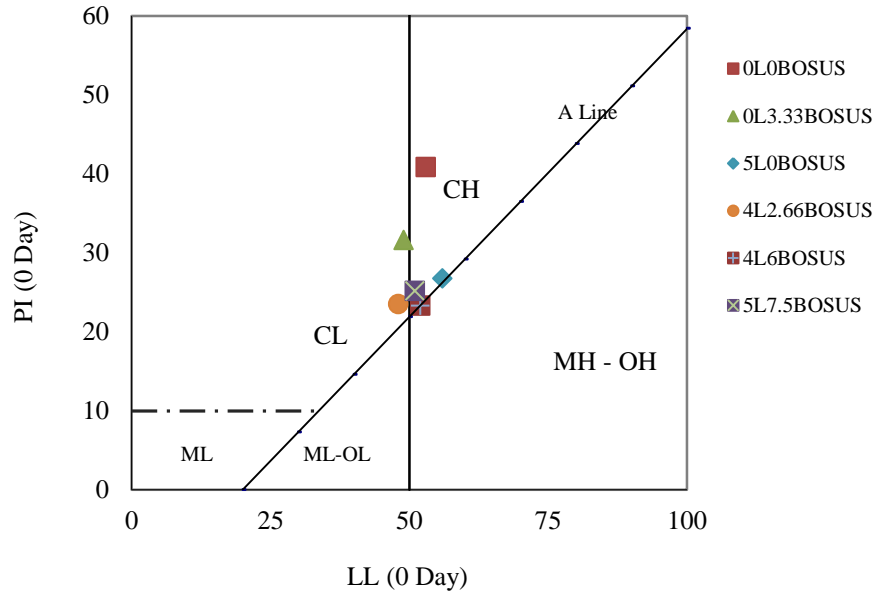
Şekil 3.22: Uzunçiftlik - çeşme suyu karışımları ve Atterberg çarkı (28 gün)

Uzunçiftlik kili ve çeşme suyu ile hazırlanan karışımların 28 gün sonra Atterberg çarkındaki değerleri Şekil 3.22 de gösterilmektedir. 28 gün sonunda 0LOBOSUT ve 0L3.33BOSUT numunesi yerlerinde değişmemekte ve CL sınıfında kalmaktadırlar. 5L0BOSUT ve 5L7.5BOSUT karışımlarında limit değeri artmakta ve karışım CH sınıfına geçmektedir. 4L2.66BOSUT karışımı 28 gün sonunda ML-OL sınıfından çıkmakta ve CL sınıfına geçme eğilimi göstermektedir. 4L6BOSUT karışımı 28 gün sonunda CL sınıfındadır. 5L3.33BOSUT karışımı ise 28 gün sonunda plastiklik özelliğini kaybetmektedir.



Şekil 3.23: Uzunçiftlik - deniz suyu karışımları ve Atterberg çarkı (0 gün)

Uzunçiftlik kili ve deniz suyu ile hazırlanan karışımların 0 günlük değerleri Şekil 3.23 de verilmiştir Uzunçiftlik kili, saf olarak deniz suyu ile karıştırıldığında (0LOBOSUS) Atterberg çarkında CL (düşük plastisiteli kil) sınıfına girmektedir. 0L3.33BOSUS numunesinin, saf uzunçiftlik göre likit limiti daha az olmakla birlikte CL sınıfına girmektedir. 5L0BOSUS, 4L2.66BOSUS, 4L6BOSUS ve 5L3.33BOSUS karışımları uzunçiftlik kilini CL sınıfında ML-OL (siltli-organik düşük plastisiteli kil) sınıfına geçirmektedir 5L7.5BOSUT karışımı ML-OL (siltli-organik düşük plastisiteli kil) sınıfına yönelmekte A hattının tam üzerinde bir değer almaktadır.



Şekil 3.24: Uzunçiftlik – deniz suyu karışımları ve Atterberg çarkı (28 gün)

Uzunçiftlik kili ve çeşme suyu ile hazırlanan karışımların 28 gün sonra Atterberg çarkındaki değerleri Şekil 3.24 de gösterilmektedir. 28 gün sonunda 0LOBOSUT ve 0L3.33BOSUT numunesi yerlerinde değişmemekte ve CL sınıfında kalmaktadırlar. 5L0BOSUT ve 5L7.5BOSUT karışımlarında limit değeri artmakta ve karışım CH sınıfına geçmektedir. 4L2.66BOSUT karışımı 28 gün sonunda ML-OL sınıfından çıkmakta ve CL sınıfına geçme eğilimi göstermektedir. 4L6BOSUT karışımı 28 gün sonunda CL sınıfındadır. 5L3.33BOSUT karışımı ise 28 gün sonunda plastiklik özelliğini kaybetmektedir.

3.3.5. Kompaksiyon

Çalışmada kullanılan 30 farklı karışımın üzerinde ASTM D1557/AASHTO T180 ve ASTM 698-07E1/AASHTO T99 standardına uygun olarak modifiye kompaksiyon ve standart kompaksiyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar çalışmalarında Proktor deneyleri olarak da söylenir. Optimizasyon amacı ile yapılan bu çalışmada 60 adet kompaksiyon deneyi yapılmıştır. Her deney için en az 5 nokta bulunmuştur. Kompaksiyon deneyi için toplamda 300 kez sıkıştırma işlemi uygulanmıştır.



Şekil 3.25: Kompaksiyon cihazı

Karışımlarda katkı malzemelerinin ve deniz suyunun optimum su muhtevasına veya birim hacim ağırlıklarına etkisini görebilmek için yapılan modifiye ve standart sıkıştırma deneylerine ait sonuçlar Tablo 3.15, Tablo 3.16, Tablo 3.17 ve Tablo 3.18 de gösterilmektedir. Şekil 3.25 de numuneleri modifiye veya standart olarak sıkıştırmak amacı ile kullanılan sıkıştırma cihazı görülmektedir.

Cihaz standartlarda belirlenen yükseklikten, standartlara göre hazırlanmış ağırlığı istenilen miktarda altına yerleştirilen kalıba vurmaktadır. Modifiye olarak kullanılacağı zaman gerekli parçalar eklenerek yük artırımı yapılabilmektedir.

Modifiye kompaksiyon deneyinde, ELE deney aletleri setine ait 15,24 mm çapında ve 11,64 cm. yüksekliğinde standart kalıplar kullanılmıştır. 4,5 kg. ağırlığındaki tokmak 45,7 cm. lik yükseklikten düşürülmüştür. Deney Şekil 3. 25 de gösterilen elektrikli otomatik sıkıştırma aleti ile gerçekleştirilmiştir. 5 tabakada sıkıştırılan zeminde her tabaka için 25 vuruş uygulanmıştır. Böylece zemin, $2,700 \text{ kN-m/m}^3$ enerji ile sıkıştırmıştır.

Modifiye olarak sıkıştırılıp, optimum su muhtevası ve optimum su muhtevasındaki en büyük kuru birim hacim ağırlığının belirlenmesi amacı ile yapılan kompaksiyon deneyleri için ilk 5 farklı plastik leğende, 2 şer kilo kuru uzunçiftlik kili tartılmıştır. Daha sonra karışımda bulunan katkı malzemeleri, yüzde miktarlarına göre kadar 0,1 gram hassasiyetinde tartıda tartılarak leğenlere eklenmiş ve kuru bir şekilde karıştırılmıştır. Daha sonra leğenlere farklı miktarlarda sular eklenerek homojen oluncaya kadar karıştırılmıştır. Karıştırılan numuneler belirtilen enerjiyi sağlayacak şekilde, her tabaka için 25 vuruş olarak 5 tabaka halinde sıkıştırılmıştır. Sıkışan numunelerin su muhtevaları ve birim hacim ağırlıkları belirlenerek kompaksiyon eğrileri çizilmiştir. 4.bölümde çalışma ile ilgili ayrıntılı çizimler gösterilmektedir. Bentonit kilinde aynı işlemler uygulanmıştır. Ancak bentonit kilinin özgül ağırlığı uzunçiftlikten azdır. Kalıpların doldurulmasında uzunçiftlik kili için 2 kilogram gerekli iken bentonit kilinin 1250 gramı yeterli olmuştur.

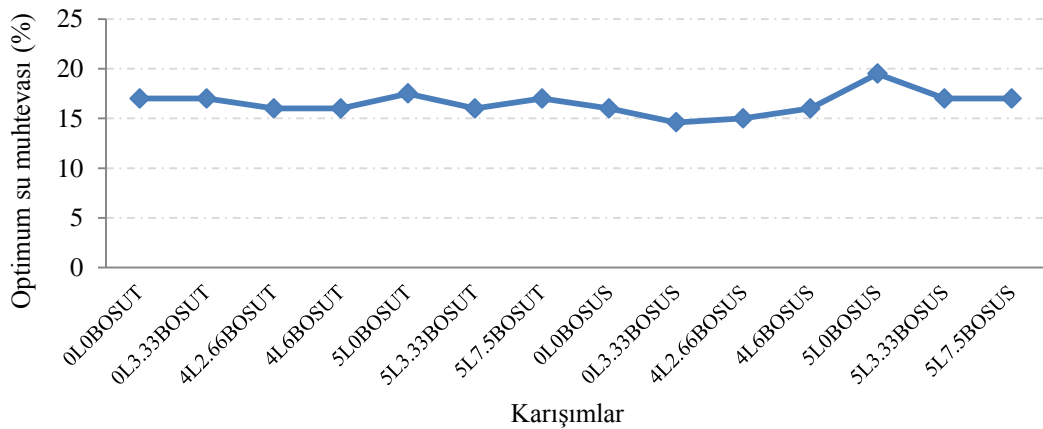
Standart olarak sıkıştırılıp, optimum su muhtevası ve optimum su muhtevasındaki en büyük kuru birim hacim ağırlığının belirlenmesi amacı ile yapılan kompaksiyon deneyleri için de aynı işlem uygulanmıştır. Ancak sıkıştırma her tabakada 25 vuruş olacak şekilde 3 tabakada tamamlanmıştır.

Deniz suyu, çeşme suyu, BOS ve kireç ile değişik oranlarda karıştırılan uzunçiftlik kiline ait modifiye kompaksiyon sonuçları Tablo 3.16 de verilmektedir. Tabloda karışım adları, karışıma ait optimum su muhtevası ve optimum su muhtevasındaki en büyük kuru birim hacim ağırlığı verilmektedir.

Tablo 3.16: Modifiye kompaksiyon sonuçları (uzunçiftlik kili)

| Karışım Simgesi (Mod. Komp.) | Opt. Su Muh. (%) | Max. Bir. Hac. Ağ. (kN/m ³) |
|---------------------------------|---------------------|--|
| 0L0BOSUT | 17,00 | 18,10 |
| 0L3.33BOSUT | 17,00 | 18,05 |
| 4L2.66BOSUT | 16,00 | 17,30 |
| 4L6BOSUT | 16,00 | 17,60 |
| 5L0BOSUT | 17,50 | 17,04 |
| 5L3.33BOSUT | 16,00 | 17,60 |
| 5L7.5BOSUT | 17,00 | 17,60 |
| 0L0BOSUS | 16,00 | 18,90 |
| 0L3.33BOSUS | 14,60 | 18,20 |
| 4L2.66BOSUS | 15,00 | 17,40 |
| 4L6BOSUS | 16,00 | 17,30 |
| 5L0BOSUS | 19,50 | 16,90 |
| 5L3.33BOSUS | 17,00 | 17,40 |
| 5L7.5BOSUS | 17,00 | 17,40 |

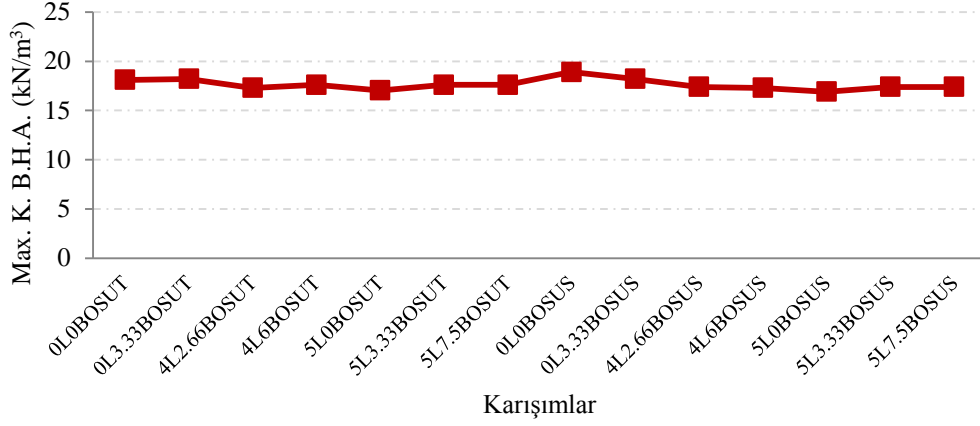
Deney sonuçlarında, katkısız olarak çeşme suyu su ile sıkıştırılan uzunçiftlik kilinin optimum su muhtevası %17 ve buna bağlı kuru birim hacim ağırlığının 18,1 kN/m³ olduğu görülmektedir. Deniz suyu kullanılması halinde ise bu değerlerde önemli bir değişiklik olmamaktadır. Karışımların, optimum su muhtevasında ve kuru birim hacim ağırlığında azalma meydana getirdiği görülmektedir.



Şekil 3.26: Uzunçiftlik kili ile yapılan modifiye kompaksiyona ait su muhtevaları

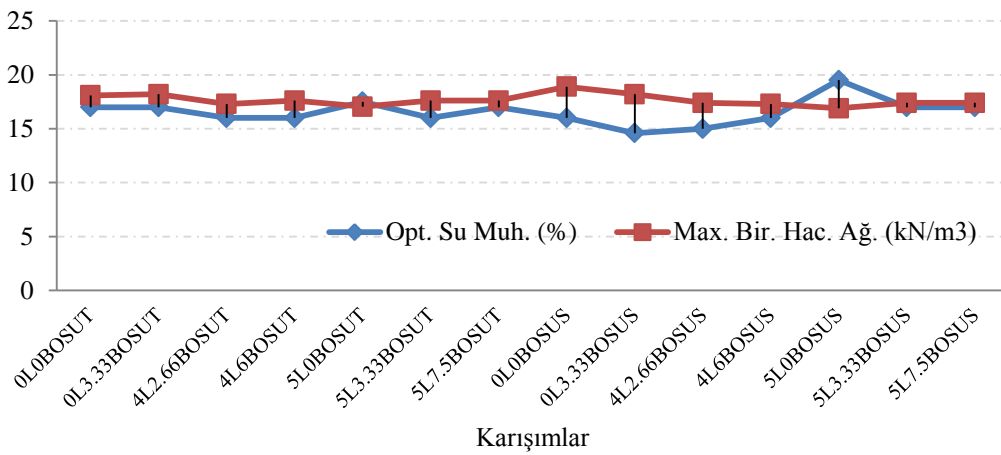
Uzunçiftlik kilinin karışım oranlarına göre modifiye sıkıştırma sonucu optimum su muhtevasında ve K.B.H.A da meydana getirdiği değişimler grafik olarak Şekil 3.26, Şekil

3.27 ve Şekil 3.28 de gösterilmektedir. Çeşme suyu ile yapılan karışımların optimum sularında önemli farklılıklar bulunmamaktadır. Ancak %5 kireç ile ve deniz suyu ile hazırlanmış olan karışımda bir miktar artış görülmektedir. K.B.H.A değerleri ise 15 ila 20 kN/m^3 civarlarındadır.



Şekil 3.27: Uzunçiftlik kili ile yapılan modifiye kompaksiyona ait K.B.H.A

Deniz suyu, çeşme suyu, BOS ve kireç ile değişik oranlarda karıştırılan bentonit kiline ait modifiye kompaksiyon sonuçları Tablo 3.17 de verilmektedir. Tabloda karışım adları, karışıma ait optimum su muhtevası ve optimum su muhtevasındaki en büyük kuru birim hacim ağırlığı verilmektedir.

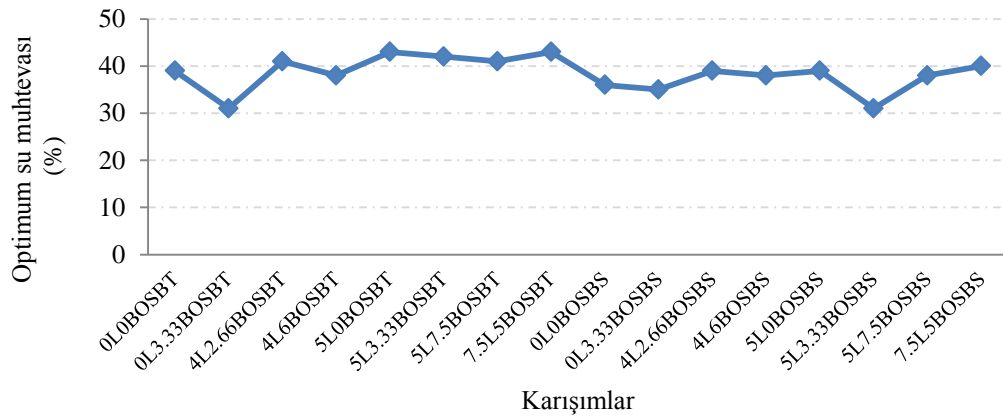


Şekil 3.28: Uzunçiftlik kili ile yapılan modifiye kompaksiyona ait değerler

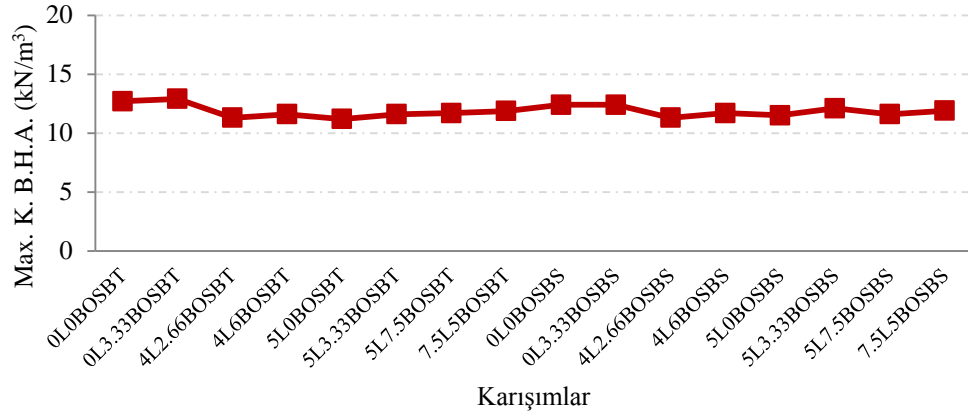
Tablo 3.17: Modifiye kompaksiyon sonuçları (bentonit kili)

| Karışım Simgesi (Mod. Komp.) | Opt. Su Muh. (%) | Max. Bir. Hac. Ağ. (kN/m ³) |
|------------------------------|------------------|---|
| 0L0BOSBT | 39,00 | 12,70 |
| 0L3.33BOSBT | 31,00 | 12,90 |
| 4L2.66BOSBT | 41,00 | 11,30 |
| 4L6BOSBT | 38,00 | 11,60 |
| 5L0BOSBT | 43,00 | 11,20 |
| 5L3.33BOSBT | 42,00 | 11,60 |
| 5L7.5BOSBT | 41,00 | 11,70 |
| 7.5L5BOSBT | 43,00 | 11,87 |
| 0L0BOSBS | 36,00 | 12,40 |
| 0L3.33BOSBS | 35,00 | 12,40 |
| 4L2.66BOSBS | 39,00 | 11,30 |
| 4L6BOSBS | 38,00 | 11,70 |
| 5L0BOSBS | 39,00 | 11,50 |
| 5L3.33BOSBS | 31,00 | 12,10 |
| 5L7.5BOSBS | 38,00 | 11,60 |
| 7.5L5BOSBS | 40,00 | 11,90 |

Bentonit kilinin karışım oranlarına göre modifiye sıkıştırma sonucu meydana gelen optimum su muhtevasında ve K.B.H.A da meydana getirdiği değişimler Şekil 3.29, Şekil 3.30 ve Şekil 3.31 de grafik olarak gösterilmektedir.

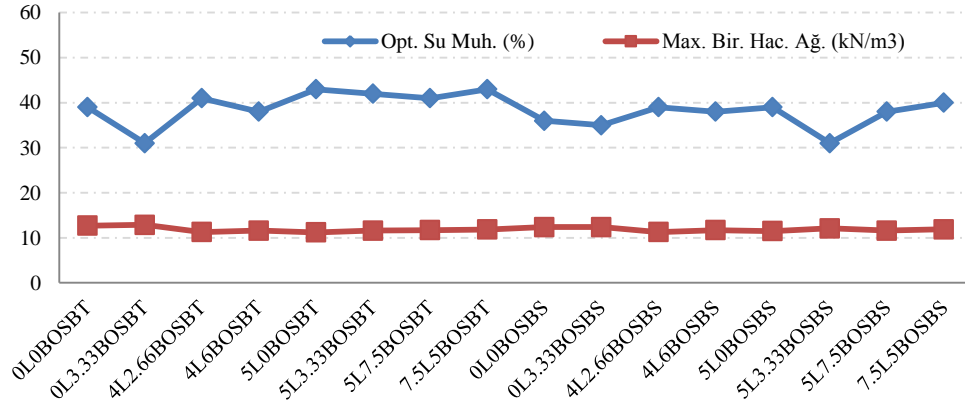


Şekil 3.29: Bentonit kili ile yapılan modifiye kompaksiyona ait su muhtevaları



Şekil 3.30: Bentonit kili ile yapılan modifiye kompaksiyona ait K.B.H.A

Çeşme suyu ve deniz suyu ile hazırlanan karışımların optimum sularında çok büyük farklılıklar bulunmamaktadır. Karışımların optimum su muhtevalarının genel olarak %40 civarında olduğu belirlenmiştir. K.B.H.A değerleri ise 10 ila 15 kN/m³ civarlarındadır.



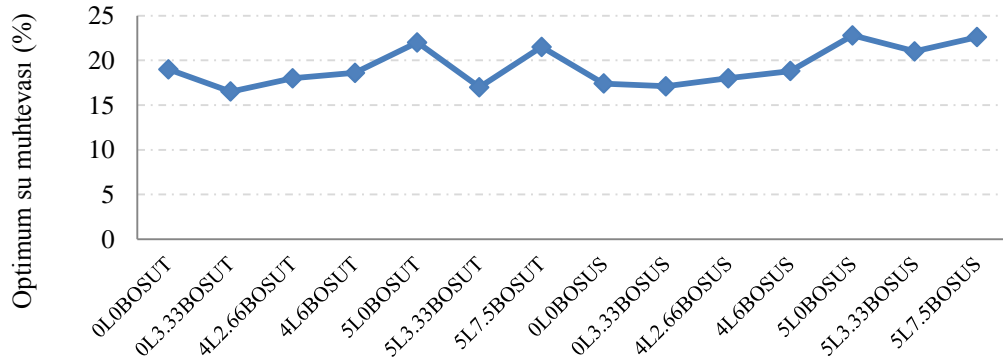
Şekil 3.31: Bentonit kili ile yapılan modifiye kompaksiyona ait değerler

Standart kompaksiyon deneyinde, uzunçiftlik kili hazırlanan karışımlar ELE deney aletleri setine ait 15,24 mm çapında ve 11,64 cm. yüksekliğinde standart kalıplar kullanılmıştır. 2,5 kg. ağırlığındaki tokmak 30,5 cm. lik yükseklikten düşürülmüştür. Deney Şekil 3. 25 de gösterilen elektrikli otomatik sıkıştırma aleti ile gerçekleştirilmiştir. 3 tabakada sıkıştırılan zeminde her tabaka için 25 vuruş uygulanmıştır. Böylece zemin, 600 kN-m/m³ enerji ile sıkıştırılmıştır.

Tablo 3.18: Uzunçiftlik kiline ait standart kompaksiyon sonuçları

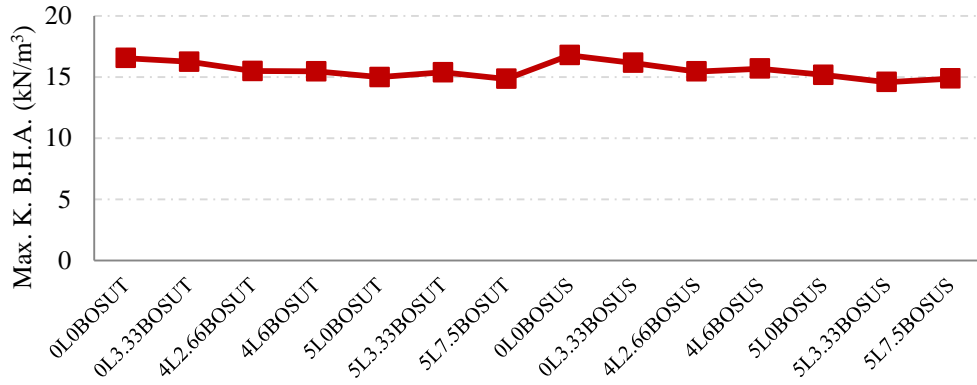
| Karışım Simgesi (St. Komp.) | Opt. Su Muh. (%) | Max. Bir. Hac. Ağ. (kN/m ³) |
|-----------------------------|------------------|---|
| 0L0BOSUT | 19,00 | 16,56 |
| 0L3.33BOSUT | 16,50 | 16,25 |
| 4L2.66BOSUT | 18,00 | 15,50 |
| 4L6BOSUT | 18,60 | 15,48 |
| 5L0BOSUT | 22,00 | 15,00 |
| 5L3.33BOSUT | 17,00 | 15,40 |
| 5L7.5BOSUT | 21,50 | 14,86 |
| 0L0BOSUS | 17,40 | 16,80 |
| 0L3.33BOSUS | 17,10 | 16,17 |
| 4L2.66BOSUS | 18,00 | 15,46 |
| 4L6BOSUS | 18,80 | 15,69 |
| 5L0BOSUS | 22,80 | 15,18 |
| 5L3.33BOSUS | 21,00 | 14,59 |
| 5L7.5BOSUS | 22,60 | 14,88 |

Deniz suyu, çeşme suyu, BOS ve kireç ile değişik oranlarda karıştırılan uzunçiftlik kiline ait standart kompaksiyon sonuçları Tablo 3.18 de verilmektedir. Tabloda karışım adları, karışıma ait optimum su muhtevası ve optimum su muhtevasındaki en büyük kuru birim hacim ağırlığı verilmektedir.



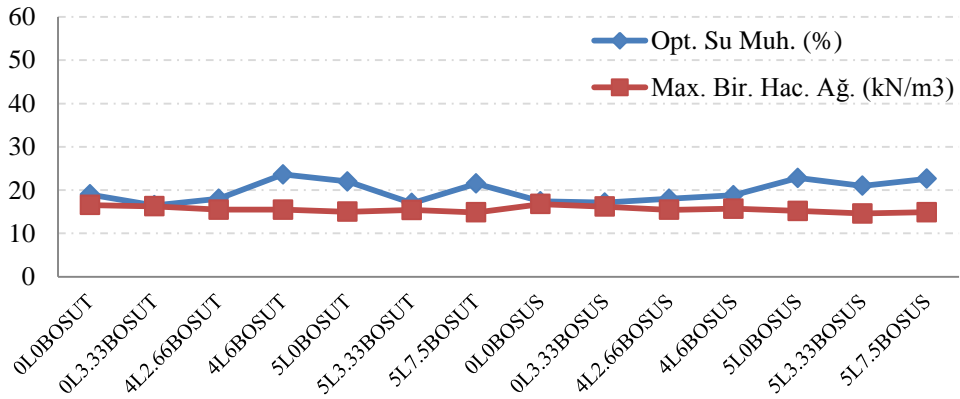
Şekil 3.32: Uzunçiftlik kili ile yapılan standart kompaksiyona ait su muhtevaları

Uzunçiftlik kilinin karışım oranlarının, standart sıkıştırma sonucu optimum su muhtevasında ve K.B.H.A da meydana getirdiği değişimler grafik olarak Şekil 3.32 ve 3.33 ve 3.34 de gösterilmektedir. Çeşme suyu ile yapılan karışımlarda da deniz suyu ile yapılan karışımlarda da optimum su muhtevasında önemli farklılıklar meydana gelmektedir.



Şekil 3.33: Uzunçiftlik kili ile yapılan standart kompaksiyon ait K.B.H.A

Deniz suyu, çeşme suyu, BOS ve kireç ile değişik oranlarda karıştırılan bentonit kiline ait standart kompaksiyon sonuçları Tablo 3.19 de verilmektedir. Tabloda karışım adları, karışıma ait optimum su muhtevası ve optimum su muhtevasındaki en büyük kuru birim hacim ağırlığı verilmektedir.



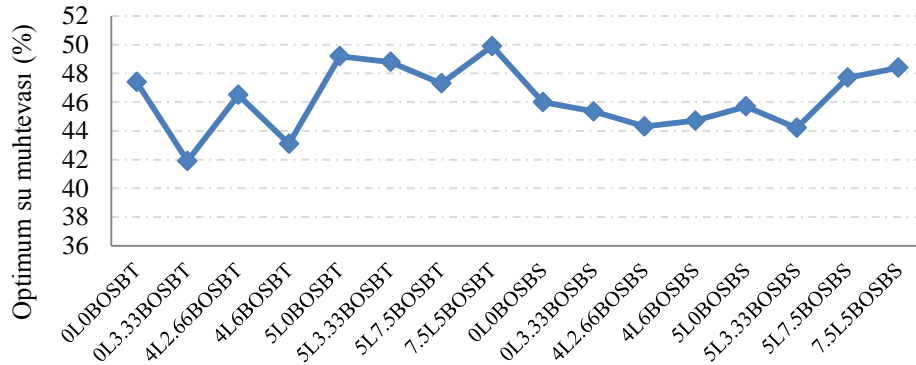
Şekil 3.34: Uzunçiftlik kili ile yapılan standart kompaksiyona ait değerler

Bentonit kili ile hazırlanan karışımlar üzerinde yapılan standart kompaksiyon deneylerinde de uzunçiftlik kilinde olduğu gibi, ELE deney aletleri setine ait 15,24 mm çapında ve 11,64 cm. yüksekliğinde standart kalıplar kullanılmıştır. 2,5 kg. ağırlığındaki tokmak 30,5 cm. lik yükseklikten düşürülmüştür. 3 tabakada sıkıştırılan zeminde her tabaka için 25 vuruş uygulanmıştır. Böylece zemin, 600 kN-m/m³ enerji ile sıkıştırmıştır.

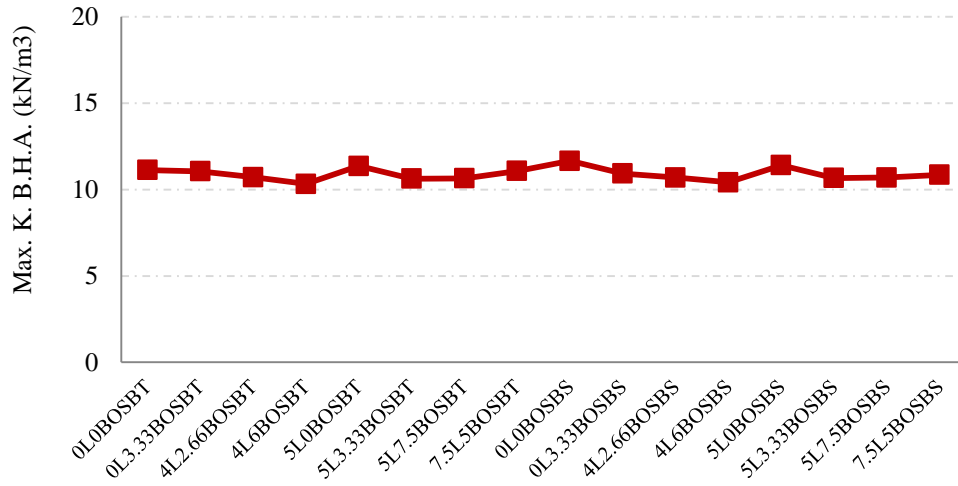
Tablo 3.19: Bentonit kiline ait standart kompaksiyon sonuçları

| Karışım Simgesi (St. Komp.) | Opt. Su Muh.(%) | Max. Bir. Hac. Ağ. (kN/m ³) |
|-----------------------------|-----------------|---|
| 0L0BOSBT | 47,40 | 11,14 |
| 0L3.33BOSBT | 41,90 | 11,06 |
| 4L2.66BOSBT | 46,50 | 10,72 |
| 4L6BOSBT | 43,10 | 10,32 |
| 5L0BOSBT | 49,20 | 11,36 |
| 5L3.33BOSBT | 48,80 | 10,63 |
| 5L7.5BOSBT | 47,30 | 10,66 |
| 7.5L5BOSBT | 49,90 | 11,08 |
| 0L0BOSBS | 46,00 | 11,66 |
| 0L3.33BOSBS | 45,35 | 10,93 |
| 4L2.66BOSBS | 44,30 | 10,70 |
| 4L6BOSBS | 44,70 | 10,42 |
| 5L0BOSBS | 45,70 | 11,41 |
| 5L3.33BOSBS | 44,20 | 10,67 |
| 5L7.5BOSBS | 47,70 | 10,69 |
| 7.5L5BOSBS | 48,40 | 10,86 |

Uzunçiftlik kilinin karışım oranlarının, standart sıkıştırma sonucu optimum su muhtevasında ve K.B.H.A da meydana getirdiği değişimler Şekil 3.35 ve Şekil 3.36 gösterilmektedir. Çeşme suyu ile yapılan karışımlarda da deniz suyu ile yapılan karışımlarda da optimum su muhtevasında önemli farklılıklar meydana gelmektedir.

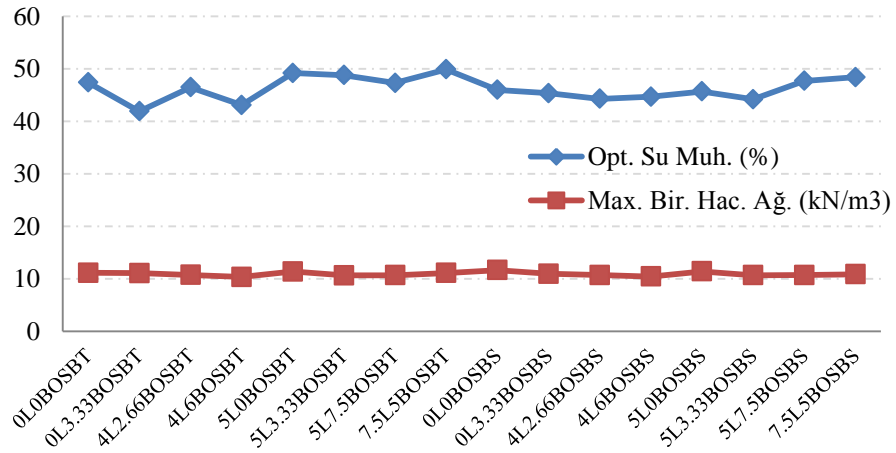


Şekil 3.35: Bentonit kili ile yapılan standart kompaksiyona ait su muhtevaları



Şekil 3.36: Bentonit kili ile yapılan standart kompaksiyona ait K.B.H.A

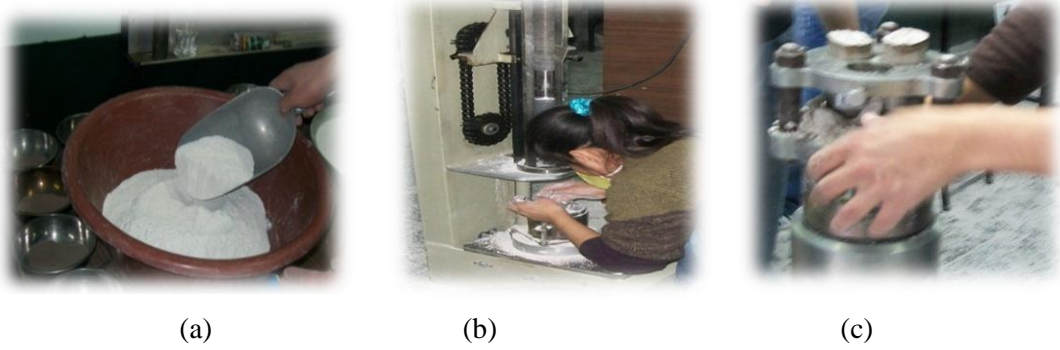
Şekil 3.37 de bentonit kili – deniz suyu ve bentonit kil çeşme suyu ile yapılan standart kompaksiyon deney sonuçları toplu olarak gösterilmektedir. Deniz suyu ve çeşme suyu, bentonitin optimum su muhtevasında ve en büyük kuru birim hacim ağırlığı değerlerinde benzer etkiler göstermektedir.



Şekil 3.37: Bentonit kili ile yapılan standart kompaksiyona ait değerler

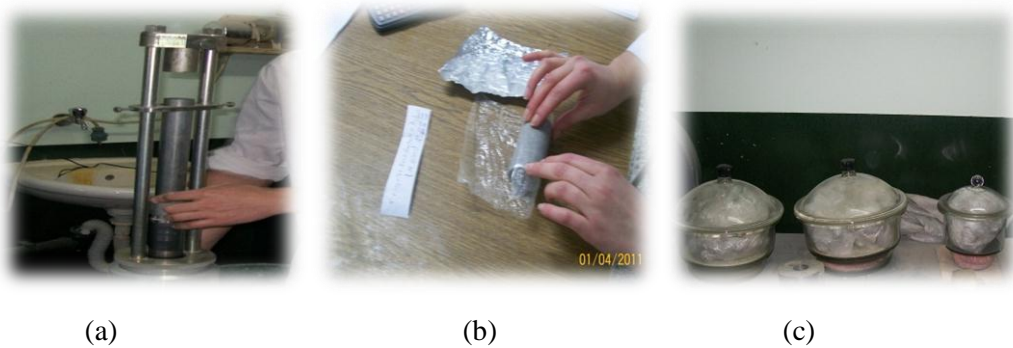
3.3.6. Serbest basınç

Hazırlanan 30 farklı karışım ASTM D2166 standardına uygun olarak serbest basınç deneylerine tabii tutulmaktadır. Bentonit kili ve Uzunçiftlik kili için yapılan serbest basınç deneyleri için kullanılan numunelerin hazırlanmasında, modifiye sıkıştırma ve standart sıkıştırma yöntemlerinin her ikisi de kullanılmaktadır. Karışımın oranları ağırlıkça yüzdelerdir. Gerekli hesaplamalar yapılarak, kil, kireç ve BOS Şekil 3.38 (a) da görüldüğü gibi, 0.1 gr. hassasiyetli tartımlarla tartılmakta, numuneler homojen olacak şekilde karıştırılmakta (b) ve kompaksiyon makinesinde (c) sıkıştırılmaktadır.



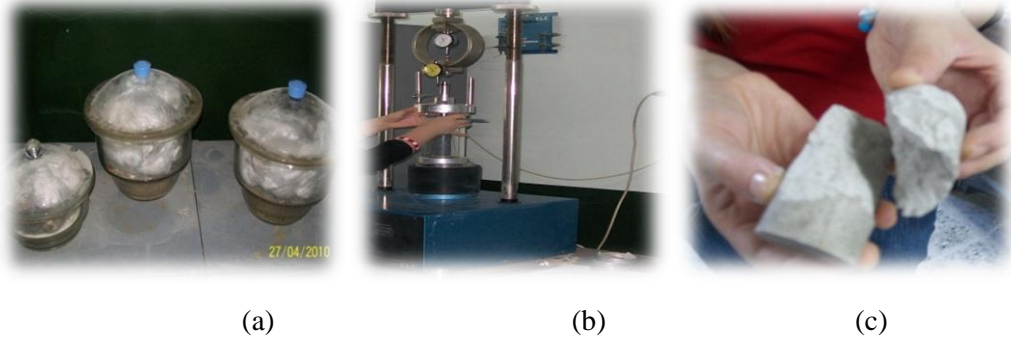
Şekil 3.38: Karışımların hazırlanması ve sıkıştırılması

Numunelerin hazırlanış aşamaları Şekil 3.8 de gösterilmektedir. Ağırlıkça belirli oranlarda karıştırılarak hazırlanan karışımlardan 38 mm. çapında ve 76 mm. boyunda silindirik numuneler elde edilmektedir. Her bir karışım için, sözü geçen ebatlarda 24 adet numune alacak şekilde, sıkıştırma ve hazırlanma işlemi tekrar edilmektedir.



Şekil 3.39: Numunenin hazırlanması

Her bir karışımın ortalama 6 tanesi aynı gün kırılmaktadır. Kırılan bu numunelerin sonuçları “0 Günlük” olarak adlandırılmaktadır. Kalan numuneler ise Şekil 3.39 da gösterildiği gibi önce şeffaf plastik bir strech ile sarılmakta, daha sonra alüminyum folyo ile sarılarak etiketlenmektedir. 1 Gün, 7 gün ve 28 gün sonra kırılmak üzere, günlük ısı ve nem ölçümü yapılan kür odasındaki desikatörlerin içinde Şekil 3.40 (a) da görüldüğü gibi kür edilmektedir. Daha sonra 3.40 (b) ve (c) de görüldüğü gibi kırılmaktadır.



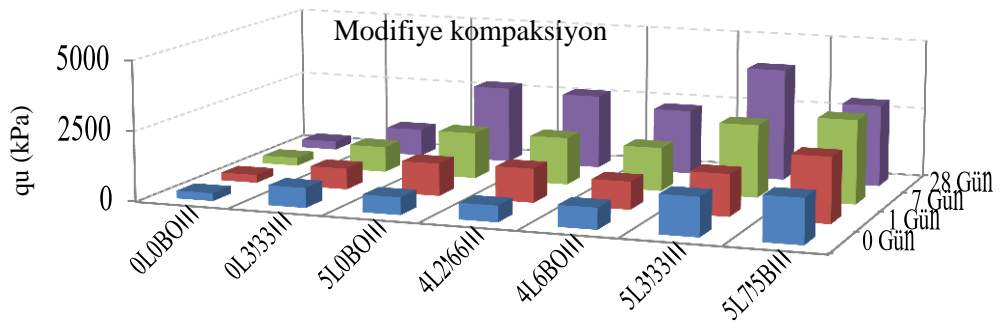
Şekil 3.40: Numunenin kür edilmesi ve kırılması

Uzunçiftlik kili ile modifiye olarak sıkıştırıldıktan sonra kırılan numunelere ait deney sonuçları Tablo 3.20 ve Tablo 3.21 de, standart olarak sıkıştırıldıktan sonra kırılan numunelere ait deney sonuçları Tablo 3.24 ve Tablo 3.25 da sunulmaktadır. Bentonit kili ile modifiye olarak sıkıştırıldıktan sonra kırılan numunelere ait deney sonuçları Tablo 3.22 ve tablo 23’ de, standart olarak sıkıştırıldıktan sonra kırılan numunelere ait deney sonuçları 3.25 ve tablo 26 da verilmektedir. Tablolarda sunulan serbest basınç deneyi sayısı 696 adettir. Toplamda yapılan serbest basınç deneyi sayısı 800 adet civarındadır. Şekil 3.49, Şekil 3.50, Şekil 3.51 ve Şekil 3.52 de elde edilen deney sonuçlar grafik halinde sunulmaktadır.

Tablo 3.20: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (uzunçiftlik-çeşme suyu)

| qu (mod.) (kPa) | | 0 Gün | 1 Gün | 7 Gün | 28 Gün |
|-----------------|-----|-------|-------|-------|--------|
| 0L0BOSUT | I | 279 | 285 | 293 | 310 |
| | II | 275 | 284 | 286 | 318 |
| | III | 274 | 295 | 288 | 310 |
| 0L3,33BOSUT | I | 708 | 750 | 918 | 982 |
| | II | 697 | 748 | 928 | 993 |
| | III | 710 | 756 | 924 | 994 |
| 5L0BOSUT | I | 622 | 1161 | 1655 | 2761 |
| | II | 629 | 1229 | 1576 | 2767 |
| | III | 609 | 1140 | 1499 | 2883 |
| 4L2,66BOSUT | I | 578 | 1208 | 1694 | 2660 |
| | II | 573 | 1282 | 1667 | 2429 |
| | III | 565 | 1210 | 1683 | 2626 |
| 4L6BOSUT | I | 758 | 987 | 1552 | 2313 |
| | II | 725 | 987 | 1570 | 2340 |
| | III | 757 | 996 | 1564 | 2303 |
| 5L3,33BOSUT | I | 1371 | 1489 | 2589 | 4018 |
| | II | 1285 | 1560 | 2417 | 4110 |
| | III | 1367 | 1508 | 2351 | 4059 |
| 5L7,5BOSUT | I | 1579 | 2311 | 2981 | 2917 |
| | II | 1607 | 2231 | 2579 | 2944 |
| | III | 1580 | 2271 | 2595 | 2981 |

Uzunçiftlik kili, çeşme suyu ve modifiye sıkıştırma ile hazırlanan karışımlara ait serbest basınç değerleri Tablo 3.20 ve grafik 3.41 de görülmektedir. En yüksek serbest basınç değerini veren karışım 28 gün sonunda 4000 kPa civarlarında bir serbest basınç mukavemetine sahip olan 5L3.33BOSUT karışımıdır.

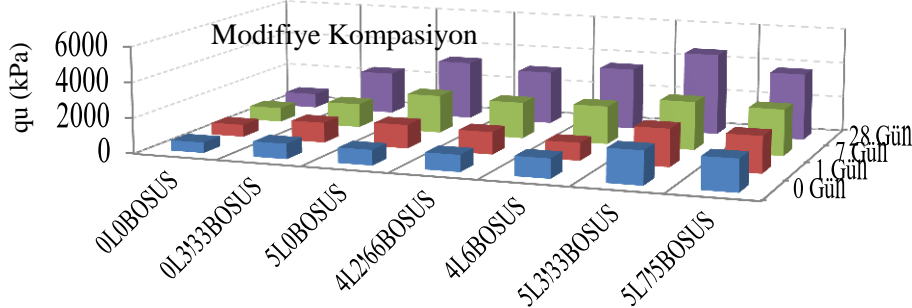


Şekil 3.41: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (uzunçiftlik-çeşme suyu)

Tablo 3.21: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (uzunçiftlik-deniz suyu)

| q_u (mod.) (kPa) | | 0 Gün | 1 Gün | 7 Gün | 28 Gün |
|--------------------|-----|-------|-------|-------|--------|
| 0L0BOSUS | I | 591 | 693 | 813 | 828 |
| | II | 609 | 695 | 817 | 831 |
| | III | 623 | 704 | 818 | 835 |
| 0L3,33BOSUS | I | 863 | 1141 | 1356 | 2394 |
| | II | 868 | 1144 | 1356 | 2381 |
| | III | 862 | 1148 | 1351 | 2359 |
| 5L0BOSUS | I | 865 | 1339 | 2153 | 3312 |
| | II | 859 | 1351 | 2161 | 3214 |
| | III | 857 | 1351 | 2134 | 3294 |
| 4L2,66BOSUS | I | 943 | 1263 | 2061 | 3025 |
| | II | 956 | 1250 | 2050 | 3011 |
| | III | 961 | 1257 | 2076 | 3025 |
| 4L6BOSUS | I | 1099 | 997 | 2156 | 3488 |
| | II | 1167 | 1026 | 2290 | 3410 |
| | III | 1111 | 967 | 2179 | 3462 |
| 5L3,33BOSUS | I | 1881 | 2115 | 2722 | 4626 |
| | II | 1891 | 2122 | 2728 | 4595 |
| | III | 1877 | 2121 | 2789 | 4674 |
| 5L7,5BOSUS | I | 1798 | 2053 | 2609 | 3773 |
| | II | 1806 | 2062 | 2569 | 3741 |
| | III | 1793 | 2212 | 2675 | 3819 |

Uzunçiftlik kili, çeşme suyu ve modifiye sıkıştırma ile hazırlanan karışımlara ait serbest basınç değerleri Tablo 3.21 ve Şekil 3.42 de görülmektedir. En yüksek serbest basınç değerini veren karışım 28 gün sonunda 4600 kPa civarlarında bir serbest basınç mukavemetine sahip olan 5L3.33BOSUS karışımıdır.

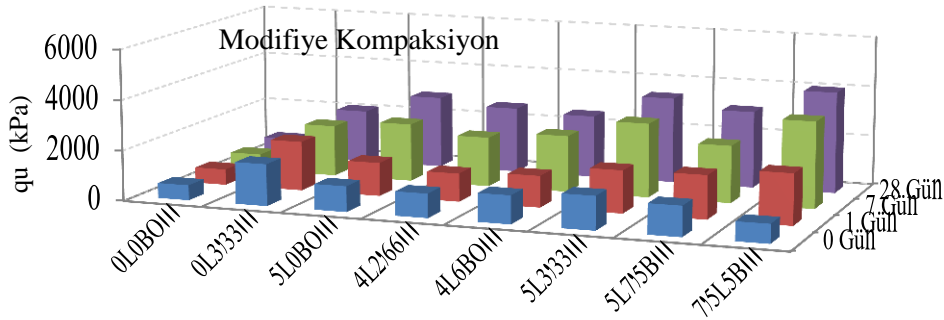


Şekil 3.42: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (uzunçiftlik-deniz suyu)

Tablo 3.22: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (bentonit-çeşme suyu)

| q_u (mod.) (kPa) | | 0 Gün | 1 Gün | 7 Gün | 28 Gün |
|--------------------|-----|-------|-------|-------|--------|
| 0L0BOSBT | I | 600 | 625 | 654 | 735 |
| | II | 642 | 647 | 677 | 734 |
| | III | 636 | 637 | 636 | 743 |
| 0L3,33BOSBT | I | 1656 | 1963 | 2041 | 2116 |
| | II | 1625 | 1846 | 2038 | 2134 |
| | III | 1639 | 1969 | 2070 | 2107 |
| 5L0BOSBT | I | 1012 | 1325 | 2316 | 2879 |
| | II | 1010 | 1285 | 2284 | 2858 |
| | III | 999 | 1298 | 2369 | 2642 |
| 4L2,66BOSBT | I | 954 | 1119 | 1978 | 2625 |
| | II | 930 | 1145 | 1970 | 2548 |
| | III | 952 | 1125 | 1996 | 2610 |
| 4L6BOSBT | I | 1117 | 1251 | 2247 | 2495 |
| | II | 1094 | 1264 | 2313 | 2418 |
| | III | 1099 | 1225 | 2291 | 2437 |
| 5L3,33BOSBT | I | 1330 | 1689 | 2949 | 3425 |
| | II | 1278 | 1745 | 2908 | 3341 |
| | III | 1313 | 1718 | 3040 | 3410 |
| 5L7,5BOSBT | I | 1192 | 1727 | 2277 | 3070 |
| | II | 1198 | 1766 | 2232 | 3017 |
| | III | 1177 | 1701 | 2258 | 3030 |
| 7,5L5BOSBT | I | 751 | 2017 | 3436 | 4043 |
| | II | 735 | 2046 | 3513 | 4131 |
| | III | 769 | 2035 | 3357 | 4070 |

Bentonit kili, çeşme suyu ve modifiye sıkıştırma ile hazırlanan karışımlara ait serbest basınç değerleri Tablo 3.22 ve Şekil 3.43 de görülmektedir. En yüksek serbest basınç değerini veren karışım 28 gün sonunda 4000 kPa civarlarında bir serbest basınç mukavemetine sahip olan 7.5L5BOSBT karışımıdır.

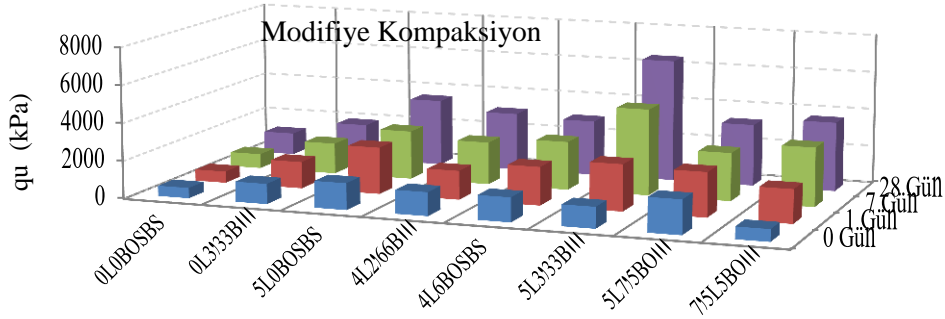


Şekil 3.43: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (bentonit-çeşme suyu)

Tablo 3.23: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (bentonit-deniz suyu)

| q_u (mod.) (kPa) | | 0 Gün | 1 Gün | 7 Gün | 28 Gün |
|--------------------|-----|-------|-------|-------|--------|
| 0L0BOSBS | I | 551 | 611 | 777 | 1184 |
| | II | 546 | 613 | 774 | 1155 |
| | III | 540 | 606 | 775 | 1190 |
| 0L3,33BOSBS | I | 1069 | 1421 | 1647 | 1930 |
| | II | 1054 | 1448 | 1616 | 1916 |
| | III | 1057 | 1431 | 1595 | 1908 |
| 5L0BOSBS | I | 1408 | 2480 | 2591 | 3555 |
| | II | 1420 | 2494 | 2739 | 3489 |
| | III | 1390 | 2552 | 2577 | 3529 |
| 4L2,66BOSBS | I | 1244 | 1534 | 2264 | 3088 |
| | II | 1267 | 1539 | 2233 | 3072 |
| | III | 1250 | 1531 | 2251 | 3082 |
| 4L6BOSBS | I | 1287 | 2034 | 2574 | 2941 |
| | II | 1279 | 1983 | 2626 | 2954 |
| | III | 1304 | 2009 | 2613 | 2888 |
| 5L3,33BOSBS | I | 1118 | 2468 | 4579 | 6491 |
| | II | 1128 | 2231 | 4258 | 6294 |
| | III | 1166 | 2307 | 4362 | 6370 |
| 5L7,5BOSBS | I | 1804 | 2357 | 2549 | 3285 |
| | II | 1819 | 2352 | 2684 | 3225 |
| | III | 1812 | 2374 | 2652 | 3304 |
| 7,5L5BOSBS | I | 641 | 1785 | 3120 | 3676 |
| | II | 654 | 1780 | 3028 | 3605 |
| | III | 636 | 1798 | 3160 | 3568 |

Bentonit kili, deniz suyu ile hazırlanan karışımlara ait serbest basınç değerleri Tablo 3.23 ve Şekil 3.44 de görülmektedir. En yüksek serbest basınç değerini veren karışım 6000 kPa civarlarında bir serbest basınç mukavemeti ile 7.5L5BOSBT karışımıdır.

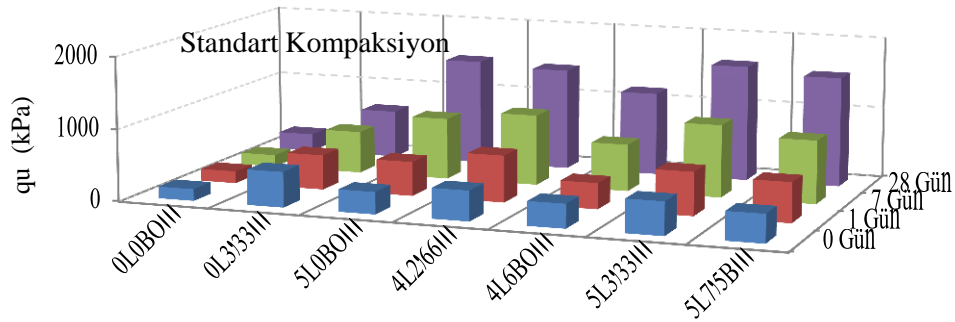


Şekil 3.44: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (bentonit-deniz suyu)

Tablo 3.24: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (uzunçiftlik-çeşme suyu)

| q_u (st.) (kPa) | | 0 Gün | 1 Gün | 7 Gün | 28 Gün |
|-------------------|-----|-------|-------|-------|--------|
| 0L0BOSUT | I | 164 | 169 | 167 | 250 |
| | II | 153 | 159 | 162 | 240 |
| | III | 157 | 158 | 167 | 238 |
| 0L3,33BOSUT | I | 491 | 484 | 589 | 670 |
| | II | 498 | 479 | 594 | 671 |
| | III | 499 | 478 | 591 | 676 |
| 5L0BOSUT | I | 307 | 476 | 858 | 1484 |
| | II | 304 | 502 | 851 | 1460 |
| | III | 302 | 489 | 840 | 1486 |
| 4L2,66BOSUT | I | 417 | 651 | 986 | 1426 |
| | II | 420 | 659 | 962 | 1489 |
| | III | 415 | 645 | 995 | 1418 |
| 4L6BOSUT | I | 334 | 360 | 654 | 1162 |
| | II | 338 | 356 | 657 | 1125 |
| | III | 347 | 370 | 652 | 1146 |
| 5L3,33BOSUT | I | 459 | 602 | 1010 | 1623 |
| | II | 466 | 609 | 992 | 1620 |
| | III | 457 | 600 | 1024 | 1609 |
| 5L7,5BOSUT | I | 391 | 553 | 879 | 1533 |
| | II | 388 | 553 | 863 | 1576 |
| | III | 392 | 548 | 869 | 1510 |

Uzunçiftlik kili, çeşme suyu ve standart sıkıştırma ile hazırlanmış karışımlara ait serbest basınç değerleri Tablo 3.24 ve Şekil 3.45 de görülmektedir. En yüksek serbest basınç değerini veren karışım 28 gün sonunda 1600 kPa civarlarında bir serbest basınç mukavemetine sahip olan 5L3.33BOSUT karışımıdır.

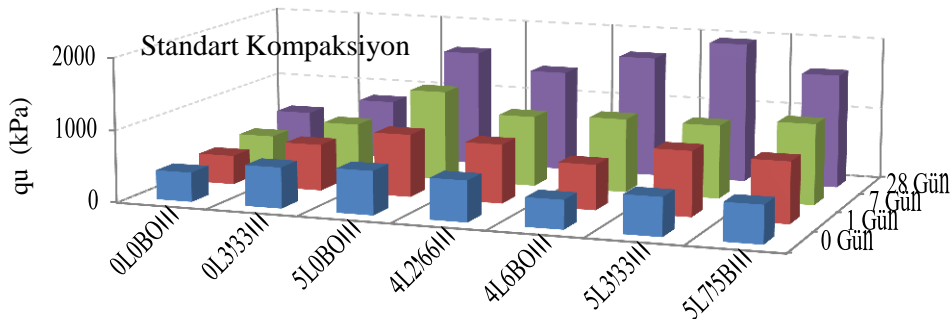


Şekil 3.45: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (uzunçiftlik-çeşme suyu)

Tablo 3.25: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (uzunçiftlik-deniz suyu)

| q_u (st.) (kPa) | | 0 Gün | 1 Gün | 7 Gün | 28 Gün |
|-------------------|-----|-------|-------|-------|--------|
| 0L0BOSUS | I | 407 | 405 | 459 | 589 |
| | II | 410 | 408 | 473 | 536 |
| | III | 414 | 410 | 406 | 589 |
| 0L3,33BOSUS | I | 565 | 646 | 712 | 828 |
| | II | 568 | 640 | 702 | 822 |
| | III | 559 | 640 | 707 | 816 |
| 5L0BOSUS | I | 606 | 869 | 1257 | 1623 |
| | II | 606 | 861 | 1251 | 1639 |
| | III | 601 | 856 | 1238 | 1618 |
| 4L2,66BOSUS | I | 566 | 817 | 981 | 1409 |
| | II | 556 | 790 | 999 | 1404 |
| | III | 553 | 803 | 991 | 1401 |
| 4L6BOSUS | I | 399 | 624 | 1025 | 1689 |
| | II | 393 | 637 | 1084 | 1644 |
| | III | 395 | 632 | 1057 | 1660 |
| 5L3,33BOSUS | I | 530 | 898 | 1017 | 1956 |
| | II | 527 | 904 | 1015 | 1919 |
| | III | 537 | 893 | 1004 | 1930 |
| 5L7,5BOSUS | I | 521 | 843 | 1120 | 1586 |
| | II | 541 | 853 | 1133 | 1552 |
| | III | 531 | 840 | 1128 | 1575 |

Uzunçiftlik kili, deniz suyu ve standart sıkıştırma ile hazırlanmış karışımlara ait serbest basınç değerleri Tablo 3.25 ve Şekil 3.46 de görülmektedir. En yüksek serbest basınç değerini veren karışım 28 gün sonunda 1900 kPa civarlarında bir serbest basınç mukavemetine sahip olan 5L3.33BOSUT karışımıdır.

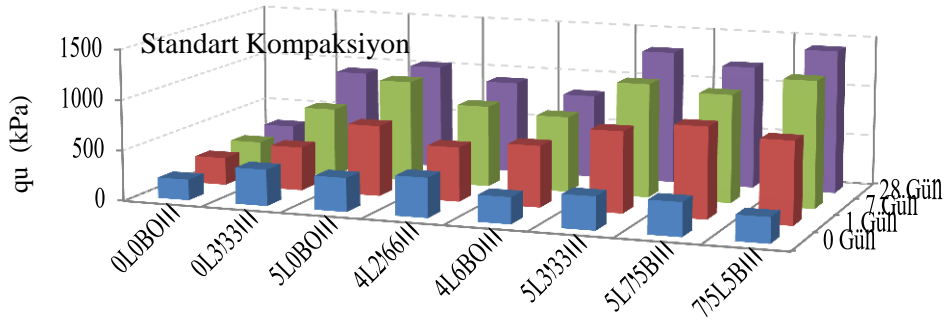


Şekil 3.46: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (uzunçiftlik-deniz suyu)

Tablo 3.26: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (bentonit-çeşme suyu)

| q_u (st.) (kPa) | | 0 Gün | 1 Gün | 7 Gün | 28 Gün |
|-------------------|-----|-------|-------|-------|--------|
| 0L0BOSBT | I | 206 | 272 | 291 | 319 |
| | II | 191 | 280 | 297 | 304 |
| | III | 208 | 269 | 285 | 305 |
| 0L3,33BOSBT | I | 359 | 433 | 683 | 931 |
| | II | 354 | 423 | 668 | 972 |
| | III | 346 | 418 | 672 | 943 |
| 5L0BOSBT | I | 334 | 700 | 1012 | 1040 |
| | II | 339 | 722 | 1005 | 1052 |
| | III | 337 | 735 | 1024 | 1067 |
| 4L2,66BOSBT | I | 392 | 538 | 809 | 920 |
| | II | 394 | 585 | 811 | 910 |
| | III | 392 | 564 | 811 | 938 |
| 4L6BOSBT | I | 262 | 608 | 751 | 833 |
| | II | 268 | 569 | 743 | 846 |
| | III | 273 | 585 | 730 | 838 |
| 5L3,33BOSBT | I | 328 | 801 | 1129 | 1322 |
| | II | 338 | 790 | 1124 | 1301 |
| | III | 329 | 817 | 1147 | 1316 |
| 5L7,5BOSBT | I | 331 | 898 | 1070 | 1216 |
| | II | 324 | 859 | 1057 | 1189 |
| | III | 324 | 864 | 1105 | 1234 |
| 7,5L5BOSBT | I | 250 | 814 | 1254 | 1422 |
| | II | 245 | 793 | 1238 | 1401 |
| | III | 250 | 819 | 1270 | 1462 |

Bentonit kili, çeşme suyu ve standart sıkıştırma ile hazırlanmış karışımlara ait serbest basınç değerleri Tablo 3.26 ve Şekil 3.47 de görülmektedir. En yüksek serbest basınç değerini veren karışım 28 gün sonunda 1400 kPa civarlarında bir serbest basınç mukavemetine sahip olan 7.5L5BOSBT karışımıdır.

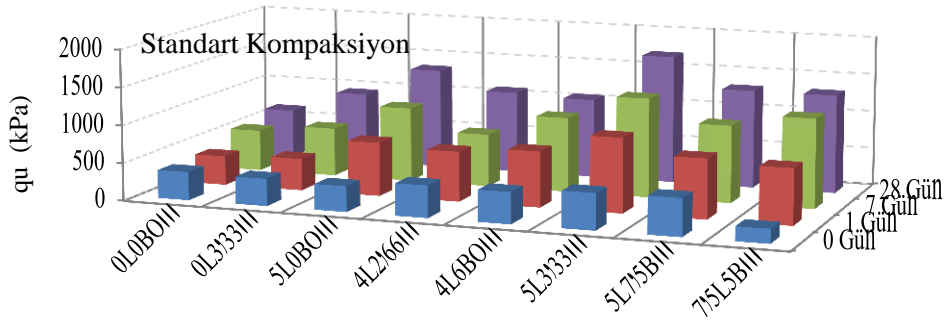


Şekil 3.47: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (bentonit-çeşme suyu)

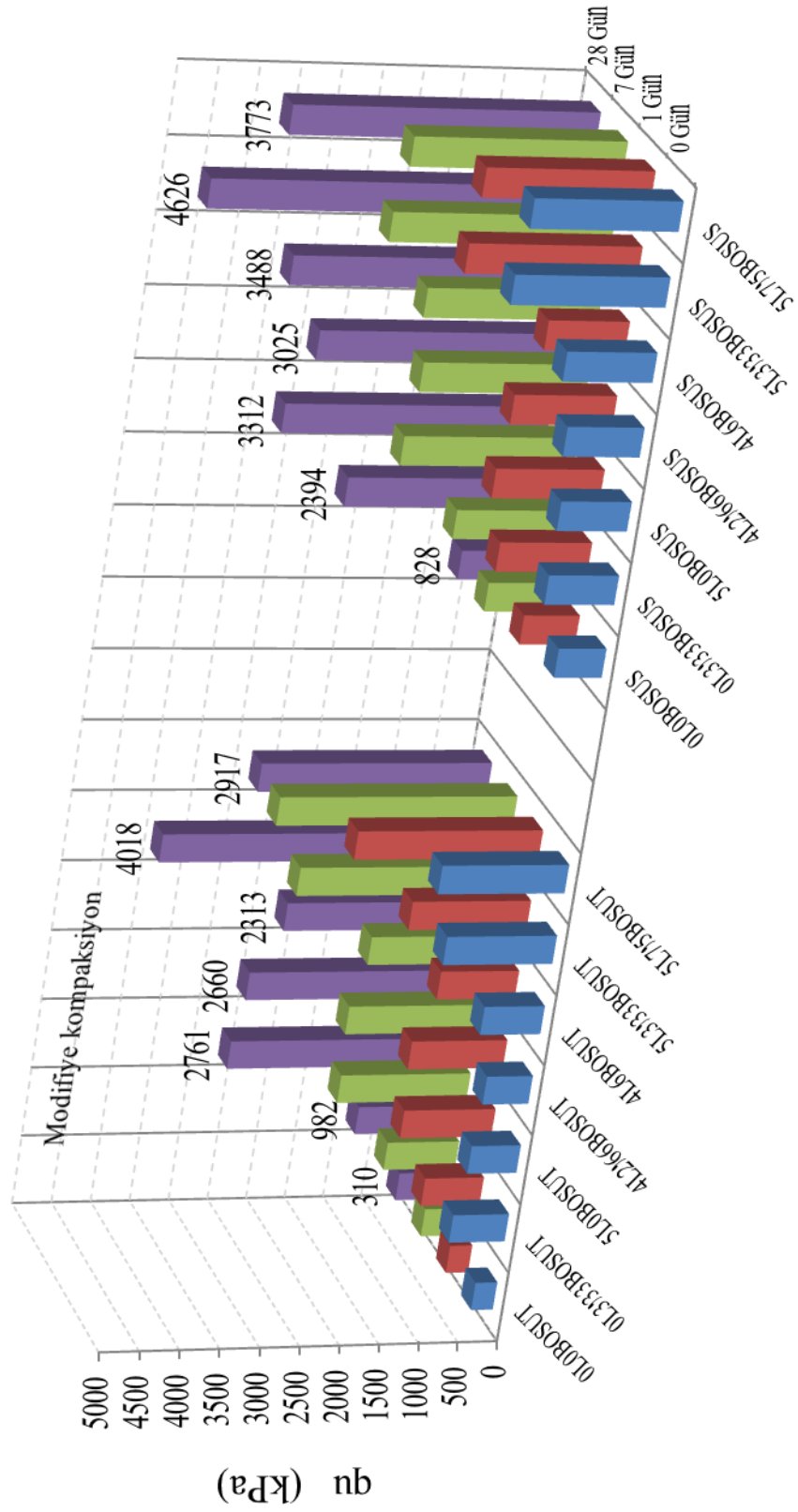
Tablo 3.27: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (bentonit-deniz suyu)

| q_u (st.) (kPa) | | 0 Gün | 1 Gün | 7 Gün | 28 Gün |
|-------------------|-----|-------|-------|-------|--------|
| 0L0BOSBS | I | 374 | 387 | 549 | 650 |
| | II | 377 | 396 | 567 | 653 |
| | III | 384 | 409 | 529 | 661 |
| 0L3,33BOSBS | I | 359 | 423 | 645 | 945 |
| | II | 366 | 457 | 659 | 953 |
| | III | 354 | 455 | 653 | 924 |
| 5L0BOSBS | I | 337 | 711 | 990 | 1339 |
| | II | 344 | 712 | 998 | 1313 |
| | III | 358 | 706 | 984 | 1323 |
| 4L2,66BOSBS | I | 424 | 662 | 698 | 1093 |
| | II | 395 | 648 | 696 | 1107 |
| | III | 398 | 656 | 706 | 1120 |
| 4L6BOSBS | I | 415 | 735 | 989 | 1057 |
| | II | 399 | 730 | 995 | 1052 |
| | III | 418 | 725 | 981 | 1056 |
| 5L3,33BOSBS | I | 478 | 985 | 1314 | 1705 |
| | II | 483 | 1005 | 1320 | 1718 |
| | III | 481 | 998 | 1317 | 1692 |
| 5L7,5BOSBS | I | 492 | 788 | 1022 | 1308 |
| | II | 434 | 793 | 1001 | 1295 |
| | III | 466 | 753 | 1014 | 1314 |
| 7,5L5BOSBS | I | 188 | 738 | 1182 | 1309 |
| | II | 173 | 743 | 1126 | 1322 |
| | III | 206 | 745 | 1129 | 1334 |

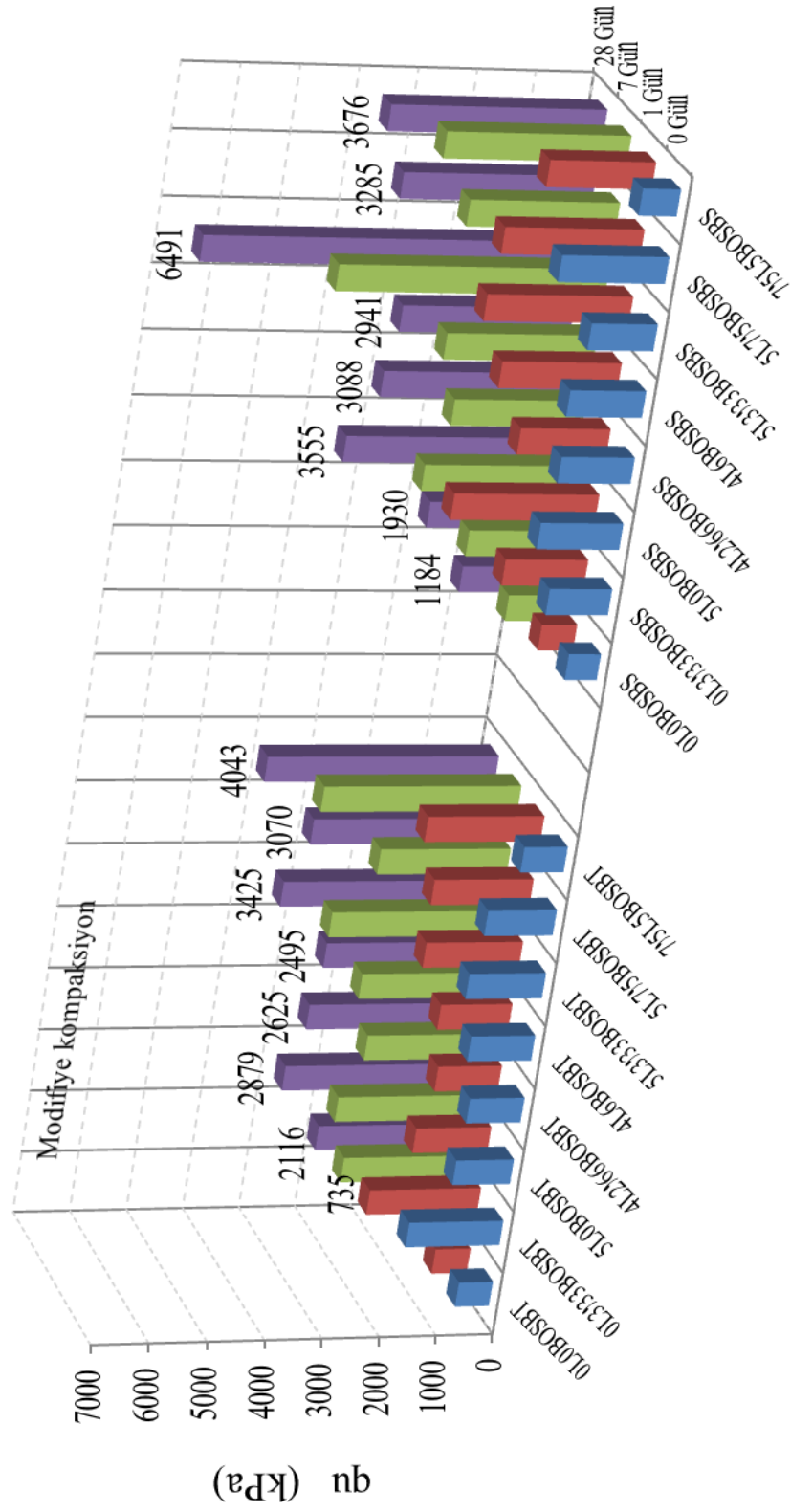
Bentonit kili, çeşme suyu ve standart sıkıştırma ile hazırlanmış karışımlara ait serbest basınç değerleri Tablo 3.27 ve Şekil 3.48 de görülmektedir. En yüksek serbest basınç değerini veren karışım 28 gün sonunda 1700 kPa civarlarında bir serbest basınç mukavemetine sahip olan 5L3.33BOSBS karışımıdır.



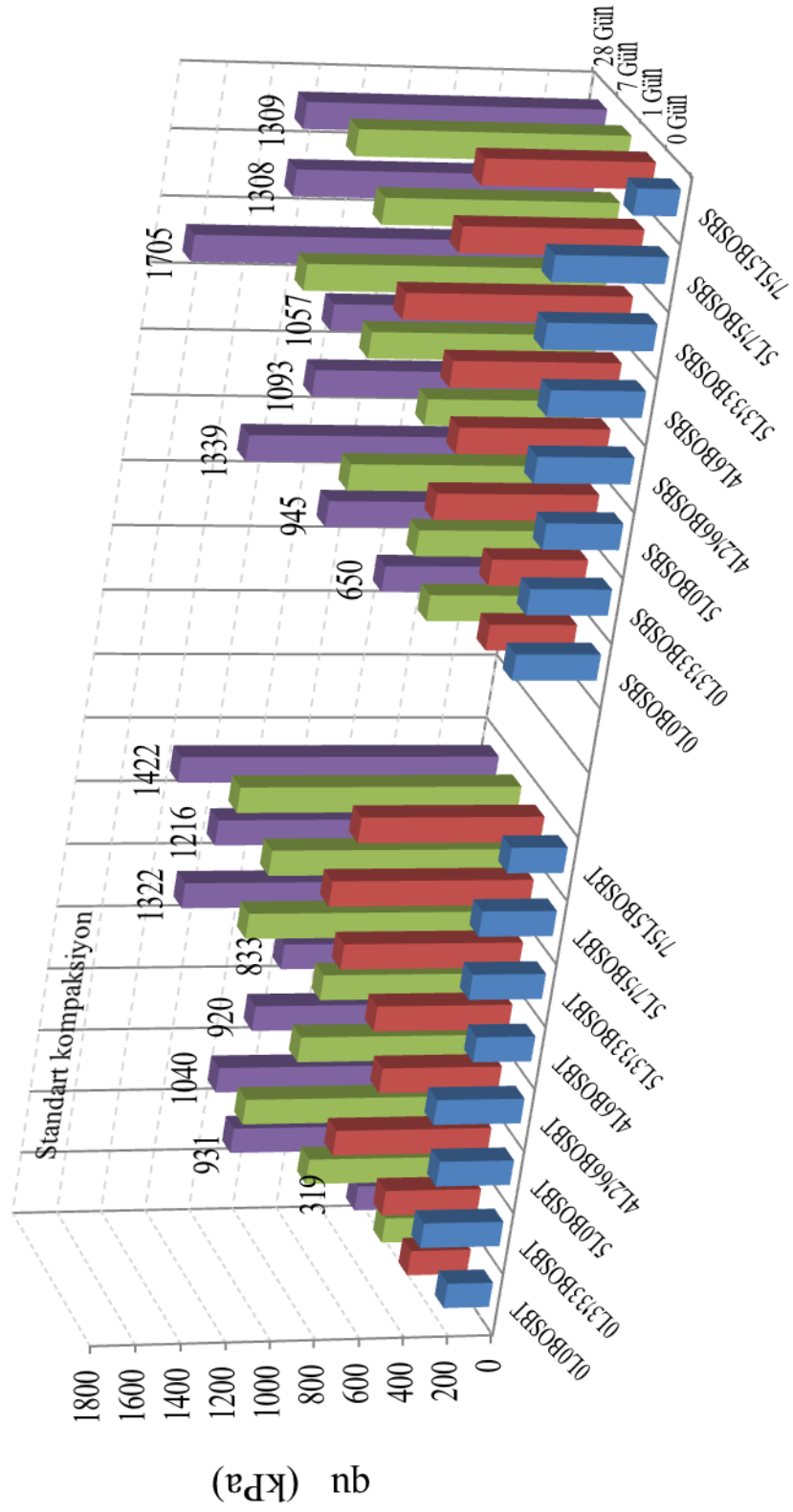
Şekil 3.48: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (bentonit-deniz suyu)



Şekil 3.49: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (Uzunçiftlik)



Şekil 3.50: Modifiye kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerinin serbest basınç değerleri (Bentonit)



Şekil 3.52: Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan numunelerin serbest basınç değerleri (Bentonit)

3.3.7. Kaliforniya taşıma oranı (CBR)

Çalışmadaki CBR deneyleri ASTM D1883 – 07e2 ve TS 1900 standardına uygun olarak yapılmıştır. Bu deney kesit alanı $19,35 \text{ cm}^2$ olan silindir pistonun $1,27 \text{ mm/dk.}$ hızla zemine itilmesiyle bulunan yük penetrasyon bağıntısını kullanarak taşıma oranının bulunması ile ilgilidir. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) olarak bilinen bu deney boyutu 20 mm 'den küçük malzeme için elverişlidir.



Şekil 3.53: CBR deneyinde kullanılan kalıplar

Deney karayolu, demiryolu ve havaalanı taban malzemesinin sıkıştırılmış örneklerinde kullanılır. CBR, zeminin içerisine $1,27 \text{ mm/dk.}$ hızla batırılan penetrasyon pistonuna karşı gösterilen direncin, aynı penetrasyon derinliği için standart bir kırma taş numunenin gösterdiği dirence oranı olarak bilinmektedir. CBR dayanımı, önceden belirlenen bir su içeriğinde, belirli bir enerjiye göre sıkıştırılan zeminin üzerine yapılır (Aytekin, 2004).

CBR deneyinde kullanılan kalıplar Şekil 3.53 de görülmektedir. CBR kalıplarının, iç çapı 152 mm , iç yüksekliği 127 mm olan, kolayca takılıp çıkarılabilen ve su geçişine izin veren bir taban plakası ve üst plakası ile 5 cm yüksekliğinde yakası olan, silindirik kalıplardır. Bu çalışmada modifiye kompaksiyon deneyinde bulunan optimum su muhtevasında karıştırılan numuneler bu kalıplar içerisinde şekilde sıkıştırılmıştır.



Şekil 3.54: Suda bekletilen CBR numunesi

Karışımlar 24 gün desikatörde muhafaza edilmektedir. Alt ve üst tabanlarına su giriş çıkışına izin veren ancak zemin giriş çıkışına izin vermeyen filtre kağıdı yerleştirilen numuneler, 24. gün Şekil 3.54 de görüldüğü gibi suya konulmaktadır. Standart gereği 96 saat suda bekletilen numunelerin aynı zamanda şişme miktarları da ölçülmektedir. 28 gün sonra Şekil 3.55 de görülen CBR deney cihazı ile CBR değerleri tespit edilmiştir.

Uzunçiftlik kili ve çeşme suyu ile yapılan karışımların 28 günlük CBR değerleri Tablo 3.28 de, uzunçiftlik kili ve deniz suyu ile yapılan karışımların 28 günlük CBR sonuçları Tablo 3.29 da görülmektedir. Katkısız olarak 28 günlük CBR değeri 6 olan uzunçiftlik kili %3,33 BOS ile karıştırıldığında 3 kat artış göstererek 21 değerine ulaşmaktadır. %5 kireç ile karıştırıldığında yaklaşık 20 kat artmakta ve 117 değerine ulaşmaktadır. En yüksek CBR değerini ise 135 ile %5 kireç ve %3,33 BOS ile yapılan karışım vermiştir. Deniz suyu çeşme suyuna göre biraz daha düşük artışlar göstermektedir.

Tablo 3.28: Uzunçiftlik çeşme suyu numunelerinin 28 günlük ıslak CBR değerleri

| Karışımlar | CBR Değerleri (%) |
|-------------|-------------------|
| 0L0BOSUT | 6 |
| 0L3,33BOSUT | 21 |
| 4L2,66BOSUT | 110 |
| 4L6BOSUT | 106 |
| 5L0BOSUT | 117 |
| 5L3,33BOSUT | 135 |
| 5L7,5BOSUT | 120 |

CBR değerleri bir oran ifadesidir ve % değerlerdir. Ancak pratikte % olarak söylenmez. Küsüratsız tam sayı olarak doğrudan oranın kendisi ifade edilir (Tunç, 2001). Bu çalışmada da değerler yüzde olarak ifade edilmemiştir. Tam sayı olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.55: CBR deney cihazı

Tablo 3.29: Uzunçiftlik deniz suyu numunelerinin 28 günlük ıslak CBR değerleri

| Karışımlar | CBR Değerleri (%) |
|-------------|-------------------|
| 0L0BOSUS | 32 |
| 0L3,33BOSUS | 18 |
| 4L2,66BOSUS | 48 |
| 4L6BOSUS | 84 |
| 5L0BOSUS | 55 |
| 5L3,33BOSUS | 114 |
| 5L7,5BOSUS | 105 |

Bentonit kili ve çeşme suyu ile yapılan karışımların 28 günlük CBR değerleri Tablo 3.30 de, bentonit kili ve deniz suyu ile yapılan karışımların 28 günlük CBR değerleri Tablo 3.31 de görülmektedir. Katkısız olarak CBR değeri 4 olan bentonit kili %3,33 BOS ile karıştırıldığında 28 gün sonunda %50 oranında artış göstererek 6 değerine ulaşmaktadır. %5 kireç ile karıştırıldığında yaklaşık 8 kat artmakta ve 31 değerine ulaşmaktadır. En yüksek CBR değerini ise 77 ile % 7,5 kireç ve %5 BOS ile yapılan karışım vermiştir. Deniz suyu çeşme suyuna göre farklı artışlar göstermektedir.

Tablo 3.30: Bentonit çeşme suyu numunelerinin 28 günlük ıslak CBR değerleri

| Karışımlar | CBR Değerleri (%) |
|-------------|-------------------|
| 0L0BOSBT | 4 |
| 0L3,33BOSBT | 6 |
| 4L2,66BOSBT | 29 |
| 4L6BOSBT | 24 |
| 5L0BOSBT | 31 |
| 5L7,5BOSBT | 51 |
| 5L3,33BOSBT | 72 |
| 7,5L5BOSBT | 77 |

Tablo 3.31: Bentonit çeşme suyu numunelerinin ıslak 28 günlük CBR değerleri

| Karışımlar | CBR Değerleri (%) |
|-------------|-------------------|
| 0L0BOSBS | 10 |
| 0L3,33BOSBS | 21 |
| 4L2,66BOSBS | 19 |
| 4L6BOSBS | 18 |
| 5L0BOSBS | 20 |
| 5L7,5BOSBS | 71 |
| 5L3,3BOSBS | 75 |
| 7,5L5BOSBS | 61 |

3.3.8. pH ölçümleri

Bu tezde, ASTM 6276 standardına göre asitlik denge ölçümü yapılmıştır. ASTM 6276 standardı söndürülmüş ve sönmemiş kireç, yüksek kalsiyum, magnezyum veya dolomitik içeren kireçlerin zemin stabilizasyonunda kullanılması ile ilgilidir.

Standartta kireç stabilizasyonunda kullanılacak kirecin kimyasal kompozisyonu ile ilgili olarak; kalsiyum ve magnezyum oksit miktarının (uçucu olmayan bazda) minimum % 90, karbondioksit maksimum %5, tabii su muhtevasının ise maksimum %2.0 olması gerektiği belirtilmiştir. Bizim kullandığımız kireçteki değerler bu şartları sağlamaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalarda, ilgili standartta bahsedildiği şekilde ana malzeme olarak kullanılan bentonit kili ve Uzunçiftlik kili, % 2, % 4 ,% 6 oranlarında kireç ile karıştırılmıştır. Ayrıca Uzunçiftlik kili ve bentonit kili kireç karıştırılmadan (%0) da deneye tabii tutulmuştur. Karışımlar plastik kaplarda 100 ml. karbondioksitsiz damıtılmış (saf su) ile karıştırılmıştır. Karıştırma işleminde de plastik çubuklar kullanılmıştır. 25⁰C de muhafaza edilen numuneler, bir saat bekletilmiştir. Beklenen bir saat içerisinde 10 dakika ara ile 30'ar saniye süre ile karıştırılmıştır. 1 saat sonunda pH okumaları yapılmıştır.

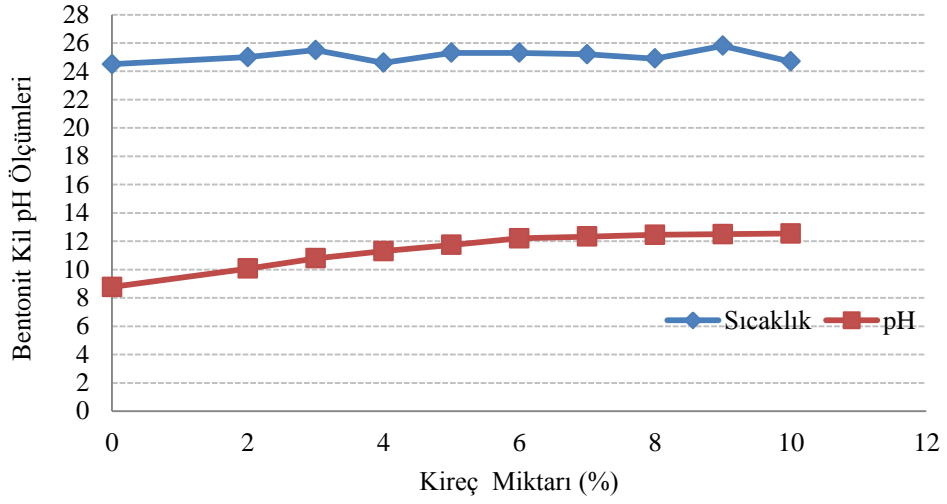
Yapılan okuma sonuçlarında pH değerinin 12,4 e ulaşmaması nedeni ile % 8 ve % 10 oranlardaki karışımlar da hazırlanmış ve deney yinelenmiştir. Deney esnasında standartta belirtildiği üzere 2 gr. kireç de 100 ml. saf su ile karıştırılarak deneye tabii tutulmuştur.

Bentonit kilinin pH değeri 8,77 ve Uzunçiftlik kilinin pH değeri ise 8,30 dur. Kireç 12.4 pH değerine sahiptir. Standartta en uygun kireç miktarının 12.4 lük pH değerini veren karışım olduğunu söylemektedir. Uzunçiftlik kilinde bu değer % 5 oranında kireç ile karıştırıldığında elde edilmektedir. Bentonit kilinde ise % 7 - 8 oranları arasında pH değeri 12.4 olmaktadır.

Tablo 3.32: Bentonit kili ve uzunçiftlik kilinin pH deneyi sonuçları

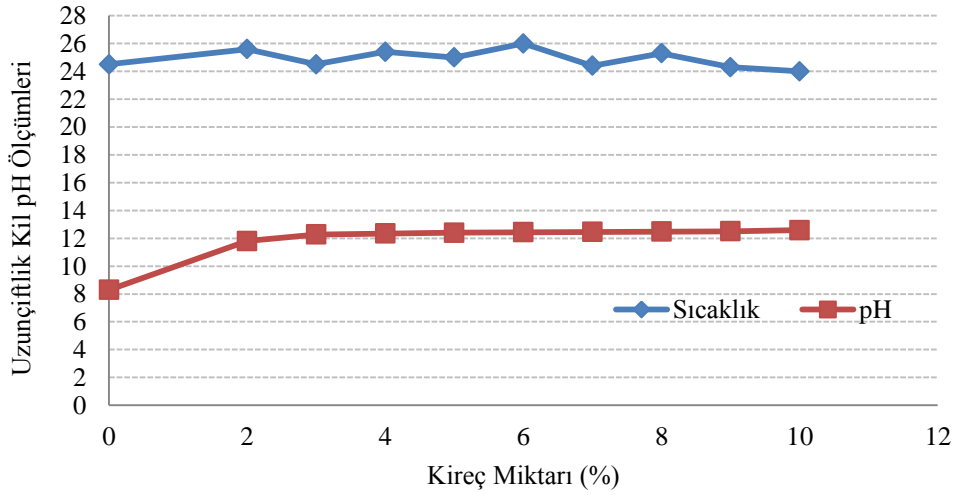
| Kireç Miktarı (%) | Bentonit Kili | | Uzunçiftlik Kili | |
|-------------------|---------------|-------|------------------|-------|
| | Sıcaklık (°C) | pH | Sıcaklık (°C) | pH |
| 0 | 24,5 | 8,77 | 24,5 | 8,30 |
| 2 | 25,0 | 10,07 | 25,6 | 11,8 |
| 3 | 25,5 | 10,79 | 24,5 | 12,27 |
| 4 | 24,6 | 11,30 | 25,4 | 12,34 |
| 5 | 25,3 | 11,74 | 25,4 | 12,40 |
| 6 | 25,3 | 12,20 | 25,7 | 12,44 |
| 7 | 25,2 | 12,33 | 24,4 | 12,46 |
| 8 | 24,9 | 12,45 | 25,3 | 12,48 |
| 9 | 25,8 | 12,50 | 24,3 | 12,51 |
| 10 | 24,7 | 12,55 | 24 | 12,59 |

pH ölçüm sonuçları Tablo 3.32 de verilmektedir. Değerlerin grafik olarak gösterimi bentonit kili için Şekil 3.56, uzunçiftlik kili için ve 3.57 de verilmiştir. Şekilde pH değerleri ile ölçümün yapıldığı andaki sıcaklık değerleri de verilmektedir. Deney esnasında karışımlarının Sıcaklık 25°C civarında tutulmaya çalışılmıştır. Şekilde de görüldüğü gibi kireç konsantrasyonu yükseldikçe pH değerleri artmaktadır.



Şekil 3.56: Bentonit kili pH değerleri

Üzerinde çalıştığımız karışımlarda sadece kireç kullanılmamıştır. Karışımlarda kireç, BOS ve kireç + BOS kullanılmıştır. Standart sadece kireç için verilmiştir. Ancak sonuçların nasıl etkilendiğinin görülmesi açısından aynı standardı kireç ve BOS lu karışımlar için de aynı şartlar altında pH ölçüm deneyi yapılmıştır.



Şekil 3.57: Uzunçiftlik kili pH değerleri

Tablo 3.33: Bentonit kili, kireç ve BOS karışımlarının pH değerleri

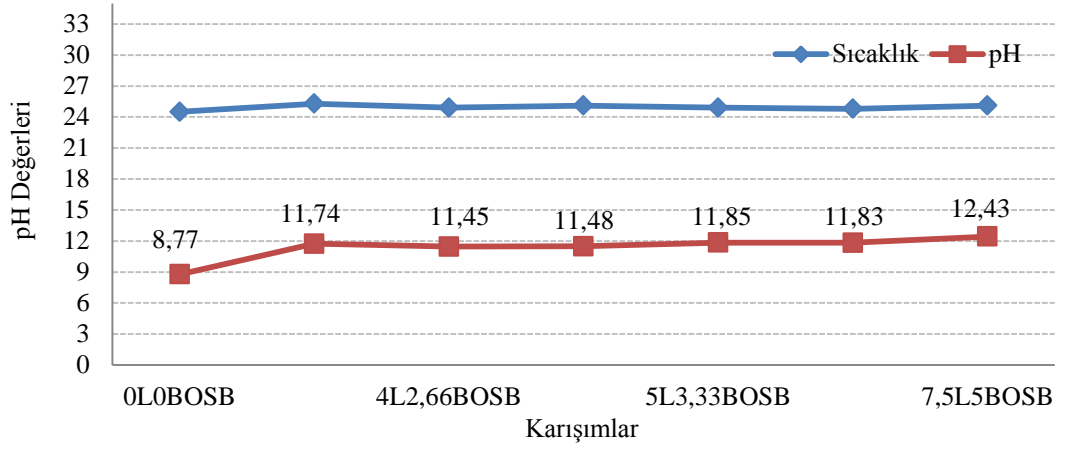
| Bentonit Kili | Sıcaklık (°C) | pH |
|---------------|---------------|-------|
| 0L0BOSB | 24,5 | 8,77 |
| 5L0BOSB | 25,3 | 11,74 |
| 4L2,66BOSB | 24,9 | 11,45 |
| 4L6BOSB | 25,1 | 11,33 |
| 5L3,33BOSB | 24,9 | 11,85 |
| 5L7,5BOSB | 24,8 | 11,83 |
| 7,5L5BOSB | 25,1 | 12,43 |

Deney sonuçları Tablo 3.33 de bentonit kili ilke ilgili karışımların, Tablo 3.34 de uzunçiftlik kili ilgili karışımların sonuçları verilmektedir. Karışımlar, standart gereği saf su ile yapıldığından deniz suyu ile olan örnekler listede bulunmamaktadır.

Tablo 3.34: Uzunçiftlik kili, kireç ve BOS karışımlarının pH değerleri

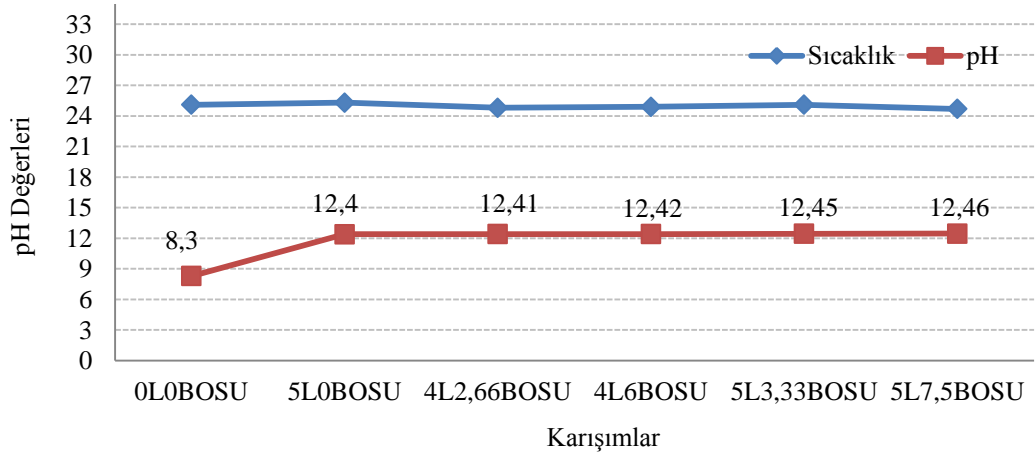
| Uzunçiftlik Kili | Sıcaklık (°C) | pH |
|------------------|---------------|-------|
| 0L0BOSU | 25,1 | 8,30 |
| 5L0BOSU | 25,3 | 12,40 |
| 4L2,66BOSU | 24,8 | 12,41 |
| 4L6BOSU | 24,9 | 12,42 |
| 5L3,33BOSU | 25,1 | 12,45 |
| 5L7,5BOSU | 24,7 | 12,46 |

Bentonit kili ve Uzunçiftlik kili ile hazırlanan karışımların pH değerleri ölçüm anında tespit edilen Sıcaklık dereceleri Şekil 3.58 ve 3.59 da birlikte verilmektedir. Karışımlarda %4, %5 ve bentonit kilinde ek olarak %7,5 oranlarında kireç kullanılmaktadır. BOS miktarları pH değerlerine çok fazla etki etmemekle birlikte küçük artışlar meydana getirmektedir.



Şekil 3.58: Bentonit kili hazırlanan numunelerin pH değerleri

Uzunçiftlik kilinin saf haldeki pH değeri 8,3, bentonit kilinin saf haldeki pH değeri ise 8,77 olarak görülmektedir. %5 kireç, bentonitin pH değerini 11,74 e de çıkarırken uzunçiftlik kilinde 12,4 e ulaşmaktadır.



Şekil 3.59: Uzunçiftlik kili hazırlanan numunelerin pH değerleri

3.3.9. Sismik ölçümler

Çalışmada hazırlanan karışımlar üzerinde sismik ölçümler yapılmıştır. Ölçümlerde Ultrasonik V-Meter III marka cihaz kullanılmıştır. Cihaz düşük ultrasonik frekans sinyalleri yaratmaktadır ve bir transformatörden diğer bir transformatöre giden frekansları ölçmektedir.

$$V_p=L/T \quad (3.1)$$

Test altındaki malzeme ile iletim yapıldıktan sonra, ultrasonik sinyal alıcı transformatör içinde bir elektrik sinyale dönüştürülmektedir. Sinyal hızı Denklem 3.1 ile hesaplanmaktadır. Burada V_p dalga hızı, L sinyal geçiş uzunluğu (numune boyu), T geçiş süresidir.



Şekil 3.60: Ultrasonik V-Meter III cihazı

Şekil 3.60 da gösterilen cihazda transducerlar numunenin altına ve üstüne yerleştirilmektedir. Tam orta noktadan düz dalga geçişi sağlamak için numunenin ve cihazın boyutlarına göre kartondan kalıplar hazırlanmıştır. Temas yüzeylerine gress yağı sürülmektedir.

Numuneye ait boy ve yoğunluk verileri cihaza girildikten sonra transducerin üzerinde bulunan yeşil düğmeye basarak dalga geçişi sağlandıktan sonra dalganın geçiş şekli ve büyüklüğü cihazın üzerindeki ekrandan okunmaktadır.

V-Meter MK III cihazı iletim transformatöründen alıcı transformatörüne doğru yol alan ultrasonik sinyal iletim zamanını doğrudan okumaktadır. Cihaz 6553.5 mili saniyeye kadarki iletim zamanlarını göstermektedir. Bunu 0.1 mikro saniyelik bir çözünürlük sağlamaktadır. Bu değer yaklaşık 80 fitlik bir beton kütlesi anlamına gelmektedir.

Tablo 3.35: Uzunçiftlik çeşme suyu ile hazırlanan karışımlarına ait P dalgası hızları

| V_p (m/sn) | 0 | 1 | 7 | 28 |
|--------------|------|------|------|------|
| 0L0BOSUT | 371 | 609 | 774 | 997 |
| 0L3,33BOSUT | 752 | 989 | 1151 | 1387 |
| 5L0BOSUT | 1584 | 1636 | 1671 | 1736 |
| 5L7,5BOSUT | 1339 | 1481 | 1728 | 1971 |
| 5L3,33BOSUT | 1602 | 1812 | 1895 | 1992 |

Uzunçiftlik çeşme suyu ile hazırlanan numunelere uygulanan deney sonuçlarına ait P dalga okumaları Tablo 3.35 de,. Uzunçiftlik çeşme suyu ile hazırlanan karışımlarının P dalga boylarına bağlı olarak hesaplanan E elastikiyet modülleri Tablo 3.36 da verilmektedir.

Tablo 3.36: Uzunçiftlik çeşme suyu ile hazırlanan karışımlarının Ed değerleri

| Ed (GPa) | 0 | 1 | 7 | 28 |
|-------------|------|------|------|------|
| 0L0BOSUT | 0,24 | 0,66 | 1,06 | 1,76 |
| 0L3,33BOSUT | 1,02 | 1,76 | 2,38 | 3,46 |
| 5L0BOSUT | 4,74 | 5,05 | 5,27 | 5,69 |
| 5L7,5BOSUT | 3,28 | 4,01 | 5,46 | 7,10 |
| 5L3,33BOSUT | 4,93 | 6,31 | 6,91 | 7,63 |

Deformasyon analizleri yapmak için gerilme ve birim deformasyon arasındaki ilişkilerin tanımlanmasında E Elastikiyet modülü kullanılır. Young modülü olarak da bilinir. Elastikiyet modülü malzemede bir birim deformasyon yaratmak için uygulanan gerilmedir.

$$E = \sigma/\varepsilon \quad (3.2)$$

Hook kanunu gerilme şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi Denklem 3.2 de gösterildiği tanımlamaktadır. Formülde:

E = Elastikiyet modülü

σ = Gerilme

ε = Deformasyon dur.

Hazırlanan numunelerin ortalama boy uzunlukları 11 cm. dir. Numuneler silindirik kesitlidir ve çapları 10,5 cm. dir. Okumalar esnasında her numunenin yoğunluğu ve boyu yüzde bir hassasiyet ile değerlendirilmiştir. Verileri cihaza kaydedilen numunelerden P dalgası geçirmek sureti ile dalga boyları ve bu boylar ile hesap edilen E (elastikiyet katsayıları) tespit edilmiştir. Poisson oranı 0,2 olarak alınmıştır.

Tablo 3.37: Uzunçiftlik deniz suyu ile hazırlanan karışımlarına ait P dalgası hızları

| V _P (m/sn) | 0 | 1 | 7 | 28 |
|-----------------------|------|------|------|------|
| 0L0BOSUS | 302 | 410 | 747 | 992 |
| 0L3,33BOSUS | 901 | 1135 | 1382 | 1636 |
| 5L0BOSUS | 1629 | 1660 | 1696 | 1766 |
| 5L7,5BOSUS | 1676 | 1740 | 1823 | 1880 |
| 5L3,33BOSUS | 1245 | 1532 | 1867 | 2097 |

Uzunçiftlik deniz suyu ile hazırlanan numunelere uygulanan deney sonuçlarına ait P dalga okumaları Tablo 3.37 de uzunçiftlik deniz suyu ile hazırlanan karışımlarının P dalga boylarına bağlı olarak hesaplanan E elastikiyet modülleri Tablo 3.38 de verilmektedir. V-Meter MK III cihazı ile elde edilen P dalga boylarının hızları ile E elastisite modülü hesaplanabilmektedir. Denklem 3.3 de verilen formül kullanılmaktadır.

Tablo 3.38: Uzunçiftlik deniz suyu ile hazırlanan karışımların Ed değerleri

| Ed (GPa) | 0 | 1 | 7 | 28 |
|-------------|------|------|------|------|
| 0L0BOSUS | 0,18 | 0,33 | 1,08 | 1,91 |
| 0L3,33BOSUS | 1,47 | 2,34 | 3,47 | 4,86 |
| 5L0BOSUS | 5,03 | 5,22 | 5,45 | 5,91 |
| 5L7,5BOSUS | 5,44 | 5,87 | 6,44 | 6,85 |
| 5L3,33BOSUS | 2,81 | 4,25 | 6,32 | 7,97 |

$$E = \frac{V_p^2 * \rho}{144 g} \left(\frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \right) \quad (3.3)$$

Formülde:

E =Elastikiyet modülü,:

V_p = P dalga hızı (m/sn)

ρ = yoğunluk (kg/m³)

g = yer çekimi ivmesi

μ = Poisson oranını temsil etmektedir.

Tablo 3.39: Bentonit deniz suyu ile hazırlanan karışımlarının ait P dalgası hızları

| V_p (m/sn) | 0 | 1 | 7 | 28 |
|--------------|------|------|------|------|
| 0L0BOSBT | 185 | 196 | 215 | 518 |
| 0L3,33BOSBT | 980 | 986 | 1047 | 1122 |
| 4L6BOSBT | 1120 | 1157 | 1335 | 1442 |
| 4L2,66BOSBT | 1090 | 1117 | 1180 | 1486 |
| 5L0BOSBT | 1240 | 1297 | 1387 | 1493 |
| 5L7,5BOSBT | 1321 | 1331 | 1445 | 1494 |
| 5L3,33BOSBT | 1287 | 1386 | 1495 | 1578 |
| 7,5L5BOSBT | 1528 | 1537 | 1628 | 1777 |

Bentonit çeşme suyu ile hazırlanan numunelere uygulanan deney sonuçlarına ait P dalga okumaları Tablo 3.39 da, P dalga boylarına bağlı olarak hesaplanan E elastikiyet modülleri Tablo 3.40 da verilmektedir. 7,5L5BOSBT karışımı 4,69 değeri ile en büyük değeri vermektedir.

Tablo 3.40: Bentonit çeşme suyu ile hazırlanan karışımlarının Ed değerleri

| Ed (GPa) | 0 | 1 | 7 | 28 |
|-------------|------|------|------|------|
| 0L0BOSBT | 0,05 | 0,06 | 0,07 | 0,40 |
| 0L3,33BOSBT | 1,50 | 1,52 | 1,72 | 1,97 |
| 4L6BOSBT | 1,89 | 2,02 | 2,68 | 3,13 |
| 4L2,66BOSBT | 1,76 | 1,85 | 2,07 | 3,28 |
| 5L0BOSBT | 2,27 | 2,48 | 2,84 | 3,29 |
| 5L7,5BOSBT | 2,61 | 2,65 | 3,12 | 3,33 |
| 5L3,33BOSBT | 2,54 | 2,95 | 3,43 | 3,82 |
| 7,5L5BOSBT | 3,47 | 3,51 | 3,94 | 4,69 |

Tablo 3.41: Bentonit deniz suyu ile hazırlanan karışımlarına ait P dalgası hızları

| V_p (m/sn) | 0 | 1 | 7 | 28 |
|--------------|------|------|------|------|
| 0L0BOSBS | 804 | 830 | 939 | 980 |
| 0L3,33BOSBS | 744 | 780 | 832 | 1011 |
| 4L6BOSBS | 810 | 860 | 1006 | 1102 |
| 4L2,66BOSBS | 1054 | 1058 | 1100 | 1231 |
| 5L7,5BOSBS | 1071 | 1039 | 1532 | 1597 |
| 5L0BOSBS | 1215 | 1407 | 1476 | 1608 |
| 7,5L5BOSBS | 1292 | 1339 | 1388 | 1683 |
| 5L3,33BOSBS | 1315 | 1328 | 1392 | 1735 |

Bentonit deniz suyu ile hazırlanan numunelere uygulanan deney sonuçlarına ait P dalgası hızı okumaları Tablo 3.41 da, P dalgası hızlarına bağlı olarak hesaplanan E_d , dinamik elastikiyet modülleri Tablo 3.42 da verilmektedir. 5L3,33OSBs karışımı 4,54 değeri ile en büyük değeri vermektedir.

Tablo 3.42: Bentonit deniz suyu ile hazırlanan karışımlarının E_d değerleri

| E_d (GPa) | 0 | 1 | 7 | 28 |
|-------------|------|------|------|------|
| 0L0BOSBS | 0,96 | 1,02 | 1,30 | 1,42 |
| 0L3,33BOSBS | 0,84 | 0,93 | 1,06 | 1,56 |
| 4L6BOSBS | 0,99 | 1,12 | 1,53 | 1,84 |
| 4L2,66BOSBS | 1,69 | 1,71 | 1,84 | 2,31 |
| 5L7,5BOSBS | 1,65 | 1,55 | 3,38 | 3,72 |
| 5L0BOSBS | 2,21 | 2,97 | 3,26 | 3,82 |
| 7,5L5BOSBS | 2,40 | 2,58 | 2,78 | 4,08 |
| 5L3,33BOSBS | 2,61 | 2,66 | 2,92 | 4,54 |

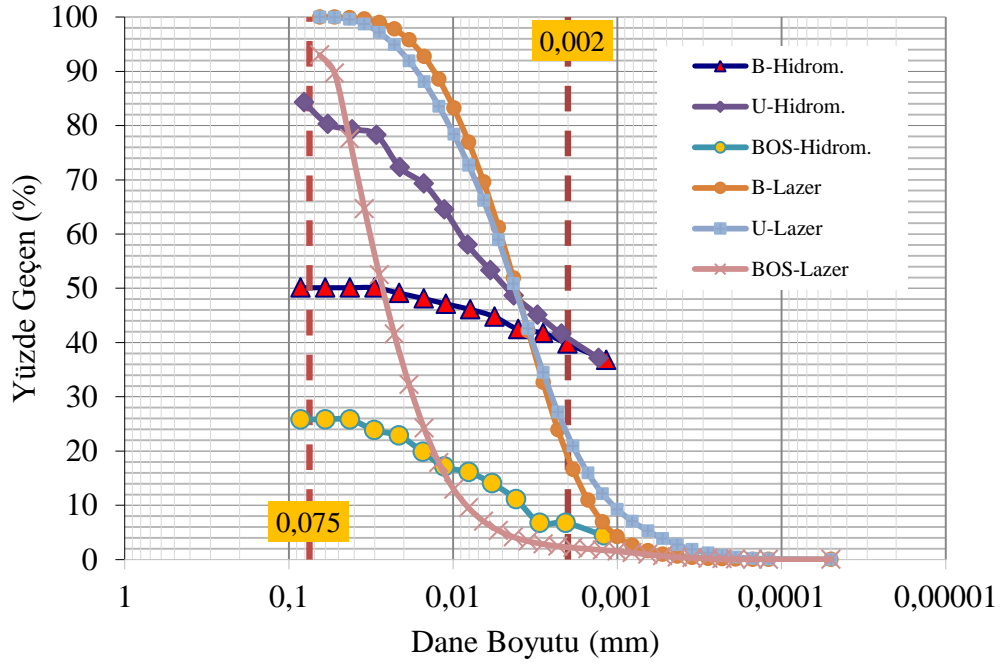
4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu bölümde yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar, mevcut literatür bilgileri ile birlikte yorumlanmıştır. Stabilizasyon amacı ile kullanılan malzemelerin killi zeminlerde meydana getirdikleri farklar, deneysel verilerin sonuçları ve konu ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalarla kıyaslanarak bu bölümde yorumlanmaktadır.

4.1. Elek Analizi ve Hidrometre Deneyi Sonuçları

Lazer kırma yönteminin ile hidrometre yöntemlerinin karşılaştırılmasında sonuçların paralel olduğu görülmektedir. Her iki yöntemde de bentonit ile uzunçiftlik kilinin 0,0002 mm. altı miktarları aynı yüzdelerde ve BOS'un 0,0002 mm. altı oldukça az miktardadır. Ancak miktarların rakamsal değerlerinde lazer yönteminin daha tutarlı olduğu düşünülmektedir. Zira hidrometre deneyi çok hassas bir deneydir. Ortamdaki sıcaklık ve benzeri faktörler deney sonuçlarını etkilemektedir. Deneyi yapan kişilerin beceri durumları da deney sonuçlarını etkilemektedir. Hidrometre deneyinin yapımında, numuneler sodyumhegzametafosfat çözeltisinde bekletilir. Bekletilen kaptan karıştırıcı kabına oradan mezura alınırken çok dikkatli davranılmasına rağmen numune kayıpları olabilmektedir.

Hidrometre deneyi, sonuçların alınıp bilgisayar ortamına aktarılması ile birlikte en az 3 gün sürmektedir. Bu deneyin tekrarlanma olasılığını da düşürmektedir. Ayrıca hidrometre yöntemi 0,0001 mm. ye kadar ölçüm yapılabilmektedir (Bardet, 1997). Lazer kırınım yöntemi ise 0,1 ile 2000 µm aralığındaki taneler ölçülebilmektedir (Malvern, 1993). Lazer kırınım yöntemi son derece hızlı olup, bu yöntemle bir örneğin analizi yaklaşık 10-15 dakikada tamamlanmaktadır. Bu süreye, örnek hazırlanması, sonuçların hesaplanması ve yazıcıdan çıktısının alınması da dâhildir. Deney bilgisayar kontrollü ve kısa sürede yapılabildiğinden defalarca tekrarlamak mümkündür (Özer, 2007).



Şekil 4.1: Hidrometre yöntemi ve lazer kırım yönteminin karşılaştırılması

Nitekim 3.3.1 başlıklı bölümde ayrıntıları verilen deney sonucunda elde edilen grafiklerden de görüldüğü üzere lazer yönteminden elde edilen sonuçlar daha tutarlıdır. Şekil 4.1 de elek analizi ve lazer yöntemi sonuçlarının birlikte verildiği grafik görülmektedir.

4.2. Kıvam limitleri Sonuçları

Literatürde, bir zeminin doğal su içeriğinin, likit limit veya plastik limit değerinin bilinmesi, onun taşı gücü hakkında fikir sahibi olmamız için yeterlidir görüşüne bulunmaktadır (Sivapullaiah, P. V ve diğ.,2000). Ayrıca plastik limit su içeriğindeki bir zeminin drenajsız kayma dayanımının, likit limit su içeriğindeki bir zemine göre yaklaşık 100 kat daha büyük olduğunu öne sürülmektedir (Skempton, 1953; Wroth, C. P., and Wood, 1978; White, I. L., 1982). Zeminlerin sıkışma indisi (C_c), şişme indisi (C_s), drenajsız kayma direnci (S_u) ve geçirimsizliği gibi bazı mühendislik özellikleri ile doğrudan veya dolaylı olarak korelasyonu yapılan likit limit değerinin, esasında zeminlerin kayma direncinin bir ölçüsü olduğu artık bilinmekte ve kabul edilmektedir (Sridharan A. ve Nagaraj, 2005).

Yapılan çalışmalarda toplamda 112 likit limit, 112 plastik limit deneyi yapılmıştır. Kıvam limitleri 0 günlük, 1 günlük ve 28 günlük olmak üzere 4 farklı zamanda ölçülmüştür.

Tablo 4.1: Teknik şartnameye göre gereken kıvam limit değerleri

| Konum | LL (%) | PI |
|----------------|--------|------|
| Alt temel | < 25 | < 6 |
| Üstyapı tabanı | < 30 | < 10 |
| Dolgular | < 40 | < 20 |

T.C Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 2005 de yayımlanan “Kireç stabilizasyonu ve çeşitli zayıf zemin stabilizatörleri teknik şartnameleri” konulu iç genelgede, yol çalışmalarında kullanıma uygun zeminlerin sahip olması gereken kıvam limitleri tanımlanmıştır. Genelgede verilen limitler Tablo 4.1 de görülmektedir.

Yapılan kıvam limitleri deneylerinden elde edilen veriler ışığında BOS ve kirecin etkisi şu şekilde özetlenebilir. Düşük plastisiteli kil gurubu üzerinde çeşme suyu ile hazırlanan karışımlarda % 3 ~ 5 oranlarında kullanılan BOS plastisite bir değişiklik yaratmamaktadır. Kireç, çeşme suyu ile birlikte kullanılması durumunda, CL gurubu killerin plastisitesini önemli derecede azaltmaktadır. Kirecin BOS ile birlikte kullanımında bir optimum değer söz konusudur. Kirecin miktarı % 5, BOS miktarı % 3,33 olması halinde plastisite sıfıra düşmektedir. BOS miktarı arttığında ise, başka bir deyişle % 3 - 4 oranını aşınca kil tekrar plastiklik özelliği kazanmaktadır. Bu bulgular ışında düşük plastisiteli killerde stabilizasyon amacı ile en uygun kireç BOS karışım miktarı, kuru ağırlıkça % 5 oranında kireç ve % 3,33 oranında BOS dur.

Her karışım için ayrı ayrı elde edilen kıvam limit değerlerinden ulaşılan yorumlar ise şu şekildedir. Katkısız olarak CL grubu killerde 0, 1, 7 ve 28 günlük likit limit (LL) değeri 48 den 50 ye yükselmektedir. Bu önemsenmeyecek kadar küçük bir artıştır. Plastik limit (PL) değeri 20 dir ve hiç değişmemektedir. Dolayısı ile plastisite indisi (PI) de 0 günle 28 gün arasında önemli bir farklılık sergilememektedir. Bu hali ile Karayolu teknik şartnamesine göre dolgu olarak bile kullanıma uygun değildir.

CL grubu kilin, % 3,33 oranında BOS ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş haldeki LL değerinde 28 gün içinde, 42 den 49 değerine doğru bir yükseliş olmuştur. PL değeri ise, 14 den 18 e çıkmaktadır. PI değeri 28 den 31'e yükselmektedir. BOS CL grubu kilin karıştırıldığı anda LL 48 den 42 ye PL 20 den 14 değerine düşürmüştür. 28 gün sonunda ise katkısız kil ile hemen hemen aynı değerlere ulaşmıştır. BOS, CL grubu kilin Atterberg değerlerinde önemli bir değişikliğe sebebiyet vermemektedir. %3,33 oranında BOS ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş haldeki düşük plastisiteli kil karışımı 2005 teknik şartnamesine göre dolgu amaçlı kullanıma uygun değildir.

CL grubu kilin, % 5 oranında kireç ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş haldeki LL değerinde 28 gün içinde, 43 den 52 değerine doğru bir yükseliş olmuştur. PL ise 28 den 29 e çıkmaktadır. PI değeri 15 den 23'e yükselmektedir. Bu sonuçlardan %5 oranında kirecin CL grubu killerin kıvam limitlerini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Karıştırıldığı anda LL değerini 48 den 43 e düşürmekte PL değerini ise değiştirmemektedir. 28 gün sonunda PI değeri 30 dan 23 e düşmektedir. % 5 oranında kireç ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş haldeki düşük plastisiteli kil karışımı 2005 teknik şartnamesine göre dolgu amaçlı kullanıma uygundur.

CL grubu kilin, % 4 kireç ve % 2,66 oranında BOS ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş olan, LL değeri 28 gün içinde, 38 den 45 değerine doğru bir yükseliş olmuştur. PL, 28 den 29 e çıkmaktadır. PI değeri 10 dan 18'e yükselmektedir. Karışım, CL grubu kil ile karıştırıldığı anda LL değerini 48 den 38 e düşürmektedir. PL değerini ise değiştirmemektedir. PI değeri 28 den 10 a düşmüştür. 28 gün sonunda 30 olan PI değeri 18 e düşmüştür. Karışım kilin Atterberg değerlerinde önemli değişikliğe yol açmış malzemenin plastisitesini oldukça düşürmüştür. , % 4 kireç ve % 2,66 oranında BOS ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş haldeki düşük plastisiteli kil karışımı 2005 teknik şartnamesine göre dolgu amaçlı kullanıma uygundur.

CL grubu kilin, % 4 kireç ve % 6 oranında BOS ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş olan LL değeri 28 gün içinde, 38 den 41 değerine doğru bir yükseliş olmuştur. PL, 29 den 27 ye düşmüştür. PI değeri 9 dan 13'e yükselmektedir. Karışım, CL grubu kil ile karıştırıldığı anda LL değerini 48 den 38 e düşürmektedir. PL değerini ise değiştirmemektedir. PI değeri değişmemiş ancak 28 gün sonunda 30 olan PI değeri 13 e düşmüştür. CL grubu killerde, % 4 kireç % 6 BOS karışımının üzerindeki etkisi, % 4 kireç % 2,66 BOS karışımının etkilerine oldukça büyük benzerlik göstermektedir. Karışım, kilin Atterberg değerlerinde önemli değişikliğe yol açmış malzemenin plastisitesini oldukça düşürmüştür. % 4 kireç ve % 6 oranında BOS ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş haldeki düşük plastisiteli kil karışımı 2005 teknik şartnamesine göre dolgu amaçlı kullanıma uygundur.

CL grubu kilin, % 5 kireç ve % 3,33 oranında BOS ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş halinde PI değeri 0 gün için 9 olarak belirlenmiş ve 7 gün sonra plastiklik özelliğini tamamen kaybetmiştir. % 5 kireç ve % 3,33 oranında BOS ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş haldeki düşük plastisiteli kil karışımı 2005 teknik şartnamesine göre dolgu, üst yapı ve alt temel malzemesi olarak kullanılabilir.

CL grubu kilin, % 5 kireç ve % 7,5 BOS ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş halinde LL değeri 28 gün içinde, 43 den 51 değerine doğru bir yükseliş olmuştur. PL, 27 den 26 ya düşmektedir. PI değeri 16 dan 25'e yükselmektedir. Karışım, CL grubu kil ile karıştırıldığı anda LL değerini 48 den 43 e düşürmektedir. PL değerini ise değiştirmemektedir. PI değeri 28 den 16 a düşmüştür. 28 gün sonunda 30 olan PI değeri 25 e düşmüştür. Bu değerler karışımın CL grubu killerde önemli bir değişiklik yapmadığını göstermektedir. % 5 kireç ve % 7,5 oranında BOS ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş haldeki düşük plastisiteli kil karışımı 2005 teknik şartnamesine göre dolgu amaçlı kullanıma uygundur.

Çeşme suyu ile çalışılan CH grubu killerde, çeşme suyu ile BOS kullanılması, plastisite değerini yükseltmektedir. Kireç, çeşme suyu ile birlikte kullanılması durumunda, CH grubu killerin plastisitesini önemli derecede azaltmaktadır. Kireç miktarı % 5, BOS miktarı % 3,33 olması halinde kil 28 gün sonra non plastik özellik

kazanmaktadır. Kireç miktarı % 5, BOS miktarı % 7,5 olması halinde de aynı şekilde kil 28 gün sonra non plastik özellik kazanmaktadır. Bu karışımlar 2005 teknik şartnamesine göre yol çalışmalarında kullanılabilirler.

CH grubu killerde 0, 1, 7 ve 28 günlük likit limit (LL) değeri 114 den 116 ya yükselmektedir. Bu önemsenmeyecek kadar küçük bir artıştır. Plastik limit (PL) değeri 82 – 83 dür ve değişmemektedir. Dolayısı ile plastisite indiside (PI) 0 günle 28 gün arasında farklılık sergilememektedir.

CH grubu kilin, % 3,33 oranında BOS ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş halinde, LL değerinde 28 gün içinde, 129 dan 140 değerine doğru bir yükseliş olmuştur. PL, 44 den 46 e çıkmaktadır. PI değeri 85 den 94 e yükselmektedir. BOS, CH grubu kilin; karıştırıldığı anda LL değerini, 114 den 129 a düşürmüş ve PL 32 den 44 değerine yükseltmiştir ve plastisite de 82 den 85 değerine yükselmiştir. 28 gün sonunda ise katkısız CH kilinin LL değerini 116 dan 140 a, PL değerini 33 den 46 ya, plastisite ise 83 den 94 e yükseltmektedir. O halde BOS, CH gurubu killerin Atterberg değerlerinde önemli bir değişikliğe sebebiyet vermekte, plastisiteyi yükseltmektedir.

CH grubu kilin, % 5 oranında kireç ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş halinde, LL değerinde 28 gün içinde, 119 dan 127 değerine doğru bir yükseliş olmuştur. PL ise 50 den 55 e çıkmaktadır. PI değeri 69 dan 72'e yükselmektedir. Bu sonuçlardan %5 oranında kirecin CH grubu killerin kıvam limitlerini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Karıştırıldığı anda CH gurubu killerin, LL değerini 114 den 119 a, PL değerini ise 32 den 50 ye, çıkarmaktadır. Plastisitesini ise 82 den 69 a düşürmektedir. 28 gün sonunda PI değeri 83 den 72 ye düşmektedir. Kireç, yüksek plastisiteli killerin plastisitesini düşürmektedir.

CH grubu kilin, % 4 kireç ve % 2,66 oranında BOS ile ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş halinde, LL değerinde 28 gün içinde, 93 den 116 değerine doğru bir yükseliş olmuştur. PL, 49 değerindedir ve değişmemektedir. PI değeri 44 den 67 ye yükselmektedir. Karışım, CL grubu kil ile karıştırıldığı anda LL değerini 114 den 93 e düşürmektedir. PL değerini 32 den 49 a yükselmekte ve. PI değerini ise

82 den 49 a düşmektedir. 28 gün sonunda katkısız halde 83 olan PI değeri 67 ye düşmüştür. Karışım yüksek plastisiteli killerin plastisitesinde önemli değişikliğe yol açmış malzemenin plastisitesini oldukça düşürmüştür.

CH grubu kilin, % 4 kireç ve % 6 oranında BOS ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş halinde, LL değerinde 28 gün içinde, 100 den 112 değerine doğru bir yükseliş olmuştur. PL, 43 den 55 e yükselmiştir. PI değeri 57 dir ve değişmemektedir. Karışım, CH grubu kil ile karıştırıldığı anda LL değerini 114 den 110 e düşürmektedir. PL değerini ise 32 den 43 e çıkartmaktadır. PI değeri 82 den 57 ye düşmüştür. 28 gün sonunda katkısız halde iken 83 olan PI değeri 57 ye düşmüştür. % 4 kireç % 6 BOS karışımının CH gurubu killer üzerindeki etkisi, % 4 kireç % 2,66 BOS karışımın etkilerine benzerlik göstermektedir. Ancak BOS miktarındaki artış değerlerin % 4kireç + % 2,66 BOS a göre biraz daha yüksek olmasını sağlamıştır. Karışım, CH gurubu kilin Atterberg değerlerinde önemli değişikliğe yol açmış malzemenin plastisitesini oldukça düşürmüştür.

CH grubu kilin, % 5 kireç ve % 3,33 oranında BOS ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş halinde,, karıştırıldığı anda PI değeri 82 den 41 a düşmüş ve 28 gün sonra karışım plastiklik özelliğini tamamen kaybetmiştir.

CH grubu kilin, % 5 kireç ve % 7,5 BOS ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş halinde, % 5 kireç ve % 3,33 oranında BOS ile karıştırılmış ve çeşme suyu su ile yoğrulmuş olan kil gibi, (hatta ondan daha fazla miktarda) bir düşüşe sebep olmuştur. Plastisiteyi karıştırıldığı anda 82 den 34 e düşürmüştür. 28 gün sonra karışım plastiklik özelliğini tamamen kaybetmiştir.

Değerlerin daha arttırılması durumunda plastisitenin nasıl olacağını gözlemlemek amacı ile kireç miktarı % 7,5 a BOS miktarı % 5 e çıkarılmıştır. Bu durumda karışım, katkısız kile göre oldukça düşük olmakla birlikte tekrar plastiklik özelliği kazanmıştır.

Yoğurma suyu olarak deniz suyu kullanılması halinde düşük plastisiteli killerde, çeşme suyunda olduğu gibi karışımın LL, PL ve PI değerleri, kendi içinde 28 günlük süreçte bir artış göstermektedir. CL gurubu kilin, katkısız ve çeşme suyu ile sahip olduğu LL değeri, deniz suyu ile karıştırıldığı anda 48 den 49 a, PL değeri 20 den 18 e dönüşmektedir. Başka bir deyişle deniz suyu karıştırıldığı anda kıvam limitleri üzerinde pek de değişikliğe sebep olmamaktadır. Ancak 28 gün sonra deniz suyu CL gurubunda bulunan kilin PI değerlerini yükseltmekte ve zemin sınıfını CH gurubuna taşımaktadır.

BOS, CL gurubu kil üzerinde deniz suyu ile kullanıldığında, 0 günde de 28 günde de CL gurubu kilin LL ve PI değerini önemli olamayacak derece yükseltmektedir. Ancak bu etki küçüktür ve zeminin sınıfında bir değişikliğe sebep olmamaktadır.

Kireç, düşük plastisiteli killerde yoğurma suyu olarak çeşme suyu kullanıldığında plastisiteyi önemli derecede azaltmakta idi. Deniz suyu bu etkiyi göstermekte, aynı karışım oranlarında aynı miktarlarda düşüşler oluşmaktadır. Ancak deniz suyu, çeşme suyuna göre kıvam değerlerini daha az aşağı çekmektedir. Başka bir deyişle deniz suyu çeşme suyuna göre LL ve PI yı daha az azaltmaktadır.

Yüksek plastisiteli killerde deniz suyunun etkisi çeşme suyunu ile benzerlik göstermekle birlikte, deniz suyu değerleri daha yüksek bir şekilde etkilemektedir. Katkısız olarak CH gurubu kil çeşme suyu yerine deniz suyu ile yoğrulduğunda LL değeri de PI değeri de yükselmektedir.

BOS, CH gurubu killerde çeşme suyu ile benzer davranışlar sergilemektedir. Deniz suyu çeşme suyuna göre LL ve PI değerlerini daha fazla yükseltmektedir. Ancak bu değişim zeminin sınıfını değiştirecek ölçüde bir değişim değildir.

Kireç ile deniz suyunun etkileşimi CH gurubunda daha belirgindir. Deniz suyu ile birlikte kireç kullanılması LL değerini 116 dan 104 de, PI değerini 83 den 54 e düşürmektedir. Bu değişim CH gurubu kili MH gurubuna taşımaktadır.

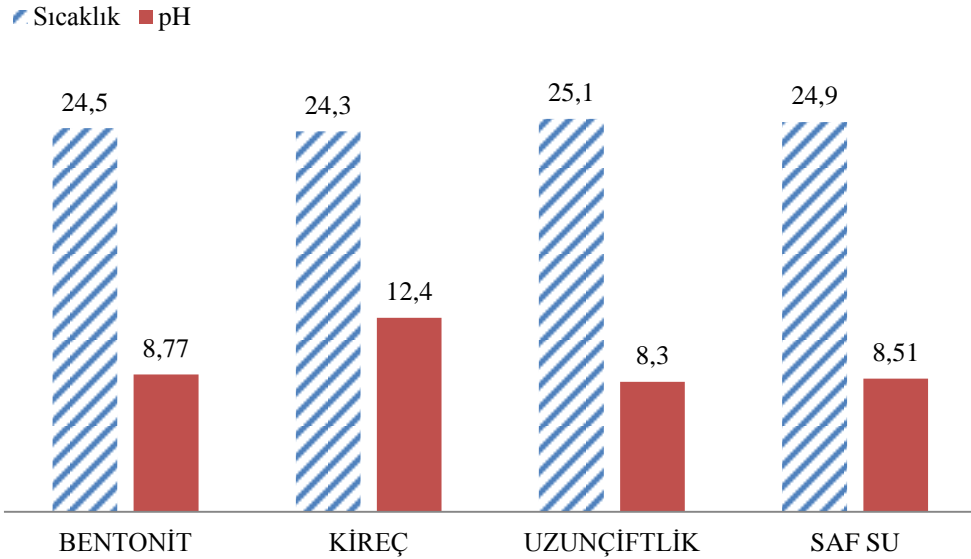
Kireç ve BOS karışımları ile birlikte deniz suyu kullanılması yine çeşme suyunda olduğu gibi kıvam limitleri değerlerini aşığı çekmektedir. Ancak deniz suyu kullanılması halinde, karışımların plastisitesi çeşme suyuna göre daha yüksek değerler almaktadır. Bunun sonucu olarak deniz suyu ile kullanılan, kireç BOS karışımları, CH gurubu kili MH gurubuna doğru taşımaktadır.

Ayrıca çeşme suyunda 28 gün sonunda plastiklik özelliğini kaybeden %5 kireç ile birlikte % 3,33 BOS ve % 5 kireç ile birlikte % 7,5 BOS içeren karışımlarla deniz suyu kullanılması halinde benzer davranış göstermektedir. Deniz suyu kullanılması durumunda, çeşme suyundan farklı olarak, daha az kireç kullanılan % 4 kireç ve % 6 BOS kullanılan karışım da benzer şekilde 28 gün sonunda plastik özelliğini kaybetmektedir.

Sonuç olarak deniz suyu ile birlikte kullanılan katkıların CH gurubu killeri üzerindeki etkisi, çeşme suyu kullanılması ile benzerlik göstermektedir. Ancak kireç, deniz suyu ile kullanılınca plastisiteyi daha fazla düşürmektedir. BOS ise deniz suyu ile kullanılınca plastisitedeki düşüşü azaltmaktadır.

4.3. pH Değerleri

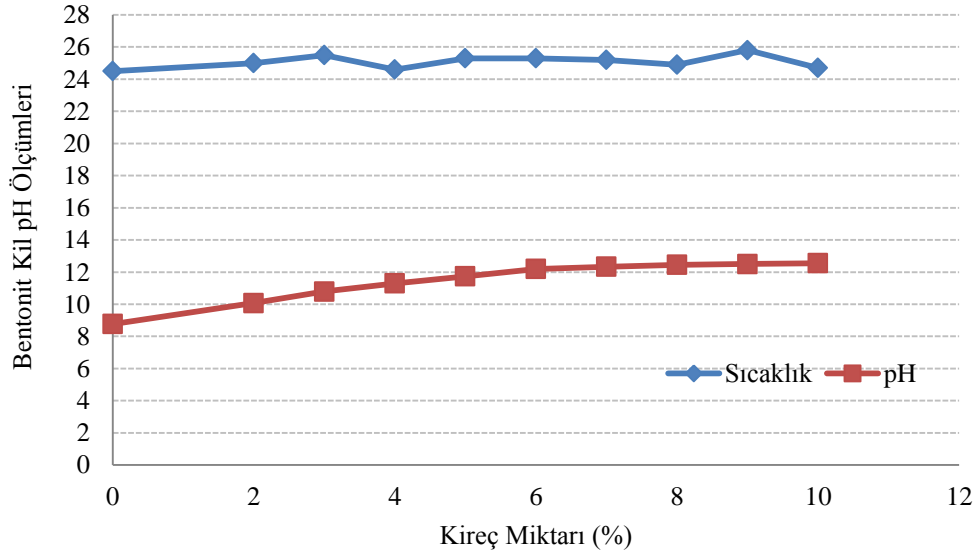
Bu tezde, ASTM 6276 standardına göre asitlik denge ölçümü yapılmıştır. ASTM 6276 standardı söndürülmüş ve sönmemiş kireç, yüksek kalsiyum, magnezyum veya dolomitik içeren kireçlerin zemin stabilizasyonunda kullanılması ile ilgilidir. Standartta kireç ile iyileştirilen zeminlerde kimyasal reaksiyonlar sonucu olarak sertleşme meydana geleceği ve böylece iyileştirilen zeminlerin yol yapımında veya diğer taşıyıcı yapılarda kullanılabilir hale geleceği söylenmektedir. Ancak standart bahsedilen uygunluğun kesin doğruluk payı içermediğini ve bu deney ile elde edilen sonuçların kullanılabilirliğinin, kullanıcı tarafından karar verilmesi gereken bir konu olduğunu da vurgulamaktadır. Şekil 4.2 de çalışmada kullanılan malzemeler üzerinde yapılan pH ölçümlerinin sonuçları verilmiştir. Yapılan ölçümler, ölçüm esnasında okunan ısı değerleri ile birlikte verilmektedir.



Şekil 4.2: Kullanılan malzemelerin pH değerleri

T.C Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 2005 de yayımlanan “Kireç stabilizasyonu ve çeşitli zayıf zemin stabilizatörleri teknik şartnameleri” konulu iç genelgede, zemin iyileştirmesinde kullanılacak optimum kireç yüzdesin bulunmasında pH metodu veya Likit Limit/Plastik Limit deneyini uygun görmektedir. Şartnameye göre, pH deneyi sonucunda, karışımın pH değerini 12,4’e getiren kireç oranı “uygun oran” olarak kabul edilir.

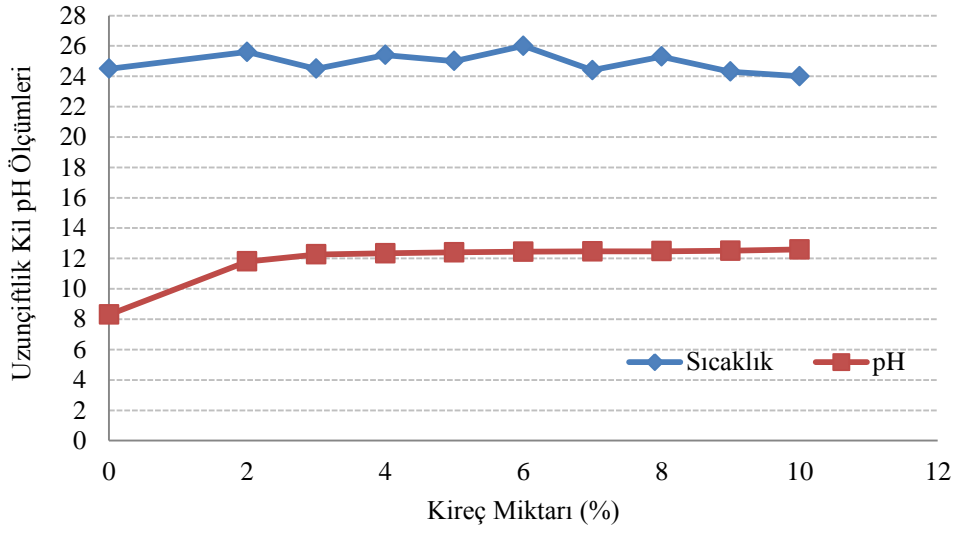
Şartnameye göre, en az 3 farklı kireç yüzdesi ile yapılan çalışma sonucunda teknik ve ekonomik optimizasyon ile optimum kireç yüzdesi belirlenir. Şekil 4.3 de bentonit kili ile hazırlanan karışımlara ait pH değerleri verilmektedir.



Şekil 4.3: Bentonit kili ile ilgili karışımların pH değerleri

Yüksek pH zeminin kil mineralleri ile reaksiyona girme yetisini artırır ve danelerin birbirlerine yapıştırarak çimentolaşmayı sağlar. Karışımdaki kireç miktarı arttıkça pH değeri artar. pH değerinin pik noktası 770F (25⁰C) de 12,454 tür. pH değerinde sıcaklık çok önemli bir faktördür. Sıcaklığın yükselmesi ile Ca(OH)₂ nin çözünürlüğü düşmektedir (Süt, 2006). Şekil 4.4 de uzunçiftlik kili ile ilgili karışımların pH değerleri verilmektedir.

Ouhadia ve Yong, (2003) yaptıkları deneysel çalışmalarda farklı oranlarda kireç ile karıştırdıkları killi zeminin pH değerlerini 28 gün boyunca her gün ölçmüşlerdir. Yaptıkları ölçümde, kireç ile değişik oranlarda karıştırılmış olan numunelerin pH değerlerinin her gün değiştiğini kaydetmişlerdir. İlk gün 12 ila 13 değerleri arasında bulunan pH değerleri 28 gün sonunda 10 lu değerlere düşmektedir.



Şekil 4.4: Uzunçiftlik kili ile ilgili karışımların pH değerleri

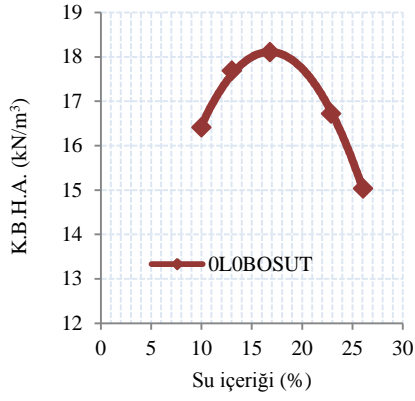
Rogers ve diğ., (2007) pH ölçüm deneyini oldukça hatalı bulduklarını belirtmişlerdir. Killer üzerinde kireç ile iyileştirme yaptıkları çalışmada pH deneyine de yer vermişlerdir. Kireci iki farklı şekilde kullanmışlardır. Isıtarak ve ısıtmadan kullandıkları kireç karıştırdıkları numunelerden çok farklı sonuçlar elde etmişlerdir. Isıtıp soğuttukları kireç ile 12.4 değerini yakaladıkları killerde tabii olarak kullanılan kireç ile 12.4 değerini hiç yakalayamamışlardır. Çalışmalarında deneyin hatalı ve yanıltıcı olduğuna yer vermişlerdir.

4.4. Kompaksiyon

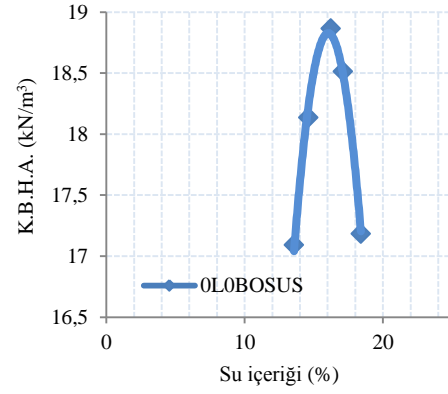
Kompaksiyon (sıkıştırma) fiziki bir zemin iyileştirme yöntemidir. Zemini sıkıştırmanın önemi ondokuzuncu yüzyılın başlarında fark edilmiştir. Hayvanlar 1893 de New Meksiko Santa Fe yakınında bir toprak dolgu barajı sıkıştırmak amacı ile kullanılmıştır. 115 keçiden ve atlardan oluşan hayvanlar bazı projelerde donanım olarak kullanılmışlardır. Daha sonra traktörler hayvanların yerini almıştır. Günümüzde sıkıştırma amacı ile kullanılan pek çok gelişmiş arazi donanımı bulunmaktadır (Coduto, 2006).

İyi sıkışmış bir zeminde, sıkışmamış durumuna göre, porozite düşüktür ve kuru birim hacim ağırlık değerleri fazladır. Zeminin boşluk miktarını azaltmak, birim hacim ağırlığını yükseltmek gerekçesiyle yapılan sıkıştırma işleminde zemin cinsine göre farklı yöntemler uygulanır. İri taneli zeminlerde sıkıştırmada bağıl yoğunluk değerleri kullanılır. İnce taneli (kohezyonlu) zeminlerde ise, dinamik yükün zeminin üzerine düşürülmesi yolu ile zemin taneleri birbirlerine yaklaşır ve kısmen üniformluk sağlanmış olur (ASTM 698). Sıkıştırma konusunda, su özellikle ince daneli zeminlerde önemli bir etkidir. İnce taneli zeminlerde, belirli bir noktaya ek eklenen su, zemin içerisindeki yüzey gerilim kuvvetlerini azaltarak, birbirleri üzerlerinden kaymalarını sağlar. Böylece hava boşluklarının kapladığı alan zemin taneleri ile doldurulur. Bu suretle zeminde sıkışma meydana gelerek birim hacim ağırlığında artma meydana gelir. R. R. Proctor zeminin sıkıştırılma işlemine, 1930 yılında bir standardizasyon getirmiştir. Proctor yöntemi ile laboratuvarında sıkışma deneyinin amacı, zemin için belli bir sıkıştırma enerjisinde en iyi sıkışmayı sağlayacak olan su içeriğini (optimum su muhtevasını) ve ona bağlı olan en büyük kuru birim hacim ağırlığı belirlemektir (Aytekin, 2004).

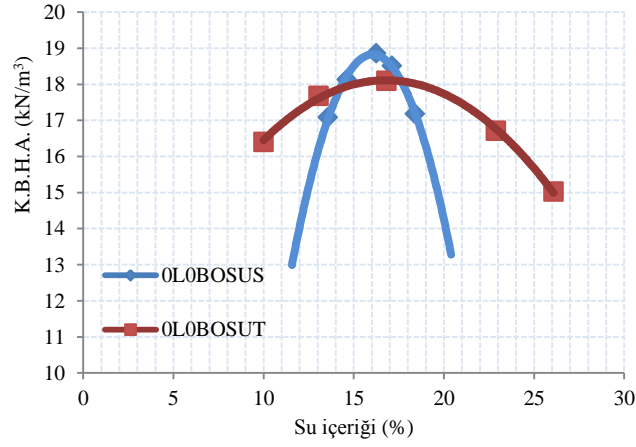
Deneysel çalışmalarımızda hazırladığımız karışımlara fiziksel iyileştirme adına sıkıştırma deneyleri uygulanmıştır. Sıkıştırma işlemi, hem modifiye olarak hem de standart olarak gerçekleştirilmiştir. Modifiye kompaksiyon deneyi $2,700 \text{ kN-m}^3$ enerji ile standart kompaksiyon deneyi ise 600 kN-m^3 enerji ile yapılmıştır. Elde edilen eğriler aşağıdaki şekillerdeki gibidir.



a)



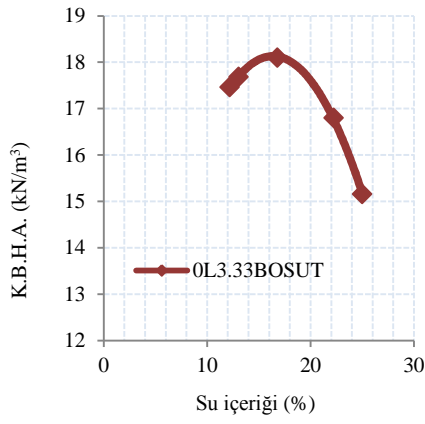
b)



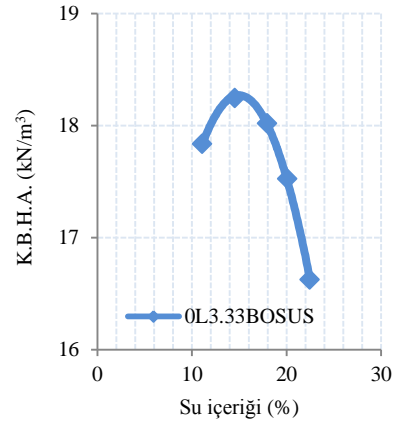
c)

Şekil 4.5: Uzunçiftlik kili modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu)

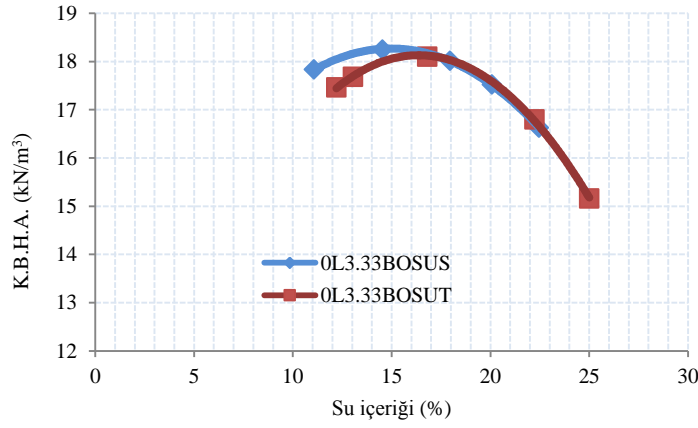
Uzunçiftlik kiline uygulanmış olan modifiye sıkıştırma deneyi sonuçları Şekil 4.5 de görülmektedir. Çeşme suyunda %17 olan optimum su muhtevası deniz suyunda %16 dır. K.B.H.A ise çeşme suyunda $18,1 \text{ kN/m}^3$ iken deniz suyu kullanılması halinde $18,9 \text{ kN/m}^3$ olmaktadır. Deniz suyu kompaksiyon değerlerini pek değiştirmemektedir. Ancak eğrinin bacaklarında daralma meydana getirmektedir.



(a)



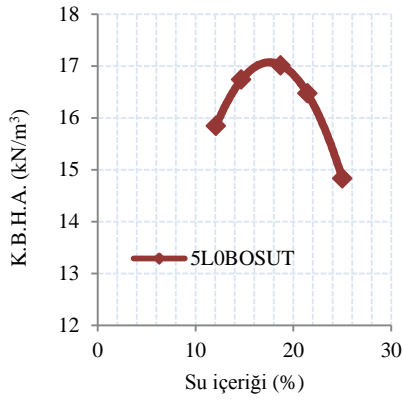
(b)



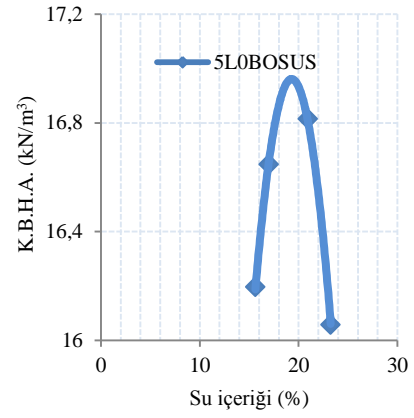
(c)

Şekil 4.6: OL3.33BOSU modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu)

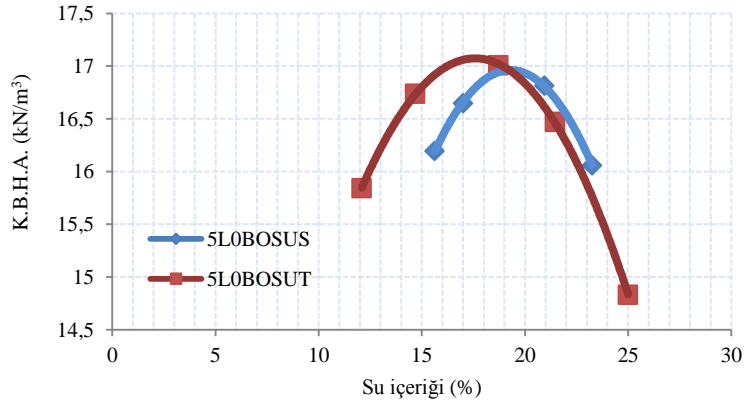
Uzunçiftlik kili ve % 3,33 BOS ile hazırlanmış olan numuneler üzerinde yapılan modifiye sıkıştırma deneyi sonuçları (a) çeşme suyu, (b) deniz suyu ve (c) her ikisinin aynı grafik üzerinde Şekil 4.6 de görülmektedir. Çeşme suyunda % 17 olan optimum su muhtevası deniz suyunda % 15 dir. K.B.H.A ise çeşme suyunda 18 kN/m^3 iken deniz suyu kullanılması halinde $18,2 \text{ kN/m}^3$ olmaktadır. % 3,33 BOS ile hazırlanmış olan numunelerde deniz suyu optimum su muhtevasını %2 azaltmaktadır.



(a)



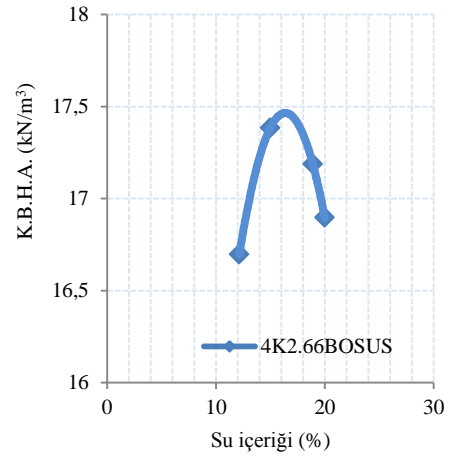
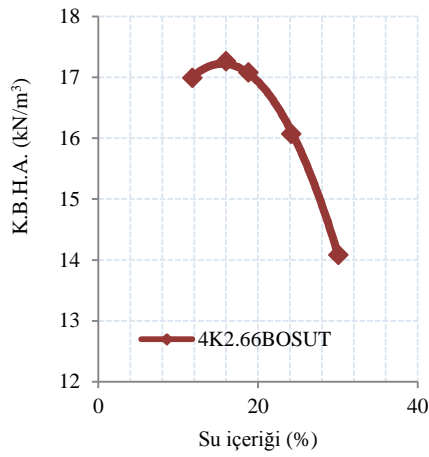
(b)



(c)

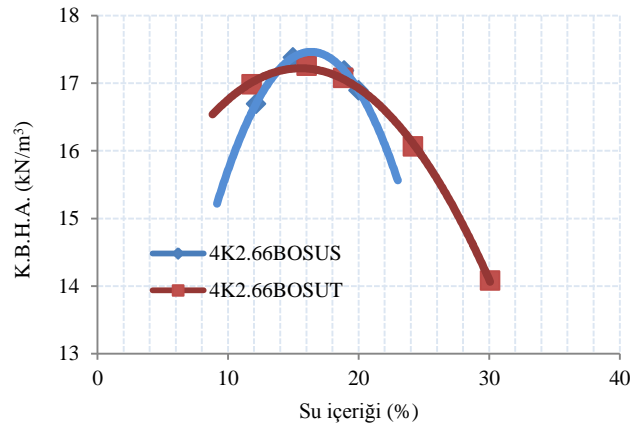
Şekil 4.7: 5L0BOSU modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu)

Uzunçiftlik kili ve % 5 kireç ile hazırlanmış olan numuneler üzerinde yapılan modifiye sıkıştırma deneyi sonuçları (a) çeşme suyu, (b) deniz suyu ve (c) her ikisinin aynı grafik üzerinde Şekil 4.7 de görülmektedir. Çeşme suyunda % 17,5 olan optimum su muhtevası deniz suyunda %19,5 dir. K.B.H.A ise çeşme suyunda 17,1 kN/m^3 iken deniz suyu kullanılması halinde de 16,9 kN/m^3 olmaktadır. % 5 kireç ile hazırlanmış olan numunelerde deniz suyu, K.B.H.A değiştirmezken, optimum su muhtevasını %2 oranında arttırmaktadır.



(a)

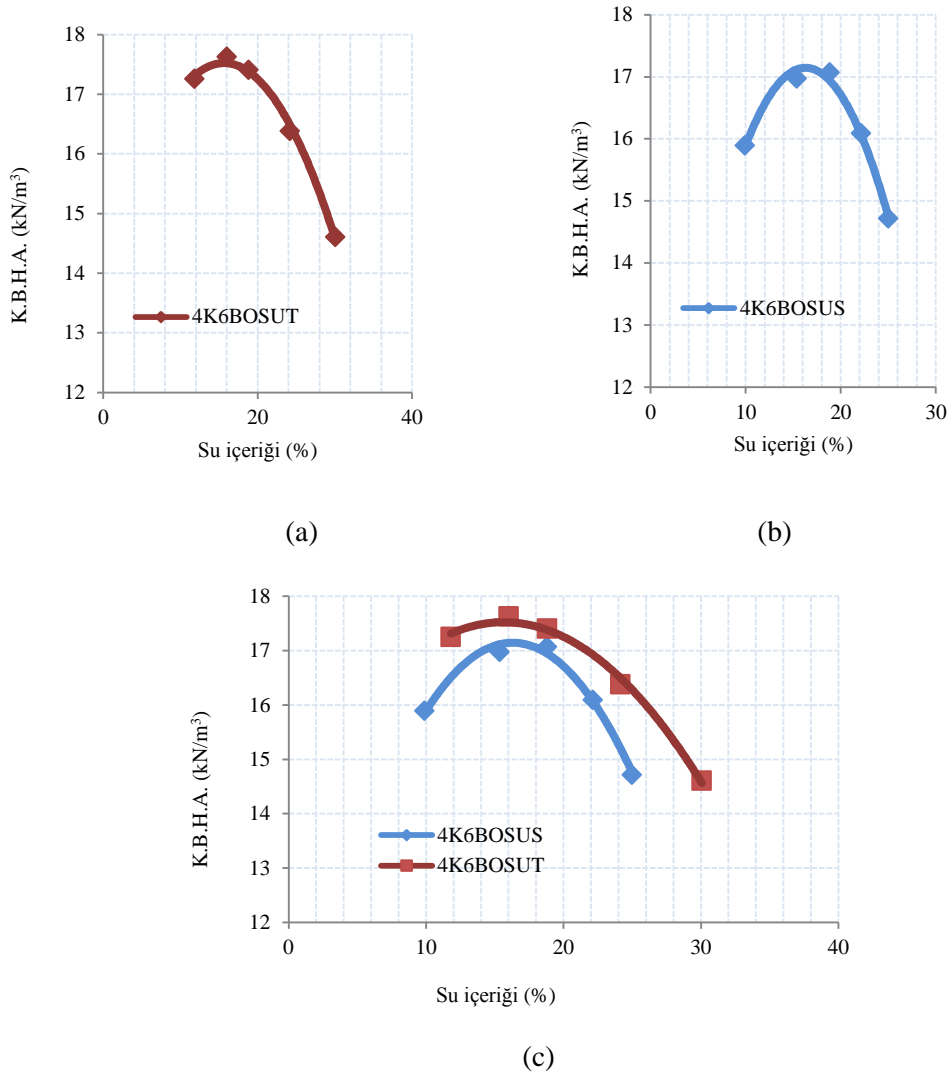
(b)



(c)

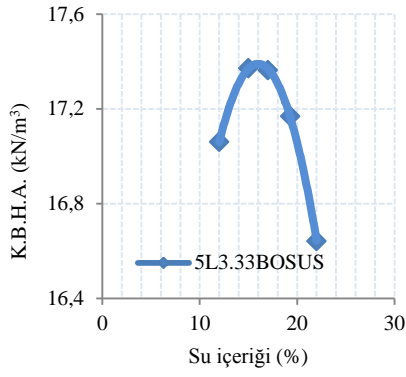
Şekil 4.8: 4K2.66BOSU modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu)

Uzunçiftlik kili, % 4 kireç ve % 2,66 BOS ile hazırlanmış olan numuneler üzerinde yapılan modifiye sıkıştırma deneyi sonuçları (a) çeşme suyu, (b) deniz suyu ve (c) her ikisinin aynı grafik üzerinde Şekil 4.8 de görülmektedir. Çeşme suyunda % 16 olan optimum su muhtevası deniz suyunda % 15 dir. K.B.H.A ise çeşme suyunda $17,3 \text{ kN/m}^3$ iken deniz suyu kullanılması halinde de $17,4 \text{ kN/m}^3$ olmaktadır. % 4 kireç ve % 2,66 BOS ile hazırlanmış olan numunelerde deniz suyu önemli bir değişiklik yapmamaktadır. Ancak eğrinin bacakları biraz daralmaktadır.

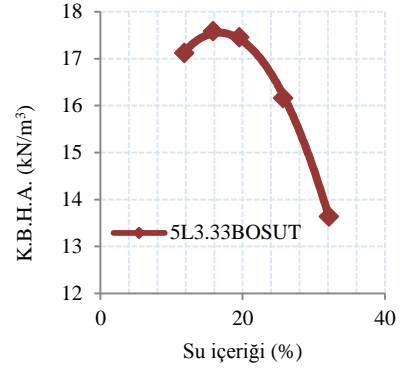


Şekil 4.9: 4K6BOSU modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu)

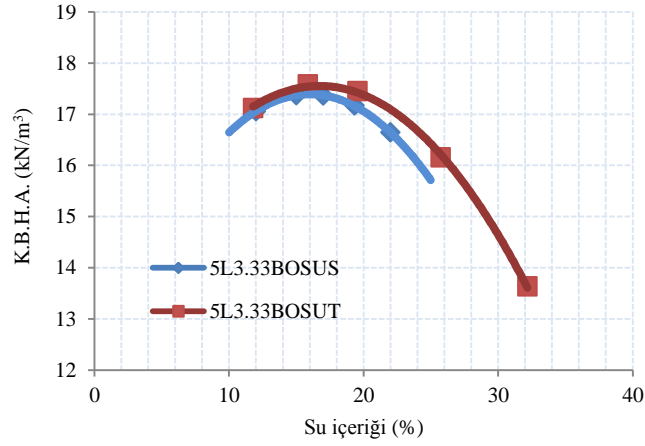
Uzunçiftlik kili, %4 kireç ve %6 BOS ile hazırlanmış olan numuneler üzerinde yapılan modifiye sıkıştırma deneyi sonuçları Şekil 4.9 de görülmektedir. Şekilde (a) çeşme suyu, (b) deniz suyu ve (c) her ikisinin aynı grafik üzerinde gösterilmiş halidir. Çeşme suyunda %16 olan optimum su muhtevası deniz suyunda da %16 dir. K.B.H.A ise çeşme suyunda $17,6 \text{ kN/m}^3$ iken deniz suyu kullanılması halinde de $17,3 \text{ kN/m}^3$ olmaktadır. %4 kireç ve %6 BOS ile hazırlanmış olan numunelerde deniz suyu önemli bir değişiklik yapmamaktadır.



(a)



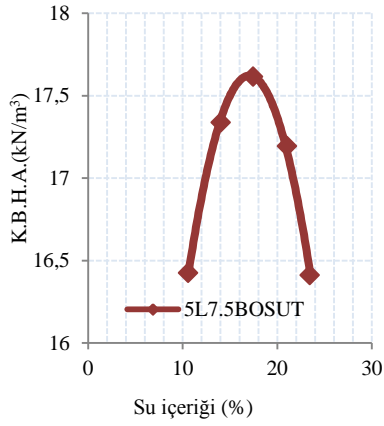
(b)



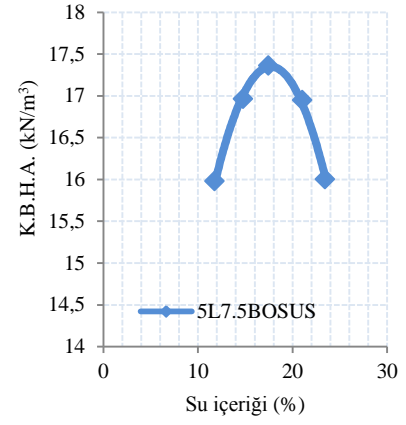
(c)

Şekil 4.10: 5L3.33BOSU modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu)

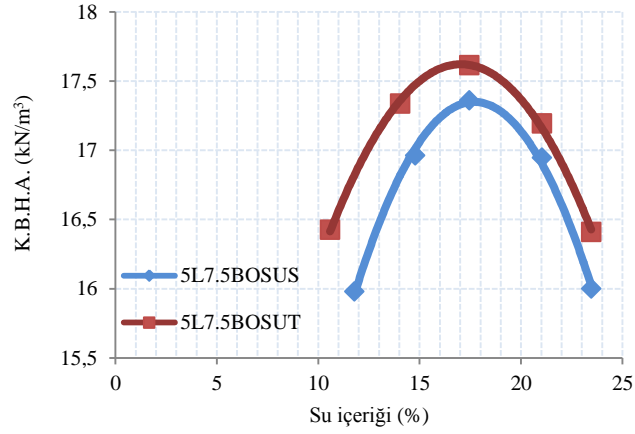
Uzunçiftlik kili, %5 kireç ve %3,33 BOS ile hazırlanmış olan numuneler üzerinde yapılan modifiye sıkıştırma deneyi sonuçları Şekil 4.10 de görülmektedir. Şekilde (a) çeşme suyu, (b) deniz suyu ve (c) her ikisinin aynı grafik üzerinde gösterilmiş halidir. Çeşme suyunda %16 olan optimum su muhtevası deniz suyunda %17 dir. K.B.H.A ise çeşme suyunda $17,6 \text{ kN/m}^3$ iken deniz suyu kullanılması halinde de $17,4 \text{ kN/m}^3$ olmaktadır. %5 kireç ve %3,33 BOS ile hazırlanmış olan numunelerde deniz suyu önemli bir değişiklik yapmamaktadır.



(a)



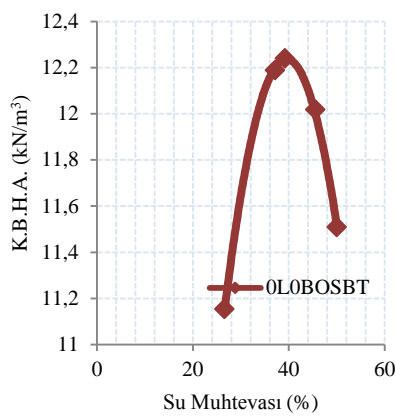
(b)



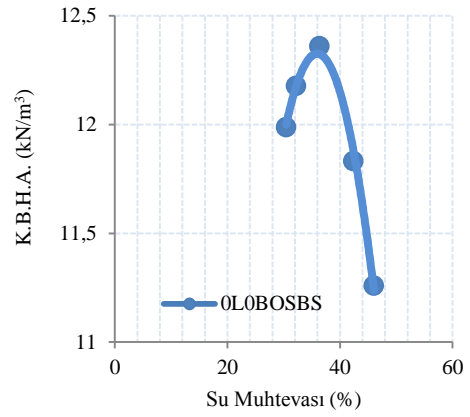
(c)

Şekil 4.11: 5L7.5BOSU modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu)

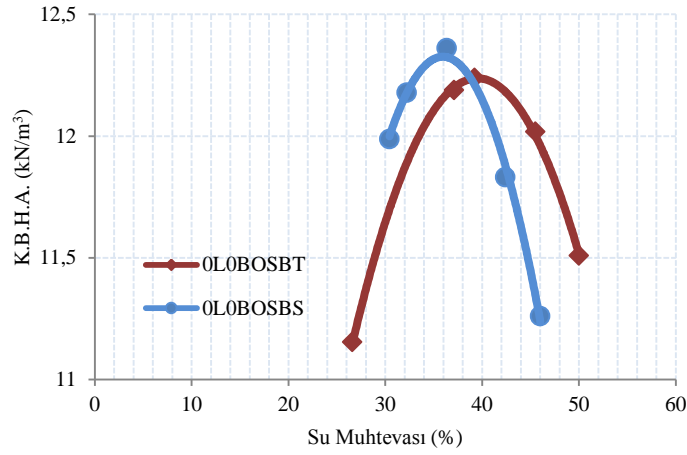
Uzunçiftlik kili, %5 kireç ve %7,5 BOS ile hazırlanmış olan numuneler üzerinde yapılan modifiye sıkıştırma deneyi sonuçları Şekil 4.11 de görülmektedir Şekilde (a) çeşme suyu, (b) deniz suyu ve (c) her ikisinin aynı grafik üzerinde gösterilmiş halidir. Çeşme suyunda %17 olan optimum su muhtevası deniz suyunda %17 dir. K.B.H.A ise çeşme suyunda $17,6 \text{ kN/m}^3$ iken deniz suyu kullanılması halinde de $17,4 \text{ kN/m}^3$ olmaktadır. %5 kireç ve %7,5 BOS ile hazırlanmış olan numunelerde deniz suyu önemli bir değişiklik yapmamaktadır.



(a)



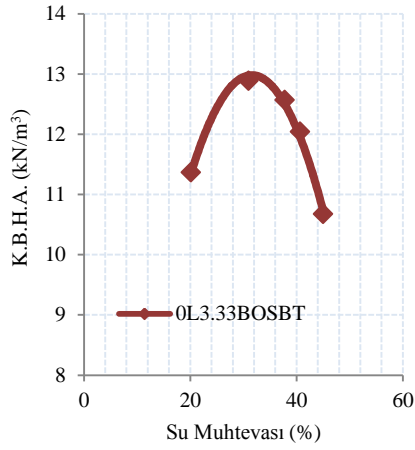
(b)



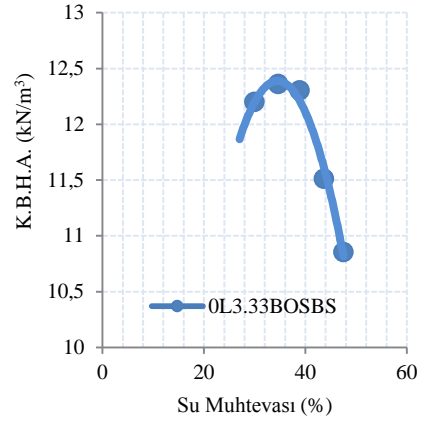
(c)

Şekil 4.12: OL0BOSB modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu)

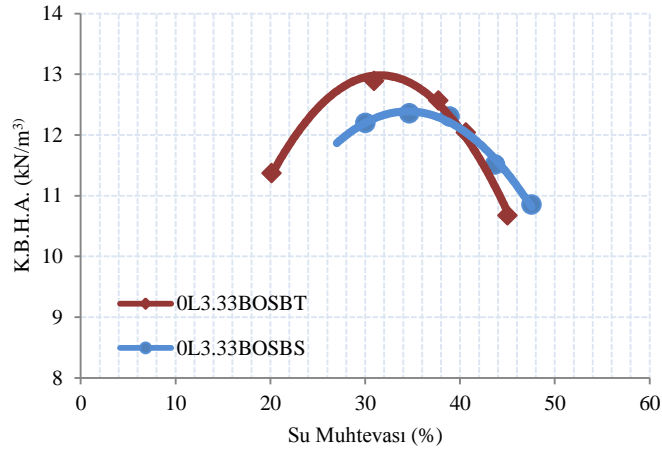
Bentonit kiline uygulanmış olan modifiye sıkıştırma deneyi sonuçları Şekil 4.12 da görülmektedir. Şekilde (a) çeşme suyu, (b) deniz suyu ve (c) her ikisinin aynı grafik üzerinde gösterilmiş halidir. Çeşme suyunda %39 olan optimum su muhtevası deniz suyunda %36 dir. K.B.H.A ise çeşme suyunda $12,7 \text{ kN/m}^3$ iken deniz suyu kullanılması halinde de $12,4 \text{ kN/m}^3$ olmaktadır. %5 kireç ve %7,5 BOS ile hazırlanmış olan numunelerde deniz suyu optimum su muhtevasını %3 azaltmaktadır. K.B.H.A da bir miktar azalmaya sebep olmaktadır.



(a)



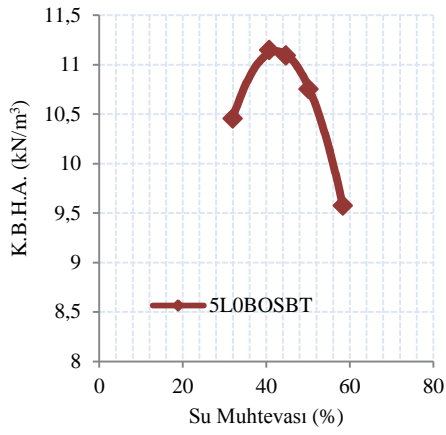
(b)



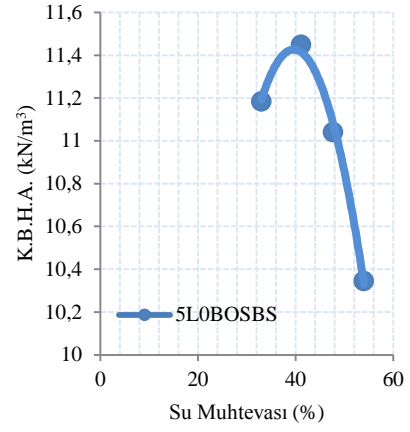
(c)

Şekil 4.13: 0L3.33BOSB modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu)

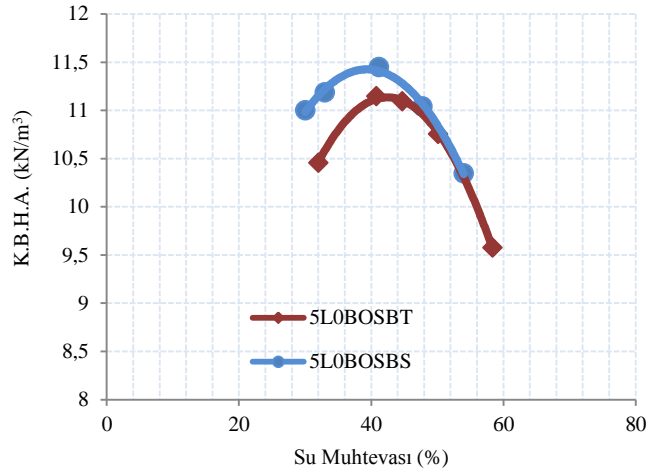
Bentonit kili ve %3,33 BOS ile hazırlanmış olan numuneler üzerinde yapılan modifiye sıkıştırma deneyi sonuçları Şekil 4.13 da görülmektedir. Şekilde (a) çeşme suyu, (b) deniz suyu ve (c) her ikisinin aynı grafik üzerinde gösterilmiş halidir. Çeşme suyunda %31 olan optimum su muhtevası deniz suyunda %35 dir. K.B.H.A ise çeşme suyunda $12,9 \text{ kN/m}^3$ iken deniz suyu kullanılması halinde $12,4 \text{ kN/m}^3$ olmaktadır. %3,33 BOS ile hazırlanmış olan numunelerde deniz suyu optimum su muhtevasını %4 arttırmaktadır.



(a)



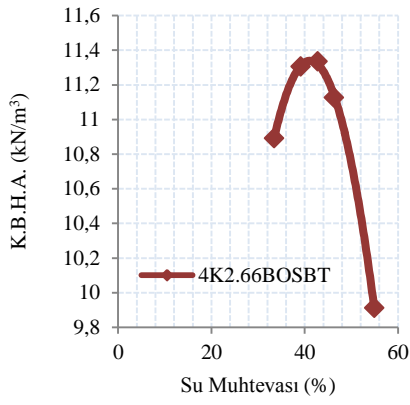
(b)



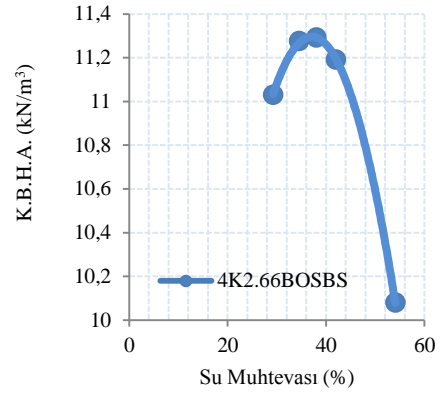
(c)

Şekil 4.14: 5L0BOSB modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu)

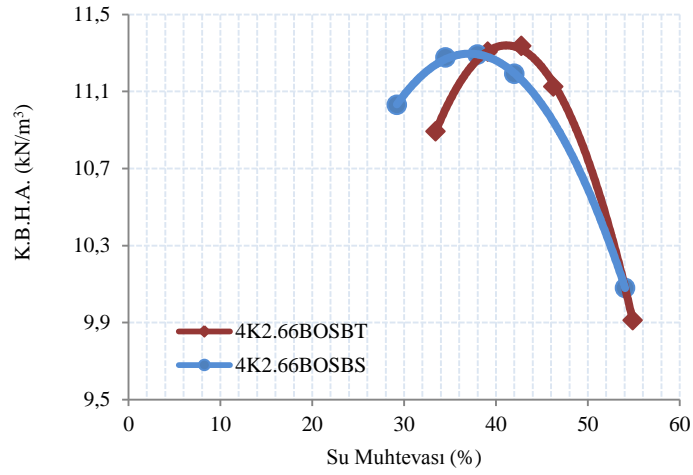
Bentonit kili ve %5 kireç ile hazırlanmış olan numuneler üzerinde yapılan modifiye sıkıştırma deneyi sonuçları Şekil 4.14 de görülmektedir. Şekilde (a) çeşme suyu, (b) deniz suyu ve (c) her ikisinin aynı grafik üzerinde gösterilmiş halidir. Çeşme suyunda %43 olan optimum su muhtevası deniz suyunda %39 dir. K.B.H.A ise çeşme suyunda $11,2 \text{ kN/m}^3$ iken deniz suyu kullanılması halinde de $11,5 \text{ kN/m}^3$ olmaktadır. %5 kireç ile hazırlanmış olan numunelerde deniz suyu, K.B.H.A bir miktar artırırken optimum su muhtevasını %4 oranında azaltmaktadır.



(a)



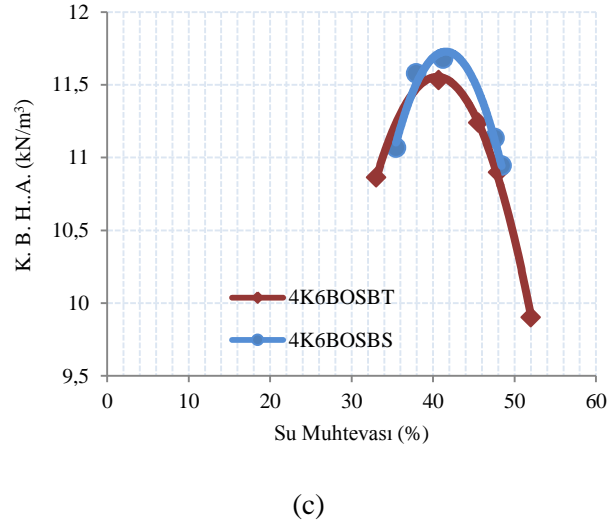
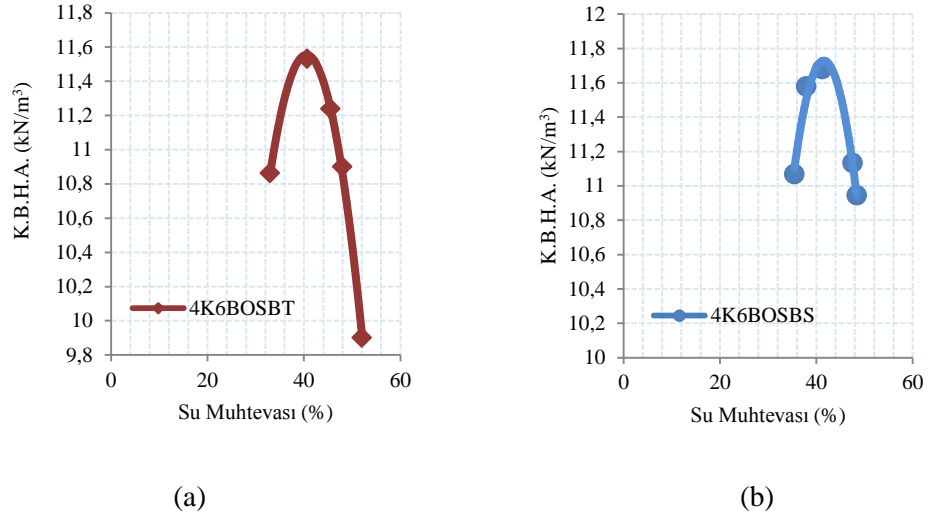
(b)



(c)

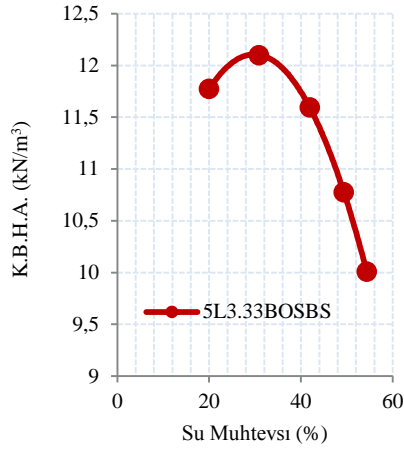
Şekil 4.15: 4K2.66BOSB modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu)

Bentonit kili ve %4 kireç ve %2,66 BOS ile hazırlanmış olan numuneler üzerinde yapılan modifiye sıkıştırma deneyi sonuçları Şekil 4.15 de görülmektedir. Şekilde (a) çeşme suyu, (b) deniz suyu ve (c) her ikisinin aynı grafik üzerinde gösterilmiş halidir. Çeşme suyunda %41 olan optimum su muhtevası deniz suyunda %35 dir. K.B.H.A ise çeşme suyunda $11,3 \text{ kN/m}^3$ iken deniz suyu kullanılması halinde de $11,3 \text{ kN/m}^3$ olmaktadır. %4 kireç ve %2,66 BOS ile hazırlanmış olan numunelerde deniz suyu, K.B.H.A bir değişiklik yapmazken optimum su muhtevasını %6 oranında azaltmaktadır.

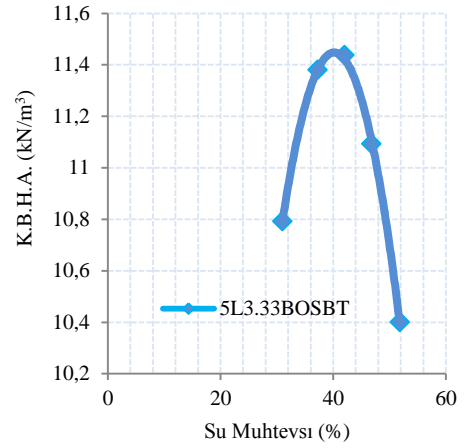


Şekil 4.16: 4K6BOSB modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu)

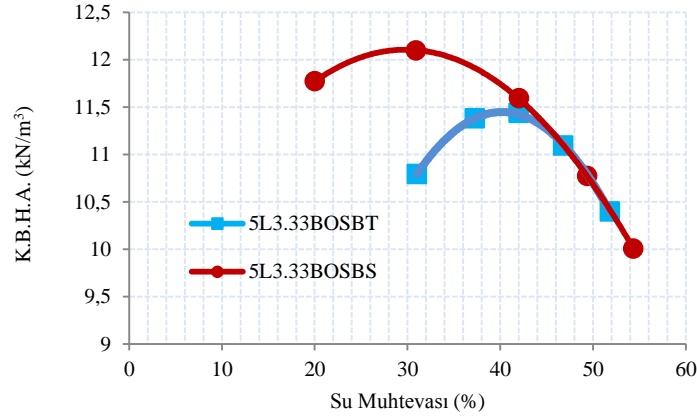
Bentonit kili ve %4 kireç ve %6 BOS ile hazırlanmış olan numuneler üzerinde yapılan modifiye sıkıştırma deneyi sonuçları Şekil 4.16 de görülmektedir. Şekilde (a) çeşme suyu, (b) deniz suyu ve (c) her ikisinin aynı grafik üzerinde gösterilmiş halidir. Çeşme suyunda %38 olan optimum su muhtevası deniz suyunda %41 dir. K.B.H.A ise çeşme suyunda $11,6 \text{ kN/m}^3$ iken deniz suyu kullanılması halinde de $11,7 \text{ kN/m}^3$ olmaktadır. %4 kireç ve %6 BOS ile hazırlanmış olan numunelerde deniz suyu, K.B.H.A önemli bir değişiklik yapmazken optimum su muhtevasını %3 oranında arttırmaktadır.



(a)



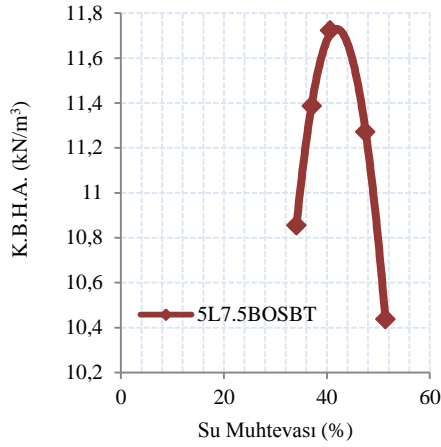
(b)



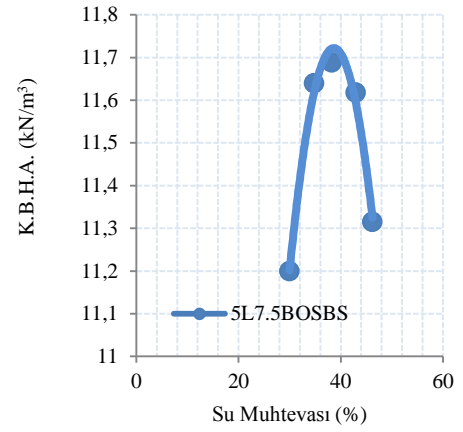
(c)

Şekil 4.17: 5L3.33BOSB modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu)

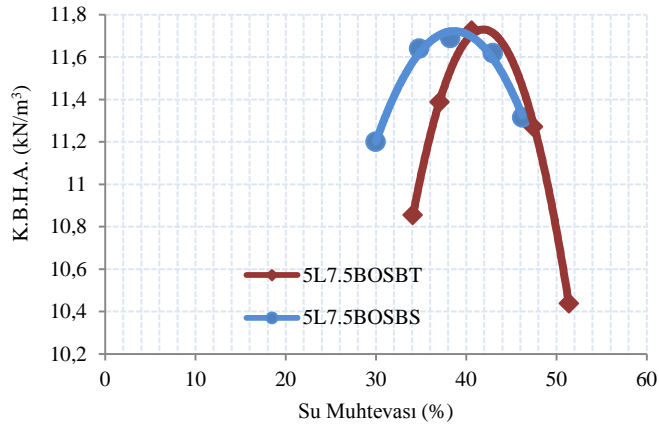
Bentonit kili ve %5 kireç ve %3,33 BOS ile hazırlanmış olan numuneler üzerinde yapılan modifiye sıkıştırma deneyi sonuçları Şekil 4.17 de görülmektedir. Şekilde (a) çeşme suyu, (b) deniz suyu ve (c) her ikisinin aynı grafik üzerinde gösterilmiş halidir. Çeşme suyunda %42 olan optimum su muhtevası deniz suyunda %31 dir. K.B.H.A ise çeşme suyunda $11,6 \text{ kN/m}^3$ iken deniz suyu kullanılması halinde de $12,1 \text{ kN/m}^3$ olmaktadır. %5 kireç ve %3,33 BOS ile hazırlanmış olan numunelerde deniz suyu, K.B.H.A nı arttırmakta, optimum su muhtevasını %11 oranında azaltmaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.18: 5L7.5BOSB modifiye kompaksiyon eğrileri (deniz suyu ve çeşme suyu)

Bentonit kili ve %5 kireç ve %7,5 BOS ile hazırlanmış olan numuneler üzerinde yapılan modifiye sıkıştırma deneyi sonuçları Şekil 4.18 de görülmektedir. Şekilde (a) çeşme suyu, (b) deniz suyu ve (c) her ikisinin aynı grafik üzerinde gösterilmiş halidir. Çeşme suyunda %41 olan optimum su muhtevası deniz suyunda %38 dir. K.B.H.A ise çeşme suyunda $11,7 \text{ kN/m}^3$ iken deniz suyu kullanılması halinde de $11,6 \text{ kN/m}^3$ olmaktadır. %5 kireç ve %7,5 BOS ile hazırlanmış olan numunelerde deniz suyu, K.B.H.A önemli bir değişiklik yapmazken optimum su muhtevasını %3 oranında azaltmaktadır.

4.5. CBR

Kalifornia taşıma oranı (California Bearing Ratio, CBR) Amerika Birleşik Devletleri' nin, Kalifornia eyaletinde karayolları araştırma dairesi tarafından, zeminlerin karayollarının alt yapılarında kullanılabilir olup olmadığını belirlemek amacı ile 1929 da geliştirilmiş bir deneydir (Bowles, 1970; Çağlaer, 1986). İkinci dünya savaşı süresince bu yöntemin havaalanı inşaatlarında kullanılabilmesi için deney yöntemi üzerinde Amerikan inşaat mühendislerince bazı değişiklikler yapılmıştır. CBR deneyi belirli bir su muhtevasında ve belirli bir yoğunluktaki zeminin, pistonun batmasına karşı verdiği direnci ifade eder. Başka bir deyişe, farklı su muhtevalarındaki zemin CBR değerleri de farklı olacaktır (Aytekin, 2004).

CBR değeri, zemine 2,54 mm (0,1") veya 5,08 mm. (0,2") batmayı yaratan basınç miktarını, standart basınç miktarına oranlayarak bulunur. Standart basınç: 2,54 mm. için 70,31 kg/cm² ve 5,08 mm. için 105,46 kg/cm² dir. CBR değeri bulunmak istenen zemin de hangi batmada daha yüksek bir CBR elde edilmişse o zeminin CBR si olarak o değer kullanılır. Genelde 2,54 mm. lik batma değeri CBR değerini verir. Bu deney sıkıştırılmış zeminler üzerinde arazide de aynı mantıkla uygulanabilir. İnce taneli zeminlerde arazi ve laboratuvar sonuçları arasındaki fark çok az iken iri taneli zeminlerde fark oldukça büyük olabilmektedir (Tunç, 2001).

Bir zeminin CBR değeri standart bir malzemenin sahip olduğu sabit stabilite değerine oranı olduğundan relatif bir değerdir. Ancak esnek kaplamaların temelleri olan zeminlerde temel ve alt temel tabakalarının taşıma gücünü ölçmede dünyada en yaygın olarak kullanılan deney yöntemidir. Esasen CBR bir taşıma gücü değil, yük karşısında deformasyona karşı gösterdiği dirençtir Başka bir deyişe CBR zeminin stabilite miktarını vermektedir. Bu test doğrudan zemine uygulanabildiği gibi, 19 mm. den büyük kısmı çok az olan temle ve alt temel malzemelerine de uygulanabilmektedir (Tunç, 2001).

Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından hazırlanan şartnameye göre, yol alt tabanında kullanılacak zeminin CBR değeri Tablo 4.3 de görüldüğü gibi olmalıdır. KGM zayıf zeminler şu şekilde tanımlanmıştır: "Yol üstyapısını ve yol yapılarını (dolgu, yarma, köprü, viyadük, tünel vb.) işletme süresince problem

çıkarmadan emniyetli ve ekonomik bir şekilde taşıyamayan zeminler ya da yer altı su seviyesinin yüksek olduğu killi, siltli, organik madde içeren zeminler, gevşek ince kumlu alüvyon zeminler ile kontrolsüz şekilde oluşturulmuş yapay dolgular”. Üstyapının oturacağı taban zeminin bu bakımdan bazı kriterlerde olması istenmektedir. Karayolları Genel Müdürlüğü’nün esnek üstyapılarda taban zemininde kullanılacak malzemenin özellikleri Tablo 4.2’ de verilmiştir (Kavlak, 2008).

Tablo 4.2: Esnek üstyapılarda yol taban zemininin özellikleri (Kavlak, 2008)

| Deney adı | Limit değer | Standart No |
|---|-------------|-----------------------|
| 0,075 mm (No.200) elekten geçen malzeme | < % 50 | TS1900, AASHTO T-11 |
| Likit limit (LL) | < 40 | TS 1900, AASHTO T-89 |
| Plastisite indeksi (PI) | < 15 | TS 1900, AASHTO T-90 |
| Yaş Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) | ≥ % 10 | TS 1900, AASHTO T-193 |

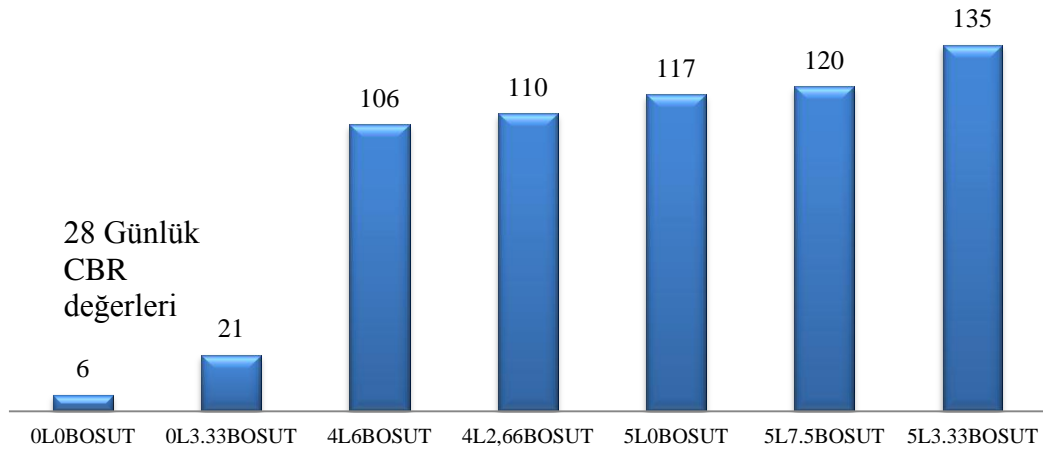
T.C Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 2005 de yayımlanan “Kireç stabilizasyonu ve çeşitli zayıf zemin stabilizatörleri teknik şartnameleri” konulu iç genelgede, sınır değeri olarak aşağıda tanımlanan değerlerin kullanılması söylenmektedir. Tablo 4.3 de teknik şartnameye göre sınır CBR değerleri verilmektedir.

Tablo 4.3: Teknik şartnameye göre sınır CBR değerleri

| Konum | CBR (%) |
|---------------------|---------|
| Alt temel | > 50 |
| Üstyapı tabanı | > 20 |
| Dolgular | > 15 |
| Zayıf Zemin Kriteri | <10 |

Bu tez çalışmasında kullanılan uzunçiftlik kilinin (çeşme suyu ile hazırlanmış) 28 günlük CBR değeri %9 dur. Bentonit kilinin 28 günlük CBR değeri ise %3 dür. Bu zeminler şartnamelere göre yol alt tabanında kullanılamaz.

Çalışmada kullanılan katkılar ile hazırlanmış numuneler üzerinde yapılan CBR deneyi ile ilgili sonuçlar şekil 19, şekil 20, şekil 21 ve şekil 22 de gösterilmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi kullanılan katkılar CBR değerlerinde önemli artışlar meydana getirmektedir.



Şekil 4.19: Uzunçiftlik çeşme suyu karışımlarının 28 günlük CBR değerleri

Katkısız olarak çeşme suyu ile karıştırılan uzunçiftlik kilinin 28 günlük CBR değeri Şekil 4.19 de görüldüğü üzere, 6 dır. Bu değer, alt temel malzemesi olarak kullanılamayacak kadar düşük bir değerdir.

Çeşme suyu su ile yoğrulmuş, %3,33 oranında BOS ile karıştırılmış olan uzunçiftlik kilinin, 28 günlük CBR değeri 21 dir.%3,33 oranında BOS çeşme suyu ile kullanıldığında, uzunçiftlik kilinin CBR değerini yaklaşık 3,5 kat arttırmaktadır. Bu değer teknik şartnameye göre üst yapıda kullanıma uygun anlamına gelmektedir.

Çeşme suyu su ile yoğrulmuş, % 5 oranında kireç ile karıştırılmış olan uzunçiftlik kilinin, 28 günlük CBR değeri 117 dir. %5 oranında kireç ve çeşme suyu ile kullanıldığında, uzunçiftlik kilinin CBR değerini yaklaşık 20 kat arttırmaktadır. Bu değer teknik şartnameye göre üst yapıda ve alt temelde kullanıma uygun anlamına gelmektedir.

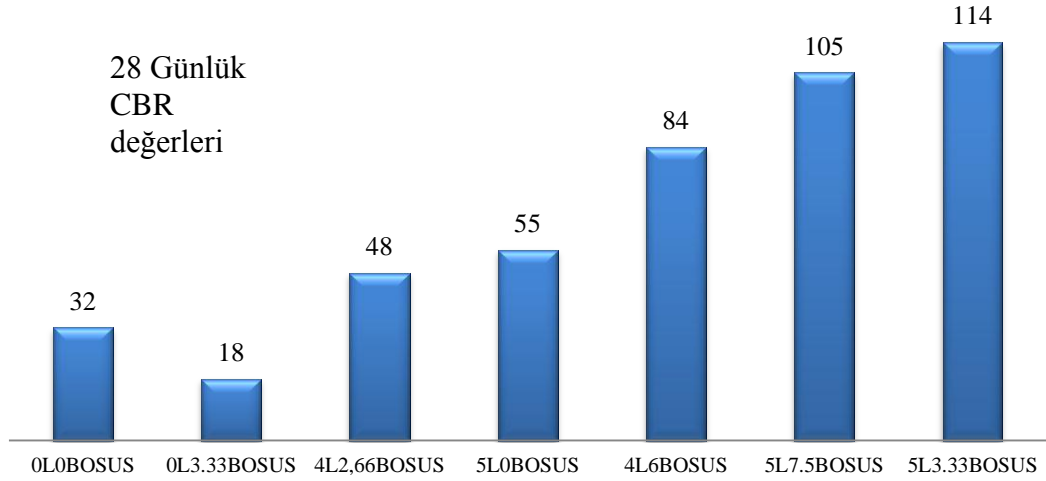
Çeşme suyu su ile yoğrulmuş, %4 kireç ve %6 oranında BOS ile karıştırılmış olan uzunçiftlik kilinin, 28 günlük CBR değeri 106 dir. %4 kireç, %6 BOS ve çeşme suyu ile kullanıldığında, uzunçiftlik kilinin CBR değerini yaklaşık 18 kat arttırmaktadır. Bu değer teknik şartnameye göre üst yapıda ve alt temelde kullanıma uygun anlamına gelmektedir.

Çeşme suyu su ile yoğrulmuş, %5 kireç ve %3,33 oranında BOS ile karıştırılmış olan uzunçiftlik kilinin, 28 günlük CBR değeri 135 dir. %5 kireç, %3,33 oranında BOS ve çeşme suyu ile kullanıldığında, uzunçiftlik kilinin CBR değerini yaklaşık 23 kat arttırmaktadır. Bu değer teknik şartnameye göre üst yapıda ve alt temelde kullanıma uygun anlamına gelmektedir.

Çeşme suyu su ile yoğrulmuş, %5 kireç ve %7,5 BOS ile karıştırılmış olan uzunçiftlik kilinin, 28 günlük CBR değeri 120 dir. %5 kireç, %7,5 oranında BOS ve çeşme suyu ile kullanıldığında, uzunçiftlik kilinin CBR değerini yaklaşık 20 kat arttırmaktadır. Bu değer teknik şartnameye göre üst yapıda ve alt temelde kullanıma uygun anlamına gelmektedir.

Deniz suyu ile hazırlanan uzunçiftlik kili üzerinde yapılan CBR deneyleri sonucunda Şekil 4.20 de görüldüğü gibi, deniz suyunun CL gurubu killere olumlu etki yaptığı gözlenmiştir. Nitekim çeşme suyu ile 9 olan CBR değeri deniz suyu kullanılması halinde 32 ye yükselmektedir. Bu değer teknik şartnameye göre üst yapıda ve dolguda kullanıma uygun anlamına gelmektedir.

Deniz suyu su ile yoğrulmuş, %3,33 oranında BOS ile karıştırılmış olan uzunçiftlik kilinin, 28 günlük CBR değeri 18 dir. BOS deniz suyu ile kullanıldığında, uzunçiftlik kilinin CBR değerini yaklaşık 2 kat arttırmaktadır. Bu değer çeşme suyu ile elde edilen artışın % 80 kadarıdır. O halde, BOS çeşme suyu ile de deniz suyu ile de düşük plastisiteli killerde dayanımı arttırmaktadır. Bu değer teknik şartnameye göre dolguda kullanıma uygun anlamına gelmektedir.



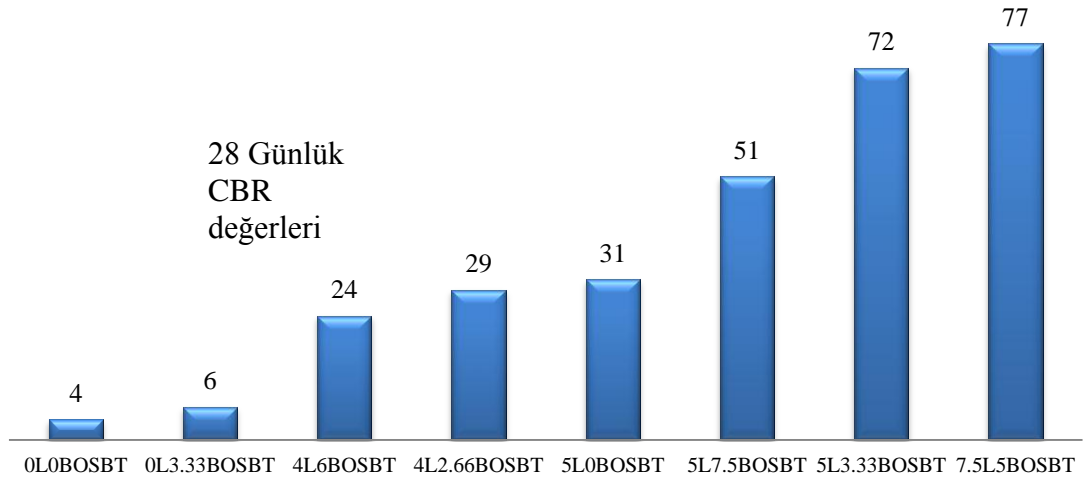
Şekil 4.20: Uzunçiftlik deniz suyu karışımlarının 28 günlük CBR değerleri

Deniz suyu su ile yoğrulmuş, % 5 oranında kireç ile karıştırılmış olan uzunçiftlik kilinin, 28 günlük CBR değeri 55 dir. %5 oranında kireç ve deniz suyu ile kullanıldığında, uzunçiftlik kilinin CBR değerini yaklaşık 6 kat arttırmaktadır. Bu değer, çeşme suyu ile elde edilen artışın % 50 si kadardır. Kireç çeşme suyu ile de deniz suyu ile de düşük plastisiteli killerde dayanımı arttırmaktadır. Bu değer teknik şartnameye göre üst yapıda ve alt temelde kullanıma uygun anlamına gelmektedir.

Deniz suyu su ile yoğrulmuş, %4 kireç ve %6 oranında BOS ile karıştırılmış olan uzunçiftlik kilinin, 28 günlük CBR değeri 84 dür. %4 kireç, %6 BOS ve deniz suyu ile kullanıldığında, uzunçiftlik kilinin CBR değerini 9 kat arttırmaktadır. Bu değer, çeşme suyu ile elde edilen artışın % 70 si kadardır. %4 kireç, %6 BOS, çeşme suyu ile de deniz suyu ile de düşük plastisiteli killerde dayanımı arttırmaktadır. Bu değer teknik şartnameye göre üst yapıda ve alt temelde kullanıma uygun anlamına gelmektedir.

Deniz suyu su ile yoğrulmuş, %5 kireç ve %3,33 oranında BOS ile karıştırılmış olan uzunçiftlik kilinin, 28 günlük CBR değeri 114 dir. %5 kireç, %3,33 BOS ve deniz suyu ile kullanıldığında, uzunçiftlik kilinin CBR değerini yaklaşık 13 kat arttırmaktadır. Bu değer, çeşme suyu ile elde edilen artışın yaklaşık % 85 ı kadardır. %5 kireç, %3,33 BOS çeşme suyu ile de deniz suyu ile de düşük plastisiteli killerde dayanımı arttırmaktadır. Bu değer teknik şartnameye göre üst yapıda ve alt temelde kullanıma uygun anlamına gelmektedir.

Deniz suyu su ile yoğrulmuş, %5 kireç ve %7,5 BOS ile karıştırılmış olan uzunçiftlik kilinin, 28 günlük CBR değeri 120 dir. %5 kireç, %7,5 oranında BOS ve deniz suyu ile kullanıldığında, uzunçiftlik kilinin CBR değerini 13 kat arttırmaktadır. Bu değer, çeşme suyu ile elde edilen artışın yaklaşık % 88 İ kadardır. %5 kireç, %7,5 BOS çeşme suyu ile de deniz suyu ile de düşük plastisiteli killerde dayanımı arttırmaktadır. Bu değer teknik şartnameye göre üst yapıda ve alt temelde kullanıma uygun anlamına gelmektedir.



Şekil 4.21: Bentonit çeşme suyu karışımlarının 28 günlük CBR değerleri

Çeşme suyu ile karıştırılan bentonit kilinin, Şekil 4.21 de görüldüğü üzere katkısız olarak 28 günlük CBR değeri 4 tür. Bu değer, alt temel malzemesi olarak kullanılamayacak kadar düşük bir değerdir. Bu değer teknik şartnameye göre dolgularda dahi kullanıma uygun olmayan zayıf zemin anlamına gelmektedir.

Çeşme suyu su ile yoğrulmuş olan bentonit kilinin, %3,33 oranında BOS ile karıştırılmış ve, 28 günlük CBR değeri 18 dir.%3,33 oranında BOS çeşme suyu ile kullanıldığında, bentonit kilinin CBR değerini %50 oranında artırmakta ve 6 ya yükseltmektedir. Bu değer teknik şartnameye göre dolgularda dahi kullanıma uygun olmayan zayıf zemin anlamına gelmektedir

Çeşme suyu su ile yoğrulmuş olan bentonit kilinin,% 5 oranında kireç ile karıştırılmış ve 28 günlük CBR değeri 31 dır. %5 oranında kireç ve çeşme suyu ile kullanıldığında, bentonit kilinin CBR değerini yaklaşık 8 kat arttırmaktadır.

Çeşme suyu su ile yoğrulmuş olan bentonit kilinin,%4 kireç ve %6 oranında BOS ile karıştırılmış 28 günlük CBR değeri 24 dir. %4 kireç, %6 BOS ve çeşme suyu ile kullanıldığında, bentonit kilinin CBR değerini 6 kat arttırmaktadır.

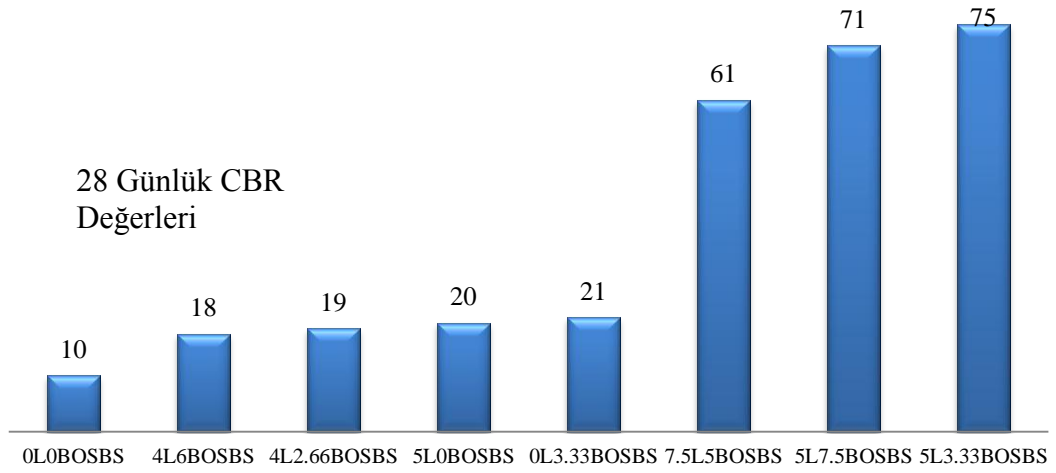
Çeşme suyu su ile yoğrulmuş olan bentonit kilinin, %5 kireç ve %3,33 oranında BOS ile karıştırılmış 28 günlük CBR değeri 72 dir. %5 kireç, %3,33 oranında BOS ve çeşme suyu ile kullanıldığında, bentonit kilinin CBR değerini 18 kat arttırmaktadır.

Çeşme suyu su ile yoğrulmuş olan bentonit kilinin, %5 kireç ve %7,5 BOS ile karıştırılmış 28 günlük CBR değeri 51 dir. %5 kireç, %7,5 oranında BOS ve çeşme suyu ile kullanıldığında, bentonit kilinin CBR değerini yaklaşık 13 kat arttırmaktadır.

Deniz suyu ile hazırlanan bentonit kili üzerinde yapılan CBR deneyleri sonucunda Şekil 4.22 de görüldüğü gibi, deniz suyunun CH gurubu killere olumlu etki yaptığı gözlenmiştir. Nitekim çeşme suyu ile 4 olan CBR değeri deniz suyu kullanılması halinde 10 a yükselmektedir.

Deniz suyu su ile yoğrulmuş olan bentonit kilinin, %3,33 oranında BOS ile karıştırılmış 28 günlük CBR değeri 21 dir. BOS deniz suyu ile kullanıldığında, bentonit kilinin CBR değerini yaklaşık 6 kat arttırmaktadır. Bu değer çeşme suyu ile elde edilen artışın 3,5 katı kadardır. O halde, BOS çeşme suyu ile de deniz suyu ile de düşük plastisiteli killerde dayanımı arttırmaktadır. Ancak deniz suyu ile BOS etkileşimi, çeşme suyu BOS etkileşiminden çok daha olumlu sonuç vermektedir.

Deniz suyu su ile yoğrulmuş olan bentonit kilinin, % 5 oranında kireç ile karıştırılmış 28 günlük CBR değeri 20 dir. %5 oranında kireç ve deniz suyu ile kullanıldığında, bentonit kilinin CBR değerini 5 kat arttırmaktadır. Bu değer, çeşme suyu ile elde edilen artışın % 80 i kadardır. Kireç çeşme suyu ile de deniz suyu ile de düşük plastisiteli killerde dayanımı arttırmaktadır. Ancak çeşme suyu ile kireç etkileşimi, deniz suyu kireç etkileşiminden daha olumlu sonuç vermektedir.



Şekil 4.22: Bentonit deniz suyu karışımlarının 28 günlük CBR değerleri

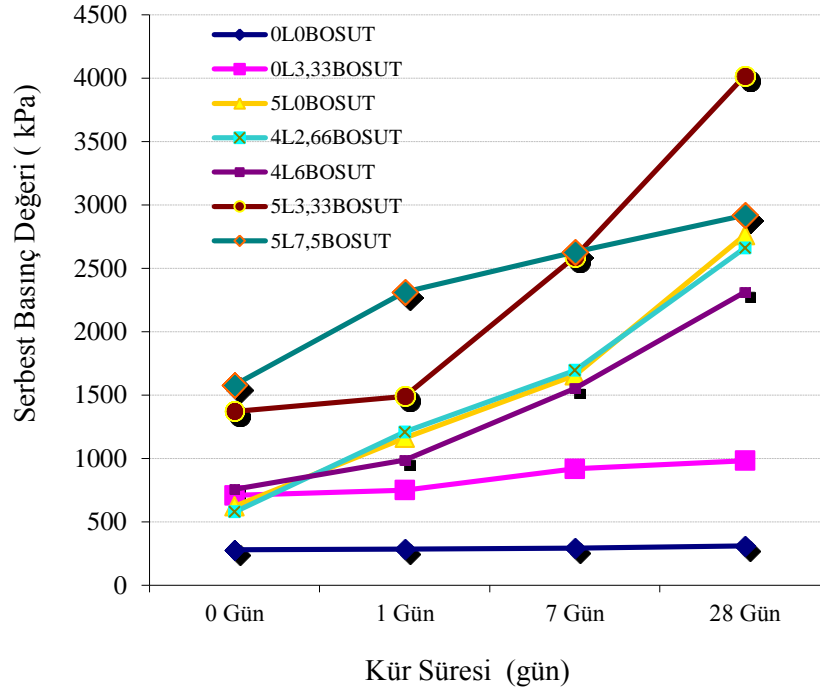
Deniz suyu su ile yoğrulmuş olan bentonit kilinin, %4 kireç ve %6 oranında BOS ile karıştırılmış 28 günlük CBR değeri 18 dir. %4 kireç, %6 BOS ve deniz suyu ile kullanıldığında, bentonit kilinin CBR değerini 4,5 kat arttırmaktadır. Bu değer, çeşme suyu ile elde edilen artışın % 80 ı kadardır. %4 kireç, %6 BOS, çeşme suyu ile de deniz suyu ile de düşük plastisiteli killerde dayanımı arttırmaktadır.

Deniz suyu su ile yoğrulmuş olan bentonit kilinin, %5 kireç ve %3,33 oranında BOS ile karıştırılmış 28 günlük CBR değeri 72 dir. %5 kireç, %3,33 BOS ve deniz suyu ile kullanıldığında, bentonit kilinin CBR değerini yaklaşık 18 kat arttırmaktadır. Bu değer, çeşme suyu ile elde edilen artış miktarı ile aynıdır. %5 kireç, %3,33 BOS çeşme suyu ile de deniz suyu ile de düşük plastisiteli killerde dayanımı arttırmaktadır.

Deniz suyu su ile yoğrulmuş olan bentonit kilinin, %5 kireç ve %7,5 BOS ile karıştırılmış 28 günlük CBR değeri 77 dir. %5 kireç, %7,5 oranında BOS ve deniz suyu ile kullanıldığında, bentonit kilinin CBR değerini yaklaşık 20 kat arttırmaktadır. Bu değer, çeşme suyu ile elde edilen artışın yaklaşık % 97 si kadardır. %5 kireç, %7,5 BOS çeşme suyu ile de deniz suyu ile de düşük plastisiteli killerde dayanımı arttırmaktadır.

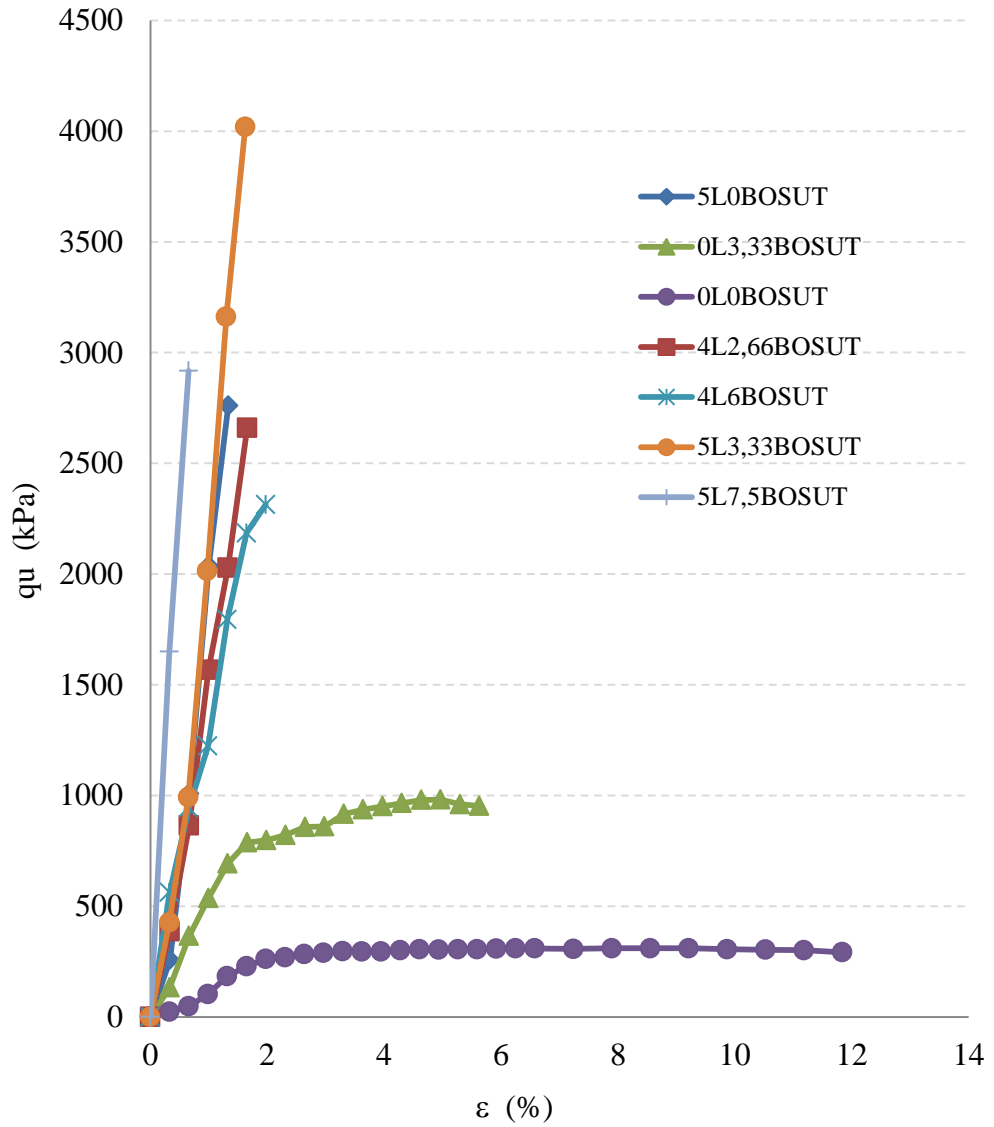
4.6. Serbest Basınç Sonuçları

Hazırlanan numunelerin taşıma gücünün belirlenmesinde serbest basınç deneyleri kullanılmıştır. Literatürde zemin iyileştirmede katkı malzemesi kullanılması hakkında yapılan hemen hemen tüm çalışmalarda iyileştirmenin tanımlanmasında serbest basınç deneyi kullanılmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen grafikler Ek A da sunulmaktadır. Şekil A.1 de görüldüğü gibi katkısız olarak çeşme suyu ile yoğrularak hazırlanmış uzun çiftlik kilinin serbest basınç mukavemeti 28 gün sonunda 350 kPa değerindedir.



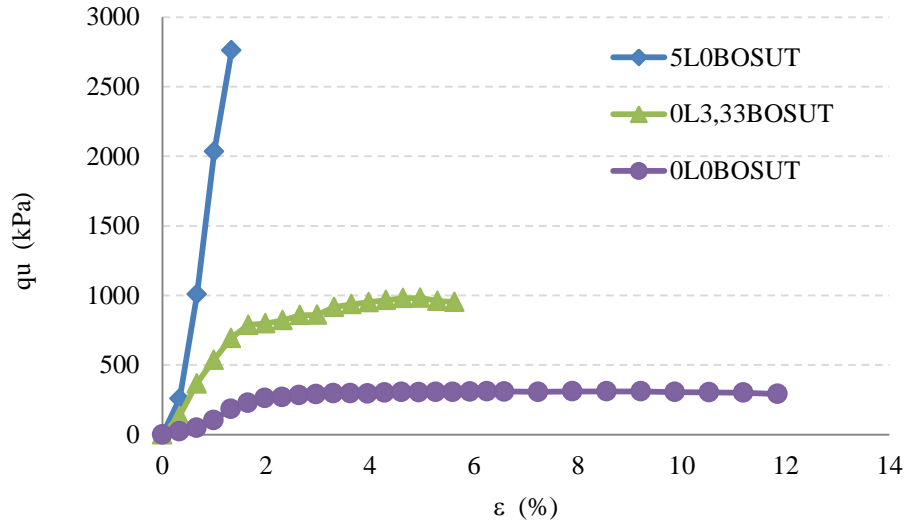
Şekil 4.23: Uzunçiftlik kili, çeşme suyu numunelerin serbest basınç değerleri

Çeşme suyu ile hazırlananmış uzunçiftlik kili ile hazırlanmış karışımların 0, 1, 7 ve 28 günlük serbest basınç değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4. 23 de görülmektedir. Şekil 4.16 de görüldüğü üzere, uzunçiftlik kilinin serbest basınç değeri 279 kPa dır. %3,33 oranında BOS çeşme suyu ile birlikte kullanıldığında uzunçiftlik killinin serbest basınç değerini 960 kPa ya çıkarmaktadır.



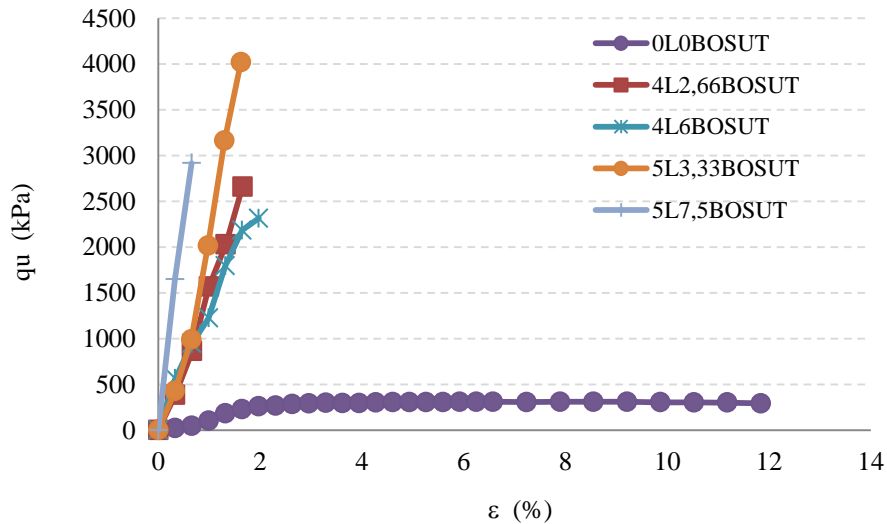
Şekil 4.24: Uzunçiftlik çeşme suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri

Çeşme suyu ve % 5 oranında kireç ve ile hazırlana karışımda ise serbest basınç değeri 2700 kPa ya yükselmektedir. % 5 kireç ve % 3,33 BOS ve çeşme suyu ile hazırlanan karışım düşük plastisiteli kil ile hazırlanan numuneler arasında en büyük değeri almakta ve 28 sonunda 4000 kPa değerine yükseltmektedir. Şekil 4.24 de Uzunçiftlik kili ve çeşme suyu ile hazırlanan karışımların 28 gün sonundaki serbest basınç değerlerinin karşılatmalı grafiği görülmektedir. Kireç oranı %7,5 ve BOS miktarı %5 olan karışım ise 3000 kPa değerine kadar yükselbilmektedir.

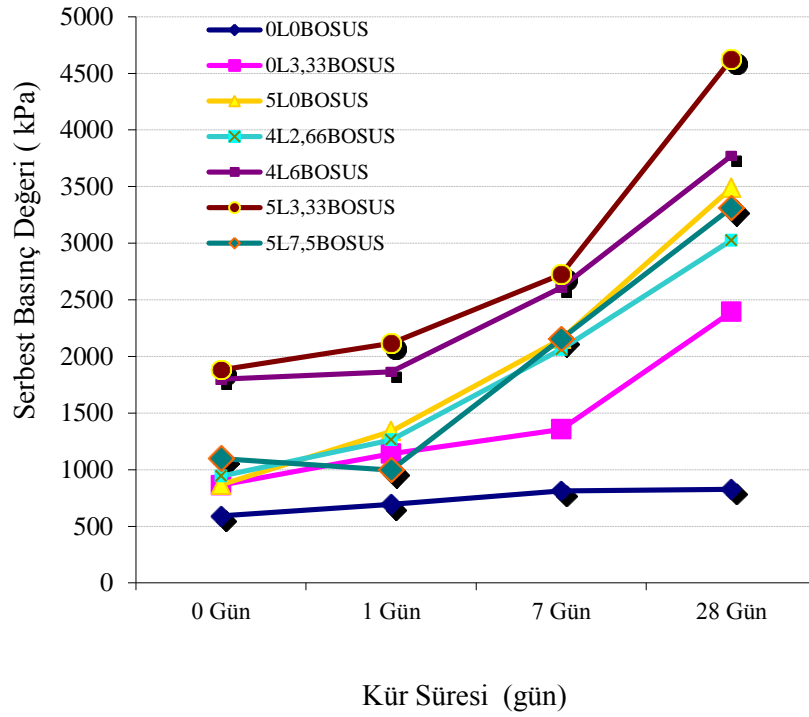


Şekil 4.25: Uzunçiftlik çeşme suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (1)

Deney sonuçlarına göre, kireç ve BOS miktarının artması ile serbest basınç değerlerinin artması arasında doğrusal bir oran yoktur. Şekil 4.25 ve 4.26 da görüldüğü üzere, kireç ve BOS miktarı arttırılınca ilk olarak yükselen serbest basınç değerleri artışın devam etmesi ile düşmektedir. O halde düşük plastisiteli killerde stabilizasyon amacı ile kireç ve BOS kullanımında bir optimum oran söz konusudur. Düşük plastisiteli killeri için optimum oran %5 kireç ve %3,33 BOS dur.



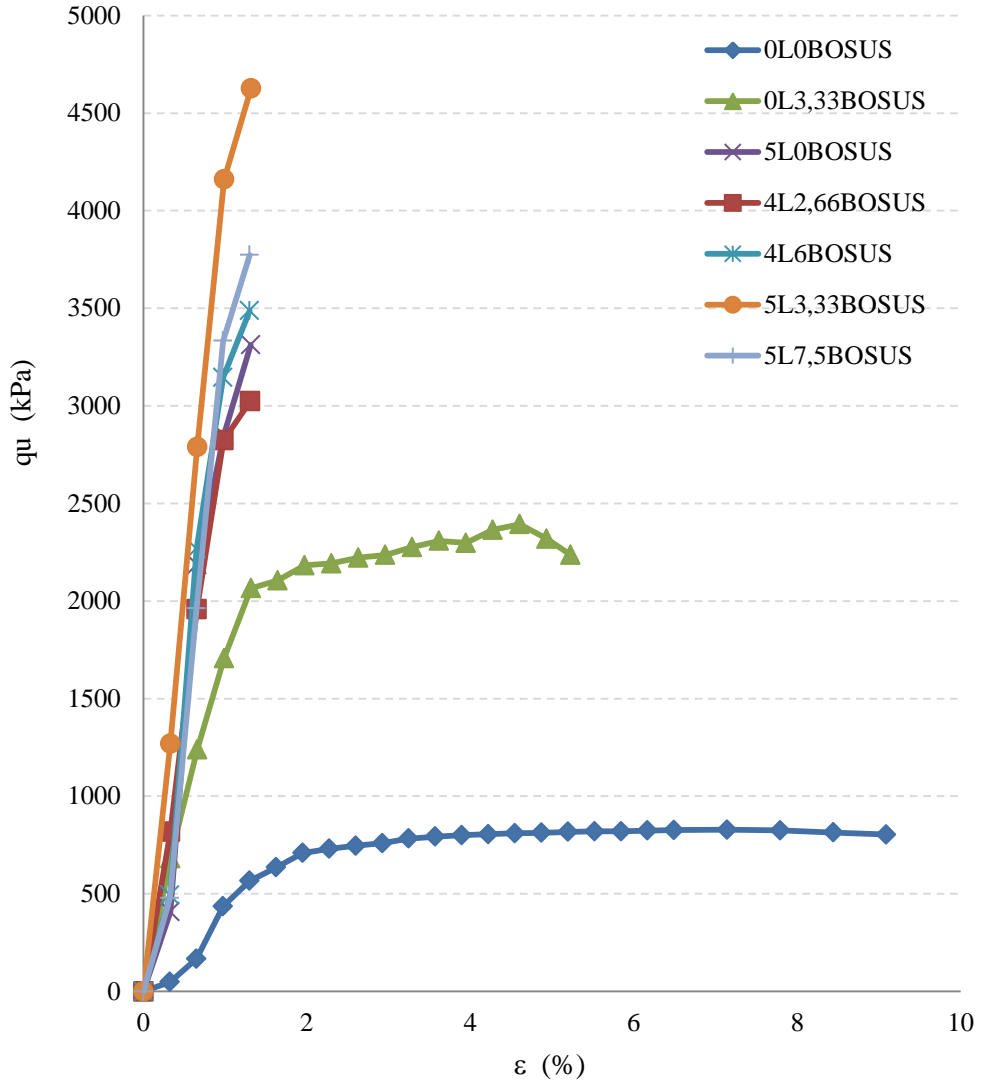
Şekil 4.26: Uzunçiftlik çeşme karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (2)



Şekil 4.27: Uzunçiftlik kili deniz suyu numunelerinin serbest basınç değerleri (1)

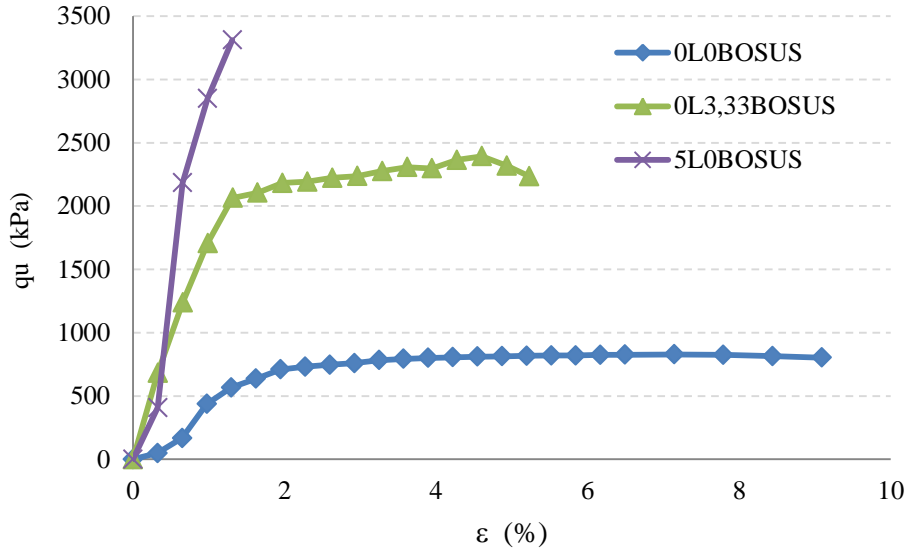
Deniz suyu ile hazırlananmış uzunçiftlik kili ile hazırlanmış karışımların 0, 1, 7 ve 28 günlük serbest basınç değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.27 de görülmektedir. Düşük plastisiteli killerde, BOS' un deniz suyu ile etkileşimi oldukça olumludur. uzunçiftlik kilinin serbest basınç değeri 279 kPa dır. % 3,33 oranında BOS çeşme suyu ile birlikte kullanıldığında uzunçiftlik killinin serbest basınç değerini 960 kPa ya çıkarmaktadır. Deniz suyu kullanılması halinde 2,6 kat daha artarak, 2400 kPa' a yükselmektedir.

% 5 oranında kireç ile deniz suyu kullanılması durumunda serbest basınç değeri 3500 kPa çıkmaktadır. Bu değer çeşme suyu kullanılması durumunda 2660 kPa olarak görülmektedir. O halde düşük plastisiteli killerde deniz suyu kullanılması serbest basınç mukavemetini arttırmaktadır.



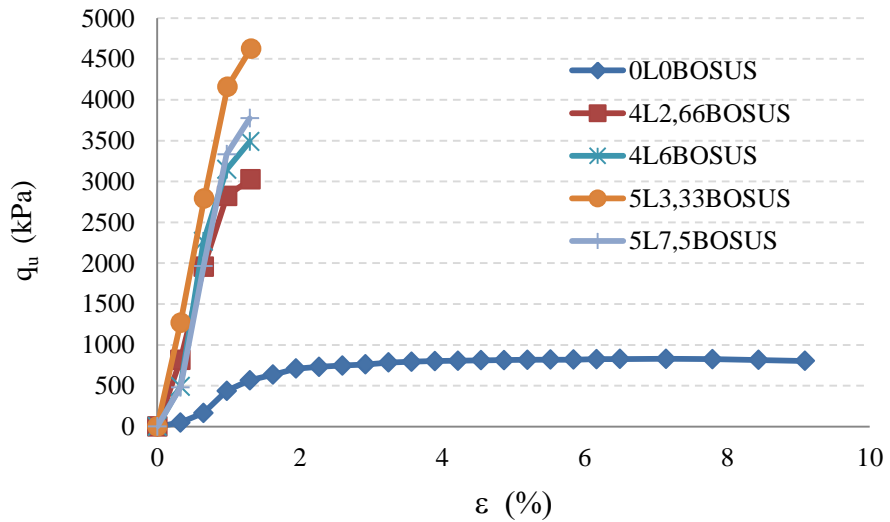
Şekil 4.28: Uzunçiftlik deniz suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (2)

Uzunçiftlik kili ve deniz suyu ile hazırlanan karışımların 28 gün sonundaki serbest basınç değerlerinin karşılatmalı grafiği Şekil 4.28 de görülmektedir. Yoğurmada deniz suyunun kullanılması durumunda düşük plastisiteli killerde, en yüksek serbest basınç değerini, çeşme suyunda olduğu gibi, %5 kireç ve %3,33 BOS ile hazırlanan karışım vermektedir. Uzunçiftlik kilinin 279 kPa olan değerini 28 sonunda 4500 kPa değerine yükseltmektedir. Kireç oranı %7,5 ve BOS miktarı %5 olan karışım ise 3800 kPa değerine kadar yükselbilmektedir

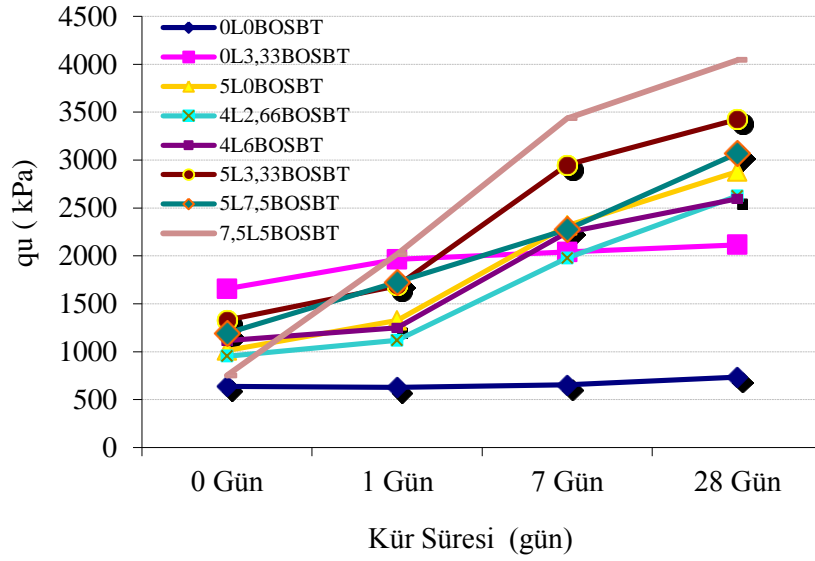


Şekil 4.29: Uzunçiftlik deniz suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (3)

Düşük plastisiteli killerin iyileştirilmesinde, deniz suyu kullanılması durumunda da optimum oran % 5 kireç ve %3 ,33 BOS dur. Şekil 4.29 de sadece BOS ve sadece kireç ile karıştırılan ve deniz suyu ile çalışılmış uzunçiftlik kiline ait 28 günlük serbest basınç değerleri verilmiştir. Şekil 4.29 ve Şekil 4.30 da uzunçiftlik kili ve deniz suyu ile hazırlanan karışımların 28 gün sonundaki serbest basınç değerlerinin karşılatmalı grafiği görülmektedir.



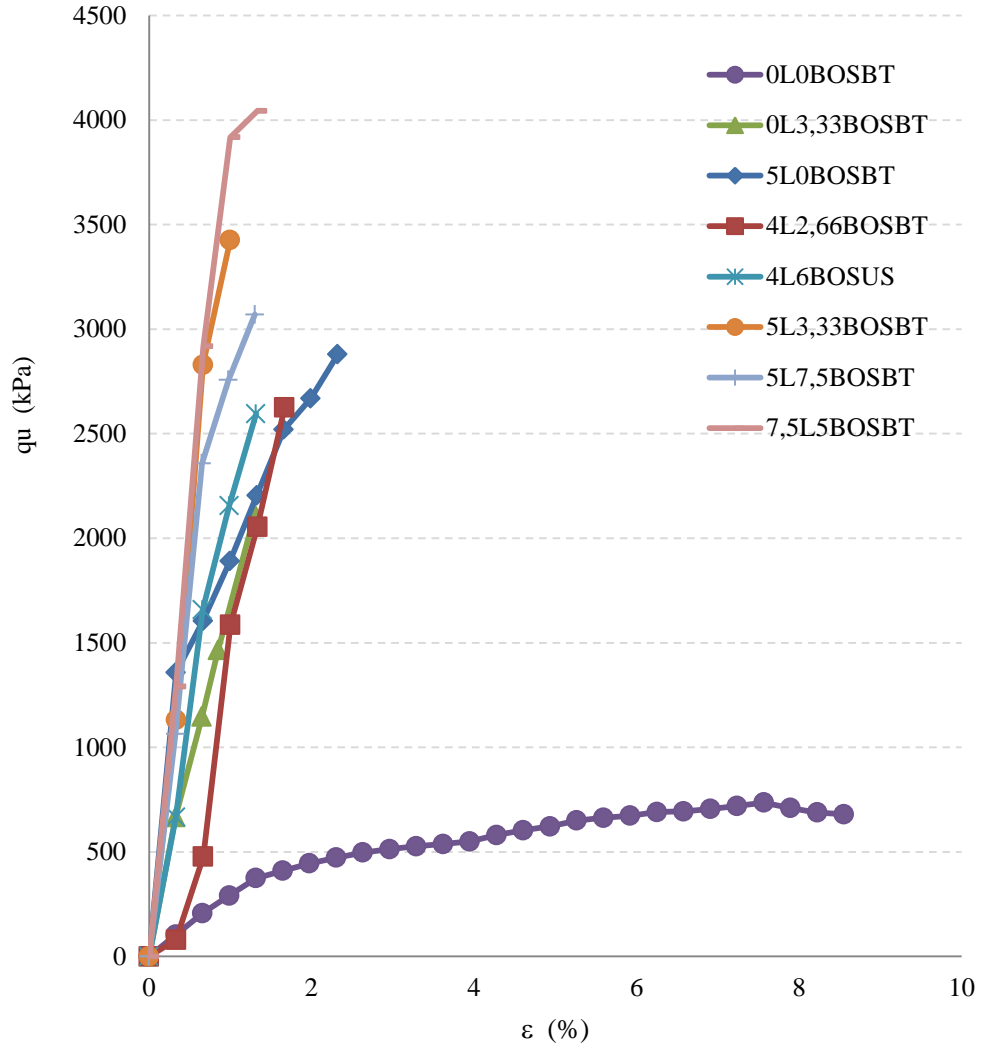
Şekil 4.30: Uzunçiftlik deniz suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (4)



Şekil 4.31: Bentonit kili çeşme suyu numunelerinin serbest basınç değerleri

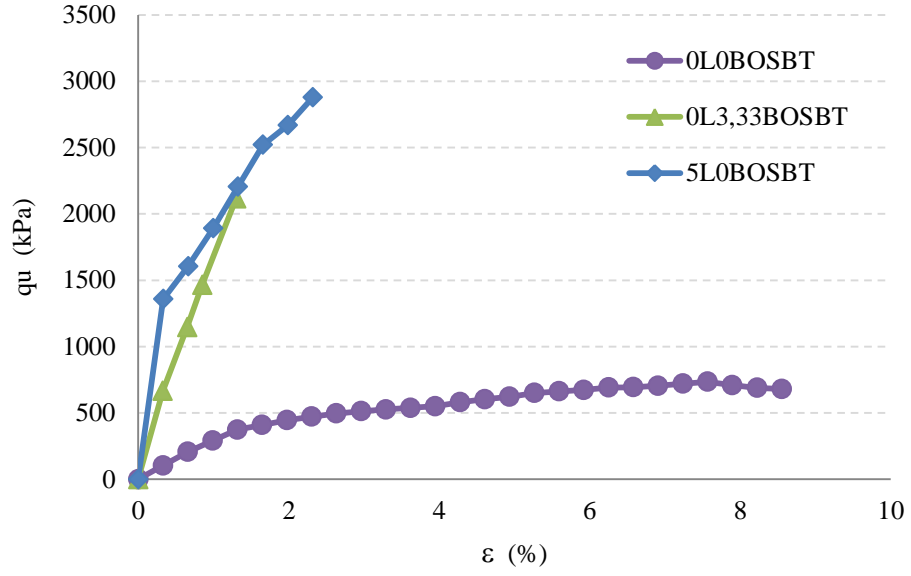
Yüksek plastisiteli killerde çeşme suyu ile hazırlanan karışımların 0, 1, 7 ve 28 günlük serbest basınç değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.31 de görülmektedir. Bentonit kilinde katkı maddesi olarak herhangi bir stabilizatör kullanmadan (katkısız halde) çeşme suyu ile çalışıldığında elde edilen serbest basınç değeri 630 kPa dır.

Yüksek plastisiteli killerde, düşük plastisiteli kilden farklı olarak dikkati çeken BOS katkısının etkileridir. Düşük plastisiteli killerde tüm karışımlar ilk karıştırıldıklarında çok fazla etki etmemekte, 28 günün sonunda artışlar belirgin bir şekilde görülmektedir. Yüksek plastisiteli kilde BOS çeşme suyu ile kullanılması halinde, karıştırıldığı anda mukavemeti 279 dan 1600 kPa değerine taşımaktadır. Daha sonra ise artış az olmaktadır. Nitekim 28 gün sonunda %3,33 BOS ile karıştırılan bentonit kilinin serbest basınç değeri 2100 kPa ya ulaşmaktadır. Yüksek plastisiteli kilde BOS çeşme suyu ile kullanılması halinde, karıştırıldığı anda mukavemeti 279 dan 1600 kPa değerine taşımaktadır. Daha sonra ise artış az olmaktadır. Nitekim 28 gün sonunda %3,33 BOS ile karıştırılan bentonit kilinin serbest basınç değeri 2100 kPa ya ulaşmaktadır.



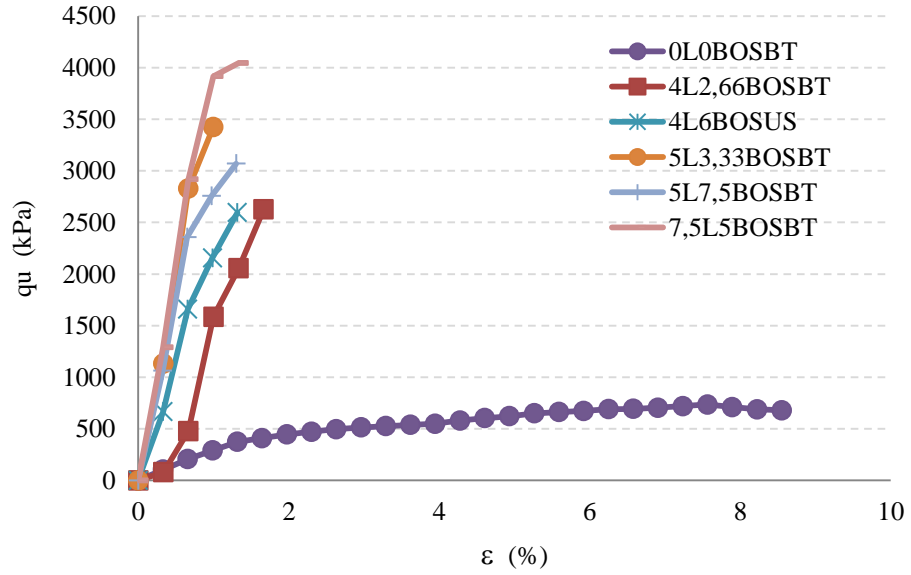
Şekil 4.32: Bentonit çeşme suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (1)

Uzunçiftlik kili ve çeşme suyu ile hazırlanan karışımların 28 gün sonundaki serbest basınç değerlerinin karşılatmalı grafiği Şekil 4.32 de görülmektedir. Yüksek plastisiteli killerde %5 oranında kireç kullanılması durumunda serbest basınç değeri 2300 kPa değerine yükselmektedir. Yüksek plastisiteli killerde çeşme suyu ile hazırlanan karışımlar içinde, en yüksek serbest basınç değerini veren %7,5 kireç ve %5 BOS ile hazırlanan karışımdır. Karışım serbest basınç değerini 630 kPa dan 4000 kPa' ya taşımaktadır. Yüksek plastisiteli killerde çeşme suyu kullanılması halinde en yüksek değeri veren karışım %7,5 kireç ve %5 BOS ile hazırlanan karışımdır.

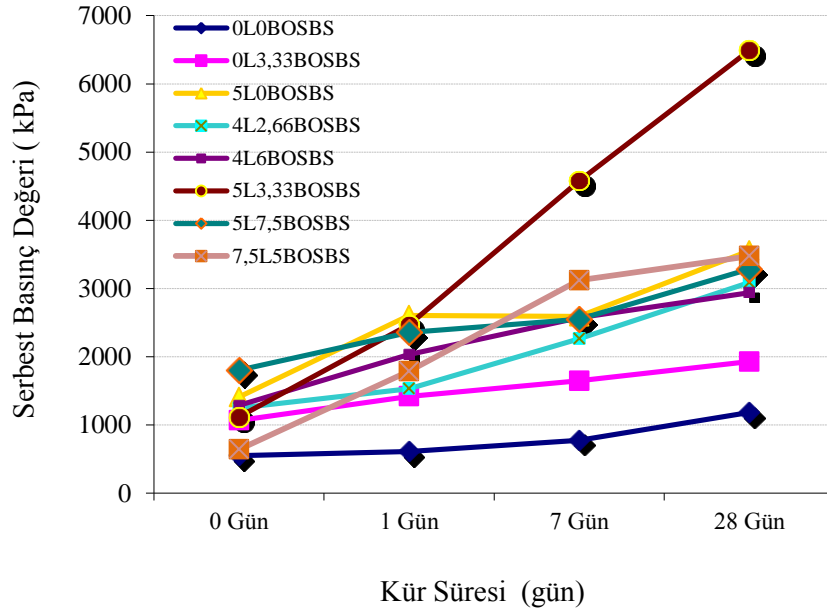


Şekil 4.33: Bentonit çeşme suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (2)

Sadece BOS ve sadece kireç ile karıştırılan ve deniz suyu ile çalışılmış bentonit kiline ait 28 günlük serbest basınç değerleri Şekil 4.33 de verilmiştir. Şekil 4.34 de bentonit kili ve deniz suyu ile hazırlanan karışımların 28 gün sonundaki serbest basınç değerlerinin karşılatmalı grafiği görülmektedir.



Şekil 4.34: Bentonit çeşme suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (3)

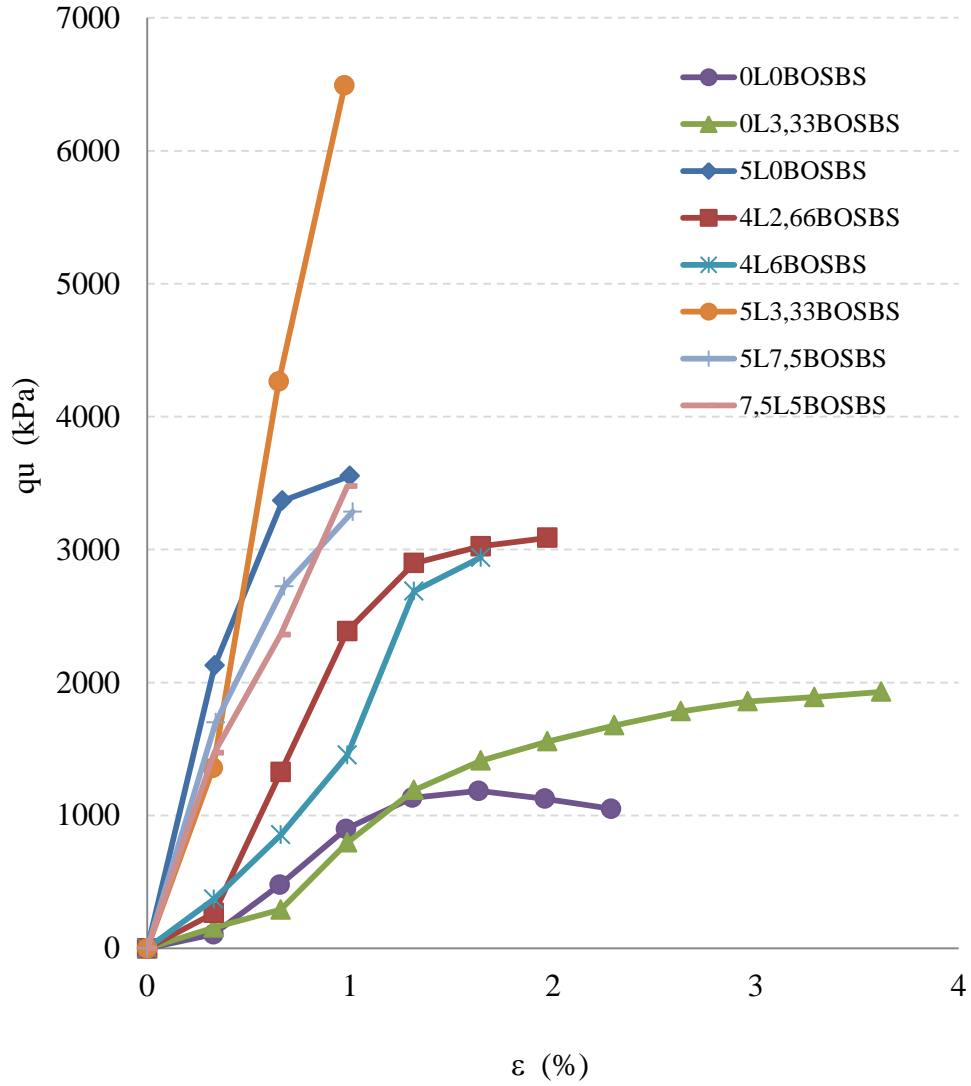


Şekil 4.35: Bentonit kili deniz suyu numunelerin serbest basınç değerleri

Yüksek plastisiteli killerde deniz suyu ile hazırlanan karışımların 0, 1, 7 ve 28 günlük serbest basınç değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.35 de görülmektedir. Deniz suyu kullanımında elde edilen sonuçlar, çeşme suyuna göre farklılık göstermektedir.

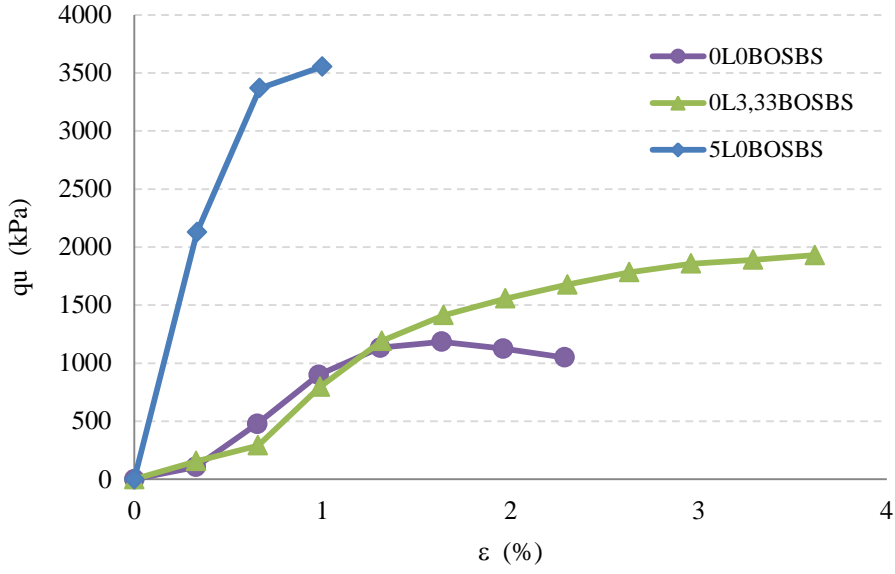
BOS ile kullanılınca katkısız hale göre çeşme suyunda olduğu gibi serbest basınç değerini yükseltmektedir. Ancak çeşme suyu BOS karışımında 2600 kPa değerine çıkan serbest basınç mukavemeti, deniz suyu kullanılması halinde 1900 kPa değerine kadar çıkabilmektedir. BOS deniz suyu etkileşimi yüksek plastisiteli killerde çeşme suyuna göre kötüdür.

%5 oranında kireç ile karıştırılan bentonit kili çeşme suyu ile yoğrulduğunda serbest basınç değeri 3500 kPa a yükselmektedir. Bu çeşme suyu ile elde edilen 2300 kPa dan 1,3 kat daha fazladır. Kireç deniz suyu etkileşimi oldukça olumludur.



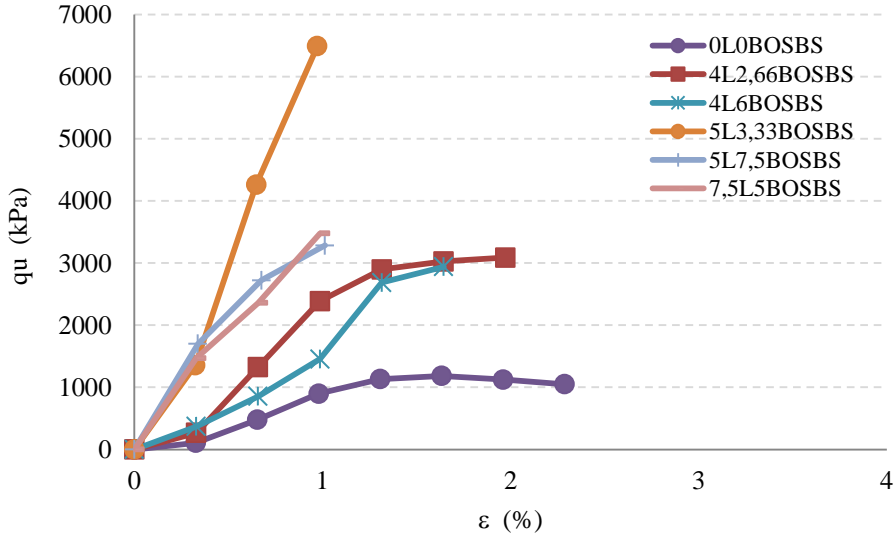
Şekil 4.36: Bentonit kili deniz suyu numunelerin 28 günlük serbest basınç değerleri (1)

Bentonit kili ve çeşme suyu ile hazırlanan karışımların 28 gün sonundaki serbest basınç değerlerinin karşılatmalı grafiği Şekil 4.36 de görülmektedir. Yüksek plastisiteli killerde çeşme suyu kullanılması halinde en yüksek değeri %7,5 kireç ve %5 BOS ile hazırlanan karışım vermekte idi. Ancak deniz suyu kullanılması halinde bu sonuç değişmektedir. Karışımda bulunun % 5 oranındaki BOS, BOS deniz suyunun olumsuz etkileşimi sebebi ile çok yükselememektedir ve 3500 kPa değerlerinde kalmaktadır. Yüksek plastisiteli killerde deniz suyu kullanılması halinde, 6900 kPa olan en yüksek serbest basınç değerini, %5 kireç ve %3,33 BOS ile hazırlanan karışım vermektir.



Şekil 4.37: Bentonit deniz suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (2)

Sadece BOS ve sadece kireç ile karıştırılan ve deniz suyu ile çalışılmış bentonit kiline ait 28 günlük serbest basınç değerleri Şekil 4.37 de verilmiştir. Şekil 4.31 de bentonit kili ve deniz suyu ile hazırlanan karışımların 28 gün sonundaki serbest basınç değerlerinin karşılatmalı grafiği görülmektedir.



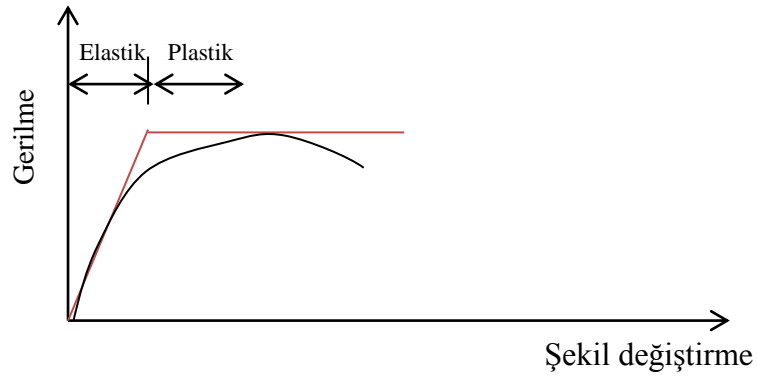
Şekil 4.38: Bentonit deniz suyu karışımlarının 28 günlük serbest basınç değerleri (3)

4.7. Elastisite Modülü

Elastisite modülü, malzemenin kuvvet altında elastik şekil değiştirmesinin ölçüsüdür. Elastikiyet modülü veya Young modülü olarak da anılır. Birim uzama ile normal gerilme arasındaki ilişki Denklem 4.1 de gösterildiği şekli ile formüle edilir.

$$\text{Elastisite Modülü (E)} = \text{Normal Gerilme } (\sigma) / \text{Birim Uzama } (\epsilon) \quad (4.1)$$

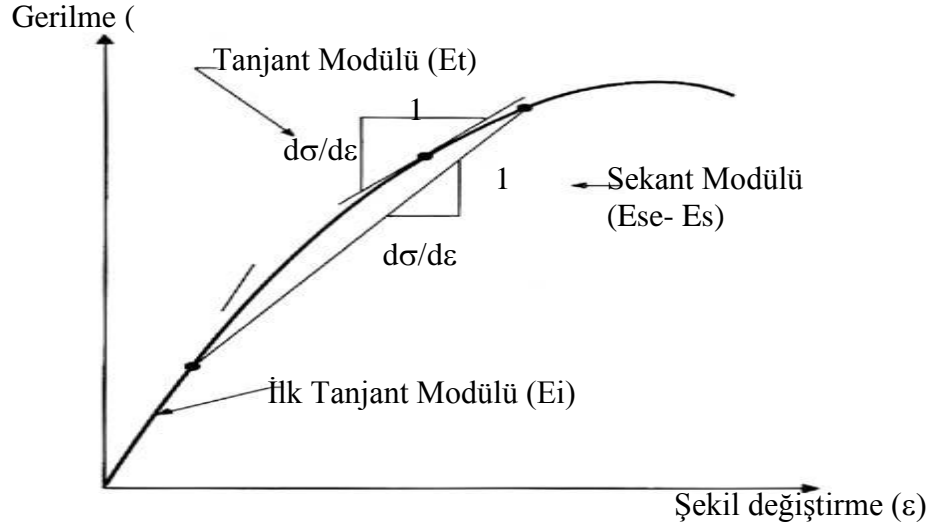
Elastikiyet teorisi lineer (doğrusal) gerilme-şekil değiştirme arasındaki ilişki olarak tanımlanmaktadır. Ancak zeminde gerilme ile şekil değiştirme arasında zeminin yapısına bağlı olarak, doğrusal olmayan (non-linear) bir gerilme-şekil değiştirme ilişkisi vardır (Craig, 2004). Zemin ne tam olarak homojen, elastik veya izotropik olmadığı halde elastikiyet teorisi zeminde gerilme davranışlarını ve oturma miktarını tahmin etmek amacı ile kullanılmaktadır. Düşük gerilme seviyelerinde şekil değiştirme ile gerilme ilişkisini gösteren eğri doğrusal olarak artar. Gerçek gerilme seviyesi ötesinde malzeme plastik duruma ulaşır ve gerilme artmadığı halde, şekil değiştirme artmaya devam eder. İdealleştirilmiş gerilme – şekil değiştirme diyagramı Şekil 4.39 de görülmektedir (Das, 2008).



Şekil 4.39: İdealleştirilmiş gerilme – şekil değiştirme diyagramı

Serbest basınç deney, ve üç eksenli basınç deneylerinden Elastik modülün tahmin edilmesi amacı ile farklı E değerleri türetilmiştir. Bunlar “İlk Tanjant Modülü” (E_i), “İkincil Modülü” (E_{se}) ve “Tanjant Modülü” (E_t) dir.

Ese genellikle zeminler tiplerinin davranışlarının tanımlanmasında kullanılırken, İlk tanjant modülü E_i , genellikle kaya tiplerinin davranışlarını tanımlamada kullanılır. Ese zeminlerin deformasyon hesabında, gerilme ya da deformasyon tanımlamalarında da kullanılır. E_s , “deformasyon elastisite modülü” olarak da adlandırılabilir. Şekil 4.40 da elastisite modüllü çeşitleri gösterilmektedir (Hurt, 2005).



Şekil 4.40: Elastik modül tanımlamaları (Hurt, 2005)

Killi zeminlerin incelendiği bu çalışmada elastikiyet modülü olarak sekant modülü (E_{se}) dikkate alınmıştır ve elastikiyet modülü olarak kullanılan tanımlamalar sekant modülüdür. Elastikiyet modülü hesaplamalarında serbest basınç deneylerinden elde edilen gerilme – şekil değiştirme grafikleri kullanılmıştır.

Lambe ve Whitman tarafından 1969 da yapılan bir çalışmada E_s hesaplamasında, gerilme değeri olarak, 0 ila en yüksek deviator gerilmenin 1/3 den 1/2 ye olan kısmı arasındaki gerilme değerlerinin kullanılabileceği söylenmektedir (Hurt, 2005). “Hidrolik bağlayıcı karışımlar, bölüm 2: curuf karışımları” isimli “DIN EN 14227-2” nolu standartta, curuflu karışımlar ile hazırlanan zemin numunelerinde elastikiyet modülü hesaplanmasından bahsedilmektedir. Bu başlık altında standart, “Bağlayıcısız ve Hidrolik Bağlayıcılı Karışımlar - Bölüm 43: Hidrolik Bağlayıcılı Karışımların Elastiklik Modülünün Tayini” isimli “EN 13286-43” nolu standartta yönlendirme yapmaktadır. İlgili standartta serbest basınç deneyi ile elde edilen eğrilerde, gerilmenin %30’u ve buna karşılık gelen şekil değiştirme değerleri

kullanarak elastikiyet modülünün hesaplanılabileceği söylenmektedir. Ancak bu yöntem bazen elastisiteyi olduğundan çok düşük gösterebilmektedir. Modül ölçümlerinde deney sonuçları 3 kat hatalı sonuç verebilmektedir. Laboratuvar deneyleri elastikiyet modülü için güvenilir değildir. Bu sebeple ampirik formüller yolu ile hesaplamalar yapılabilir (Coduto, 2005).

Tablo 4.4: Farklı standartlarda verilen elastisite bağıntıları

| | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Türk Standartları (TS 500) | $E=14000+3250 \sigma^{1/2}$ |
| Avrupa Beton Komitesi (CEB) | $E=9500(\sigma+8)^{1/3}$ |
| Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) | $E= 0.043 W^{3/2} \sigma^{1/2}$ |

Türk, Avrupa ve Amerikan beton standartlarında verilen elastisite bağıntıları Tablo 4.4 de bulunmaktadır. Burada E: Beton basınç dayanımının % 40'ına denk gelen gerilme düzeyinin temel alınarak sekant yöntemi ile belirlenen E-modülü değeri, W: Normal ağırlıklı betonun birim ağırlığı (yoğunluk), σ : standart silindir numunelerle elde edilen basınç dayanımıdır. Görüleceği üzere yukarıdaki ampirik bağıntılar yardımı ile de beton E-modülü hesaplanabilir (Topçu ve Uğurlu, 2007).

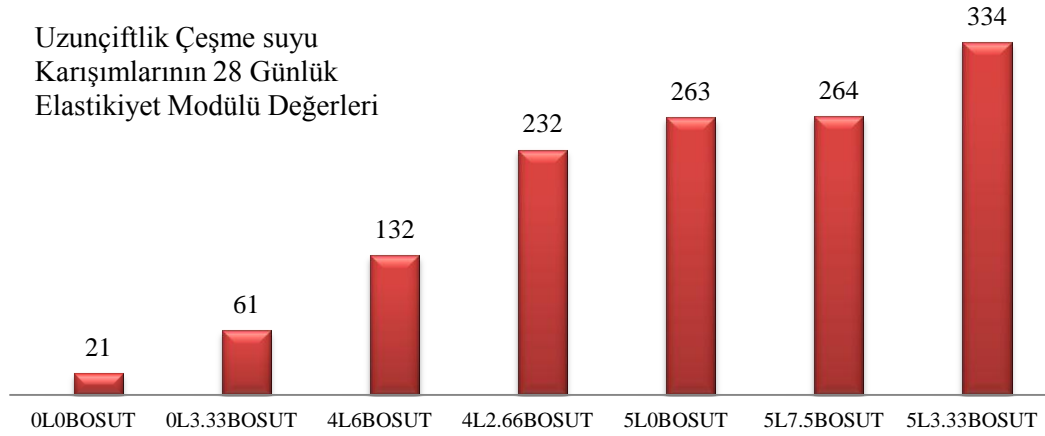
Dinamik E-modülü denilen bir başka yöntem ise ultrasonik ses dalgalarının beton içerisinden geçişi esasına dayanır. Bu yöntemde ultrasonik dalgaların beton içerisinden geçiş hızı hesaplanır ve daha sonra kullanılan ampirik bağıntılar yardımıyla betonun dinamik E-modülü bulunur. Dinamik yöntemler ile hesaplanan E-modülü değeri statik yöntemlerle elde edilen E-modülü değerinden daha yüksektir. Bu durum deney sırasında numune üzerine yük uygulanmaması gerçeği ile ilgilidir. Dinamik yöntemlerle bulunan E-modülü değerine en yakın olan statik E-modülü değeri başlangıç teget yöntemi ile bulunan değerdir. Yalnız bu yaklaşımların hepsinde E modülü için oldukça önemli olan beton yaşı, agreganın E-modülü ve boyutu gibi faktörler ihmal edilmektedir. Bu nedenle adı geçen bağıntılar yardımı ile hesaplanan E-modülü değerleri gerçek E-modülü değerini hiçbir zaman temsil etmez (Topçu ve Uğurlu, 2007).

Tablo 4.5: Uzunçiftlik kili çeşme suyu karışımlarına ait Es değerleri

| Es (Mpa) | 0 G | 28 G |
|-------------|-----|------|
| 0L0BOSUT | 10 | 21 |
| 0L3.33BOSUT | 22 | 61 |
| 4L6BOSUT | 27 | 132 |
| 4L2.66BOSUT | 27 | 232 |
| 5L0BOSUT | 24 | 263 |
| 5L7.5BOSUT | 88 | 264 |
| 5L3.33BOSUT | 72 | 334 |

Bu tez çalışmasında, serbest basınç grafiklerinde, numune üzerine uygulanan en büyük gerilmenin, yaklaşık %20 ila %50'sine tekabül eden deformasyon miktarları tespit edilmiştir. Elde edilen gerilme ve deformasyon değerleri kullanılarak elastikiyet modülü elde edilmiştir. Ancak bazı numunelerde özellikle 28 gün sonucunda gerilme – şekil değiştirme arasında nerdeyse doğrusal bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla elastikiyet modülü hesaplamalarında, genelleme yapılmamış ve her bir grafik ayrı ayrı incelenerek şekil değiştirme ile gerilmeler arasındaki ilişki incelenmiştir. Dinamik modül ile ilgili çalışmalar 4.6 sismik ölçümler başlığı altında verilmektedir.

Uzunçiftlik kili çeşme suyu karışımlarına ait 0 günlük ve 28 günlük elastikiyet modülü değerleri verildiği Tablo 4.5 de verilmektedir. Uzunçiftlik kili, hazırlandığı gün 10 Mpa değerinde bir elastikiyet modülüne sahiptir. Fiziksel iyileştirme uygulandığından dolayı 28 gün sonra elastikiyet modülü 21 MPa değerine ulaşmaktadır. Şekil 4.41 de uzunçiftlik çeşme suyu karışımlarının 28 günlük elastikiyet modülü değerleri grafik olarak verilmektedir.



Şekil. 4.41: Uzunçiftlik çeşme suyu karışımlarının elastikiyet modülü değerleri

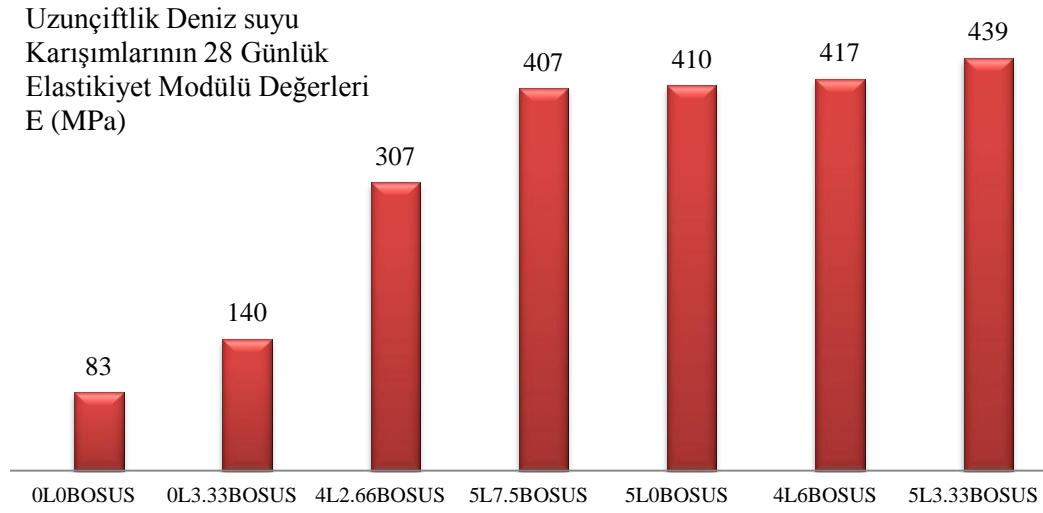
BOS ile karıştırılarak hazırlanan numunede ise 28 gün sonunda Es, 61 MPa değerine çıkmıştır. Kireç ile karıştırıldığında uzunçiftlik kilinin Es değeri 26 kat artarak 263 MPa ya ulaşmıştır. Kireç ve curufun birlikte kullanıldığı karışımda ise elastikiyet modülü değeri 28 gün sonunda 334 MPa olmaktadır.

Tablo 4.6: Uzunçiftlik kili deniz suyu karışımlarına ait Es değerleri

| Es (Mpa) | 0 G | 28 G |
|-------------|-----|------|
| 0L0BOSUS | 38 | 83 |
| 0L3.33BOSUS | 57 | 140 |
| 4L2.66BOSUS | 60 | 307 |
| 5L7.5BOSUS | 123 | 407 |
| 5L0BOSUS | 23 | 410 |
| 4L6BOSUS | 86 | 417 |
| 5L3.33BOSUS | 130 | 439 |

Uzunçiftlik kili deniz suyu karışımlarına ait 0 günlük ve 28 günlük elastikiyet modülü değerleri verildiği Tablo 4.6 de verilmektedir. Uzunçiftlik kili, deniz suyu ile karıştırıldığında, elastikiyet modülü değeri 38 dir.

28 gün sonra elastikiyet modülü 83 MPa değerine ulaşmaktadır. Deniz suyu ve BOS ile karıştırılarak hazırlanan numunede ise 28 gün sonunda Es, 140 MPa değerine çıkmıştır. Kireç ile karıştırıldığında uzunçiftlik kilinin Es değeri 11 kat artarak 410 MPa ya ulaşmıştır. Kireç ve curufun birlikte kullanıldığı karışımda ise elastikiyet modülü değeri 28 gün sonunda 439 MPa olmaktadır. Şekil 4.42 de uzunçiftlik deniz suyu karışımlarının elastikiyet modülü değerleri verilmektedir.



Şekil 4.42: Uzunçiftlik deniz suyu karışımlarının elastikiyet modülü değerleri

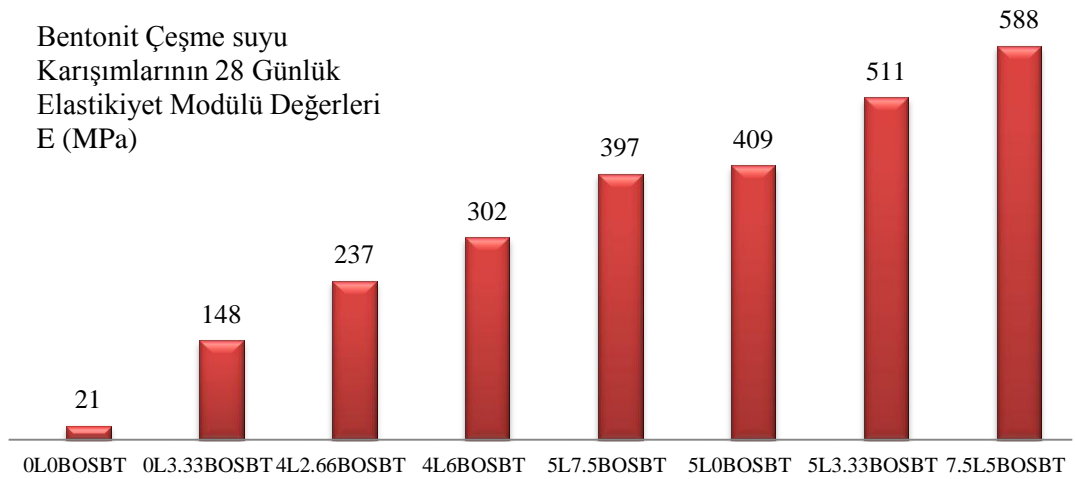
Bentonit kili çeşme suyu karışımlarına ait 0 günlük ve 28 günlük elastikiyet modülü değerleri Tablo 4.7 da verilmektedir. Bentonit kili, hazırlandığı gün 13 Mpa değerinde bir elastikiyet modülüne sahiptir. Fiziksel iyileştirme uygulandığından dolayı 28 gün sonra elastikiyet modülü 21 MPa değerine ulaşmaktadır.

BOS ile karıştırılarak hazırlanan bentonit numunede ise karışımın yapıldığı gün E değeri 69 değerine çıkmaktadır. Başka bir deyişle BOS karıştırıldığı anda, gerilme şekil değiştirme eğrisini dikleştirilmektedir. Aynı karışım, 28 gün sonunda 148 MPa değerinde bir elastikiyet modülüne sahip olmaktadır. Kireç ile karıştırıldığı anda bentonit kilinin Es değeri 45 MPa ya ulaşmıştır. Kireç, bentonitin gerilme şekil değiştirme eğrisini, BOS kadar olmamakla birlikte dikleştirilmektedir.

Tablo 4.7: Bentonit kili çeşme suyu karışımlarına ait Es modülü değerleri

| Es (Mpa) | 0 G | 28 G |
|-------------|-----|------|
| 0L0BOSBT | 13 | 21 |
| 0L3.33BOSBT | 69 | 148 |
| 4L2.66BOSBT | 46 | 237 |
| 4L6BOSBT | 72 | 302 |
| 5L7.5BOSBT | 83 | 397 |
| 5L0BOSBT | 45 | 409 |
| 5L3.33BOSBT | 77 | 511 |
| 7.5L5BOSBT | 47 | 588 |

Kireç ve BOS katkılarının birlikte kullanıldığı karışımda ise elastikiyet modülü değeri karışımın hazırlandığı gün 47 MPa iken 28 gün sonunda 588 MPa olmaktadır. Katkıların birlikte kullanılması, bentonit kili üzerinde, tek başlarına kullanılması durumundan çok farklı etkiler yaratmaktadır. Şekil 4.43 de değerlere ait grafik görülmektedir. Katkıların birlikte kullanılması halinde malzeme 28 gün sonunda oldukça rijit bir yapıya dönüşmektedir.



Şekil 4.43: Bentonit çeşme suyu karışımlarının elastikiyet modülü değerleri

Bentonit kili deniz suyu karışımlarına ait 0 günlük ve 28 günlük elastikiyet modülü değerleri verildiği Tablo 4.8 de verilmektedir. Bentonit kili, deniz suyu ile karıştırıldığı anda, elastikiyet modülü değeri 15 MPa' a olmaktadır. 28 gün sonra elastikiyet modülü 105 MPa değerine ulaşmaktadır. Deniz suyu, çeşme suyuna göre bentonite rijitlik kazandırmıştır.

Tablo 4.8: Bentonit kili deniz suyu karışımlarına ait Es değerleri

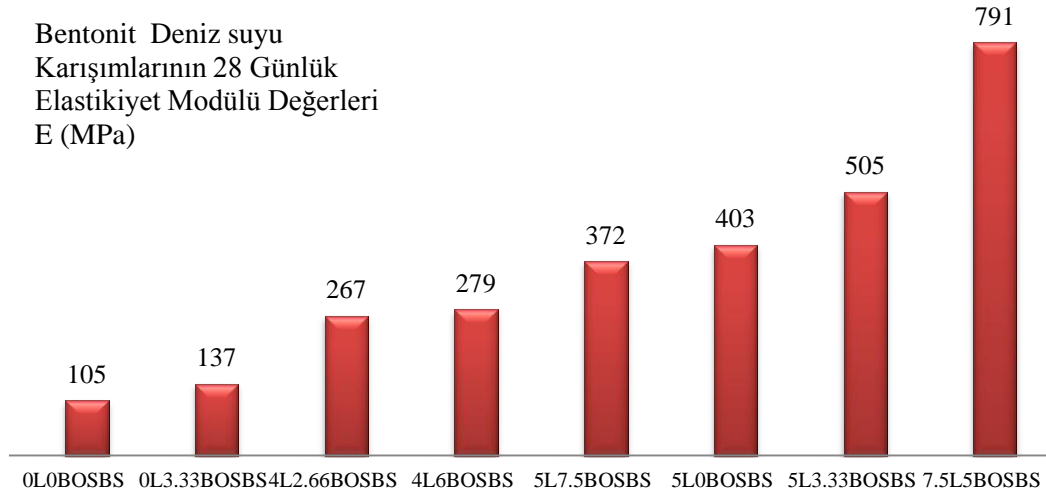
| Es (Mpa) | 0 G | 28 G |
|-------------|-----|------|
| 0L0BOSBS | 15 | 105 |
| 0L3.33BOSBS | 22 | 137 |
| 4L2.66BOSBS | 78 | 267 |
| 4L6BOSBS | 74 | 279 |
| 5L7.5BOSBS | 51 | 372 |
| 5L0BOSBS | 197 | 403 |
| 5L3.33BOSBS | 39 | 505 |
| 7.5L5BOSBS | 86 | 791 |

Deniz suyu ve BOS ile karıştırılarak hazırlanan numunede ise 28 gün sonunda Es, 137 MPa değerine çıkmıştır. Bu değer bentonit, BOS, çeşme suyu karışında 148 MPa olarak görülmektedir. Ölçümlerin çok hassas olmadığı göz önüne alındığında bu değerler aynı olarak kabul edilebilir. O halde BOS bentonit kili üzerinde, gerilme şekil değiştirme ilişkisi üzerinde, deniz suyunda da çeşme suyunda da aynı miktarda bir değişim yaratmaktadır.

Kireç ile karıştırıldığında bentonit kilinin E değeri karıştırıldığı anda 197 MPa ya çıkmaktadır. Bu değer çeşme suyunda 45 MPa olarak görülmekte idi. Bu durumda kireç deniz suyu ile birlikte kullanıldığında bentonit kilinde ani bir rijitlik meydana getirmekte, malzemenin fazla deformasyon olmasına izin vermeden en büyük gerilmeye ulaşmasını sağlamaktadır.

28 gün sonunda ise elastikiyet modülünün 403 MPa olduğu görülmektedir. Bu değer çeşme suyu ile elde edilen değer kadardır. O halde deniz suyu ve kireç kullanılması malzemede ani bir rijitlik meydana getirirken süreç içerisinde çeşme suyu ile aynı etkiye sebep olmaktadır.

Kireç ve BOS katkılarının deniz suyu ile birlikte kullanılması halinde, bentonit kili üzerinde ayrı ayrı kullanılmasına kıyasla oldukça farklı bir etki göstermektedir. Bentonit kilinin ise elastikiyet modülü değeri 28 gün sonunda Şekil 4.44 de gösterildiği şekilde 791 MPa olmaktadır. Bu değer çok rijit bir yapıya işaret etmektedir.



Şekil 4.44: Bentonit deniz suyu karışımlarının elastikiyet modülü değerleri

Değişik zeminlere ait tipik elastik modül değerleri Tablo 4.9 de verilmektedir. Çalışmada referans olarak kullanılan uzunçiftlik kili bu tabloda verilen tipik değerlere göre yumuşak, hassas kil gurubuna girmektedir. Bentonit kili de aynı şekilde verilen tipik değerlere göre yumuşak, hassas kil gurubuna girmektedir. Katkı malzemesi olarak kireç, BOS ve deniz suyu kullanılarak hazırlanan karışımlarda ise 28 gün sonunda malzeme elastisite modülü değerleri bakımından, çok sert kil veya sıkı kum gibi bir davranış sergilemektedir.

Tablo 4.9: Değişik zeminlere ait tipik Es değerleri (Hurt, 2005)

| Malzeme | Es (MPa) | Poisson Oranı |
|---------------------------------|-----------------------|---------------|
| Kil | | |
| Yumuşak, Hassas | 25–150 | |
| Orta sert | 150–500 | 0.4–0.5 |
| Çok sert | 500–1000 | (undrained) |
| Lös | 150–600 | 0.1–0.3 |
| Silt | 20–200 | 0.3–0.35 |
| İnce Kum | | |
| Gevşek | 80–120 | |
| Orta Sıkı | 120–200 | 0.25 |
| Sıkı | 200–300 | |
| Kum | | |
| Gevşek | 100–300 | 0.2–0.35 |
| Orta Sıkı | 300–500 | |
| Sıkı | 500–800 | 0.3–0.4 |
| Çakıl | | |
| Gevşek | 300–800 | |
| Orta Sıkı | 800–1000 | |
| Sıkı | 1000–2000 | |
| Diğer malzemeler | | |
| Kömür | $1-2 \times 10^5$ | |
| Ahşap | $1,2-1,5 \times 10^5$ | |
| Beton | $2-3.3 \times 10^5$ | 1.5-.25 |
| Bozulmamış Killi Yapraktaşı | $1-4 \times 10^5$ | 0.25-0.30 |
| Bozulmamış Kumtaşı ve Kireçtaşı | $4-8 \times 10^5$ | 0.25-0.33 |
| Bozulmamış magmatik taşlar | $6-10 \times 10^5$ | 0.25-0.33 |
| Çelik | 21×10^5 | 0.28-.29 |

4.8. Sismik Ölçümler

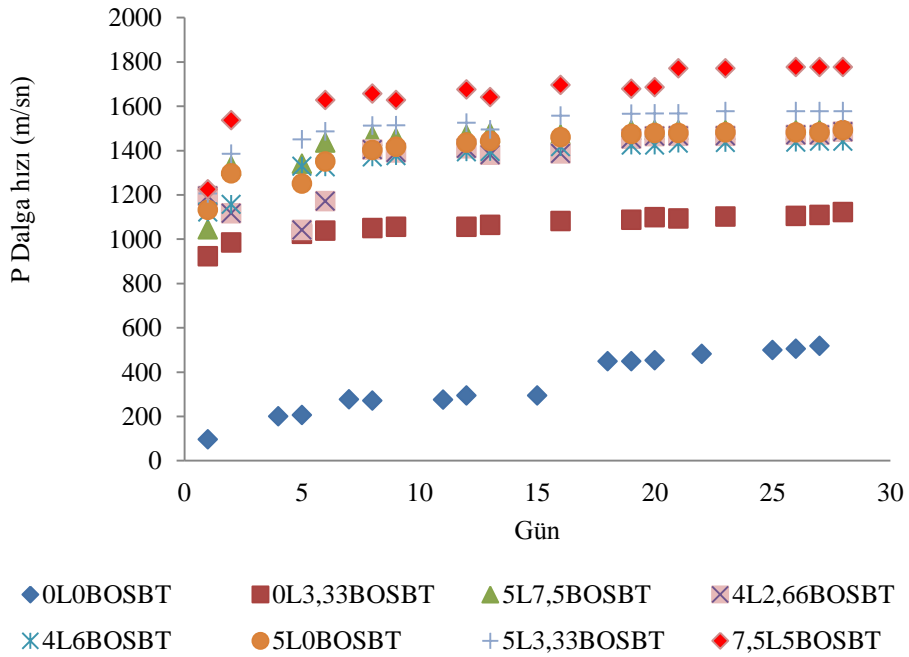
Bir deprem esnasında, zeminde meydana gelen titreşimler, mühendislik yapı yüklerinin iletiildiği zeminlerde büyük deformasyonlar yapabilir. Bu durum, zeminin dinamik ve stabilite özelliğinin bilinmemesinden kaynaklanır. Zeminin dinamik ve stabilite özelliği doğrudan doğruya ortamın kayma direnci ile ilgilidir. Kayma direnci ile ilgili bilgilerin saptanmasında daha hızlı ve daha pratik çözümlere ulaşmak için yerinde deneylerin (sismik yöntem, vane ve penetrometre) önemi oldukça büyüktür (Çekmen, 2009).

Sismik kırılma yöntemi yeryüzünde veya çok sığ derinliklerde meydana getirilen sismik dalgaların yer içerisinde kırılarak yayıldıktan sonra yeryüzündeki jeofonlara gelmeleri için geçen zamandan faydalanarak yeraltındaki tabakalı jeolojik yapıyı saptamaya yarar. Sismik kırılma yöntemi temel kayanın derinliğinin, fiziksel ve dinamik özelliklerinin saptanmasında yaygın olarak kullanılır. Yeraltındaki kayaçların yoğunluk farklılığından dolayı elastik dalgaları iletme yetenekleri de farklıdır. Bu özellik doğal veya yapay olarak oluşturulan enine ve boyuna dalgaların hızlarında önemli şekilde etkiler. Bu hız farklılıkları yardımıyla yeraltı konusunda yoruma gidilir. Uygulamada ölçülerek kullanılan enine ve boyuna dalga hızlarıdır. Boyuna dalga hızları (V_p) özellikle yapısal sorunları çözmeye yönelik olduğu halde, enine dalga hızları (V_s) mühendislik açısından önemli olan parametreler için önemlidir. Bu enine ve boyuna dalgalar ya kırılma ya da yansıma teknikleri ile elde edilirler. Sismik dalgalar özelliklerine göre cisim ve yüzey dalgaları olmak üzere ikiye ayrılır. Tam elastik, izotrop ve homojen bir ortamda, dalgalar biri dilatasyon (hacim değişimi) diğeri rotasyon (eşit hacim) dalgası olmak üzere iki türlü yayılır. Bunlardan ikisine birden cisim dalgaları denir. Cisim dalgaları primer (P) ve sekonder (S) dalgalar olmak üzere ikiye ayrılır. Dalganın yayınım doğrultusuna dik bir düzlem içindeki hareketi sabit kalıyorsa böyle bir dalgaya “Düzlemsel Dalga” denir. Düzlemsel dalga olması halinde dilatasyon dalgası boyuna bir dalgadır. Bu tip dalgaya P dalgası (Primer dalga) veya sıkışma dalgası denir.

Bu dalga istasyona gelen ilk dalgadır. Titreşim hareketi dalgaların yayılma doğrultusundadır. Periyot ve genlikleri diğer dalgalara göre küçüktür. Hem katıda hem de sıvıda yayılabilirler. P dalgalarının geçişi sırasında partiküller sıkışma genişleme hareketi yaparlar (Elmasdere, 2008).

Yer içerisinde en hızlı yayılan ve sismometreler tarafından ilk algılanan dalgalar P dalgalarıdır. Bunun anlamı, dalganın yayılma doğrultusu üzerinde bulunan taneciklerin ileri-geri hareketinden dolayı yerin sıkışmaya ve genişlemeye maruz kalmasıdır. Sıkışma dalgaları, yaptıkları bir çeşit itme-çekme hareketinden dolayı, geçtikleri bir ortamın hacimsel değişimine neden olurlar.

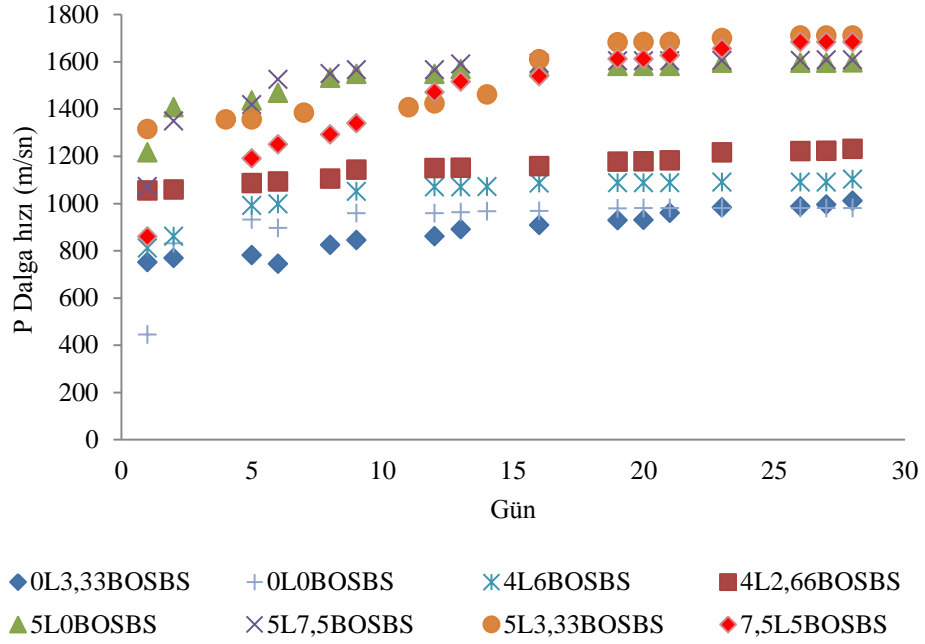
Ortam üzerinde herhangi bir şekil bozukluğu gözlenmez. P dalgaları katı, sıvı ve gaz içerisinde yayılabilirler. Yayılım hızları S dalgası hızının yaklaşık 1,7-1,8 katı kadardır. P dalgalarının havadaki hızları yaklaşık 330 m/sn sudaki hızları 1450 m/sn ve granit içerisindeki hızları ile yaklaşık 5000 m/sn 'dir (Çeviker, 2008).



Şekil 4.45: Bentonit çeşme suyu ile hazırlanan numunelere ait Vp hızları

Bölüm 3.3.9 da ayrıntıları verilen Ultrasonik V-Meter III marka sismik dalga ölçüm cihazı kullanılarak elde edilen dalga hızları verilmektedir. Bentonit kili ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan ölçümlerde elde edilen Vp değerleri Şekil 4.45 ve Şekil 4.46 da grafik olarak sunulmaktadır.

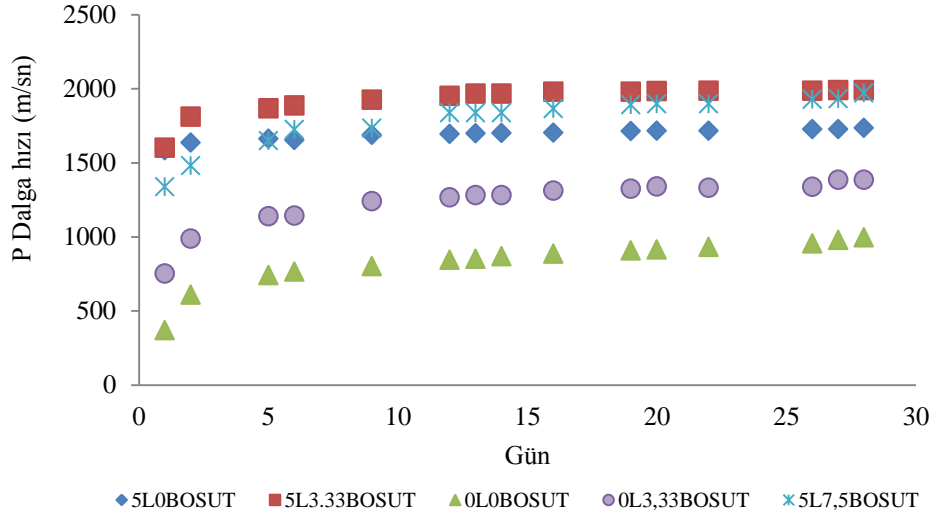
Vp dalgalarının tipik hızları, "Geology For Civil Engineers", (Craig, 1985), kitabında km/sn cinsinden olmak üzere; havada 0.33; suda 1.45; kuru zeminde 0,60; doymun kumda 1.50; sürüntülü kilde 2.00; granitte 5.00 olarak verilmiştir. Şekil 4.38 de görüldüğü üzere katkısız olarak çeşme suyu ile hazırlanan bentonit numunesinde Vp hızı 28 gün sonra 500 m/s değerindedir.



Şekil 4.46: Bentonit deniz suyu ile hazırlanan numunelere ait Vp hızları

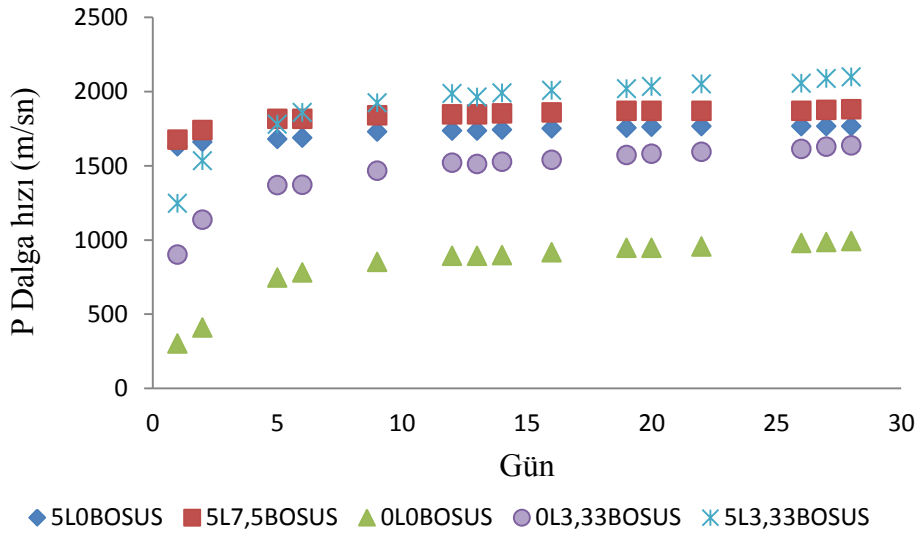
Bu kuru zeminlerde olması tahmin edilen hızdan daha aşağıdadır. Deniz suyu ile hazırlanan katkısız bentonit kili numunelerinde ise Vp hızı 28 gün sonra 900 m/s olarak ölçülmüştür. Deniz suyu P dalga hızını oldukça yükseltmiştir. Bentonit kil ile hazırlanan numunelerde, en büyük hız artışı ise 1700 m/s lik Vp hızı ölçülen % 7.5 kireç ve % 5 BOS katkısı ve çeşme suyu ile hazırlanan numune üzerinde görülmektedir. % 5 kireç ve %3.33 BOS ve deniz suyu ile hazırlanan bentonit kili numunesinde de 1600 m/s lik Vp hızı ölçülmüştür.

Katkısız halde çeşme suyu ile hazırlanan ve 28 gün kür edilen uzunçiftlik numunesinde, dalga hızı 987 m/s olarak ölçülmüştür. %5 kireç katkısı ile hazırlanan numunede 1800 m/s değerine ulaşırken, %5 kireç %3.33 BOS katkısı ile hazırlanan ve 28 gün kür edilen numunelerde 1992 m/s lik P hızı değeri okunmuştur. Uzunçiftlik kili ile hazırlanan numuneler üzerinde yapılan ölçümlerde elde edilen Vp değerleri Şekil 4.47 ve Şekil 4.48 de verilmektedir.



Şekil 4.47: Uzunçiftlik çeşme suyu ile hazırlanan numunelere ait V_p hızları

Sismik hızlar bağıntı olarak yoğunlukla ters orantılı, elastik parametrelerle doğru orantılıdır. Arazi ve laboratuvarında elde edilebilen sismik dalga hızları, zeminin elastik ve dinamik parametre tayininde kullanılır. Mühendislik çalışmalarında bu parametrelerin bilinmesi, yol, baraj, tünel, yeraltı treni gibi büyük çapta kazı işleri gerektiren projelerde önemli unsurlar taşır (Elmasdere, 2008).



Şekil 4.48: Uzunçiftlik deniz suyu ile hazırlanan numunelere ait V_p hızları

Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan “Mühendislik Jeofizikinde Zemin Araştırmaları Ve Zemin Dinamik Parametrelerinin Hesaplanması” isimli normda arazide sismik dalga ölçümlerinden elde edilen veriler ile Tablo 4.10 da verilen bağıntılar doğrultusunda hesaplamaların yapılabileceği belirtilmiştir (www.eie.gov.tr/turkce/YEK/HES/jeoloji/jeo.../63_jeofizik.doc).

Tabo 4.10: Sismik dalga ölçümleri ile ilgili bağıntılar

| | | |
|---------------------------------|---|---|
| Yoğunluk | $\rho = 0,2 * V_p + 1,6$ | $V_p: \text{km/sn}, \rho: \text{gr/cm}^3$ |
| Poisson oranı | $U = 1 - 2 * (V_s/V_p)^2 / 2 - 2 * (V_s/V_p)^2$ | - |
| Dinamik Shear Modülü | $G = \rho * V_s^2$ | kg/cm^2 veya Mpa |
| Dinamik Young Modülü | $E = 2 * (1 + U) * G$ | kg/cm^2 veya Mpa |
| Hacimsel Rijidite (Bulk Modülü) | $k = 2 * (1 + U) / 3 * (1 - 2 * U) G$ | kg/cm^2 veya Mpa |
| Zemin Hakim Titreşim Peryodu | $T_0 = \Sigma 4 * \text{Hz} / V_s$ | sn |
| Serbest Basınç Dayanımı | $V_s = 136,3 * q_u^{0,417}$ | (Imai, 1976) |
| SPT Darbe Sayısı | $V_s = 91,0 * N^{0,337}$ | |

Gazete Sayısı: 26369 olan 2006 resmi gazetede yayınlanmış “Karayolu Yolboyu Mühendislik Yapıları İçin Afet Yönetmeliği” sismik ölçüm ile yapılacak hesapların kabul edileceğini bildirmektedir (<http://www.mevzuat.gov.tr/Metin .Aspx?MevzuatKod=7.5.10837&sourceXmlSearch=&MevzuatIliski=0#>).

Decoding Eurocode 7 (Bond ve Harris, 2008) de standard penetrasyon testi darbe sayısı, kıvam limitleri, drenajsız kayma mukavemeti, plastik limit, California taşıma oranı ile Young modülü arasında bir ilişki olduğu konusu irdelenmektedir.

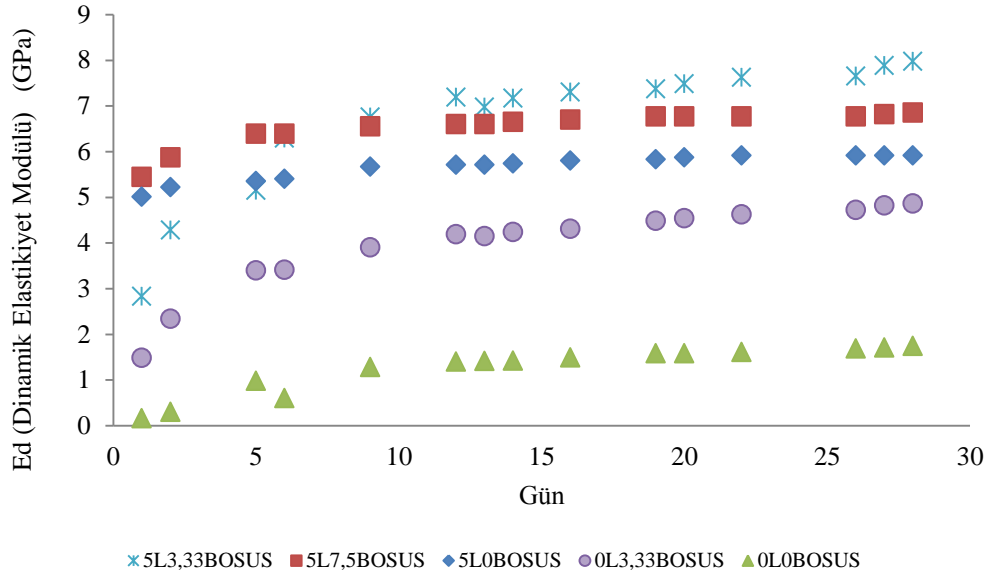
“Dinamik Young modülü” veya “Dinamik Elastisite Modü” olarak bilinen elastisite modülü “Ed” ile sembolize edilmektedir. Yaygın olarak Birimi giga paskal (GPa) olarak kullanılmaktadır. ASTM D2845 de sismik dalga hızları ve bunlara bağlı olarak sismik elastik modülünün hesaplanması ile ayrıntılar verilmektedir.

Dinamik elastisite modülü daha çok kayaların davranışlarını irdelenmede kullanılmaktadır. Ed, zemin ve depremle ilgili hasarların tespiti açısından önemli bir parametredir. Ayrıca kayaçların mukavemet kabiliyetinin de bir göstergesidir. 4.5. nolu başlık altında irdelenen, zeminin gerilme şekil değiştirme ilişkisinden elde edilen Es (statik elastisite modülü veya deformasyon elastisite modülü) ile Ed

(dinamik elastisite modülü) arasındaki ilişki farklı şekillerde incelenmiştir. "Geology For Civil Engineers", (Craig, 1985), kitabında Ed nin her zaman Es den büyük olduğu belirtilmektedir. Bunun sebebini sismik titreşimlerin daha kısa süreli ve düşük gerilmesi olması ile açıklamaktadır. Bozulmamış, çatlaksız bir kaya için Es/Ed oranının bir değerine yakın olacağını belirtmiştir.

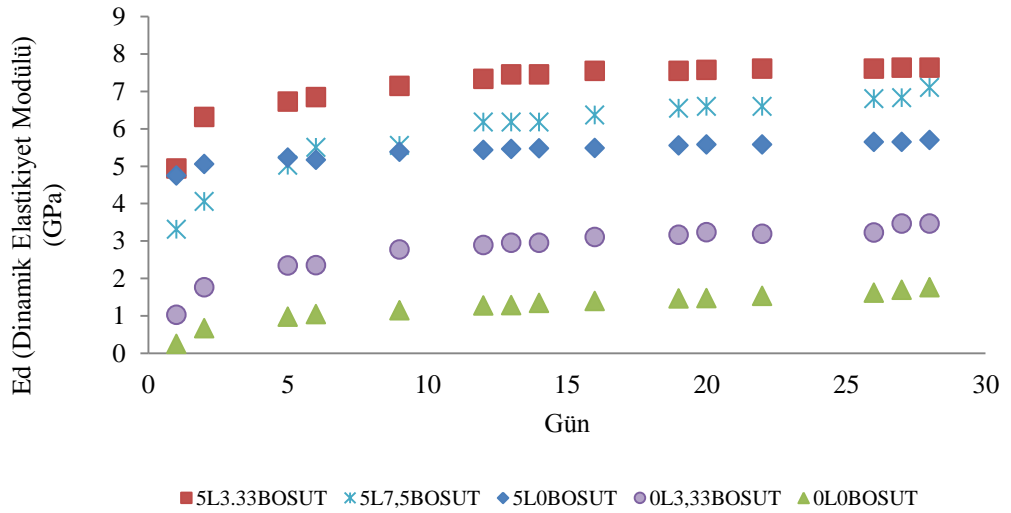
Statik Elastikiyet modülünde sabit bir yük altındaki zeminin, gerilme şekil değiştirme ilişkisi irdelenmektedir. Dinamik elastikiyet modülünde ise zamanla değişen farklı frekanslarda gelen tekrarlı yük şartlarındaki, gerilme ile şekil değiştirme arasındaki ilişki belirtilmektedir. Dolayısı ile Es malzemenin (zeminin) farklı davranışlarını ve Ed. malzemenin (zeminin) farklı davranışlarını açıklamaktadırlar. Ayrıca elastik ve dinamik elastisite modülleri farklı parametrelerden etkilenmektedir. Örneğin dinamik elastisite modülü zemin yoğunluğundan doğrudan etkilenmektedir. Çünkü yoğunluk arttıkça P dalga hızıda artmaktadır. Ayrıca zemindeki su miktarı da dinamik elastisite modülünü etkilemektedir. Zira P dalga hızları suda farklı, havada farklı hızda hareket etmektedir. Zemin özelliklerine bağlı olarak Ed değerinin Es değerinden 5 ila 20 kat fazla olabileceği belirtilmektedir (Craig, 1985; Martínez ve diğ., 2008).

Statik elastikiyet modülü hesaplarında da dinamik elastik modülü hesaplarında da daha önce ayrıntıları verildiği şekilde pek çok kabul yapılarak ve ortalama değerler alınarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Dolayısı ile bu tezde sunulan elastisite değerlerinin kesinliği yoktur. Ancak kesin olan bir husus mevcuttur. Katkı malzemeleri ile hazırlanmış olan killerin hem dinamik hem statik elastisite modüllerinde önemli artışlar gerçekleşmiştir. Gerek düşük plastisiteli gerek yüksek plastisiteli killerde, kireç, BOS ve deniz suyu ile hazırlanan numuneler rijitlik kazanmış, zemin daha az deformasyon yaparak daha yüksek gerilmeleri taşıyor hale gelmiştir. Diğer bir deyişle killi zeminlerde önemli ölçüde iyileştirme sağlanmıştır.

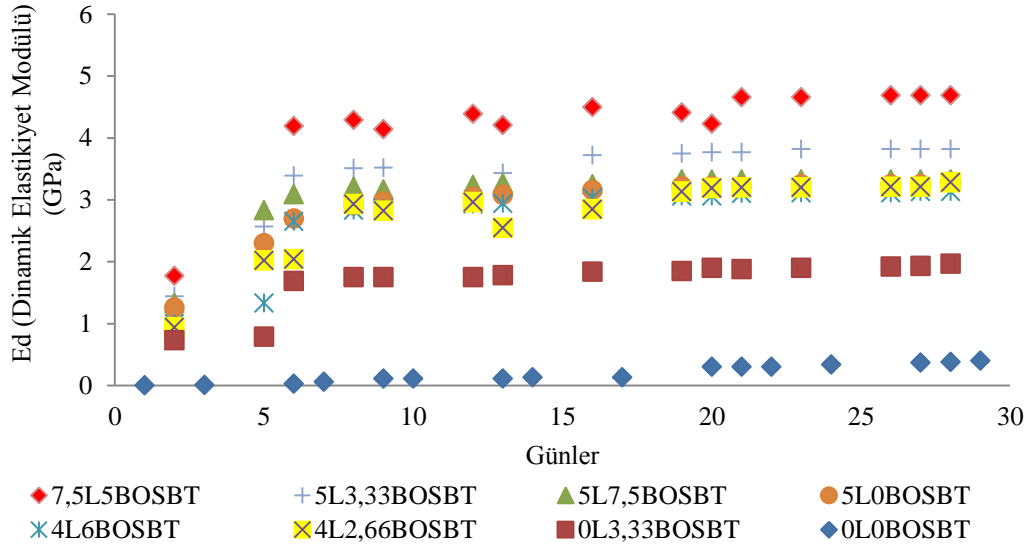


Şekil 4.49: Uzunçiftlik çeşme suyu ile hazırlanan numunelerin E değerleri

Tezde yapılan sismik ölçümlerde sadece V_p dalga hızları ölçülebilmiş, V_s dalga hızları ölçülememiştir. Dolayısı ile yapılan hesaplamalarda, poisson oranı 0.2 olarak kabul edilerek çalışılmıştır. Bu kabul doğrultusunda elde edilen E_d (Dinamik elastisite modülü) Şekil 4.49, Şekil 4.50, Şekil 4.51 ve Şekil 4.52 de gösterilmektedir.

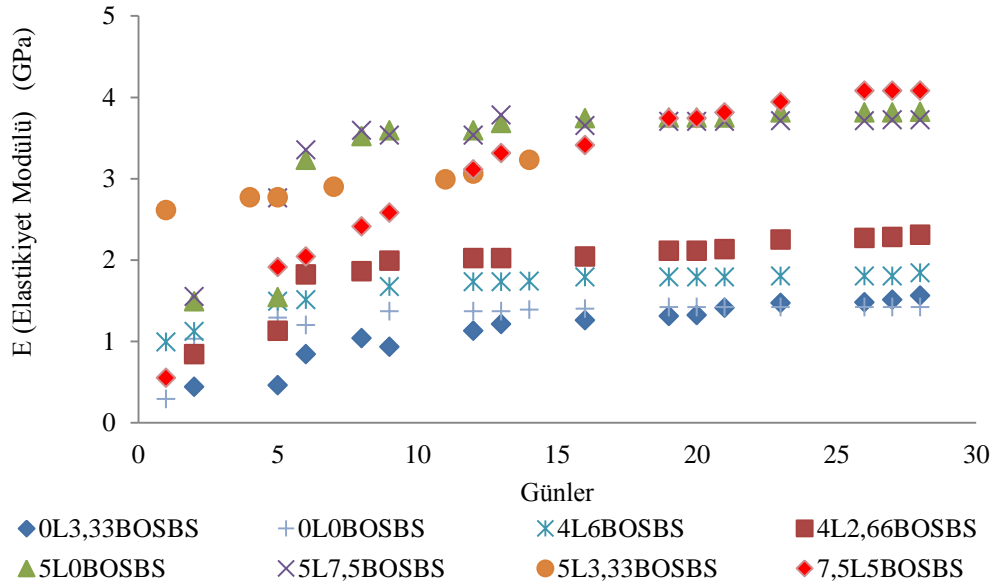


Şekil 4.50: Uzunçiftlik deniz suyu ile hazırlanan numunelerin E değerleri



Şekil 4.51: Bentonit çeşme suyu ile hazırlanan numunelerin E değerleri

Uzunçiftlik kili serbest basınç deneylerinde, bentonit kiline göre daha fazla deformasyon yapmıştır. Dolayısıyla statik elastisite modülü (E_s), bentonit kiline göre daha küçüktür. Ancak uzunçiftlik kilinin yoğunluğu, bentonit kiline göre daha fazladır ve optimum su muhtevası daha azdır. Bu nedenlerden ötürü uzunçiftlik kilinin, dinamik elastisite modülü (E_d) bentonit kiline göre daha yüksek bir değer almaktadır.



Şekil 4.52: Bentonit deniz suyu ile hazırlanan numunelerin 28 günlük E değerleri

4.9. İstatistiksel Çalışmalar

Değişkenler arası ilişkinin sadece derecesinin belirlenmesinde korelasyon analiz yeterlidir. Ancak değişkenler arası ilişkinin derecesini, şeklini ve yönünü araştırmak için regresyon analizine gereksinim duyulmaktadır. Değişkenler arası ilişkiler matematiksel olarak farklı şekillerde ifade edilebilmektedir. Analizde kullanılacak fonksiyon şeklinin seçiminde veriyi iyi açıklamasının yanında mümkün merteye basit ve tahmin edilebilir olması, tercih sebebidir. Fonksiyon, değişkenler arası ilişkinin türüne göre seçilir. Fonksiyon şekli, lineer bir doğru veya lineer olmayan bir eğri şeklinde tanımlanabilir. Çoklu Lineer Regresyon analizi ise, bir bağımlı değişkeni, birden fazla bağımsız değişkenler ile tanımlamak için kullanılan metottur (Sivrikaya, ve diğ., 2011).

Zemin numunelerinin alınmasında ve taşınmasında karşılaşılan problemler ile dayanım deneylerinin karmaşık-pahalı olması, bu tip deneylerin yapılmasını zorlaştırmaktadır. Bu amaçla arazide veya laboratuvarında yapılmış, endeks deneylerinden elde edilmiş olan, boşluk oranı, birim hacim ağırlığı, su muhtevası, likit limit, plastik limit gibi endeks özellikleri kullanılarak serbest basınç dayanımının ampirik olarak belirlenmesinin, deneylerle belirlenmesine göre, oldukça düşük maliyetli olacağı bilinmektedir. Bu nedenle zeminin endeks özelliklerinden; serbest basınç dayanımını elde etmemizi sağlayacak ampirik ilişkilerin geliştirilmesi çok faydalı olacaktır. Ancak zeminin homojen olmayışı, boşluklu yapısı ve oluşum farklılıkları gibi faktörler nedeniyle, benzer özellikteki zeminlerin kayma dayanımları farklılıklar gösterebilmektedir. Zemin mekaniği biliminin gelişmeye başladığı son iki yüzyıl boyunca zeminlerin taşıma gücünün belirlenmesi için pek çok çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, sonlu elemanlar yönteminden yapay sınır ağlarına ve istatistiksel yöntemlere varıncaya kadar geniş bir yelpazede yer almaktadır (Aksoy, 2008).

Bu çalışmada serbest basınç deneyi sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak, killi zeminlerin stabilizasyonunda kireç kullanılması, BOS kullanılması veyahut her ikisinin birden aynı veya farklı oranlarda kullanılması durumları için deney yapmadan tahmini bir sonuca ulaşmak amacı ile modellenmiştir.

Model sadece nicel değerleri değil aynı zaman da nitel değerleri de içine almaktadır. Örneğin çalışmada kullanılan suyun türünü, kr sresinin dayanıma etkisi verilen bağıntı ile hesaba katılabilmektedir.

İstatistiksel analizler “R” (R GUI v. 2.1) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. “R for Windows” paket programı internet aracılığı ile ücretsiz olarak dağıtılan genel lisanslı bir programdır. Program lisans kapsamında, serbest bir şekilde dağıtılabilir ve kullanılabilir; ayrıca programı elde eden herkes asıl kaynağı belirterek dağıtma ve kullanma hakkına sahiptir ve programın kaynak kodu da açık bir şekilde sunulmaktadır.(Er ve diğ., 2005).

Çalışmanın bu bölümünde, serbest basınç deney verileri ile çoklu regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizinde farklı fonksiyonel yapılar kullanılmış olup en uygun fonksiyonel yapının, yarı logaritmik fonksiyon yapısı olduğu ortaya çıkmıştır. Regresyon analizi, aralarında sebep-sonuç ilişkisi bulunan iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi, o konu ile ilgili tahminler (estimation) ya da kestirimler (prediction) yapabilmek amacıyla regresyon modeli olarak adlandırılan matematiksel bir model ile karakterize eden bir istatistik analiz tekniğidir. Ayrıca matematiksel model bulunduktan sonra bu modelin yeterli olup olmadığını kontrol etmek için gerekli olan analizler ve testlerdir (şahinler, 2000).

İstatistiksel modellemelerin, anlamlılığını test etmede bir çok yöntem vardır. Regresyon modellerinde parametrelerin istatistiksel anlamlılığını bir arada test etmek için (modelin genel anlamlılığını da test etmiş olan) F-testi kullanılırken; her bir parametrenin anlamlılıklarını test etmek için “t testi” kullanılır. “t testi” ile iki grubun ortalamaları karşılaştırılarak, aradaki farkın rastlantısal mı, yoksa istatistiksel olarak anlamlı mı olduğuna karar verilir. İstatistikte “p” değeri, “probability” yani “olasılık” teriminin kısaltılmış halidir. % 5 hatayı kabul ederek karşılaştırma yapıldığında; p değeri % 5’ten küçük ise “gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı fark vardır” sonucu çıkarılır (zbek ve diğ., 2007; maden.karaelmas.edu.tr/hocalar/hamitaydin/Sunu_7ci_hafta.pdf).

Yapılan regresyon analizinde kireç miktarı, BOS miktarı gibi nicel (sayısal) değerler kullanılmaktadır. Ancak kilin CH veya CL olması, suyun deniz suyu veya çeşme suyu olması, sıkıştırmanın modifiye veya standart olması gibi sayısal olmayan (nitel) değerlerde modelin bağımsız değişkenleri arasındadır. Bu durumda bu değişkenler “kukla değişken” (dummy) olarak modele girmektedir. Var ya da yok değeri alan kavramlar kukla değişkenler vasıtasıyla modellere katılır. Regresyon denkleminde nicel değerler, bağımlı değişkeni gösteren eğrinin eğimini verir. Kukla değişkenler eğimi değil eğrinin y eksenini kestiği noktanın ne kadar değiştiğini gösterir. Kukla değişkenlerin birbirlerinden etkilendiği düşünülüyorsa bu etkileşim modele (a*b) şeklinde yansıtılır. Kukla değişkenlerde hesaplanan dayanımda bahsi geçen nitel değişkenin olması hali için “1”, olmaması hali için “0” kullanılır.

$$\ln(\text{formula}) = \ln q_u \sim L * \text{kilf} + L * \text{dayf} + L * S + \text{denf} + \text{suf} \quad (4.2)$$

Regresyon analizinde, çalışma süresince gerçekleştirilen toplamda 706 adet serbest basınç deneyi sonucu kullanılmıştır. Stabilizasyon amacı ile killi zeminlerde (yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli), kireç, BOS, her ikisinin birden kullanımı, çalışmada deniz suyu veya çeşme suyu kullanımı şeklindeki girdilerine göre; 0 gün, 1 gün, 7 gün ve 28 günlük serbest basınç değerini veren dönüştürülmüş modelin istatistiksel yazılımı, Denklem 4.1 de, genelleştirilmiş olarak yazılımı, Denklem 4.2 de verilmektedir.

$$q_u = e^{(L * \text{kilf} + L * \text{dayf} + L * S + \text{denf} + \text{suf})} \quad (4.3)$$

Model ile ilgili istatistiksel değerler ve katsayılar Tablo 4.11 da ve Tablo 4.12 de verilmektedir. Determinasyon katsayısı R^2 0,89 olup, modelde kullanılan bağımsız değişkenler bağımlı değişkendeki değişimin %89 gibi önemli bir kısmın açıklamaktadır.

F testi sonucu, modelin genel anlamda doğruluğunu onaylamaktadır. p değeri $< 2.2e^{(-16)}$ dır. O halde gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı fark vardır. t testi sonuçları dayf2 harici bütün değişkenler %95 güven aralığında anlamlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.11: İstatistiksel model ile ilgili program çıktıları

| Residuals: | | | | |
|------------|----------|----------|---------|---------|
| Min. | 1Qu | Median | 3Qu | Max |
| -0.79875 | -0.15766 | -0.01126 | 0.15824 | 0.57895 |

| lm(formula = lnqu ~ L * kilf + L * dayf + L * S + denf + suf) | | | | |
|---|-----------|------------|---------|--------------|
| Coefficients: | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t) |
| (Intercept) | 6.064654 | 0.042958 | 141.177 | < 2e-16 *** |
| L | 0.135588 | 0.010189 | 13.307 | < 2e-16 *** |
| S | 0.197915 | 0.009195 | 21.525 | < 2e-16 *** |
| L:S | -0.037942 | 0.002044 | -18.563 | < 2e-16 *** |
| kilf2 | 0.248653 | 0.033730 | 7.372 | 4.72e-13 *** |
| dayf2 | 0.060850 | 0.047110 | 1.292 | 0.197 |
| dayf3 | 0.233848 | 0.047110 | 4.964 | 8.67e-07 *** |
| dayf4 | 0.471457 | 0.047110 | 10.008 | < 2e-16 *** |
| denf2 | -0.858272 | 0.018060 | -47.524 | < 2e-16 *** |
| suf2 | 0.240231 | 0.018060 | 13.302 | < 2e-16 *** |
| L:kilf2 | -0.049069 | 0.008203 | -5.982 | 3.50e-09 *** |
| L:dayf2 | 0.092601 | 0.011099 | 8.343 | 3.79e-16 *** |
| L:dayf3 | 0.133987 | 0.011099 | 12.072 | < 2e-16 *** |
| L:dayf4 | 0.146096 | 0.011099 | 13.163 | < 2e-16 *** |
| Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1 | | | | |

t testi sonuçlarına göre, 0 gün ve 1 günlük dayanımlar arasında anlamlı fark olmadığı ama 7 gün ve 28 günlük dayanımların anlamlı farklılıklar olduğu ortaya çıkmaktadır. Tablo 4.13 ve Tablo 4.14 de model ile ilgili verilerin açıklamaları yapılmaktadır.

Tablo 4.12: Model ile ilgili istatistiksel test sonuçları

| | |
|---|----------------------------|
| Residual standard error: 0,2423 on 706 degrees of freedom | |
| Multiple R-squared: 0,8941; | Adjusted R-squared: 0.8921 |
| F-statistic: 458,5 on 13 and 706 DF; | p-value: < 2,2e-16 |

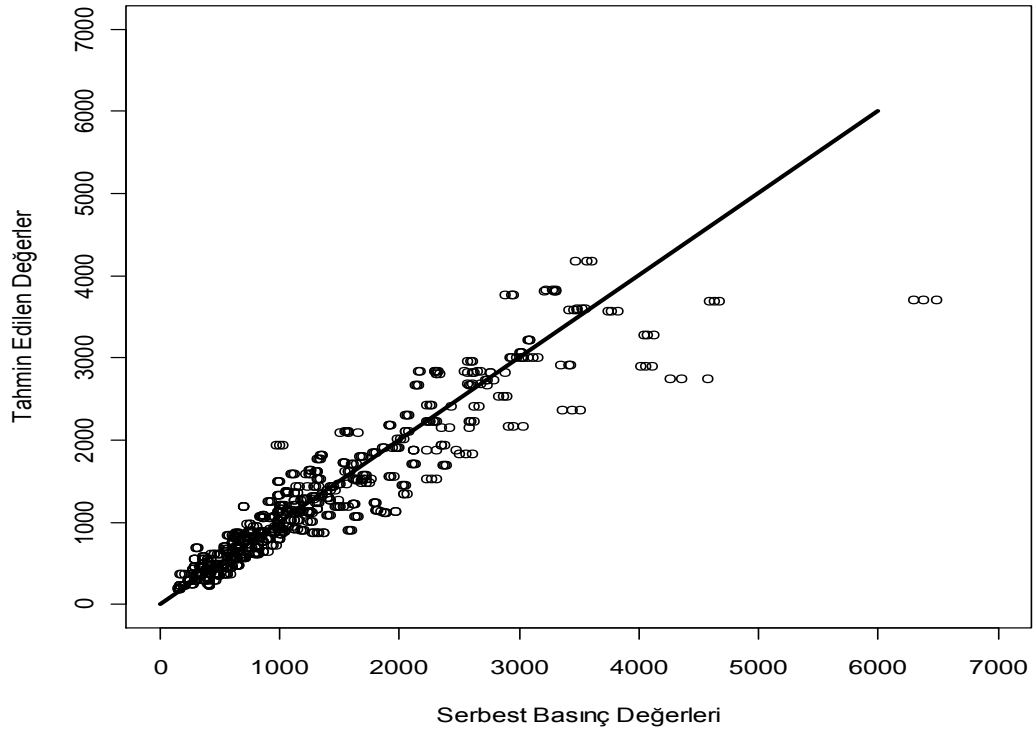
Tablo 4.13: İstatistiksel model ile ilgili katsayılar

| $q_u = e^{(6.06 + 0.13L + 0.19S - 0.03L*S + kilf2 + day2 + day3 + day4 + denf2 + suf2 + denf2 + L*kil2 + L*day3 + L*day4)}$ | | | |
|---|-------------|------------|---------------|
| Değişkenlerin açıklaması | Değişkenler | Katsayılar | t* statistics |
| Sabit | İntercept | 6.064654 | 0.042958 |
| Karışımdaki % Kireç miktarı | L | 0.135588 | 0.010189 |
| Karışımdaki % BOS miktarı | S | 0.197915 | 0.009195 |
| Kireç ve BOS un aynı anda kullanımı | L:S | -0.037942 | 0.002044 |
| Kukla Değişkenler (dummy): | | | |
| kil sınıfı (CH için 1; CL için 0) | kilf2 | 0.248653 | 0.033730 |
| Gün: 0. veya 1. gün için: 1 değilse 0 | dayf2 | 0.060850 | 0.047110 |
| Gün: 7 gün için 1 değilse 0 | dayf3 | 0.233848 | 0.047110 |
| Gün: 28. gün için 1 değilse 0 | dayf4 | 0.471457 | 0.047110 |
| Sıkıştırma tipi: modifiye için 1; standart için 0 | suf2 | 0.240231 | 0.018060 |
| Su tipi: deniz ise 1, çeşme ise 0 | suf2 | 0.240231 | 0.018060 |
| CH kil için kil kireç etkileşimi | L:kilf2 | -0.049069 | 0.008203 |
| Kirecin 1 gün için etkisi | L:dayf2 | 0.092601 | 0.011099 |
| Kirecin 7 gün için etkisi | L:dayf3 | 0.133987 | 0.011099 |
| Kirecin 28 gün için etkisi | L:dayf4 | 0.146096 | 0.011099 |

Tablo 4.14: İstatistiksel model ile ilgili katsayıların yorumları

| $q_u = e^{(6.06 + 0.13L + 0.19S - 0.03L*S + kilf2 + day2 + day3 + day4 + denf2 + suf2 + denf2 + L*kil2 + L*day3 + L*day4)}$ | | | |
|---|------------|--------------|---|
| Değişkenler | Katsayılar | p değeri | Yorumu |
| L | 0.135588 | < 2e-16 *** | Kireç katkısının artması olumlu |
| S | 0.197915 | < 2e-16 *** | BOS katkısının artması olumlu |
| L:S | -0.037942 | < 2e-16 *** | Kireç-curuf etkileşimi negatif ama istatistiksel olarak anlamlı değil |
| kilf2 | 0.248653 | 4.72e-13 *** | CH daha iyi reaksiyona giriyor |
| dayf2 | 0.060850 | 0.197 | 0 ve 1 gün arası fark yok |
| dayf3 | 0.233848 | 8.67e-07 *** | 0-7 arası fark anlamlı |
| dayf4 | 0.471457 | < 2e-16 *** | 0-28 arası fark anlamlı |
| denf2 | -0.858272 | < 2e-16 *** | Modifiye sıkıştırma daha iyi |
| suf2 | 0.240231 | < 2e-16 *** | Deniz suyu daha iyi sonuçlar veriyor |
| L:kilf2 | -0.049069 | 3.50e-09 *** | Bentonit kireç etkileşimi olumsuz |
| L:dayf2 | 0.092601 | 3.79e-16 *** | Kirecin etkisi kür süresi uzadıkça etkisi artıyor |
| L:dayf3 | 0.133987 | < 2e-16 *** | Kirecin etkisi kür süresi uzadıkça artıyor |
| L:dayf4 | 0.146096 | < 2e-16 *** | Kirecin etkisi kür süresi uzadıkça artıyor |

İstatistiksel model ile yapılan denemeler sonucunda, killi zeminlerde dayanımı arttırma amacı ile kireç kullanılmasının olumlu etki yaptığı sonucuna varılmıştır. Aynı şekilde çelikhane curufu (BOS) kullanılmasının da olumlu etki yaptığı sonucu elde edilmiştir. Model de kireç – curuf etkileşimi negatif çıkmıştır ancak bu sonuç istatistiksel olarak anlamlı değildir. Kullanılan kil türü ile ilgili katsayılar, yüksek plastisiteli killerin daha iyi reaksiyona girdiği sonucuna ulaşılmaktadır. Model de günlerin dayanıma etkisi test edildiğinde, 0 ve 1 günlük sonuçlar arasında önemli farklılıklar olmadığı, 7 ve 28 günlerde ise anlamlı farklar bulunduğu görülmektedir. Modelde kullanılan suyun etkisi ile ilgili katsayılar test edildiğinde, deniz suyunun daha iyi sonuçlar verdiği anlamına ulaşılmaktadır. Ayrıca model üzerinde yapılan testlerde süre uzadıkça kirecin etkisinin arttığı görülmektedir. Deneyden elde edilen değerleri ile modelden tahmin edilen serbest basınç değerleri sonuçları arasındaki ilişki grafik halinde Şekil 4.53 da ile verilmiştir. Veriler eksenden geçen 45° lik doğru üzerinde yoğunlaşmaktadır. Katsayı testleri ve grafikler, modelin tahmin gücünün oldukça iyi olduğunu göstermektedir.

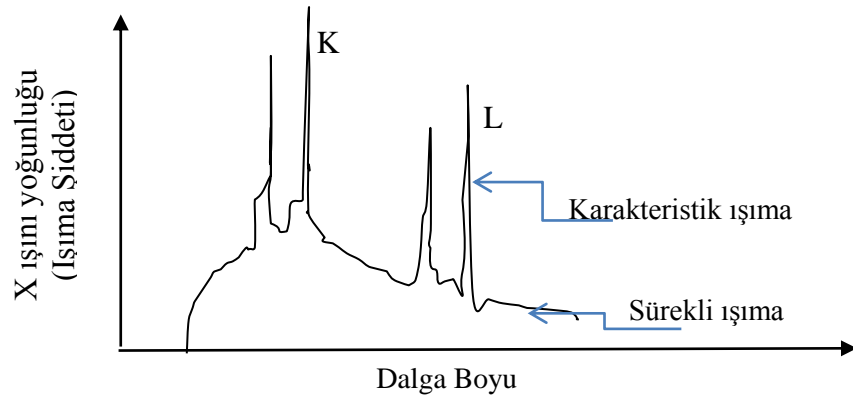


Şekil 4.53: Gerçek değerleri ile modelden tahmin edilen serbest basınç değerleri

4.10. XRD (X Işın Kırınımı)

X-Işını Kırınımı, “X-Ray Diffraction (XRD) Spektroskopisi” olarak bilinir. X-ışını kullanılarak yapılan analizi temel alır (Yavuz, 2003). Türkiye Atom Enerjisi Kurumu kırınımı şu şekilde tanımlamaktadır: aralarındaki uzaklık d olan ve aynı Miller indislerine sahip düzlemlerden yansıyan x-ışınlarının girişimleri sonucu oluşur, nitel ve nicel malzeme analizlerinde kullanılır. Ayrıca kristal yapı çözümü ve arıtımı için de kullanılmaktadır (<http://www.taek.gov.tr/component/content/article/130-malzeme-teknolojisi/482-xrd-nedir-x-isini-kirinimi-nedir.html>).

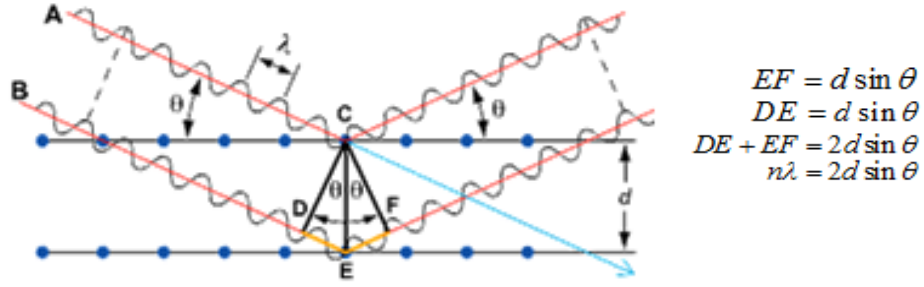
X-Işınları ,kısa dalga boylu Elektromanyetik Işımadır. Dalga boyu ultraviyolede küçüktür. Dalga boyu tipik olarak 0.1-0.001 nm yani 100-1 pm civarındadır. X-ışınları çoğu cismin içine kolayca girebilmektedir. 1895 de Röntgen tarafından keşfedilmiş ve isimlendirilmiştir. X ışını, görünmeyen, yüksek giriciliğe sahip, görünür ışıktan daha kısa dalga boylu (yüksek frekanslı) elektromanyetik dalgadır (skara.trakya.edu.tr/X-ışınları%20Bragg%20Compton.ppt). Şekil 4.54 da tipik bir X ışın kırınımı görülmektedir. Işınlardan pik yaptıkları noktalar belirlenerek malzemenin mineralojik yapısı incelenebilmektedir.



Şekil 4.54: Tipik bir X ışını spektrumu

İngiliz fizikçileri Sir W.H. Bragg ve oğlu W.L. Bragg, 1913 yılında kristal düzlemlerinden yansıyan X-ışınlarının niçin belirli açılarda gelen X-ışınları için gözlenebildiklerini açıklayan bir bağıntıyı geliştirmişlerdir. W.L. Bragg kristallerin paralel atom düzlemlerinden oluştuğunu göz önüne almıştır. Gelen dalgalar her bir

düzlemlerden ayrı ayrı yansımaya uğrarlar. Birbiri üzerine dizili pek çok “aynadan” yansımaya uğrayan ışık girişim desenleri oluşturur. Kırınımına uğramış demetler (yansımalar) Bragg yasası ile tanımlanan belirli açılarda oluşabilir (Gelen açı yansıma açısına eşittir) (skara.trakya.edu.tr/X-ışınları%20Bragg%20Compton.ppt).



Şekil 4.55: Bragg yasası

Denklem 4.4 de Bragg Kırınım yasası verilmektedir. Burada, d düzlemler arası mesafe ve n kırınımın mertebesidir. Bragg kırınım yasasına göre, farklı iki paralel düzlemlerden kırınımına uğrayan dalgaların, yapıcı girişim yapabilmeleri için, aralarındaki optik yol farkının dalga boyunun tam katları olması gerekir.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (4.4)$$

Optik yol farkı, Şekil 4.5 de ve Denklem 4.4 de tanımlanmaktadır. Bragg yansıması sadece Denklem 4.5 de verilen dalga boyu şartında meydana gelir. Bu koşulu sağlamak görünür ışık dalga boyu ile mümkün olmadığından X-ışınları kullanılmaktadır (www.fizik.itu.edu.tr/mfl/mfl_foy/04Elktkirinimi.doc).

$$n\lambda \leq 2d \quad (4.5)$$

XRD analizleri Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi Kurumu Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü tarafından yapılmıştır. SHIMADZU XRD-6000 cihazı ile Cu X-Işını tüpü ($\lambda=1,5405$ Angstrom) kullanılarak yapılan kalitatif faz (mineralojik) analizi sonucunda numunelerde Tablo 4.15 de verilmekte verilen bileşikler saptanmıştır. PDF No: Toz Difraksiyon Kart Numarasıdır.

Tablo 4.15: Kalitatif faz analiz sonuçları

| Numune Kodu | Bileşenler | PDF |
|------------------|--|-----------------|
| 0L0BOSBS | | |
| Montmorillonite, | $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ | PDF No: 13-135 |
| Kristobalite, | SiO_2 | PDF No: 39-1425 |
| Magnesite, | MgCO_3 | PDF No: 8-479 |
| Feldispat - | | |
| Kalsit, | CaCO_3 | PDF No:5-586 |
| 0L0BOSBT | | |
| Montmorillonite, | $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ | PDF No: 13-135 |
| Kristobalite, | SiO_2 | PDF No: 39-1425 |
| Magnesite, | MgCO_3 | PDF No: 8-479 |
| Feldispat | | |
| Kalsit, | CaCO_3 | PDF No:5-586 |
| 0L0BOSUS | | |
| Kuvars, | SiO_2 | PDF No:46-1045 |
| Feldispat, | | |
| Montmorillonite, | $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ | PDF No: 13-135 |
| Kalsit | CaCO_3 | PDF No:5-586 |
| Illite, | $(\text{K,H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$ | PDF No:26-911 |
| Clinochlore | $(\text{Mg,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ | PDF No: 29-701 |
| 0L0BOSUT | | |
| Kuvars, | SiO_2 | PDF No:46-1045 |
| Feldispat | | |
| Kalsit, | CaCO_3 | PDF No:5-586 |
| Montmorillonite, | $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ | PDF No: 13-135 |
| Illite, | $(\text{K,H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$ | PDF No:26-911 |
| Clinochlore, | $(\text{Mg,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ | PDF No: 29-701 |

Tablo 4.15: Kalitatif faz analiz sonuçları (devamı)

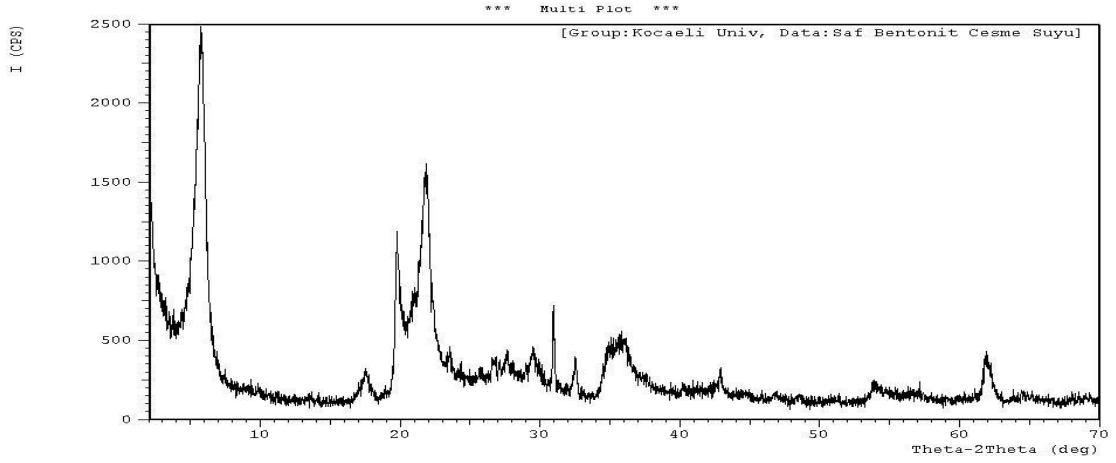
| | | |
|--------------------|--|-----------------|
| 0L3.33BOSBS | | |
| Montmorillonite, | $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_24\text{H}_2\text{O}$ | PDF No:13-135 |
| Kristobalite, | SiO_2 | PDF No: 39-1425 |
| Kalsit, | CaCO_3 | PDF No:5-586 |
| Feldispat | | |
| Magnesite, | MgCO_3 | PDF No: 8-479 |
| Hematite, | Fe_2O_3 | PDF No:33-664 |
| 0L3.33BOSBT | | |
| Montmorillonite, | $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_24\text{H}_2\text{O}$ | PDF No:13-135 |
| Kristobalite, | SiO_2 | PDF No: 39-1425 |
| Kalsit, | CaCO_3 | PDF No:5-586 |
| Feldispat | | |
| Magnesite, | MgCO_3 | PDF No: 8-479 |
| Hematite, | Fe_2O_3 | PDF No:33-664 |
| 0L3.33BOSUS | | |
| Kuvars, | SiO_2 | PDF No:46-1045 |
| Kalsit, | CaCO_3 | PDF No:5-586 |
| Montmorillonite, | $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 4\text{H}_2\text{O}$ | PDF No: 13-135 |
| Feldispat | | |
| Clinochlore, | $(\text{Mg,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ | PDF No: 29-701 |
| Illite, | $(\text{K,H}_3\text{O})\text{A}_{12}\text{Si}_3\text{Al}_1\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ | PDF No:26-911 |
| 0L3.33BOSUT | | |
| Kuvars, | SiO_2 | PDF No:46-1045 |
| Kalsit, | CaCO_3 | PDF No:5-586 |
| Feldispat | | |
| Montmorillonite, | $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 4\text{H}_2\text{O}$ | PDF No: 13-135 |
| Clinochlore, | $(\text{Mg,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ | PDF No: 29-701 |
| Illite, | $(\text{K,H}_3\text{O})\text{A}_{12}\text{Si}_3\text{Al}_1\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ | PDF No:26-911 |
| 5L0BOSBS | | |
| Montmorillonite, | $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_24\text{H}_2\text{O}$ | PDF No:13-135 |
| Kristobalite, | SiO_2 | PDF No: 39-1425 |
| Kalsit, | CaCO_3 | PDF No:5-586 |
| Magnesite, | MgCO_3 | PDF No: 8-479 |
| Feldispat | | |

Tablo 4.15: Kalitatif faz analiz sonuçları (devamı)

| | | |
|--------------------|--|-----------------|
| 5L0BOSBT | | |
| Montmorillonite, | $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_24\text{H}_2\text{O}$ | PDF No:13-135 |
| Kristobalite, | SiO_2 | PDF No: 39-1425 |
| Kalsit, | CaCO_3 | PDF No:5-586 |
| Magnesite, | MgCO_3 | PDF No: 8-479 |
| Feldispat | | |
| 5L0BOSUS | | |
| Kuvars, | SiO_2 | PDF No:46-1045 |
| Kalsit, | CaCO_3 | PDF No:5-586 |
| Montmorillonite, | $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 4\text{H}_2\text{O}$ | PDF No: 13-135 |
| Feldispat | | |
| Clinochlore, | $(\text{Mg,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ | PDF No: 29-701 |
| Illite, | $(\text{K,H}_3\text{O})\text{A}_{12}\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$ | PDF No:26-911 |
| 5L0BOSUT | | |
| Kuvars, | SiO_2 | PDF No:46-1045 |
| Kalsit, | CaCO_3 | PDF No:5-586 |
| Feldispat | | |
| Montmorillonite, | $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 4\text{H}_2\text{O}$ | PDF No: 13-135 |
| Illite, | $(\text{K,H}_3\text{O})\text{A}_{12}\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$ | PDF No:26-911 |
| Clinochlore, | $(\text{Mg,Fe})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ | PDF No: 29-701 |
| 5L3.33BOSBS | | |
| Montmorillonite, | $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_24\text{H}_2\text{O}$ | PDF No: 13-135 |
| Kristobalite, | SiO_2 | PDF No: 39-1425 |
| Kalsit, | CaCO_3 | PDF No:5-586 |
| Magnesite, | MgCO_3 | PDF No: 8-479 |
| Feldispat | | |
| Hematite, | Fe_2O_3 | PDF No:33-664 |
| 5L3.33BOSBT | | |
| Montmorillonite, | $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 4\text{H}_2\text{O}$ | PDF No:13-135 |
| Kristobalite, | SiO_2 | PDF No: 39-1425 |
| Kalsit, | CaCO_3 | PDF No:5-586 |
| Magnesite, | MgCO_3 | PDF No: 8-479 |
| Feldispat | | |
| Hematite, | Fe_2O_3 | PDF No:33-664 |

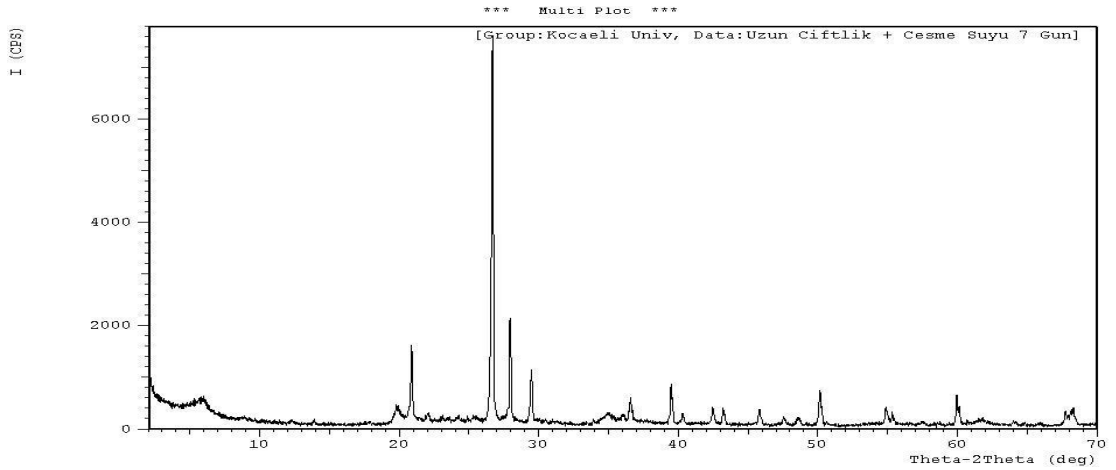
Tablo 4.15: Kalitatif faz analiz sonuçları (devamı)

| | | |
|--------------------|--|-----------------|
| 5L3.33BOSUS | | |
| Kuars, | SiO ₂ | PDF No:46-1045 |
| Kalsit, | CaCO ₃ | PDF No:5-586 |
| Feldispat | | |
| Montmorillonite, | Ca _{0.2} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ 4H ₂ O | PDF No: 13-135 |
| Clinochlore, | (Mg,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈ | PDF No: 29-701 |
| Illite, | (K,H ₃ O)A ₁₂ Si ₃ A ₁ O ₁₀ (OH) ₂ | PDF No:26-911 |
| 5L3.33BOSUT | | |
| Kuars, | SiO ₂ | PDF No:46-1045 |
| Kalsit, | CaCO ₃ | PDF No:5-586 |
| Montmorillonite, | Ca _{0.2} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ 4H ₂ O | PDF No: 13-135 |
| Feldispat | | |
| Clinochlore, | (Mg,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈ | PDF No: 29-701 |
| Illite, | (K,H ₃ O)A ₁₂ Si ₃ A ₁ O ₁₀ (OH) ₂ | PDF No:26-911 |
| 7.5L5BOSBS | | |
| Montmorillonite, | Ca 0.2(Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ 4H ₂ O | PDF No:13-135 |
| Kristobalite, | SiO ₂ | PDF No: 39-1425 |
| Kalsit, | CaCO ₃ | PDF No:5-586 |
| Feldispat | | |
| Magnesite, | MgCO ₃ | PDF No: 8-479 |
| Hematite, | Fe ₂ O ₃ | PDF No:33-664 |
| 7.5L5BOSBT | | |
| Montmorillonite, | Ca 0.2(Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ 4H ₂ O | PDF No:13-135 |
| Kristobalite, | SiO ₂ | PDF No: 39-1425 |
| Kalsit, | CaCO ₃ | PDF No:5-586 |
| Feldispat | | |
| Magnesite, | MgCO ₃ | PDF No: 8-479 |
| Hematite, | Fe ₂ O ₃ | PDF No:33-664 |



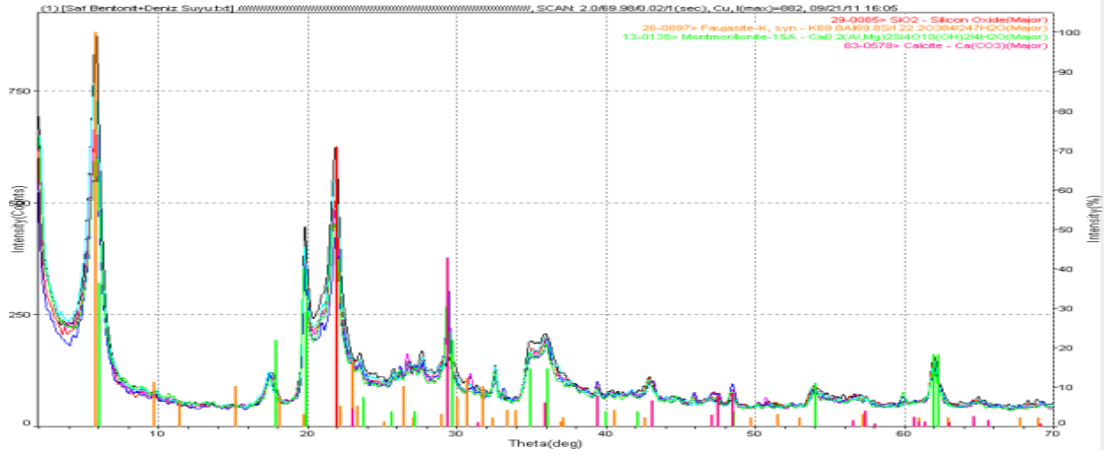
Şekil 4.56: Bentonit kil, çeşme suyu XRD analiz görüntüleri

Yapılan çalışmalar akabinde Tablo 4.8 de de görüldüğü gibi, kullanılan uzunçiftlik kili ve bentonitin morfolojik yapılarında farklılık gözlemlenmiştir. Şekil 4.56 ve Şekil 4.57 de bu fark açık olarak görülmektedir.



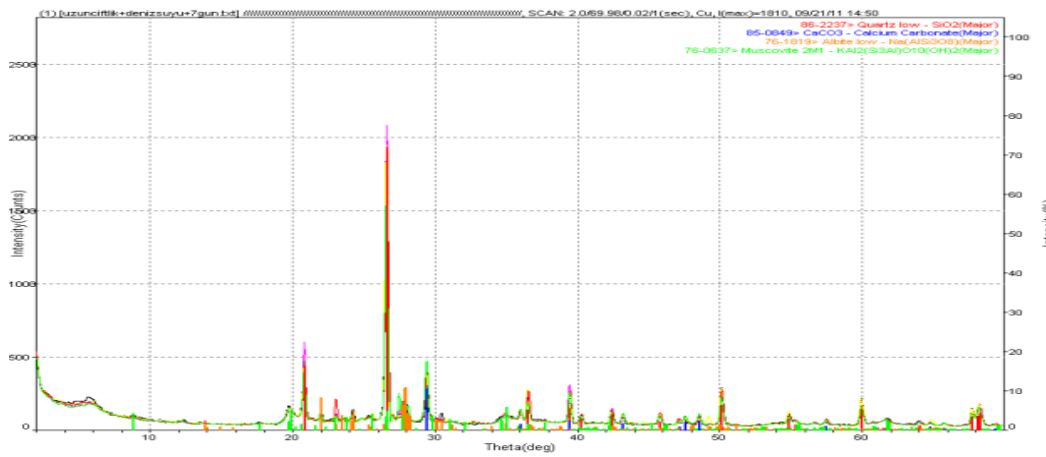
Şekil 4.57: Uzunçiftlik kil, çeşme suyu XRD analiz görüntüleri

Alınan XRD çekimleri sonucunda, değişik katkılarla hazırlanan killerin, doğal yapıları ile katkılı durumları kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslamalarda, belirgin farklılıklar gözlemlenmemiştir. Neden olarak, katkı miktarlarının düşük olması (katkılar % 10 dan küçük, Deniz suyunda NaCl miktarı %1 ler seviyesinde) gösterilebilir. Gözlemlenen fazlar ve görülen farklılıklar aşağıda incelenmiştir.



Şekil 4.58: Bentonit kili, deniz suyu XRD analiz görüntüleri

Uzunçiftlik kili ve bentonit kili üzerinde deniz suyu ile çalışılması halinde de morfolojik yapılarında farklılık gözlemlenmiştir. Şekil 4.58 ve Şekil 4.59 de bu fark açık olarak görülmektedir.

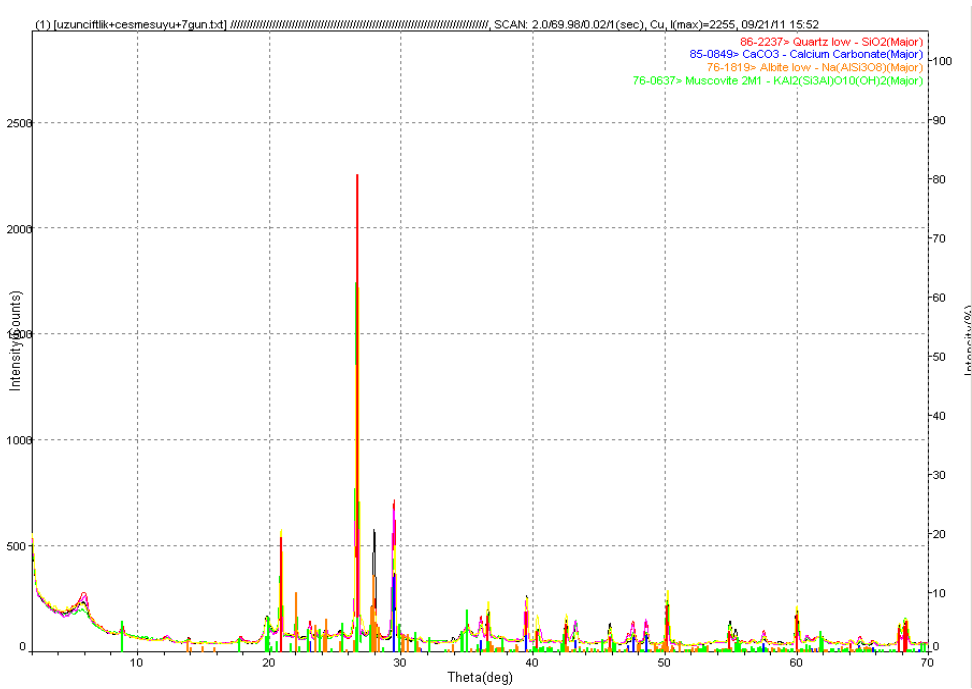


Şekil 4.59: Uzunçiftlik kili, deniz suyu XRD analiz görüntüleri

Uzunçiftlik karışımlarının içeriğinde; kuvars, (SiO₂), Kalsit, (CaCO₃), Illite, ((K,H₃O)Al₂Si₃AlO₁₀(OH)₂), Clinoclore, ((Mg,Fe)₆(Si,Al)₄O₁₀(OH)₈), Montmorillonite, (Ca_{0.2}(Al,Mg)₂Si₄O₁₀(OH)₂·4H₂O) bulunmaktadır. Bentonit ile hazırlanan karışımların içeriğinde ise, Kristobalite, (SiO₂), Magnesite, (MgCO₃), Kalsit, (CaCO₃), Montmorillonite, (Ca_{0.2}(Al,Mg)₂Si₄O₁₀(OH)₂·4H₂O), bulunmaktadır.

Numunelerin XRD faz inceleme çalışmaları sonrasında elde edilen veriler dört kategoride incelenebilir. Bunlar:1. Çeşme Suyu, kireç ve BOS kullanılarak hazırlanmış uzunçiftlik kili karışımları; 2. Deniz Suyu, kireç ve BOS kullanılarak hazırlanmış uzunçiftlik kili karışımları; 3. Çeşme Suyu, kireç ve BOS kullanılarak hazırlanmış bentonit kili karışımları; 4. Deniz Suyu, kireç ve BOS kullanılarak hazırlanmış bentonit kili karışımları olarak adlandırmıştır.

1. Çeşme Suyu, kireç ve BOS kullanılarak hazırlanmış uzunçiftlik kili karışımları

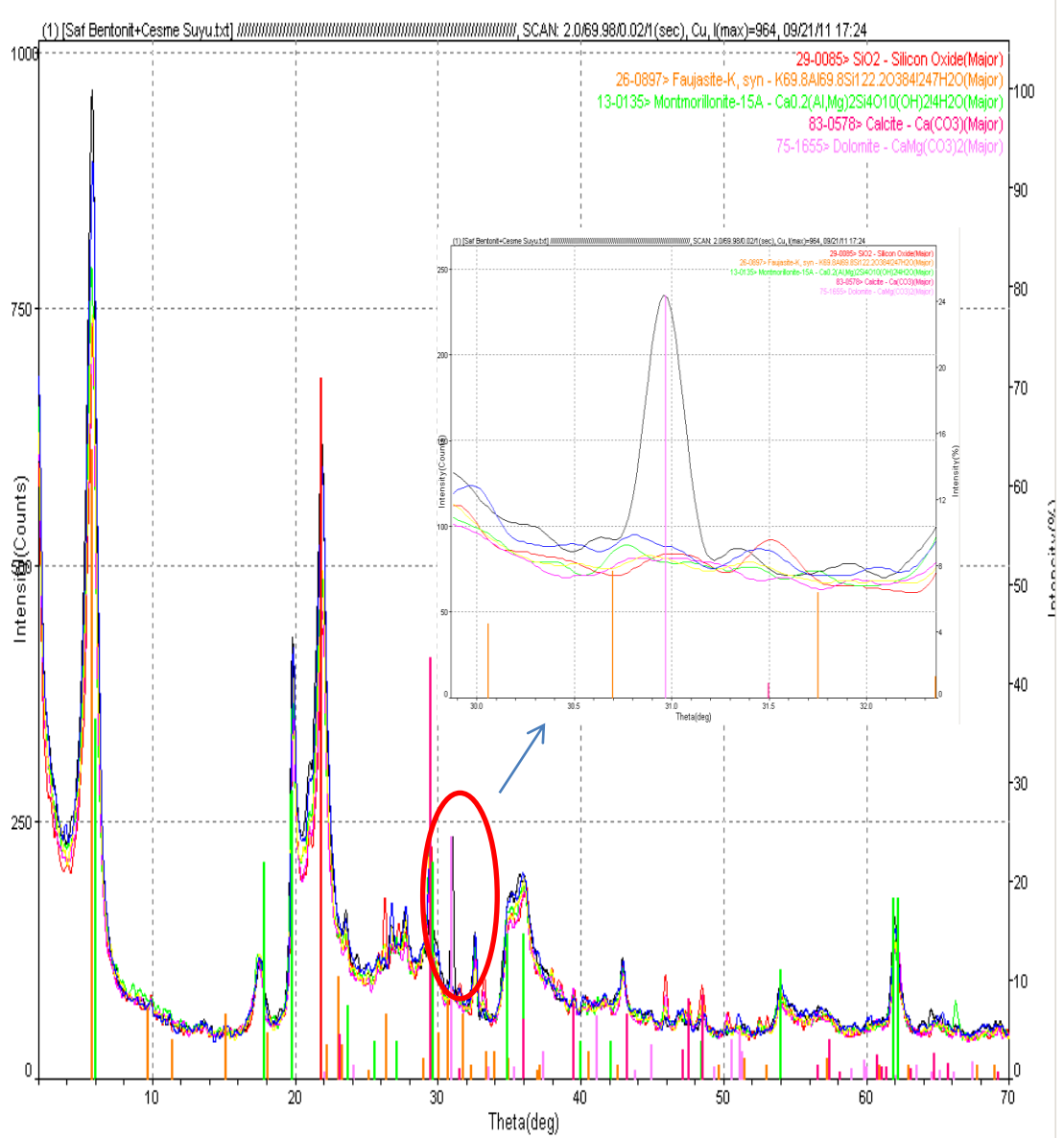


Şekil 4.60: Çeşme suyu, kireç ve BOS kullanılarak hazırlanmış uzunçiftlik kili karışımları XRD analiz görüntüleri

Çeşme suyu kullanılarak değişik oranlarda kireç, BOS ve ikisinin bir arada kullanıldığı uzunçiftlik kili karışımların XRD faz diyagramları Şekil 4.60 de aynı grafik üzerinde görülmektedir. Bu karşılaştırmada, numuneler arasında herhangi bir farklı faz oluşumu gözlemlenmemiştir. Genel olarak görülen fazlar, SiO₂, Hidratlı Potasyum Aluminyum Silikat, Hidratlı kalsiyum magnezyum silikat, Kireçtaşı(CaCO₃) ve dolomit (MgCa(CO₃)₂) olarak söylenebilir.

3. Çeşme Suyu, kireç ve BOS kullanılarak hazırlanmış bentonit kili karışımları

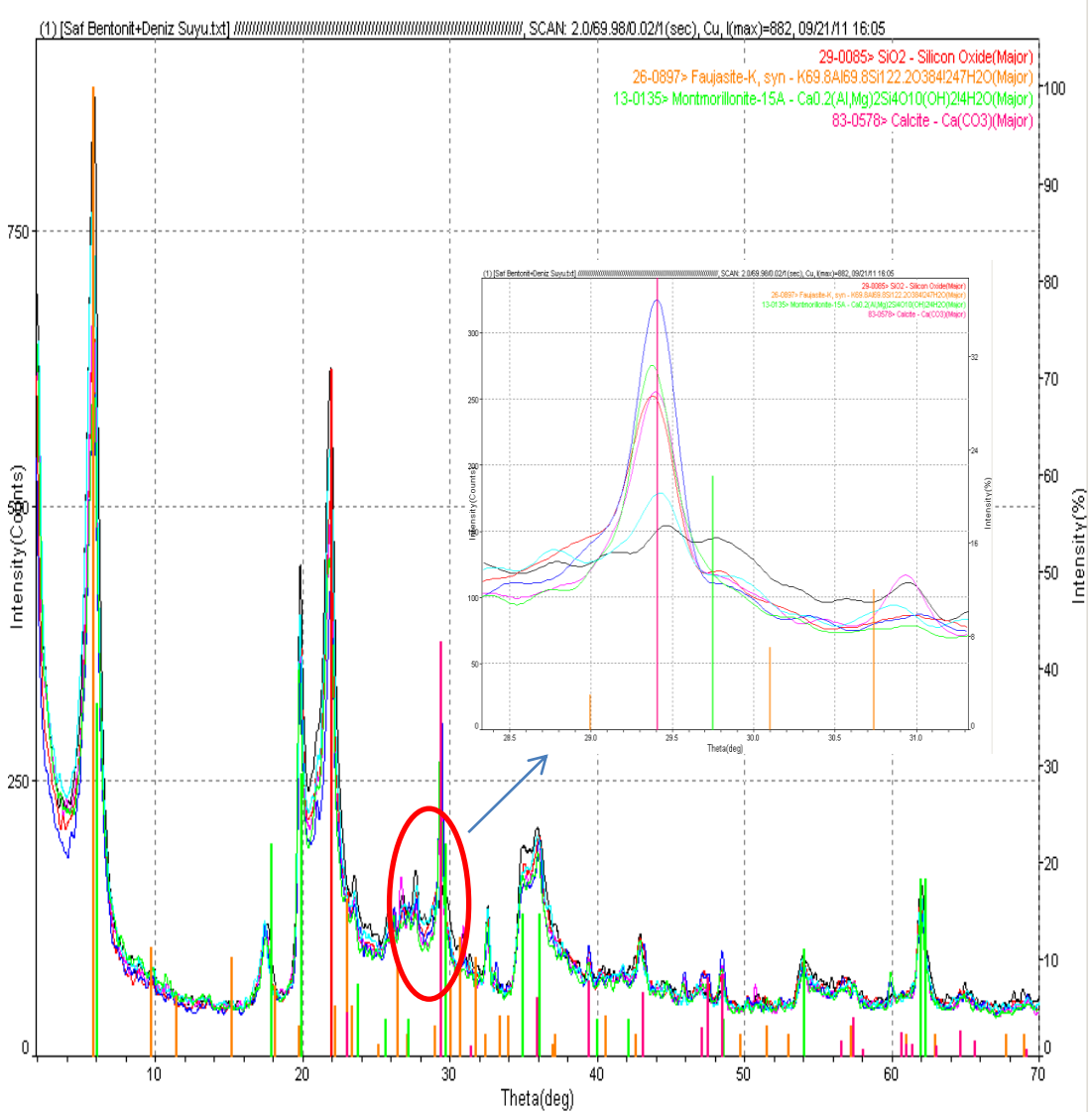
Çeşme suyu kullanılarak değişik oranlarda kireç, BOS ve ikisinin bir arada kullanıldığı bentonit kili karışımların XRD faz diyagramları Şekil 4.62 de aynı grafik üzerinde görülmektedir. Gözlemlenen faz oluşumları SiO_2 , hidratlı potasyum alüminyum silikat, kalsiyum magnezyum silikat, kalsit ve dolomit olarak adlandırılabilir. Dolominit fazı sadece katkısız bentonite ait fazda bulunmaktadır.



Şekil 4.62: Çeşme suyu, kireç ve BOS kullanılarak hazırlanmış bentonit kili karışımları XRD analiz görüntüleri

4. Deniz Suyu, kireç ve BOS kullanılarak hazırlanmış bentonit kili karışımları

Deniz suyu kullanılarak değişik oranlarda kireç, BOS ve ikisinin bir arada kullanıldığı bentonit kili karışımların XRD faz diyagramları Şekil 4.63 de aynı grafik üzerinde görülmektedir. gözlemlenen faz oluşumları SiO_2 , hidratlı potasyum alüminyum silikat, kalsiyum magnezyum silikat, kalsit ve dolomit olarak adlandırılabilir. Katkısız bentonit ve 3.33 BOS ile hazırlanan numuneler de CaCO_3 fazı oluşumu gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.63: Deniz suyu, kireç ve BOS kullanılarak hazırlanmış bentonit kili karışımları XRD analiz görüntüleri

4.11. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)

Taramalı Elektron Mikroskobu, çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronlarla yüzeyin taranması prensibiyle çalışır. Manfred von Ardenne öncülüğünde 1930'lı yıllarda geliştirilmiştir. En sık kullanıldığı biçimiyle, yüzeyden yayılan ikincil (secondary) elektronlarla yapılan ölçüm, özellikle yüzeyin engebeli (topografik) yapısıyla ilişkili bir görüntü oluşturur (<http://tr.wikipedia.org>).

Temel olarak Taramalı elektron mikroskobu, Tungsten, Lantan hekza borit katottan veya alan emisyonlu (FEG) gun'dan ortaya çıkan elektronların kullanımı incelenecek malzeme yüzeyine gönderilmesi sonucu oluşan etkileşmelerden yararlanılması esasına dayanır (<http://www.taek.gov.tr/component/content/article/130-malzeme-teknolojisi/482-xrd-nedir-x-isini-kirinimi-nedir.html>).

Elektron mikroskopları iki çeşittir. Bunlar : Transmisyon Elektron Mikroskobu (TEM): Bu mikroskopta elektron ışını çok ince bir örneğe yönlendirilir. Elektron mikroskobunda, projeksiyon mercekleri olarak adlandırılan mercekler gerçek görüntüyü flouresans ya da fotografik film üzerine düşürmelidir, çünkü gözümüz elektron görüntüsünü doğrudan göremez. Tem için kullanılan örnekler çok ince olmalıdır. 10-20nm (100 atom kalınlığı) kadar ince örnekler özel yöntemlerle hazırlanabilmektedir. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM): Daha kalın örnekler elektron ışınlarının yüzeyden yansıması ile incelenebilir. Bu inceleme SEM ile yapılabilmektedir. Elektron ışını örnek yüzeyine odaklanır ve örnek yüzeyini taramaya başlar. Işının örnek yüzeyini taramaya başlamasıyla yüzeyden yansıyan elektronlar örneğe göre birkaç yüz volt pozitif voltajda tutulan anot ile toplanır. Toplayıcı anottaki akım yükseltilir ve katot ışın tüpündeki mikroskop ışını ile eşzamanlı olarak taranan elektron ışınlarını değiştirmek için kullanılır. Bu nedenle katot ışın tüpü örneğin oldukça büyütülmüş olan görüntüsünü alır. SEM 'in ayırma gücü 10nm mertebesindedir. Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile (200-300 eV dan 100 keV a kadar değişebilir) hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal

güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir (<http://www.elektrotekno.com/about16948.html>).

Gelen elektron demetinin incelenen örnek yüzeyi ile yapmış olduğu diğer bir etkileşme ise (yaklaşık 1000 nm derinlik civarında), karakteristik X ışınlarının çıktığı durumdur (enerjileri keV mertebesindedir). Buna göre örneğe çarpan elektron, örnekteki atomun iç yörüngesinden bir elektron kopmasına neden olunca, enerji dengelenmesi gereği bir üst yörüngedeki elektron bu seviyeye geçer ve geçerken de ortama bir X ışını yayar ve buna da karakteristik X ışını adı verilir. Bu X ışını mesela 10 mm² çapındaki bir Si (Li) dedektörle algılanır, ortaya çıkan sinyal yükselticiye, oradan çok kanallı analizöre ve daha sonra da SEM sistemin bilgisayarına gönderilir. Sonuçta ortaya çıkan karakteristik X ışını (ki bu ışının enerjisi her atoma özeldir), SEM'de incelenen malzemenin element bakımından muhtevasının nitel ve nicel olarak tespit edilmesine yardımcı olur (<http://www.taek.gov.tr/component/content/article/130-malzeme-teknolojisi/482-xrd-nedir-x-isini-kirinimi-nedir.html>).

Bu tezde kullanılan numunelerin SEM analizleri Türkiye Bilimsel Ve Teknolojik Araştırma Merkezi Kurumu Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü tarafından yapılmıştır. Analiz kalitatif faz (mineralojik) analiz olarak rapor edilmiştir. Numuneler ile ilgili analiz sonuçları Ek- C de verilmektedir.

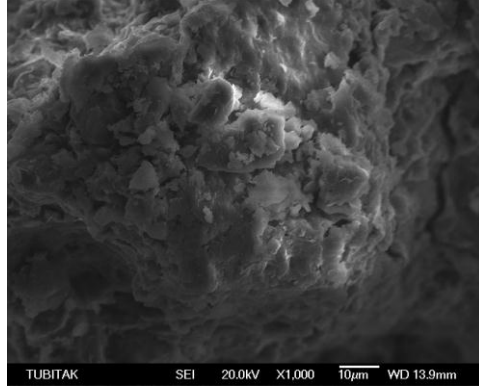
Analizler sonucu çeşme suyu su ile hazırlanmış katkısız uzunçiftlik kili numunesinin (OLOBOSUT), atomik ağırlıkça %64 ünü oksijen (O) oluşturmaktadır. %21'ini ise Silisyum (Si) kaplamaktadır. Daha sonra %8 ile Aliminyum (Al) yer almaktadır. Kalan %7 lik kısmın, %2 sini sodyum (Na), % 2 sini Kalsiyum (Ca), %2 sini demir (Fe) ve %1 ini Magnezyum ve Potasyum (K) oluşturmaktadır. Burada oksijen ve silisyum SiO₂ den, Alüminyum Al₂O₃ den, magnezyum MgO dan, Sodyum (Na) Albit (NaAlSi₃O₈) den, kalsiyum (Ca) Kollasit (CaSiO₃) den gelmektedir. Kollasit doğal kalsiyum silikat ve albit Sodyum ağırlıklı bir feldspat mineralidir.

SEM analizleri sonucunda numunelerdeki elementlerin atomik olarak ağırlıkça % miktarları elde edilmiştir. Elde edilen değerler Tablo 4.16 da gösterilmektedir.

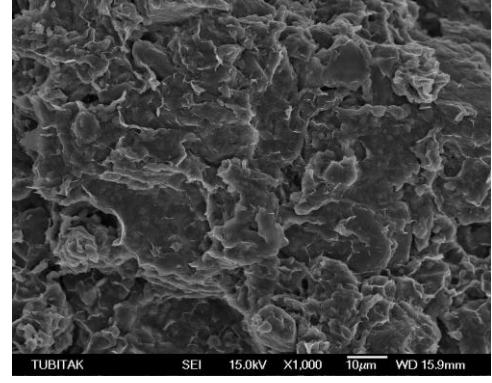
Tablo 4.16: Numunelerin içeriğinde bulunan elementlerin atomik ağırlıkça % değerleri

| Atomik % | | | | | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| Element / Karışım | C | O | Na | Mg | Al | Si | K | Ca | Ti | Fe |
| 0L0BOSUT | | 63,63 | 2,39 | 0,68 | 7,66 | 21,17 | 0,80 | 2,22 | | 1,45 |
| 0L3.33BOSUT | 5,54 | 64,88 | | 2,29 | 4,23 | 16,04 | 0,42 | 4,12 | 0,32 | 2,16 |
| 5L0BOSUT | | 66,00 | | | 3,01 | 25,49 | 0,54 | 2,75 | | 2,20 |
| 5L3.33BOSUT | | 58,73 | | 0,83 | 13,51 | 20,32 | 4,59 | 0,91 | | 1,11 |
| 5L7.5BOSUT | | 69,10 | | 0,61 | 4,74 | 18,30 | 0,42 | 5,06 | 0,20 | 1,59 |
| 0L0BOSUS | | 68,91 | | | 7,02 | 19,77 | | 2,08 | | 2,21 |
| 0L3.33BOSUS | | 72,27 | | 0,80 | 6,14 | 14,39 | 0,49 | 4,36 | | 1,54 |
| 5L0BOSUS | | 72,70 | | 0,75 | 4,73 | 15,48 | 0,29 | 4,64 | | 1,40 |
| 5L3.33BOSUS | 16,15 | 60,18 | | | 3,89 | 15,00 | 0,29 | 3,00 | | 1,49 |
| 5L7.5BOSUS | | 67,35 | 1,59 | 0,80 | 6,59 | 19,29 | 0,38 | 2,62 | | 1,39 |
| 0L0BOSBT | | 67,04 | | 2,87 | 4,34 | 24,70 | 0,34 | 0,72 | | |
| 0L3.33BOSBT | | 69,59 | | 2,73 | 3,71 | 20,68 | | 3,30 | | |
| 5L0BOSBT | | 68,12 | | 2,59 | 4,38 | 22,44 | 0,33 | 2,14 | | |
| 5L3.33BOSBT | | 67,42 | | 2,16 | 3,98 | 21,30 | 0,30 | 4,26 | | 0,57 |
| 5L7.5BOSBT | | 63,21 | | 2,77 | 4,75 | 26,32 | | 2,95 | | |
| 7.5L5BOSBT | | 71,07 | | 3,01 | 4,07 | 18,08 | | 3,77 | | |
| 0L0BOSBS | | 69,71 | | 2,89 | 4,54 | 22,10 | 0,27 | 0,49 | | |
| 0L3.33BOSBS | | 63,38 | | 2,79 | 4,71 | 27,79 | | 1,33 | | |
| 5L0BOSBS | | 63,86 | | 2,34 | 2,79 | 28,80 | | 2,21 | | |
| 5L3.33BOSBS | | 69,03 | | 2,42 | 3,82 | 21,14 | 0,31 | 3,28 | | |
| 5L7.5BOSBS | | 69,86 | | 2,49 | 3,96 | 21,21 | 0,22 | 2,27 | | |
| 7.5L5BOSBS | | 63,79 | | 2,70 | 3,75 | 24,77 | | 4,99 | | |

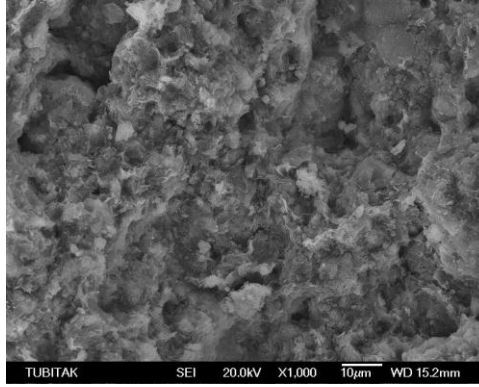
Bentonit kili çeşme suyu ile hazırlanmış olan numunenin (0L0BOSBT) atomik ağırlıkça %67 sini oksijen (O) oluşturmaktadır. %25'sini ise Silisyum (Si) kaplamaktadır. Daha sonra, %4 ile Aliminyum (Al), % 3 ile Magnezyum (Mg) yer almaktadır. Kalan % 1 lik kısmı, Kalsiyum (Ca), ve Potasyum (K) oluşturmaktadır. Burada Oksijen ve Silisyum SiO₂ den gelmektedir. Magnezyum MgO dan, Aliminyum Al₂O₃ den, kalsiyum (Ca) Kollasit (CaSiO₃) den gelmektedir.



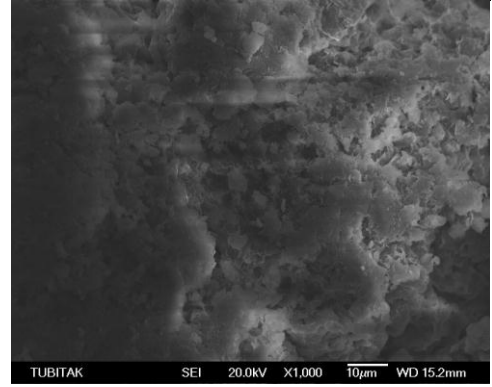
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.64: Katkısız uzunçiftlik ve bentonit numunelerine ait SEM fotoğrafları

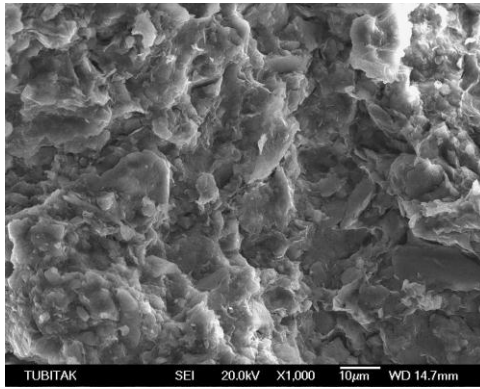
Katkısız uzunçiftlik ve bentonit numunelerine ait SEM fotoğrafları Şekil 4.64 de görülmektedir. 4.57 (a) da uzunçiftlik kilinin çeşme suyu, (b) de deniz suyu ile hazırlanmış numunelere ait fotoğraf görülmektedir. Şekil 4.57 (c) de bentonit çeşme suyu, (d) de ise bentonit deniz suyuna ait fotoğraf bulunmaktadır. Fotoğraflar TUBITAK MAM laboratuvarlarında 15 kV de çekilmiştir. Çektirilen fotoğrafların tümü “Ek C” de sunulmaktadır. Bu bölümde kullanılan SEM fotoğraflarının tamamı 1000 kez büyütülmüş 1 µm lik görüntülerdir.

Çeşme suyu ile hazırlanan uzunçiftlik kilinin yapısında (a) büyük boşluklar ve çatlaklar arasında topaklanmış bir yapı görülmektedir. Deniz suyu ile karıştırıldığında ise (b) yapı tabakalansız ve homojenleşmiş olarak görülmektedir. Tablo 4.15 de de görüldüğü üzere, uzunçiftlik kili çeşme suyu ile çalışıldığında yapısında sodyum (Na) ve magnezyum (Mg) ve potasyum (K) bulunmaktadır. Na ve K bilindiği gibi alkali metallere; kolaylıkla eriyebilen, tepkimelerde etkin elementlerdir ve suyla etkileşimleri çok güçlüdür. Deniz suyu kullanıldığı

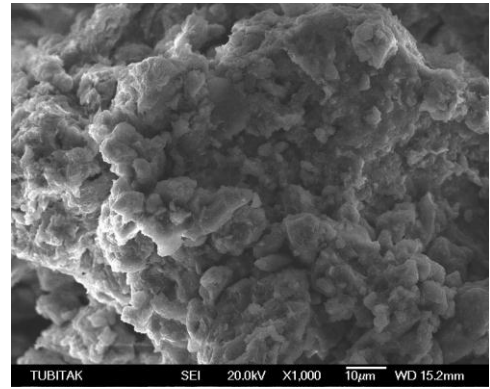
durumlarda bu elementlere rastlanmamıştır. Deniz suyu ile çalışılan uzunçiftlik killlerinde demir (Fe) miktarında artış, oksijen miktarında azalma gözlenmiştir. Bu durum çeşme suyu kullanılmasına göre farklılık göstermektedir.

Bentonit kilinin çeşme suyu hazırlanmış numunesinde Şekil 4.57 (c) ve deniz suyu ile hazırlanmış numunesinde (d) ise çok büyük olmamakla birlikte bir miktar farklılık göze çarpmaktadır. Bentonit kili deniz suyu numunesinde çeşme suyuna kıyasla Tablo 4.15 de görüldüğü gibi, Ca (kalsiyum) miktarında 1/3 oranında bir azalma meydana gelmiştir. K (Potasyum), Si(silisyum) miktarlarında da bir miktarda azalma gözlenirken O (oksijen), Mg(magnezyum) ve Al (alüminyum) miktarlarında artış görülmektedir.

Yüksek iyon değişim kapasitesi ve yüksek Na miktarı zeminin şişme potansiyelini artırır. Öte yandan yüksek Ca miktarı şişme potansiyelini azaltır. Sodyum montmorilonit, kalsiyum montmorilanta göre önemli miktarda daha fazla şişme potansiyeline sahiptir. Katkı konulan killerde “kation değişim kapasitesi” (CEC) azalmaktadır. Bu Na ile Ca elementlerinin yer değiştirmesinden dolayı olmaktadır. Sodyum ve kalsiyum iyonları ve CEC zeminin likit limitini, plastik indekteki yerini, şişme basıncını, şişme potansiyelini etkilemektedir (Al-Rawas ve diğ., 2002).



(a)



(b)

Şekil 4.65: % 5 kireç katkılı uzunçiftlik kili numunelerine ait SEM fotoğrafları

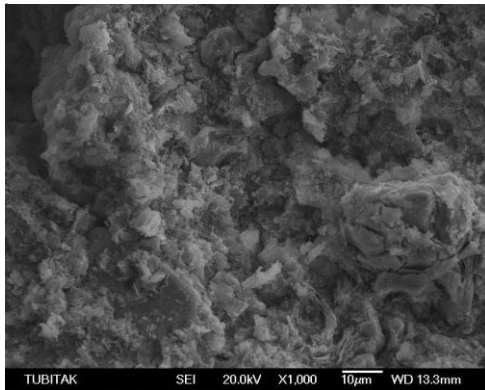
Şekil 4.65 de % 5 kireç katkılı uzunçiftlik kili numunelerine ait SEM fotoğrafları görülmektedir. (a), % 5 kireç katkılı uzunçiftlik çeşme suyu, (b), % 5 kireç katkılı uzunçiftlik deniz suyu numunesine aittir. Kireç ve çeşme suyu ile hazırlanmış

uzunçiftlik kilindeki yapısal değişim Şekil 4.58 (a) ve (b) de görülmektedir. Deniz suyu ve kireç kullanılan uzunçiftlik kilinde (b) çeşme suyuna benzer ancak daha topaklı, birbirine daha da yakınlaşmış bir yapı görülmektedir.

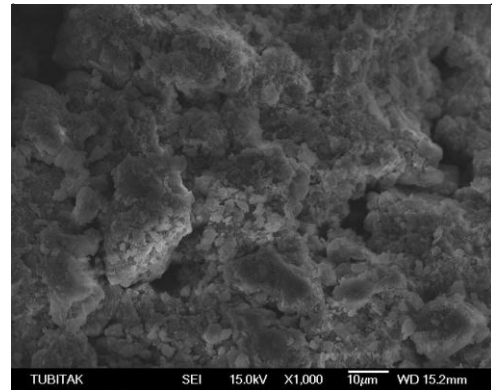
Kireç ve çeşme suyu ile hazırlanmış uzunçiftlik numunelerinde, katkısız haldeki uzunçiftlik kilinde bulunan sodyum (Na) ve magnezyum (Mg) elementleri bulunmaktadır. Alüminyum (Al) miktarında yarı yarıya bir azalma meydana gelmiştir. Silisyum (Si) ve (Ca) Kalsiyum ve (Fe) demir miktarlarında biraz artış meydana gelmiştir.

Kireç ve deniz suyu ile hazırlanmış uzunçiftlik numunelerinde, (Na) sodyum bulunmamakta ama (Mg) magnezyum katkısız duruma göre daha fazla bulunmaktadır. Alüminyum (Al) ve silisyum (Si) miktarlarında azalma olmuş, demir (Fe) miktarı değişmemiştir.

Şekil 4.66 de % 5 kireç katkıli bentonit kili numunelerine ait SEM fotoğrafları görülmektedir. (a), % 5 kireç katkıli bentonit çeşme suyu, (b), % 5 kireç katkıli bentonit deniz suyu numunesine aittir. Bentonit kilinin kimyasal yapısı çeşme suyu ve deniz suyunda benzerlik göstermektedir. Ancak kalsiyum (Ca) ve potasyum (K) miktarlarında bir miktar azalma ve alüminyum (Al) miktarlarındaki artış göze çarpmaktadır.



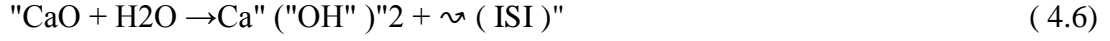
(a)



(b)

Şekil 4.66: % 5 kireç katkıli bentonit kili numunelerine ait SEM fotoğrafları

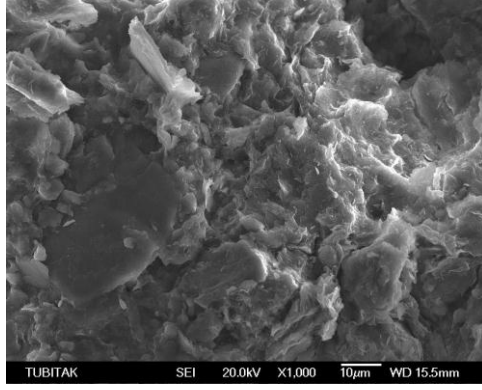
Bilindiği gibi kireç doğada (CaO) Kalsiyum oksit şeklinde bulunurlar. Kireç, kalsiyum ve magnezyum oksitleri ve hisroksillerinden oluşur. Kalsiyum oksit su ile reaksiyona girince, Denklem 4.6 da görüldüğü gibi, ısı açığa çıkan (dehidrotasyon) bir etkileşim meydana gelir.



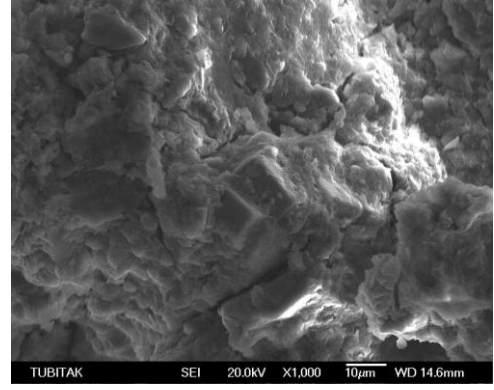
Bu reaksiyonda ortaya çıkan ısı 65 kJ/mol dır. Bu ısı karışıma eklenen suyun buharlaşmasına sebep olur. Kuruyan kireçte işlenebilirlik ve mukavemette artış meydana gelir. Ek olarak kireçteki kalsiyum iyonları ile kildeki metal iyonları yer değiştirir. Bu değişim, absorbe su katmanlarında (elektriksel çift katmanda) önemli bir azalma meydana getirir ve daha sonra eklenen sulara karşı hassasiyeti azalır. Absorbe su katmanlarındaki inceltme kilin yapısında topaklaşma meydana getirir. Bu kil partiküllerinde karşılıklı çekimi artırarak içsel sürtünme açısının, dolayısı ile kesme mukavemetinin artmasını sağlar. Böylece meydana gelen yapısal değişiklikler, plastik bir kilin granüler bir yapıya dönüşmesine sebep olur. Kireç ile karıştırılmış killer, sıkıştırıldığında belli bir kür süresi sonrasında, mukavemetlerinde artış, deformasyonlarında azalma gözlenmektedir. Bu stabilizasyon demektir. Bu değişimin sebebi, kür süresi boyunca, kilin içerisindeki silika ve alüminalar, kireç ve su ile reaksiyona girerek, kalsiyum silika hidrat ve alümina silika hidrat jelleri oluşturmaktadır (Rogers ve diğ., 1997).

Kireç ve su içinde kil mineralleri bulunan zemine eklendiğinde silika ve alüminalarla reaksiyona girerek çimentolaşma etkisi göstermektedir. Kireç ortamın pH değerini yükselterek asitik bir ortam oluşturmaktadır. Bu ortamda silika ve alüminaların eriyebilirliği artmaktadır. Ayrıca, kireç zeminin plastisitesini azaltmakta ve işlenebilirliğini ve mukavemetini arttırmaktadır.

Şekil 4.67 (a) da, % 5 kireç ile % 3.33BOS ve çeşme suyu kullanılarak (b) de aynı karışım ve deniz suyu kullanılarak hazırlanmış uzunçiftlik numunelerine ait SEM fotoğrafları görülmektedir.



(a)

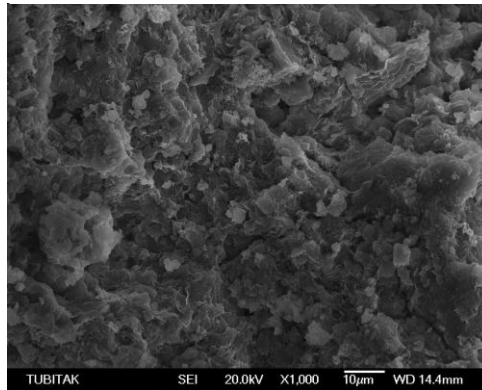


(b)

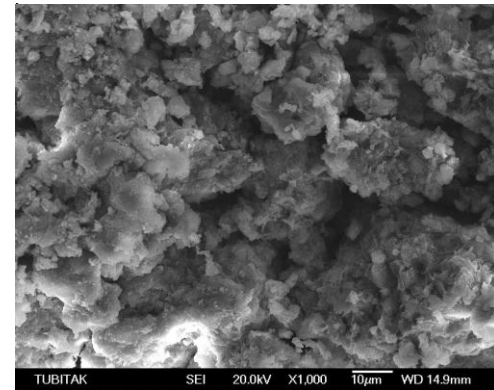
Şekil 4.67: 5L3.33BOSUT ve 5L3.33BOSUS numunelerine ait SEM fotoğrafları

Şekil 4.68 (a) da, % 5 kireç ile % 3.33BOS ve çeşme suyu kullanılarak, (b) da, aynı karışım ve deniz suyu kullanılarak hazırlanmış bentonit numunelerine ait SEM fotoğrafları görülmektedir.

Uzunçiftlik kilinde deniz suyu ve çeşme suyu ile hazırlanan numunelerin yaptığı değişim birbirine benzemektedir. Ancak bentonite çeşme suyu ve deniz suyunun etkisinin oldukça farklı olduğu görülmektedir. Kireç ve BOS katkılarının birlikte kullanılması sadece kireç katkısı kullanılmasına göre de oldukça farklıdır.



(a)



(b)

Şekil 4.68: 5L3.33BOSBT ve 5L3.33BOSBS numunelerine ait SEM fotoğrafları

Uzunçiftlik kilinde katkı kullanıldığı durumlarda sodyum elementine rastlanmamaktadır. Magnezyum elementi sadece kireç kullanılması durumunda görülmezken kireç ve BOS un birlikte kullanılması durumunda tekrar göze çarpmaktadır. Aliminyum miktarı sadece kireç kullanılması durumunda yarı miktara

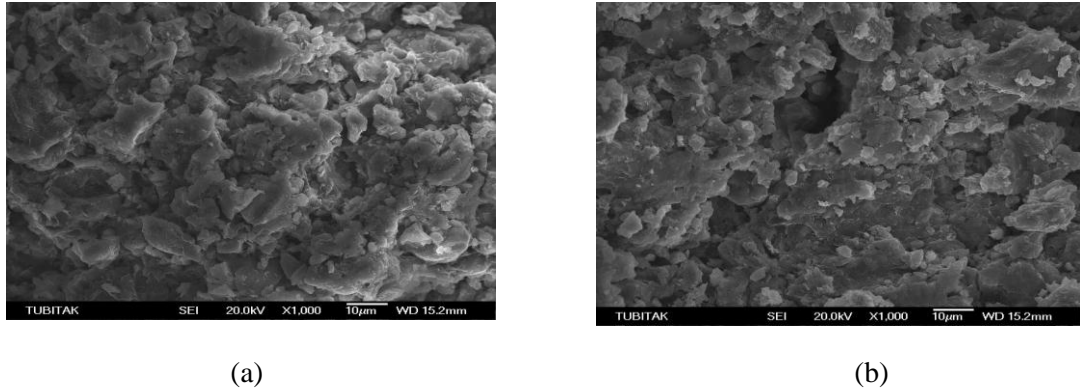
inerken cürüfla birlikte kullanılması durumunda % 60 civarında bir artış göstermektedir. Potasyum miktarı sadece kireç kullanıldığında azalırken, kireç ve BOS kullanıldığında yaklaşık 6 kat artmaktadır. Katkıların birlikte kullanılması durumunda, kalsiyum miktarında azalma meydana gelmektedir.

Kireç, BOS ve deniz suyu ile çalışılan uzunçiftlik numunelerindeki element miktarlarındaki değişimler sadece kireç ve çeşme suyu kullanılması durumuna benzerlik göstermektedir. Ancak kireç, BOS ve deniz suyu ile hazırlanan uzunçiftlik kili numunelerindeki en önemli fark hiç bir karışımda görülmeyen karbon miktarı %16 gibi önemli bir miktarda görülmesidir. Karbon bilindiği gibi ametallere bir elementtir ve metaller pozitif yüklü iyonlar oluştururken ametaller negatif yüklü iyonlar oluştururlar ve elektronegatifliği çok yüksektir. Elektronegatiflik, kimya da bağ yapımı kullanılan elektronların bağı oluşturan atomlar tarafından çekilme gücüdür. Güçlü elektronegatif elementler kolaylıkla elektron alırlar. Buna karşın sodyum gibi dış seviyeleri hemen hemen boş olan atomlar kolaylıkla elektronlarını verirler ve güçlü elektropozitiflerdir.

Bentonit kilinin cürüflü karışımlarında Hematit (Fe_2O_3) bulunmaktadır. Uzunçiftlik kili karışımlarında Fe elementine rastlanırken bentonit kilinde rastlanmamaktadır. Hematit çelik üretiminde kullanılan temel bir mineraldir. Kireç, BOS ve çeşme suyu ile hazırlanan numunelerde bir miktar demir elementi görülmekte ancak deniz suyu karışımlarında görülmemektedir. Serbest basınç mukavemetinin deniz suyu ile hazırlanan kireç, BOS ve bentonit karışımlarında yüksek olmasında bunun etkili olabileceği düşünülmektedir.

James R. ve diğ., 2008 yılında bakır cürufu, kireç ve kil kullanarak yaptıkları çalışmada şu yorumu yapmaktadır: Kireç ve cüruf eklenen killerde su muhtevası azalır ve birincil çimentolaşma formasyonuna sebebiyet veren hidrolik reaksiyonlar meydana gelir. Hidrolik reaksiyonlarla birlikte zaman içerisinde daha yavaş hızda meydana gelen puzolonik reaksiyonlarda olmaktadır. XRD analizleri kireç kil karışımlarında örneğin kalsiyum silika hidrat (C-S-H) puzolonik reaksiyon (2.cil çimentolaşma) oluşumunu onaylamaktadır. Kireç, cüruf ve kil karışımlarındaki reaksiyon sonucunda ise kalsiyum silika hidrat (C-S-H) ve kalsiyum alimino hidrat

(C-A-S-H) oluşumları görülmektedir. Karışımlar için, puzolonik reaksiyon ürünlerinin bağıl yoğunluğu (C-S-H, C-A-S-H) curuf miktarının artması ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Kireç kil veya curuf, kireç kil karışımlarında kilin boşluklu ve örgülü yapısı, yumaksı yapıya dönüşmüştür. Kil, kireç ve curufli karışımlarda ise yapıda yumaksı kümelenmeler ve kümeler arası boşluklar oluşmuştur. Curuf kireç ile birlikte C-S-H ve C-A-S-H kristal ağ oluşumunu sağlayarak puzolonik reaksiyonların oluşumunu aktif olarak desteklemektedir. Kireç miktarı sabit tutulup curuf miktarı arttırıldığında ağ yapısına dönüşüm derecesinde belirgin artışlar meydana gelmektedir. Serbest basınç değerleri de karışımlarda artmaktadır. Bu hidratasyon ve puzolonik reaksiyonlar sonucunda meydana gelmektedir. Reaksiyonlarda katkısız kil ile birlikte curuf partiküllerinden serbest bırakılmış (Ca) kalsiyum iyonlarının difizyonu gerçekleşmekte ve çimentolaşma oluşmaktadır (James ve diğ., 2008).

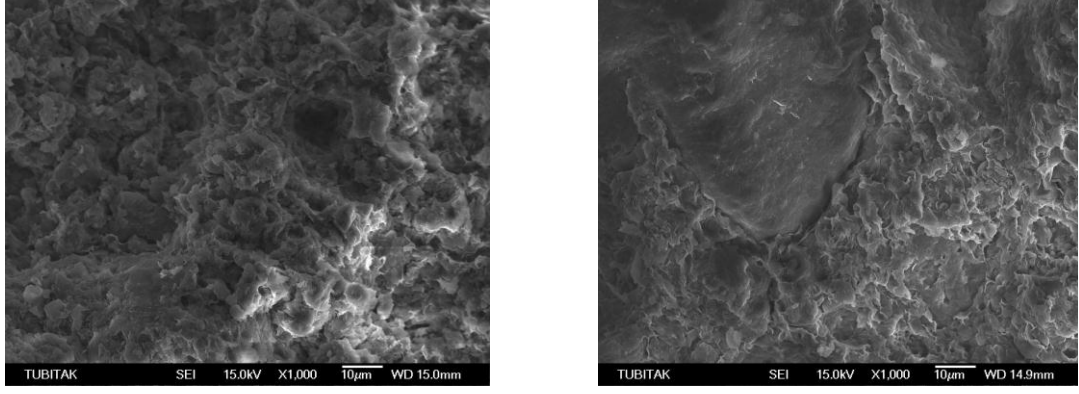


Şekil 4.69: 0L3.33BOSUT ve 0L3.33BOSUS numunelerine ait SEM fotoğrafları

Şekil 4.69 (a) da, % 3.33BOS ve çeşme suyu kullanılarak (b) de aynı karışım ve deniz suyu kullanılarak hazırlanmış uzunçiftlik numunelerine ait SEM fotoğrafları görülmektedir. Şekil 4.70 (a) da, % 3.33BOS ve çeşme suyu kullanılarak, (b) da, aynı karışım ve deniz suyu kullanılarak hazırlanmış bentonit numunelerine ait SEM fotoğrafları görülmektedir.

BOS karışımlarında en dikkat çeken özellik kalsiyum (Ca) miktarlarındaki artıştır. BOS ve uzunçiftlik kili ve çeşme suyu ile hazırlanan numunelerde, sadece % 5 kireç, % 3.33 curuf, deniz suyu ve uzunçiftlik kilinde rastlanan karbon (C) elementi bulunmaktadır ancak miktarı daha azdır. Aynı karışım da az miktarda (Ti) titanyuma

rastlanmıştır. Ti bu karışımın dışında sadece % 5 kireç, % 7.5 BOS, uzunçiftlik ve çeşme suyu ile hazırlanan karışımın karşımıza çıkmaktadır. Titanyum elementinin önemli özelliği sertliğidir.



(a)

(b)

Şekil 4.70: 0L3.33BOSBT ve 0L3.33BOSBS numunelerine ait SEM fotoğrafları

Rajasekaran G. (2005) yılında yayınlanan bir çalışmasında kireç, zemin etkileşimini iki aşamalı olarak değerlendirmiştir: kirecin kısa vadeli ve uzun vadeli etkileri. Kireç, zeminin üzerinde kısa vadede folukasyon, pH değeri, katyon değişim kapasitesi gibi özellikleri ve zeminin kıvam limitleri gibi fiziksel özellikleri etkilemektedir. Uzun vadede ise puzolonik reaksiyonlar sonucunda zeminde mukavemet ve sıkışabilirliği etkileyen yeni oluşumlara sebep olmaktadır. Mevcut kalsiyum ve alimya ile sülfat birleşimlerinin iyonları zeminde erimez yapıda “etrenjit” oluşumuna sebebiyet vermektedir.

Etrenjit ilk olarak 1874 yılında Etringer yanardağının bulunduğu Almanya’da tanımlanmıştır (<http://en.wikipedia.org/wiki/Ettringite>). Oldukça fazla miktarda şişme özelliğine sahip olan etrenjit formasyonu SEM fotoğraflarında iğne şeklindeki görüntüsü ile tanınabilir.

Kireç ve su eklenmiş zeminde 4 hafta içinde etkisini göstermeye başlar (Wild ve diğ., 1998, Reich ve diğ., 2001, Wang ve diğ., 2005, Vahid ve diğ., 2008) Zemin içindeki oluşum süreci şu şekilde tanımlanmıştır. (Ouhadi, V., R., ve diğ., 2008).

$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ (Kirecin hidratasyonu)

$\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2(\text{OH})^-$ (Kalsiyumhidroksitin iyonlaşması; $\text{pH} > 12.3$)

$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} + 2(\text{OH})^- + 10\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\{2\text{Al(OH)}_4^- + 4\text{H}_4\text{SiO}_4\} + n\text{H}_2\text{O}$
($\text{pH} > 10.5$; kil minerallerin ayrışması)

$\text{M}_x\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{XM}^{Y++} + \text{SO}_4^{2-} + n\text{H}_2\text{O}$ (Sülfat minerallerinin ayrışması; $x = 1$; $y = 2$
veya $x = 2$; $y = 1$)

Zeminden veya yeraltı suyundan gelen sülfat + Aluminyum bileşenleri + Kalsiyum bileşenleri \rightarrow Kalsiyum – alimuna sülfat (Etrenjit)

$6\text{Ca}^{2+} + 2\text{Al(OH)}_4^- + 4\text{OH}^- + 3(\text{SO}_4)^{2-} + 26\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$
(Etrenjit formasyonu)

Bu çalışmada kullanılan malzemelerde sülfat bulunmamaktadır. XRD analizlerinde etrenjit formasyonuna rastlanmamıştır ve SEM analizlerinde gül yaprağı şeklinde kaynaşmalar görülmektedir. Wild ve diğ., 1998 yılında yaptıkları bir çalışmada killi bir zemini iyileştirme amacı ile yaptıkları kireç stabilizasyonunda, kireçle birlikte hazırlanan numunelerden bir kısmına % 1 ve % 6 oranında yüksek fırın curufu eklemiştirler. % 6 oranında yüksek fırın curufu ile kirecin birlikte kullanıldığı karışımlarda etrenjit oluşuna rastlanmamıştır.

Betonda etrenjit oluşumu ve bunun önlenmesi amacı ile yapılan çalışmalarda; yüksek fırın curufunun etrenjit oluşumunu engelleyebileceği konusu tartışılmaktadır. (Bijen, 1996; Bakhareva ve diğ., 2002; Chen, 2006). Çelikhane curufu olan BOS'un da etrenjit oluşumunu engellediği düşünülmektedir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN GENEL DEĞERLENDİRMESİ

Deneysel çalışmalarda katkı malzemeleri olarak kullanılan BOS un, kirecin ve deniz suyu kullanılmasının killerin geoteknik özellikleri üzerindeki etkileri aşağıda sunulmaktadır.

Uzunçiftlik kilinin kıvam limitlerine deniz suyunun etkisi, çeşme suyu ile kıyaslandığında benzerlik göstermektedir. Uzunçiftlik kilinin, sadece deniz suyu kullanılarak hazırlanan ve sadece çeşme suyu kullanılarak hazırlanan numunelerden elde edilen kıvam limitleri değerleri hemen hemen aynıdır. Ancak 28 gün sonunda deniz suyu, çeşme suyuna göre plastisite de bir artışa sebep olmaktadır.

CH grubunu temsil eden Bentonit kilinin kıvam limitlerinde; deniz suyu veya çeşme suyu kullanımı, katkısız olarak kullanımda, BOS ile birlikte kullanımda, kireç ile birlikte kullanımda ve katkıların birlikte kullanımında farklı etkiler yaratmaktadır. Katkısız haldeki Bentonit kilinin plastisite indeksi değerlerinde, çeşme suyu veya deniz suyu kullanımının anlık olarak bir farkı yoktur. Ancak deniz suyu, 28 gün sonunda çeşme suyuna göre daha yüksek bir plastisite değeri kazandırmaktadır.

BOS' un Uzunçiftlik kilinin kıvam limitlerine etkisi yok denilecek kadar azdır. BOS, çeşme suyu ile kullanıldığında da deniz suyu ile kullanıldığında da Uzunçiftlik kilinin likit limit değerini ve plastik limit değerini çok az miktarda düşürmekte, plastisite indisini etkilememektedir.

BOS, çeşme suyu ile kullanıldığında CH grubunu temsil eden Bentonit kilinin plastisite indisini arttırmaktadır. Deniz suyu ile kullanıldığında ise anlık olarak bir miktar azaltmakla yaratırken, 28 gün sonunda çeşme suyuna benzer bir etki oluşturarak, plastisitede bir artışa sebep olmaktadır.

BOS ve kirecin birlikte kullanılması halinde Uzunçiftlik kilinin, çeşme suyunda da deniz suyunda da plastisite indisi oldukça azalmaktadır. Karışımında %5 kireç ve %3,33 oranında BOS ile karıştırılarak hazırlanan Uzunçiftlik kili, 28 gün sonunda “non-plastik” bir hale gelmektedir.

CH grubunu temsilen kullanılan Bentonit kilinde, BOS ve kirecin birlikte kullanılması halinde ise çeşme suyunda da deniz suyunda da, likit limit azalmakta, plastik limit artmakta ve plastisite indisi önemli ölçüde azalmaktadır. Bu etki BOS un veya kirecin ayrı ayrı kullanımında yarattığı etkiden farklıdır. Çeşme suyu ile de deniz suyu ile de %5 kireç ve %3,33 BOS ve %5 kireç %7,5 BOS oranında karıştırılan CH grubu killeri, 28 gün sonunda “non-plastik” bir hale gelmektedir. Deniz suyu ile hazırlanan numunelerde %4 kireç, %6 BOS ve Bentonit karışımı da “non-plastik” hale gelmektedir.

pH ölçümlerinden elde edilen verilere göre, CL grubunu temsilen kullanılan Uzunçiftlik kilinde, CH grubunu temsilen kullanılan Bentonit kiline göre daha yüksek bir asidik ortam mevcuttur. Zemin stabilizasyonunda kireç kullanımı ile ilgili standart, pH değerinin 12,4 olduğu karışımı, en uygun karışım olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan kireç ve killere ile yapılan pH ölçümlerinde, Uzunçiftlik kilinde en uygun kireç oranının %5, Bentonit kilinde ise %7,5 olduğu görülmüştür.

Uzunçiftlik kilinin kompaksiyon değerlerinde, deniz suyu kullanılması ile çeşme suyu kullanılması arasında küçük farklılıklar bulunmaktadır. Deniz suyu, Uzunçiftlik kilinin optimum su muhtevasını etkilemezken, en büyük kuru birim hacim ağırlığı değerlerini, çeşme suyuna göre %2 mertebesinde arttırmaktadır. Bentonit kilinde, deniz suyu ile çalışıldığında, çeşme suyuna göre, kompaksiyon eğrisinde daralma, optimum su muhtevasında bir miktar azalma görülmektedir. BOS, Uzunçiftlik kilinde çeşme suyu ile kullanıldığında kompaksiyon değerlerinde önemli bir değişiklik meydana getirmemekte, deniz suyu ile kullanıldığında ise optimum su muhtevasında %2 civarında azalma meydana getirmektedir. BOS, Bentonit kilinde çeşme suyu ile kullanıldığında optimum su muhtevasını %2 oranında azaltmaktadır. Deniz suyu ile kullanıldığında ise optimum su muhtevasında %1 civarında azalma

meydana getirmektedir. Kireç, Uzunçiftlik kilinde, çeşme suyu ile kullanıldığında da deniz suyu ile kullanıldığında da birim hacim ağırlığın düşmesine, optimum su muhtevasının artmasına sebep olmaktadır. Kireç, çeşme suyu ile veya deniz suyu ile kullanıldığında CH grubunu temsil eden Bentonit kilinin optimum su muhtevasını arttırmakta, birim hacim ağırlığın düşmesine sebep olmaktadır. BOS ve kirecin birlikte kullanıldığı Uzunçiftlik kilinde, çeşme suyu ile de deniz suyu ile de optimum su muhtevasında ve kuru birim hacim ağırlığında azalma olmaktadır. Bentonit kilinde, BOS, kireç ve çeşme suyunun birlikte kullanılması durumunda, kilinin optimum su muhtevasını bir miktar arttırmakta; deniz suyu kullanılması durumunda ise optimum su muhtevasında azalmaya sebep olmaktadır.

Çalışmada kullanılan CL grubu killeri temsilen kullanılan Uzunçiftlik kilinin 28 günlük yaş CBR değerleri 6, CH grubu killeri temsilen kullanılan Bentonit kilinin yaş CBR değeri ise 4 olarak tespit edilmiştir. Bu CBR değerleri kullanılan killerin zayıf zeminler olduğuna işaret etmektedir. Uzunçiftlik kilinde çeşme suyu yerine, deniz suyu ile çalışıldığında CBR değeri 6 kat artış göstererek 32 değerine ulaşmaktadır. Bentonit kilinde deniz suyu ile çalışıldığında CBR değeri yaklaşık 2,5 kat artış göstermiş ve 4 den 10 değerine çıkmıştır. Deniz suyu katkı malzemesi gibi bir davranış sergileyerek, killerin CBR değerlerinde artış meydana getirmiştir.

Uzunçiftlik kiline katkı olarak % 3,33 oranında BOS eklendiğinde ve çeşme suyu ile çalışıldığında, Uzunçiftlik kilinin 6 olan CBR değerlerini yaklaşık 4 kat arttırmakta ve 21 değerine yükseltmektedir; deniz suyu ile kullanıldığında ise karışımın CBR değeri 18 olmaktadır. Çeşme suyu, BOS ve kireç karışımları, Uzunçiftlik kilinin CBR değerinde 20 katı aşan artışlar meydana getirmektedir. Özellikle, %5 kireç, %3,33 BOS, Uzunçiftlik, çeşme suyu karışımının yaş CBR değeri 135'e çıkmıştır. Bu değer, yol alt temel ve temel malzemesi olarak kullanıma uygunluk için aranan CBR değerlerinin üzerindedir. BOS ve deniz suyu kullanılan karışımlarda ise CBR değerleri çeşme suyunda olduğu kadar büyük artışlar göstermemekle birlikte 10 kata yakın artış sağlamaktadır. Bentonit kiline katkı olarak % 3,33 oranında BOS eklendiğinde ve çeşme suyu ile çalışıldığında, Bentonit kilinin 4 olan CBR değerlerini 1,5 kat arttırmakta ve 6 değerine yükseltmektedir; deniz suyu ile kullanıldığında ise karışımın CBR değeri yaklaşık 5 kat artarak 21 olmaktadır.

Bentonit kilinde, katkı olarak BOS, kireç ile birlikte kullanıldığında ise daha büyük değer artışlarına aracı olmaktadır. Çeşme suyu, BOS ve kireç karışımları, Bentonit kilinin CBR değerinde yaklaşık 20 kat artış meydana getirmektedir. Özellikle, %7,5 kireç, %5 BOS, Bentonit, çeşme suyu karışımının yaş CBR değeri 77'ye yükselmektedir. Deniz suyu kullanılan Bentonit karışımlarında, en büyük CBR değerini 75 ile, %5 kireç, %3,33 BOS, Bentonit karışımı vermektedir.

Killer altyapı çalışmalarında taşıma gücü açısından zayıf zeminler gurubuna girmektedir. Üzerinde çalışılan gerek CL grubu, gerek CH grubu killer, küçük gerilmeler altında, büyük deformasyon özellikleri göstermektedir. Çeşme suyu ile hazırlanan CL grubunu temsilen kullanılan Uzunçiftlik kilinde 28 gün sonunda serbest basınç mukavemeti 310 kPa'a çıkarken %10 mertebesinde birim deformasyon yapmaktadır. CH grubu killeri temsilen kullanılan Bentonit kilinde de benzer şekilde, 28 gün sonunda 735 kPa bir gerilme altında %10 civarında birim deformasyon yapmıştır.

Uzunçiftlik kilinde, deniz suyu ile çalışıldığında, serbest basınç q_u değeri çeşme suyuna göre yaklaşık 3 kat artış göstermiştir ve 800 kPa değerine çıkmış ve birim deformasyonlarda azalma meydana gelmiştir. CH grubunu temsilen kullanılan Bentonit kilinde de, deniz suyu ile çalışıldığında q_u değeri, çeşme suyuna göre yaklaşık 2 kat artış göstererek 1184 kPa değerine çıkmış ve deformasyonlarda azalma meydana gelmiştir.

BOS, Uzunçiftlik kili, çeşme suyu karışımlarında serbest basınç değeri yaklaşık 3 kat, deniz suyu karışımlarında yaklaşık 8 kat artış göstermiş ve deformasyonlarda azalma meydana gelmiştir. Bentonit kilinde katkı olarak kullanılan BOS, çeşme suyu karışımlarında da deniz suyu karışımlarında da serbest basınç mukavemetlerini 3 kat civarında artırarak 2000 kPa değerlerine yükselmektedir. Kireç ve Bentonit kili ile hazırlanan karışımlarda, çeşme suyu ve deniz suyu kullanılması benzer etki göstermekte ve kilin serbest basınç mukavemetini 5 kat civarında artırarak 3000 kPa değerine ulaştırmaktadır. Aynı zamanda kırılma anında birim deformasyonlarda azalma meydana getirmektedir. Bentonit kilinde deniz suyu kullanılan karışımlardaki q_u artışı biraz daha yüksek değerler almaktadır.

Uzunçiftlik kilinde, kireç, BOS ve çeşme suyu ile hazırlanan karışımlarda da deniz suyu ile hazırlanan karışımlarda da mukavemetlerde 13 katı aşkın artışlar meydana gelmiştir. Özellikle, %5 kireç %3,33 BOS karışımının q_u değerleri 4000 kPa dan daha yüksek mertebelere ulaşmıştır. Birim deformasyon ise %1 seviyelerine düşmüştür. Uzunçiftlik kilinde, q_u değerinin BOS ve kirecin birlikte kullanılması durumunda çok yüksek değerlere ulaşmış olması kadar dikkat çeken bir diğer konu, %5 kireç ve %3,33 BOS karışımının q_u değerinin %5 kireç ve %7,5 BOS karışımından daha yüksek bir değere ulaşmış olmasıdır. Bentonit kilinin serbest basınç mukavemeti, BOS, kireç ve çeşme suyu kullanılan karışımlarla yaklaşık 9 kata kadar artmaktadır. En yüksek mukavemet değeri %5 kireç, %3,33 BOS ve çeşme suyu ile yapılan karışımda 6400 kPa olmuştur.

Karışımlar üzerinde yapılan serbest basınç deneylerinden elde edilen grafiklerden killerin statik elastikiyet modülleri (E_s) hesaplanmıştır. E_s değeri, %5 kireç, %3,33 BOS, çeşme suyu ve Uzunçiftlik kili ile hazırlanan karışımlarda, katkısız olarak hazırlanan Uzunçiftlik kiline ait değerlere göre 33 kat artış göstermiştir. Başka bir deyişle malzeme oldukça rijit bir yapıya sahip olmuş, çok küçük deformasyonlarda çok yüksek statik gerilme taşıyıcı hale dönüşmüştür. Deniz suyu ile hazırlanan Uzunçiftlik karışımlarında ise malzeme daha fazla rijitlik kazanmış ve E_s değeri 44 kat artış göstermiştir. Bentonit kilinin deniz suyu,%7,5 kireç ve %5 BOS ile hazırlan karışımlarında E_s değerlerinde 80 kata yakın bir artış meydana gelmiş ve 791 MPa lık bir değere ulaşmıştır. Bentonit kili, BOS, kireç ve deniz suyu karışımlarında ise gerilme-birim deformasyon grafiği doğrusal bir özellik göstererek tamamen elastik bir davranış sergilemektedir.

Dalga hızlarının (V_p) zeminden geçiş zamanlarına dayanarak yapılan sismik ölçümlerden elde edilen dinamik elastisite modülü (E_d) değerlerinde, kullanılan katkı malzemelerinin büyük artışlara yol açtığı gözlenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen mukavemet verileri ile istatistiksel modelleme yapılmıştır. Killerde; zaman fonksiyonunu da içine alan, ayrı ayrı veya birlikte olacak şekilde, BOS, kireç, çeşme suyu, deniz suyu kullanılması sonucunda, meydana gelmesi tahmin edilen serbest basınç değerini veren istatistiksel bir model

geliştirilmiştir. Bu denklem: “ $q_u = e^{(L * k_{ilf} + L * d_{ayf} + L * S + denf + suf)}$ ” şeklindedir. Denklemin R^2 değeri %85 dir. Yapılan istatistiksel kontrol testleri modelin güvenilirliğini %95 olarak vermiştir.

Killerin, kıvam limitleri, kompaksiyon değerleri, serbest basınç değerleri, CBR değerleri gibi geoteknik özelliklerinin, BOS, kireç ve deniz suyu kullanılması durumunda, farklı oranlarda olmakla birlikte, iyileştiği görülmüştür. Yapılan deneysel çalışmaların yanı sıra daha sonra bu konularda yapılacak çalışmalarda aşağıdaki konuların irdelenmesi ve sonrasında yapılabilecek arazi deneylerinin gerçekleştirilmesi uygun olacaktır.

- Farklı oranlarda karışımlar hazırlanarak, deneylere tabii tutulmasının ve optimizasyon açısından irdelenmesinin,
- Karışımların donma – çözülme dayanımının, ıslanma – kuruma etkilerinin, durabilitatesinin incelenmesinin uygun olacağı düşünülmektedir.
- Bunun yanında karışımlarda; kil su etkileşiminin, matematiksel olarak hem düzlemsel hem küresel varsayımlar için tanımlanmış olan diffuze çift katmanlı tabakalar teorisine göre irdelenmesinin,
- Karışımlardaki katkıların, valans elektronlara etkilerinin, katyon değiştirme teorisine göre irdelenmesinin,
- Katkıların etrenjüt oluşumunun üzerindeki etkilenin farklı açılardan incelenmesi adına sülfat katkısı ile deneylere tabii tutulmasının,
- Katkıların uzun süreli etkilerinin incelenmesinin uygun olacağı düşünülmektedir.

6. SONUÇLAR

Öğütülmüş çelikhane curufu, kireç ve deniz suyunun, killerin iyileştirilmesinde kullanımının araştırıldığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar; mühendislik açısından ulaşılan sonuçlar, çevresel etkiler ve sosyal etkiler şeklinde üç ana başlık altında toplanabilir.

Tez çalışmasının, çevresel etkileri:

- Endüstriyel bir atık olan “Çelikhane Curufunun” (BOS) un, killerin geoteknik özelliklerinde iyileştirme sağladığı, kireç gibi farklı katkı malzemeleri ile etkileşiminin olumlu şekilde olduğu mukavemet deneyleri ile açık olarak anlaşılmaktadır. Küresel ısınmanın ve çevre kirliliğın günden güne daha büyük bir sorun haline geldiği yüzyılımızda, endüstriyel bir atık olan çelikhane cürufu sürdürülebilir şekilde zemin iyileştirme çalışmalarında kullanılabilir hale gelebilecektir.
- Killi zeminlerin iyileştirilmesinde “Deniz Suyu” kullanılmasının mümkün olduğu görülmektedir. Temiz su kaynaklarının hızla tükendiği ve yeni kaynakların yaratılması amacı ile çalışmaların bulunduğu yüzyılımızda, çeşme suyu yerine deniz suyu kullanılması mümkün olabilecektir.
- Killi zeminlerin katkı malzemeleri ile yerinde iyileştirilmesi ile egzoz salınımından, doğal yapının bozulmasına kadar çevreye zarar veren pek çok etmen azalacaktır. Killi zeminlerin bulunduğu inşaat alanlarında, killi zemin kaldırıp yerine daha sağlam yapıda granül zemin konulması günümüzde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, birçok kamyon ve iş makinası sürekli hareket etmekte, atık malzemeler toprak yığınları oluşturmakta, ocakların bulunduğu dağlar sürekli patlayıcılarla ve makinalarla kazılarak doğal yapı bozulmakta, ocakta malzeme hazırlamak için birçok makine ve iş makinesi çalışmakta, egzoz gazı salınımı artmaktadır. Bu şekilde iyileştirme yöntemleriyle problemlerin pek çoğunda azalma olacaktır.

Çalışmanın mühendislik açısından elde edilen sonuçları:

- İstatistiksel olarak; düşük plastisiteli ve yüksek plastisiteli killerde; zaman fonksiyonunu da içine alan, ayrı ayrı veya birlikte olacak şekilde, BOS, kireç, çeşme suyu, deniz suyu kullanılması sonucunda, meydana gelmesi tahmin edilen serbest basınç değerini veren bir denklem elde edilmiştir.
- Kimyasal stabilizasyon amacı ile kullanılan bir katkıının, killerin her bir geoteknik özelliği üzerindeki etkisi farklı olabilecektir. Ayrıca bir katkıının başka bir katkı ile karıştırılarak kullanılması çok daha değişik sonuçlar verebilir. Killi zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde, istenilen iyileştirmenin derecesi önemlidir.
- Kullanılan katkı malzemeleri, belirli bir orana kadar geoteknik özelliklerde olumlu sonuçlar doğururken, belirli bir oranın üzerinde kullanılması durumunda, killerin mühendislik özelliklerini olumsuz olarak da etkileyebilmektedir. Başka bir deyişle katkı malzemelerin kullanımında bir optimizasyonu vardır. Bu sebeple iyileştirme çalışmalarında, arazi uygulamaları öncesinde kapsamlı laboratuvar çalışmalarına ihtiyaç bulunmaktadır.
- Çalışmada BOS ve kirecin birlikte kullanılması durumu için farklı karışım oranları denenmiştir. Denenen karışımlarda en uygun sonuçları veren oranın yaklaşık 1(Curuf):1,5 (Kireç) karışımı olduğu görülmektedir.
- Kireç ve BOS katkılarının birlikte kullanılması, CBR değerleri, kullanılan katkı oranlarına göre değişmekle birlikte 20 kata kadar artışlar meydana getirmekte ve yaş CBR değerlerini %100 ün üzerine çıkmaktadır. %5 kireç ve % 3,33 BOS kullanılarak çeşme suyu ile hazırlanmış düşük plastisiteli kilde yaş CBR değeri %135 olarak bulunmuştur. Bu değer yol alt temel malzemesi olarak kullanılacak malzemelerde istenilen CBR değerinden de yüksektir.
- Kireç ve BOS katkılarının birlikte kullanılması, serbest basınç değerlerinde, kullanılan katkı oranlarına göre değişmekle birlikte 10 kata kadar artışlar, deformasyon özelliklerinde önemli azalmalar meydana getirmektedir. %5 kireç ve %3,33 BOS kullanılarak deniz suyu ile hazırlanmış yüksek plastisiteli kil 28 gün sonunda rijitlik kazanmış ve serbest basınç değeri 6400 kPa gibi çok yüksek bir serbest basınç mukavemeti değerine ulaşmıştır.
- Çalışma sonucunda seçilen katkı oranlarında önemli bir optimizasyon yapılarak çok yüksek mukavemet değerlerine ulaşılmıştır. Bu çalışma sonrasında karışımlarda;

mukavemetin uzun dönemde değişimlerinin incelenmesi, mikro yapı, donma çözüme davranışı, ıslatma kuruma durumları da çalışılmalıdır. Bu çalışmaların gerçek arazi uygulamalarında denenerek kireç stabilizasyonunun yoğun olarak kullanılması yayında yeni katkıları kullanılarak daha verimli zemin iyileştirme çalışmaları yapılabilecektir.

Çalışmanın sosyal açıdan etkileri:

- İnşaat çalışmalarında kolaylık ve rahatlık sağlanacaktır. Genellikle yaygın olarak kullanılan zemini değiştirme yönteminde, petrol fiyatlarının yüksekliği, döküm yeri, daha çok makine kullanılması gibi sebeplerle, yapılan işler çok yüksek bedellere mal olmakta, iş yapan firmalar ile yerel sorumlularla tonaj konularında birçok problemler çıkmakta, ayrıca çalışan kamyonlar yollara, diğer araçlara ve insanlara birçok zararlar verebilmektedir. Killi zeminlerin katkı malzemeleri ile yerinde iyileştirilmesi bu sorunların bir kısmını ortadan kaldıracaktır. Güvenli ve sağlam yolların daha rahat ve kolay yapılabilecek olması tezin sosyal açıdan olumlu bir etkisi olacaktır.
- İnşaat çalışmaları daha hızlı yapılması mümkün olabilecektir. Üç tarafı denizlerle çevrili ülkemizde, deniz suyunun temin edilmesi, doğrudan kullanılabilmesi ve çalışmalara hız kazandırabilmesi söz konusudur. Bu yöntemin iş maliyetine etkisinin de olumlu olacağı düşünülmektedir.
- Katkıların kullanılması ülke ekonomisine katkıda bulunacaktır. Çünkü çalışmada kullanılan BOS toz halindedir. BOS fabrika çıkışında ise kum boyutunda bulunmaktadır. Dolayısı ile boyutunun küçültülmesi (öğütülmesi), paketlenmesi, ambalajlanması ve kullanılacağı çalışma bölgesine taşınması gerekmektedir. Tüm bunlar, pek çok insan için yeni bir istihdam olanağı sağlayacak ve ülke ekonomisine katkıda bulunacaktır.

KAYNAKLAR

AASHTO, T-27, “Sieve analysis of fine and coarse, aggregates”, *American Association of State Highway and Transportation*, (2001).

AASHTO T-180, “Standard method of test for moisture-density relations of soils using”, *American Association Of State Highway And Transportation Officials*, (2010).

Acar, A., Dincer, I., Necdet, M. “Geotechnical characteristics of the clayey soils and rocks of the North Lefkosa, Nicosia, Cyprus”, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66, 473–481, (2007).

Acar, M., C., “Kayseri Çinko-kurşun üretimi tesisi (Çinkur A.Ş) atıklarının zemin stabilizasyonunda kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri*, 59-63, (1998).

Ahnberg, H. “Effects of back pressure and strain rate used in triaxial testing of stabilized organic soils and clays”, *Geotechnical Testing Journal*, 27, (3), (2004).

Ahnberg, H., Johansson, S. E., Pihl, H., Carlsson, T. “Stabilising effects of different binders in some Swedish soils”, *Ground Improvement*, 7, (1), 9–23, (2003).

Ahmaruzzaman, M., “A review on the utilization of fly ash”, *Progress in Energy and Combustion Science*, 1–37, (2010).

Aiban, S., A., “Utilization of steel slag aggregate for road bases”, *Journal of Testing and Evaluation*, 34, (1), (2006).

Akbulut, S., Arasan, S., Kalkan, E., “ Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers”, *Applied Clay Science*, 38, 23-32, (2007).

Akili, D., Khawaji, Ibrahim, K., Kutubkhanah, Jong-Mihn W., “Advances in seawater desalination technologies”, *European Desalination Society and Center for Research and Technology Hellas (CERTH)*, 221, 47–69, (2008).

Aktubinsk, F., P., 2002, Improving Soil Waste Management at Aktubinsk Ferroalloys Plant [online], Eco Links Project Contribution, http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADA667.pdf (Ziyaret Tarihi: 26 Mayıs 2010).

Aksoy, H., S., “Normal Konsolide Zeminlerin Tek Eksenli Kayma Dayanımlarının İstatistiksel Yaklaşımla Belirlenmesi”, *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 20 (3), 509-515, (2008).

Akyarlı, A., Kavak, A., Atay, S., Alkaya, S., 2009, Killi zeminlerin kireç ile iyileştirilmesi, (online), TSE Dergisi, http://www.kimtas.com/dosyalar/basinda_ozture/yazili/TSE%20Standard%20Dergisi%20Temmuz%202009%20Kirec%20Stabilizasyonu.pdf, (**Ziyaret Tarihi: 8 Mayıs 2010**).

Alkaya, D., “Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının İncelenmesi”, *Electronic Journal of Construction Technologies*, 5, (1), 61-72, (2009).

Al-Rawas, A., Taha R., Nelson, J.D., Al-Shab, T. B., Al-Siyabi, H., “A comparative evaluation of various additives used in the stabilization of expansive soils”, *Astm Geotechnical Testing Journal*, 25 (2), 199-209, (2002).

Amu, O. O., Adewumi, I. K., Ayodele, A. L., Mustapha, R. A., “Analysis of California bearing ratio values of lime and wood ash stabilized lateritic soil”, *Journal Of Applied Sciences*, 5, (8), 147-1483, (2005).

Andrejkovičová, S., Janotka, I., Komadel, P., “Evaluation of geotechnical properties of bentonite from Lieskovec deposit, Slovakia”, *Applied Clay Science*, 38, 297–303, (2008).

Arasan, S., Yetimoğlu, T., “Effect of inorganic salt solutions on the consistency limits of two clays”, *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, 32, 107 – 115, (2008).

Arslan, M., Abdioğlu, E., Kadir, S., “Mineralogy, Geochemistry, and Origin of Bentonite in Upper Cretaceous Pyroclastic Units of The Tirebolu Area, Giresun, Northeast Turkey”, *Clays And Clay Minerals*, 58(1), 120-141, (2010).

ASTM C 1529 – 06a, “Standard Specification for Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone for Environmental Uses”, *American Test Methods Standards*, (2010).

ASTM C 25, “Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime”, *American Test Methods Standards*, (2006)

ASTM C 977 – 03, “Standard Specification for Quicklime and Hydrated Lime for Soil Stabilization”, *American Test Methods Standards*, (2003).

ASTM C136-06, “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates”, *American Test Methods Standards*, (2006).

ASTM C51-07, “Standard Terminology Relating to Lime and Limestone (as used by the Industry)”, *American Test Methods Standards*, (2007).

ASTM C593-06, “Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime for Soil Stabilization”, *American Test Methods Standards*, (2006).

ASTM C977-03, “Standard Specification for Quicklime and Hydrated Lime for Soil Stabilization”, *American Test Methods Standards*, (2009).

ASTM D 2166-06, “Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil”, *American Test Methods Standards*, (2006).

ASTM D 2845 – 00, “Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock1”, *American Test Methods Standards*, (2000).

ASTM D 2974–07, “Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils”, *American Test Methods Standards*, (2007).

ASTM D 3282-09, “Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes”, *American Test Methods Standard*, (2009).

ASTM D 4318–05, “Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils”, *American Test Methods Standards*, (2010).

ASTM D 4609–01 “Standard Guide for Evaluating Effectiveness of Admixtures for Soil Stabilization”, *American Test Methods Standards*, (2001).

ASTM D 4609–08, “Standard Guide for Evaluating Effectiveness of Admixtures for Soil Stabilization”, *American Test Methods Standards*, (2010).

ASTM D 4609–86 “Standard Guide for Screening Chemicals for Soil Stabilization”, *American Test Methods Standards*, (1986).

ASTM D 5102–04, “Standard Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures”, *American Test Methods Standards* (2004).

ASTM D1557-09, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Modified Effort”, *American Test Methods Standards*, (2009).

ASTM D1883-07, “Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils”, *American Test Methods Standards*, (2006).

ASTM D2166-06, “Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil”, *American Test Methods Standards*, (2006).

ASTM D3551-08, “Standard Practice for Laboratory Preparation of Soil-Lime Mixtures Using Mechanical Mixer”, *American Test Methods Standards*, (2008).

ASTM D3877-08, “Standard Test Methods for One-Dimensional Expansion, Shrinkage, and Uplift Pressure of Soil-Lime Mixtures”, *American Test Methods Standards*, (2008).

ASTM D5102-09, “Standard Test Methods for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures”, *American Test Methods Standards*, (2009).

ASTM D5202-08, “Standard Test Method for Determining Triaxial Compression Creep Strength of Chemical Grouted Soils”, *American Test Methods Standards*, (2008).

ASTM D698-07 E1, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort”, *American Test Methods Standards*, (2009).

ASTM D854-10, “Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer”, *American Test Methods Standards*, (2010).

ASTM E1266-88, “Standard Practice for Processing Mixtures of Lime, Fly Ash, and Heavy Metal Wastes in Structural Fills and Other Construction Applications”, *American Test Methods Standards*, (2005).

Atanur, A., “Yol Yapımında Yüksek Fırın Curufu”, 8-12, *Karayolları Genel Müdürlüğü*, (1983).

Aydın, H., “İstatistik ders notları”, (maden.karaelmas.edu.tr/hocalar/hamitaydin/Sunu_7ci_hafta.pdf), (**Ziyaret Tarihi: 6 Mayıs 2011**).

Aytekin, M., “Deneysel Zemin Mekaniği”, 30- 60, *Teknik Yayınevi*, (2004).

Azam, S. “Influence of mineralogy on swelling and consolidation of soils in eastern Saudi Arabia”, *Canadian Geotechnical Journal*, 40, (5), 964-675 (2003).

Bakhareva, T., Sanjayan, J., G., Cheng, Y., B., “Sulfate attack on alkali-activated slag concrete” *Cement and Concrete Research* 32 (2), 211-216, (2002).

Baoying, N., Yuanqing, H. “Tourism development and water pollution: Case study in lijiang ancient town”, *China Population, Resources and Environment*, 17, (5), 123–127, (2007).

Bardou, E., Boivin P., Pfeifer H-R. “Properties of debris flow deposits and source materials compared: implications for debris flow characterization”, *Sedimentology*, 54, 469–480, (2007).

Bardet, J. P., “Experimental Soil Mechanics”, *Prentice-Hall, Inc., New Jersey, A.*, (1997).

Bella, F., G., “Lime stabilization of clay minerals and soils”, *Engineering Geology*, 42, (4), 223-237, (1996).

Bijen, J., “Benefits of slag and fly ash”, *Construction and Building Materials*, 10 (5), 309-314, (1996).

Bilgen, G. ve Çapar, Ö., F., “Devrek Kilinin Yüksek Fırın Cürufu Ve Kireç Kullanılarak Yol Alt Dolgusu Olarak Kullanımının Araştırılması”, *Mersin Ulusal Çevre Sempozyumu*, (2007).

Bilgen, G. and Kavak A., “Effects of seawater on geotechnical properties of a clay soil”, *Fresenius Environmental Bulletin*, 19 (8a), 1623-1628, (2010).

Bilgen, G., “Yüksek fırın cürufu ve kireçle zemin stabilizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmit, 5-27, (2004).

Binod Tiwari, A., M., Tuladhar G., R., Marui., H., “Variation in residual shear strength of the soil with the salinity of pore fluid”, *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 12, 1445–1456, (2005).

Bond, A., and Harris, A., “Decoding Eurocode 7 Bond”, *Taylor & Francis Group*, 500- 563, (2008).

Brown, S. F., “Soil mechanics in pavement engineering”, *Geotechnique*, 46(3), 383-426, (1996).

Bucksch, H., “Dictionary geotechnical engineering: English German”, *Sringer*, 58, (1997).

Capar, O., F., Kavak, A., Bilgen, G., “Stabilization of Clay Soils with Lime and Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS)”, *The 24th International Conference on Solid Waste Technology and Management*, Philadelphia, 15-18 Mart, U.S.A., (2009).

Chaurand, P., Rose, J., Domas, J., Bottero, J. Y., “Speciation of Cr and V within bof steel slag reused in road constructions”, *Journal of Geochemical Exploration*, 88, (1), 10-14, (2006).

Chen, W., “HYDRATION OF SLAG CEMENT: Theory, Modeling And Application”, *University of twente*, 159-184, (2006).

Choudhary, A., K., Jha, J., N., Gill, K., S., “Laboratory investigation of bearing capacity behavior of strip footing on reinforced fly ash slope”, *Geotextiles and Geomembranes*, 28, (4), 393-402, (2010).

Chun, B., S, Kim J., C., “A Study on the optimal mixture ratio for stabilization of surface layer on ultra-soft marine clay”, *Geotechnical Special Publication - Proceedings of the Third International Conference: Grouting and Ground Treatment, ASCE*, 2, 1314-1325, (2003).

Cioffi, R., Maffucci, L., Santoro, L., Glaser, F., P. “Stabilization of chloro-organics using organophilic bentonite in a cement-blast furnace slag matrix”, *Waste Management*, 2, (1), 651-660, (2001).

- Craig, R., F., “Craig’s Soil Mechanics, Seventh edition”, *Spon Press*, 137-138, (2004)
- Coduto, D., P., “Temel Tasarımı”, Çeviri, Mahmutoğlu M., Kayabalı K., *Gazi Kitapevi*, 125-130, (2005).
- Coduto, D., P., “Geoteknik Mühendisliği İlkeler ve Uygulamalar”, Çeviri, Mahmutoğlu M., Kayabalı K., *Gazi Kitapevi*, 125-130, (2006).
- Çekmen, V., “Kayma direnç parametrelerinin sismik hızlar ile belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2009)
- Das, B., M., “Principles of Foundation Engineering”, *Thomson Brooks/ Cole*, 664-712, (2004).
- Das, B., M., “Advanced Soil Mechanics, Third edition”, *Taylor & Francis Group*, 48 -50, (2008).
- Demiröz, A., Karaduman, M., “Zemin iyileştirme metotları”, *Journal of Technical-Online*, 8 (3), 176-192, (2009).
- Demir, S., Kılıç, M., “Şişen zeminlerin tanımlanması ve zemin iyileştirme yöntemleri”, 27, (1), 95-104, *Ziraat Fakültesi Dergisi*, (2010).
- Deslouis, C., Falaras, P., Gil, O., Jeannin, M., Maillot, V., Tribollet, B., “Influence of clay on calcareous deposit in natural and artificial sea water”, *Electrochemical Acta*, 51, 3173–3180, (2006).
- DIN EN 14227-2, “Hydraulically bound mixtures, Specifications Part 2: Slag bound mixtures”, *Deutsches Institut für Normung*, (2004).
- Dolar, B., Trauner, L. “Liquid limit and specific surface of clay particles” *Geotechnical Testing Journal*, 27, (6), 580–584, (2004).
- Dontsova, K. M., Norton, L. D., Johnston, C., T., Bigham J. M. “Influence of exchangeable cations on water adsorption by soil clays”, *Soil Science Society of America Journal*, 68, (4), 1218, (2004).
- Dowda, B. M., Press, D., Huertos, M. L. “Agricultural nonpoint source water pollution policy: The case of California’s Central Coast”, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 128, 151–161, (2008).
- Edil, T., B., “A review of mechanical and chemical properties of shredded tires and soil mixtures”, *Geotechnical Special Publications*, 127, 1-21, (2004).
- Elarbash, M., M., “New sea water intake filtration system”, *Desalination*, 82, 281-301, (1991).

Elektrik İşleri Etüt İdaresi, “Mühendislik Jeofiziğinde Zemin Araştırmaları ve Zemin Dinamik Parametrelerinin Hesaplanması”, www.eie.gov.tr/turkce/YEK/HES/jeoloji/jeo.../63_jeofizik.doc, (Ziyaret Tarihi, 20 Haziran 2011).

Elhassadi A., “Pollution of water resources from industrial effluents: a case study - Benghazi, Libya”, *Desalination*, 222, 286-293, (2008).

Elmasdere, E., “Isparta mavikent yerleşim bölgesinin sismik mikrobölgelemesi ve değerlendirilmesi”, Yüksek lisans tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2008).

Emery, J., J., Kim, C., S., Cotsworth, R., P., “Base Stabilization using pelletized blast furnace slag”, *Journal of Testing and Evaluation*, 4, (1), 94-100, (1976).

Er, F., Sönmez H., “Temel istatistik eğitiminde R for windows paket programı kullanımı”, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, C. XVIII, 2, (2005).

Erdemir, AR-GE Raporu, “Çelik üretim curuflarının asfalt üretiminde kullanılması”, *Ereğli Demir Çelik Fabrikası*, (2005).

Eren, S., Filiz M. “Comparing the conventional soil stabilization methods to the consolid system used as an alternative admixture matter in Isparta Darıdere material”, *Construction and Building Materials*, 23, 2473–2480, (2009).

Forumfizik, “Elektron Kırınımı”, www.fizik.itu.edu.tr/mfl/mfl_foy/04Elktkirinimi.doc, (Ziyaret Tarihi: 6 Mayıs 2011).

Ghadiri, H., Dordipour, I., Bybordi, M., Malakouti, M., J., “Potential use of Caspian Sea water for supplementary irrigation in Northern Iran”, *Agricultural Water Management*, 79, 209–224, (2006).

Grasso V. F., Singh, A., “Global Environmental Alert Service (GEAS)”, *Advances in Space Research*, 41, 1836-1852, (2008).

Hasçakır., B., Dölgen, D., “Kil Minerallerinin Atık Su Arıtımında Kullanılabilirliği: Kaolinit ile Organik Madde Giderimi”, *Çevre Koruma Ekoloji Bilgi Dergisi*, 17, (66), 47-54, (2008).

Hau, K., W., McDowell, G., R., “Evaluating permissible subgrade rut depth in pavement design”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 158, 45-56 (2005).

High, D., W., Stevens, M., G., H., “An analysis of the California bearing ratio test in saturated clays”, *Geotechnique*, 32, (4), 315-322, (1982).

Holtz, R., D., and Kovacs W., D., “Geoteknik Mühendisliğine Giriş”, Çeviri, Kayabalı K., *Gazi Kitapevi*, 5-7, (1981).

Hossain, K., M., A., “Development of stabilized soils for construction applications”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 163, (G13), 173-185, (2010).

Hurt, R., “Geotechnical Engineering Investigation Handbook, Second Edition”, *Taylor & Francis Group*, 220-223, (2005).

Imtiaz, A., “Use of Waste Materials In Highway Construction”, *Noyes Data Corporation*, 3-7, (1993).

Johnson, A., W., Sallberg, J., R., “Factor that influence field compaction of soils”, *D. Brunsten and B. Prior, Eds., John Willey, New York*, (1960).

James., R., Kamruzzaman, A., H., M., Haque., A. Wilkinson A., “Behavior of lime–slag-treated clay”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 161 (G14), 207-216, (2008).

Kara, S., “X-Işınları ve Bragg Kırınımı”, skara.trakya.edu.tr/X-ışınları%20Bragg%20Compton. ppt, (**Ziyaret Tarihi: 28 Nisan 2011**).

Kavak, A., Akyarlı, A., “A field application for lime stabilization”, *Environmental Geology*, 51, (6), 987-997, (2007).

Kavak, A., Bilgen, G., Çapar Ö., F., “Using ground granulated blast furnace slag (GGBFS) with seawater as soil additives in lime-clay stabilization” *International Symposium on Testing and Specification of Recycled Materials for Sustainable Geotechnical Construction*, 2-4 Şubat, Baltimore, USA, (2011).

Kavak, A., Capar, Ö., F., Bilgen, G., “Problemlı bir kilin kireç ve yüksek fırın curufu katkısı ile iyileştirilerek yol dolgularında kullanılması”, *14. Ulusal Kil Sempozyumu*, 1-3 Ekim, Trabzon, (2009).

Kavak, A., Farrell, E., Doğan, U., Özişik, I., Bilgen, G., Mutman, U., “Yol alt yapısında polimer katkısı ile zemin stabilizasyonu” *Geoteknik Sempozyumu*, 3-4 Aralık, Adana, (2009).

Kavlak, Y., “Isparta gelincik pomzasının karayolu esnek üstyapıları taban zemini stabilizasyonunda kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta*, 9-12, (2008).

Khawaji, A., D., Kutubkhanah, K., I., Wie, J., M., “Advances in seawater desalination Technologies”, *Desalination*, 221, 47–69, (2008).

Kızılcılık, M., M., “Yüksek plastisiteli bir kilin kireç ile stabilizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2010).

Kirwan, R., W., Snaith M., S., “A simple chart for the prediction of resilient modulus”, *Geotechnique*, 16, (2), 162-171, (1976).

- Larsson, S., Rothhämel, M., Jacks, G., “A laboratory study on strength loss in kaolin surrounding lime–cement columns”, *Applied Clay Science*, 44, 116-126, (2009).
- Malvern, I., “Diffraction Reference, MAN 0073 and Instrument Manuel, MAN 0054”, *Malvern Instruments Ltd*, (1993).
- Maio, C., D., Santoli, L., Schiavone, P. “Volume change behavior of clays: The influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state”, *Mechanics of Materials*, 36, (5), 435–451, (2004).
- Malviya, R., Chaudhary, R. “Factors affecting hazardous waste solidification / stabilization: A review”, *Journal of Hazardous Materials*, 137, 267–276, (2006).
- Markwick, A., H., D., “The basic principles of soil compaction and their application.” *The Institution of Civil Engineers*, 40-42, (1944).
- Martínez, J., Benavente, D., Cura, M., “Comparison of static and dynamic elastic modulus in fractured building rocks” *International Geological Congress*, (2008).
- Misra, A., Upadhyaya, S., Horn, C., Kondagari, S., Gustin, F., “CBR and DCP correlation for class c fly ash-stabilized soil”, *Geotechnical Testing Journal*, 29, (1), (2010).
- Modmoltin, C., Voottipruex, P., “Influence of salts on strength of cement-treated clays”, Proceedings *of the Institution of Civil Engineers*, 162, (G11), 15-26, (2009).
- Moseley, M., P., and Kirsch, K., “Ground Improvement Second edition”, *Spon Press*, 252-331, (2004).
- Mukherjee A., B., Zevenhoven, R., Bhattacharya, P., Sajwan, K., S., "Mercury flow via coal and coal utilization by-products: A global perspective" *Kikuchi Res. Conserv. & Recycl.*, 52, 571–591, (2008).
- Mutman, U., “Düşük basınçlı çimento enjeksiyonu ile zemin özelliklerinin iyileştirilmesi”, *Doktora Tezi, Kocaeli Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli*, 2-4, (2007).
- Nordell., B., “Thermal pollution causes global warming”, *Global and Planetary Change*, 38, 305-312, (2003).
- Ouhadi, V., R., Yong, R., N., “Ettringite formation and behaviour in clayey soils”, *Applied Clay Science*, 42, 258-265, (2008).
- Ouhadia, V., R., Yong, R., N., “The role of clay fractions of marly soils on their post stabilization failure”, *Engineering Geology*, 70, 365–375, (2003).
- Özbek, H., Keskin, S., “Standart sapma mı yoksa standart hata mı?”, *Van Tıp Dergisi*, 14, (2), 64-67, (2007).

Özer, M., Orhan, M., Işık N., “Effect of particle optical properties on size distribution of soils obtained by laser diffraction”, *Environmental & Engineering Geoscience*, 16, (2), 163-17, (2010).

Özer, M., Orhan, M., “Lazer kırınım yöntemiyle zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi: genel ilkeler ve örnek hazırlama yöntemi”, *Gazi Üniversitesi. Mühendislik, Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22, (2), 217-226, (2007).

Rajasekaran, G., “Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays”, *Ocean Engineering*, 32, 1133–1159, (2005).

Ramesh, H., N., Mohan, M., S., Sivapullaiah, P., V., “Improvement of strength of fly ash with lime and sodium salts” *Ground Improvement*, 3, 163-167, (1999).

Rao, S., M., Shivananda, P., “Role of osmotic suction in swelling of saltamended clays” *Canadian Geotechnical Journal*, 42, 307–315, (2005).

Rao, S., M., Thyagaraj, T., “Swell–compression behavior of compacted clays under chemical gradients”, *Canadian Geotechnical Journal*, 44, 520–532, (2007).

Resmi Gazete, “Karayolu Yolboyu Mühendislik Yapıları İçin Afet Yönetmeliği”, <http://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.10837&sourceXmlSearch=&MevzuatIliski=0#>, (**Ziyaret Tarihi, 20 Haziran 2011**).

Rex, R., W., Mart, B., D., “Clay mineral formation in sea water by submarine weathering of k-feldspar”, *Clays and Clay Minerals*, 249, 95-104, (1965).

Robinson, R., Thagesen B., “Road Engineering for Development Second Edition”, *Spon Press*, 193 – 284, (2004).

Rogers, C., D., F., Glendinning, S., Roff, T., E., J., “Modification of Clay Soils for Construction Expediency”, *Geotechnical engineering, proceedings of the institution of civil engineers*, 125, (4), 242-249, (1997).

Russell, J., S., “Perspectives in Civil Engineering: Commemorating the 150th Anniversary of the American Society of Civil Engineers”, *American Society of Civil Engineers*, 306-310, (2003).

Sakr, A., M., Shahin, M., A., Metwally, Y., “Utilization of Lime for Stabilizing Soft Clay Soil of High Organic Content”, *Geotechnical and Geological Engineering*, 27, (1), 105-113, (2009).

Saride, S., Puppala A., J., Williammee R., “Assessing recycled/secondary materials as pavement bases”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement*, 163, 3-12, (2010).

Sariosseiri, F., Muhunthan, B, “Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils”, *Engineering Geology*, 104, 119-125 (2009).

Sawanguriya, A., Edil, T., B., “Evaluating stiffness and strength of pavement materials”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 158, 217-230, (2005).

Schroeder, R., L., “The Use of Recycled Materials in Highway Construction”, *U.S.A, Department of Transportation Federal highway Administration: Washington*, (1984).

Setién., J., Hernández, D., González, J., J., “Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material”, *Construction and Building Materials*, 23, 1788–1794, (2009).

Sert, H. “Mostar Köprüsü”, *İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara Subesi*, (2009).

Seyhan, I., “Kaolin, Bentonit, Kil ve Tuğla-Kiremit Toprakları Jeolojisi”, *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü*, 52, (1972).

Shridharan, A., Nagaraj, H., B., “Hydraulic conductivity of remolded fine-grained soils versus index properties”, *Geotechnical and Geological Engineering*, 23, 43–60, (2005).

Sivapullaiah, P., V., Manju “Lime treatment to control alkali induced heave in soils”, *Ground Improvement*, 10, (1), 31–37, (2006).

Sing, W., L., Hashim, R., Ali, F. H., “A review on experimental investigations of peat stabilization”, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3,(4), 3537-3552, (2009).

Sing, W., L., Hashim, R., Ali, F. H., “Behavior of stabilized peat soils in unconfined compression tests”, *American J. of Engineering and Applied Sciences*, 1 (4), 274-279, (2008).

Sing, W., L., Hashim, R., Ali, F. H., “Engineering behaviour of stabilized peat soil”, *European Journal of Scientific Research*, 21, (4), 581-591, (2008).

Sivapullaiah, P., V., Sridharan, A., Bhaskar Raju, K., V., “Role of amount and type of clay in the lime stabilization of soils”, *Ground Improvement*, 4, 37- 45, (2000).

Sivapullaiah., P., V., Sridharan, A., Bhaskar, R., K., V., “Role of amount and type of clay in the lime stabilization of soils”, *Ground I provement*, 4, 37-45, (2000).

Sivrikaya, O., Ölmez, A., “Zeminlerin kompaksiyon parametreleri ile indeks özellikleri arasındaki ilişkiler”, www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/1505.pdf, (**Ziyaret Tarihi: 6 Nisan 2011**).

Skempton, A., W., Northey, R., D., “The Sensitivity of clays”, *Geotechnique*, 3, (1), 30-53, (1953).

Song, Y. S., Yun, J., M., Hong, W., P., Kim, T., H., “Investigation of solid waste soil as road construction material”, *Environmental Geology*, 44, 203–209, (2003).

Sridharan, A., Nagaraj H. B. “Plastic limit and compaction characteristics of fine grained soils” *Ground Improvement*, 9, (1), 17–22, (2005).

Steekiwicz, R., Adamska, K., Z., “Application of power industry wastes in road embankments”, *Fuel and Energy Abstracts*, 36, (4), 294, (1997).

Süt, İ., “Kohezyonlu Zeminlerin Kireçle İyileştirilmesinin Cbr Değeri Üzerindeki Etkisinin İrdelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2006).

Şahinler, S., “En küçük kareler yöntemi ile doğrusal regresyon modeli oluşturmanın temel prensipleri”, *M.K.Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi*, 5, (1-2), 57-73, (2000).

Tam, V., W., Y., Tam, C., M., “A review on the viable technology for construction waste recycling” *Resources, Conservation and Recycling*, 47, 209–221, (2006).

T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü “Kireç stabilizasyonu ve çeşitli zayıf zemin stabilizatörleri teknik şartnameleri” (<http://www.nuhyapi.com.tr/media/pdf/KirecTeknikSartname.pdf>) (**Ziyaret Tarihi: 8 Mayıs 2010**).

TEAK, “X Işın Kırınımı Nedir”, <http://www.taek.gov.tr/component/content/article/130-malzeme-teknolojisi/482-xrd-nedir-x-isini-kirinimi-nedir.html>, (**Ziyaret Tarihi: 26 Nisan 2011**).

Terrel, R., L., Epps, J., A., Barenberg E., J., Mitchell, J., K., Thompson, M., R., “Soil Stabilization in Pavement Structures A User’s Manual Volume 1: Pavement Design and Construction Considerations”, *Reprint by permission of FHWA*, 11-12, (1984a).

Terrel, R., L., Epps, J., A., Barenberg E., J., Mitchell, J., K., Thompson, M., R., “Soil Stabilization in Pavement Structures a User’s Manual Volume 2: Mixture Design Considerations”, *Reprint by permission of FHWA*, 11-12, (1984b).

Topçu, İ., B., Uğurlu, A., “Betonda Elastisite Kuramı ve Baraj Betonları için Statik E-Modülünün Kompozit Modellerle Tahmini”, *İMO Teknik Dergi*, 4055-4067, (2007).

TS EN 13286-43, “Bağlayıcısız Ve Hidrolik Bağlayıcılı Karışımlar - Bölüm 43: Deney Metodu - Hidrolik Bağlayıcılı Karışımların Elâstiklik Modülünün Tayini”, *Türk Standardları Enstitüsü*, (2004).

Tsutsumi, T., Tanaka, Y., Tanaka, T., “Initial Stage Hardening Characteristics of Marine Clay Improved Cement”, *Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and Laboratory Studies*, 220-229, (1988).

Tunç, E., “Yol Mühendisliğinde Geoteknik Ve Uygulamaları”, *Atlas Yayınevi*, 1-240, (2002).

Ulla-Maija, M., Wahlström, M., “By-Products and recycled materials in earth construction in Finland”, *Resources Conservation and Recycling*, 35, (1-2), 117-129, (2002).

Ünver, M., “Elektron Mikroskobu”, <http://www.elektrotekno.com/about16948.html>. (Ziyaret Tarihi: 6 Mayıs 2011).

Vasudev, D., Puppala, A., J., Sirivitmaitrie, C., “Field Studies on Rigid Pavement Sections Built on Stabilized Sulfate Soils”, *ASCE Geotechnical Special Publication*, 169, Geo-Denver, Colorado, (2007).

Veith, G., “Essay competition: Green, ground and great: soil stabilization with slag”, *Building Research & Information*, 28, (1), 70-72, (2000).

White, I., L., “Soil plasticity and strength—a new approach using extrusion”, *Ground Engineering*, 15 (1), 16-24, (1982).

Wild S., Kinuthia J., M., Jones G., I., Higgins D., D., “Effects of partial substitution of lime ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime stabilized sulphate-bearing clay soils”, *Engineering Geology*, 51, (1), 37-53, (1998).

Wild, S., Abdi, M., R., Ward, G., “Sulphate expansion of lime-stabilized kaolinite, part II, reaction products and expansion”, *Clay Miner*, 28, 569–583, (1993).

Wild, S., Sabir, B., B., Khatib, J., M., Factors influencing development of concrete containing silica fume.” *Cement Concrete Res*, 25, 1567–1580, (1995).

Wild, S., Kinuthia, J., M., Robinson, R., B., Humphreys, I., “Effects of ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength and swelling properties of lime stabilised kaolinite in the presence of sulphates”, *Clay Miner*, 31, 423–433, (1996).

Wild, S., Kinuthia, J., M., Jones, G., I., Higgins, D., D., “Suppression of swelling associated with ettringite formation in lime stabilized bearing clay soils by partial substitution of lime with ground granulated blastfurnace slag.” *Engineering Geology*, 51, 257–277, (1999).

Wilkinson, A., Haque, A., Kodikara, J., “Stabilization of clayey soils with industrial by-products: part B” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 163, (GI3), 165-172, (2010).

Winnefeld, F., Leemann, A., Lucuk, M., Svoboda, P., Neuroth M. “Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials”, *Construction and Building Materials*, 24, (6), 1086-1093, (2010).

Wroth, C., P., Wood, D., M., “The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, 15, (2), 137- 44, (1978).

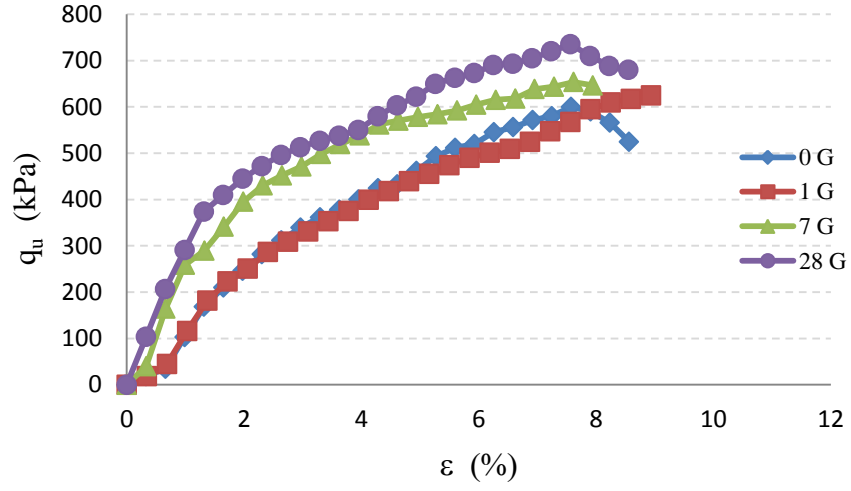
Yılmaz, I., Civelekoğlu, B., “Gypsum: An additive for stabilization of swelling clay soils”, *Applied Clay Science*, 44, 166-172, (2009).

Yiğiter, N., “Isparta Çünür Bölgesi’nde yüzey dalgasi yöntemiİle zemin özelliklerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2008).

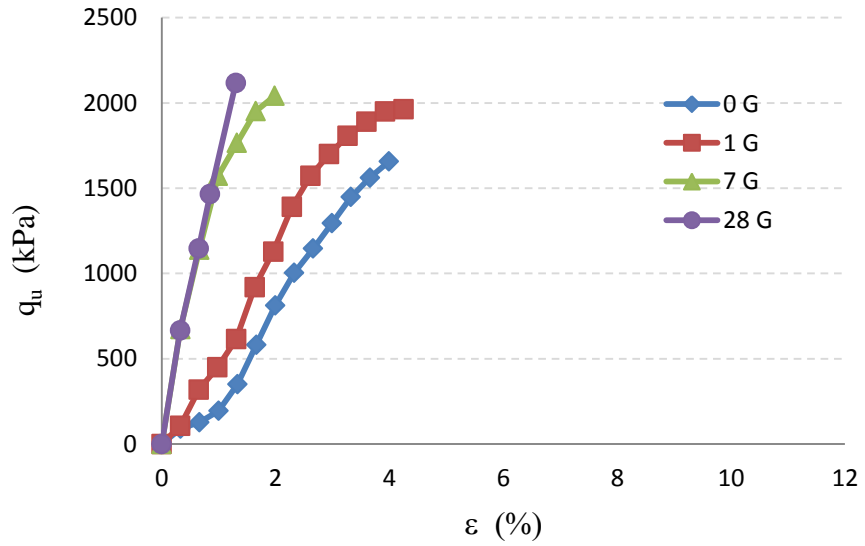
Yükselen, Y., A., Kaya, A. and Ören, A. H., “Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays”, *Engineering Geology*, 102, 54-61, (2008).

EKLER

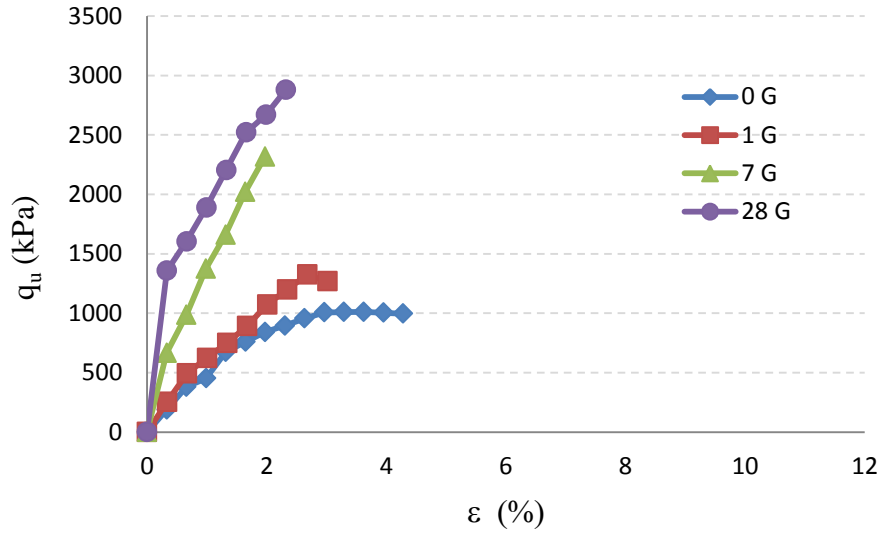
EK-A



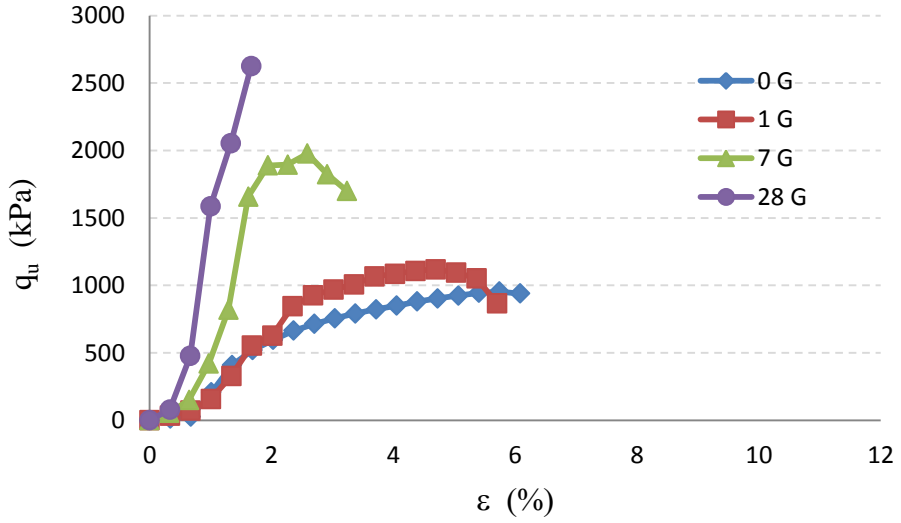
Şekil A.1: 0L0BOSBT numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



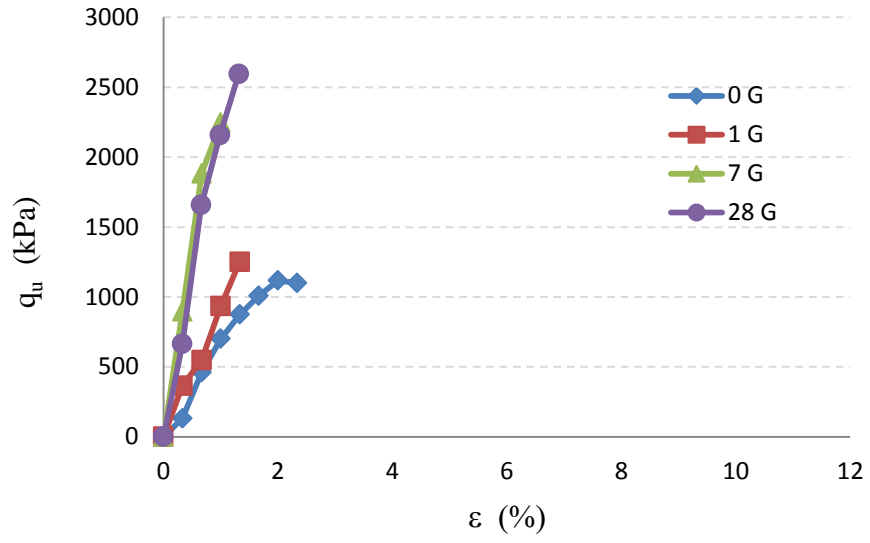
Şekil A.2: 0L3,33BOSBT numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



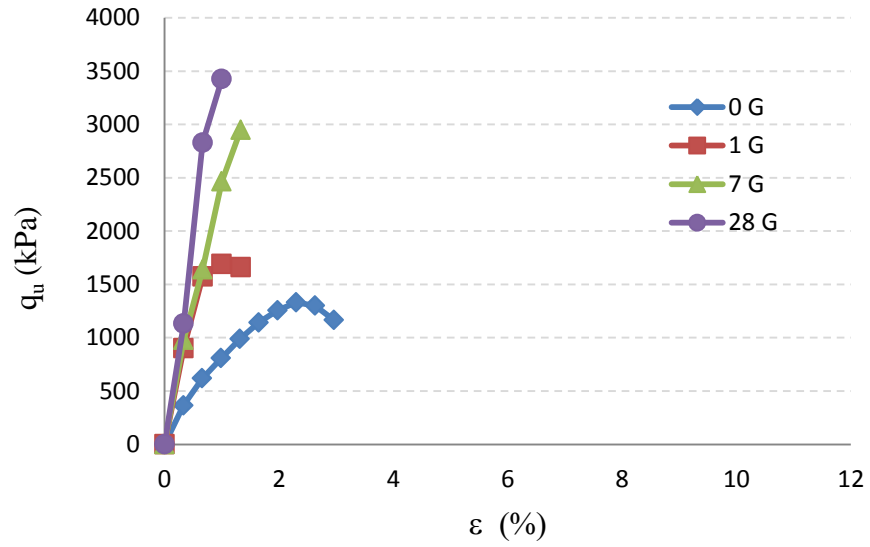
Şekil A.3: 5L0BOSBT numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



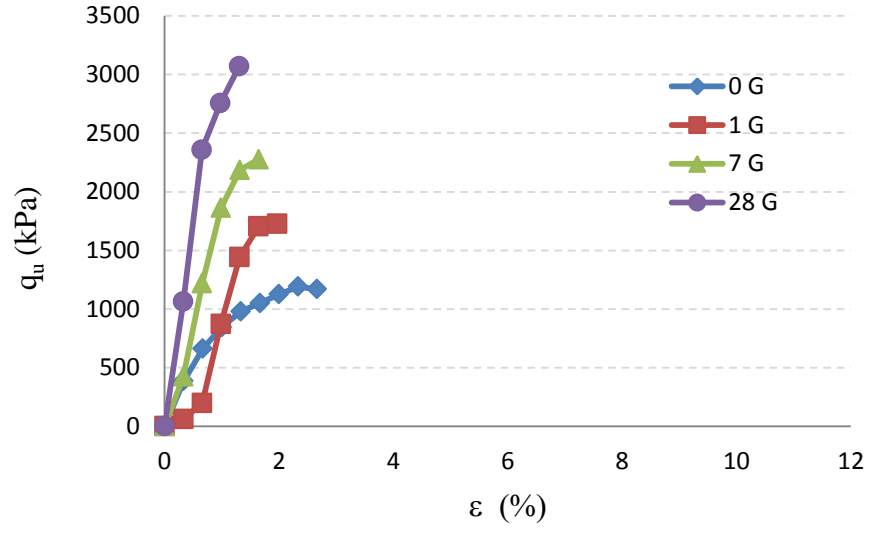
Şekil A.4: 4L2,66BOSBT numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



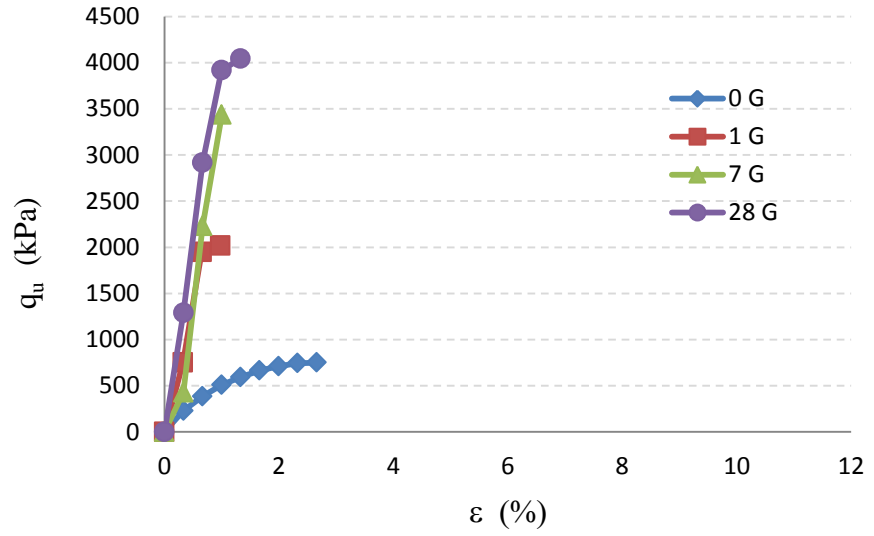
Şekil A.5: 4L6BOSBT numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



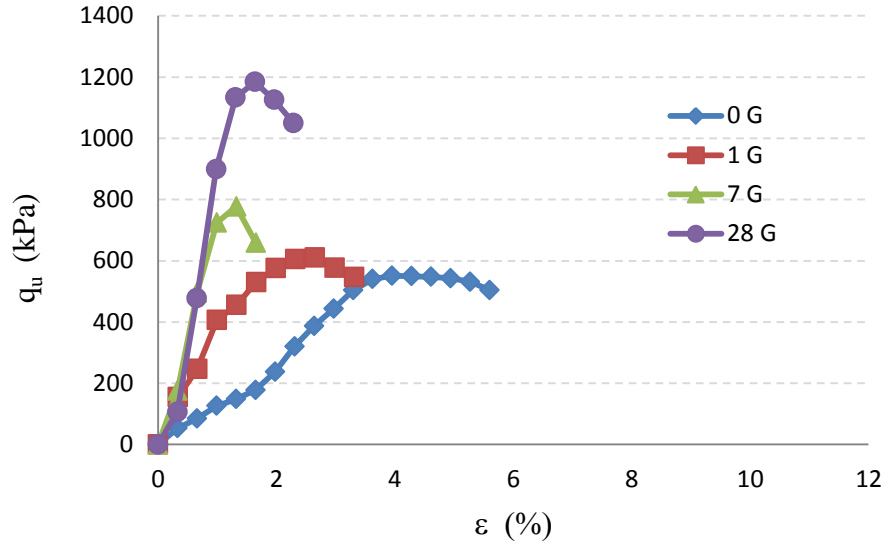
Şekil A.6: 5L3,33BOSBT numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



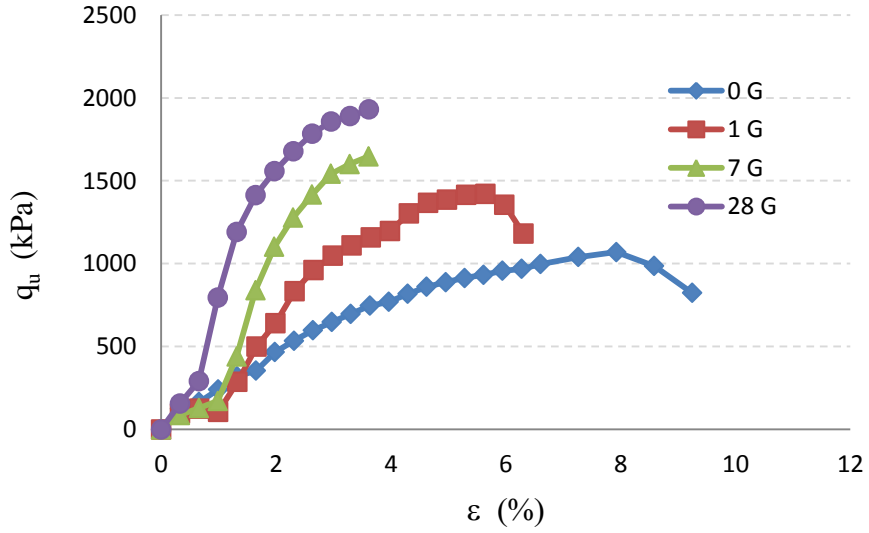
Şekil A.7: 5L7,5BOSBT numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



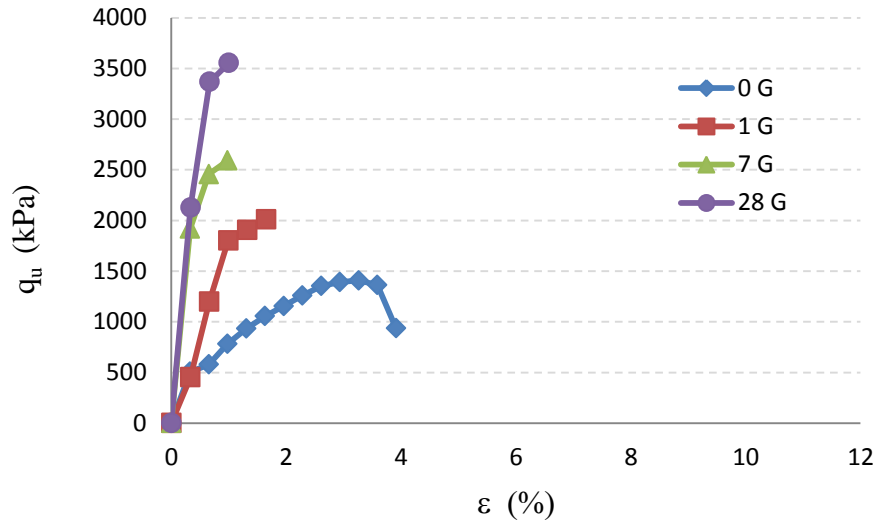
Şekil A.8: 7,5L5BOSBT numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



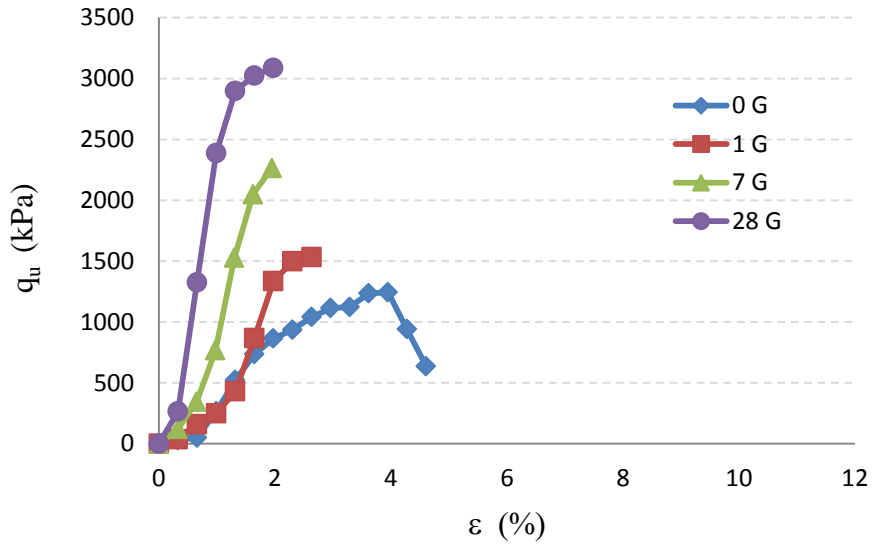
Şekil A.9: 0L0BOSBS numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



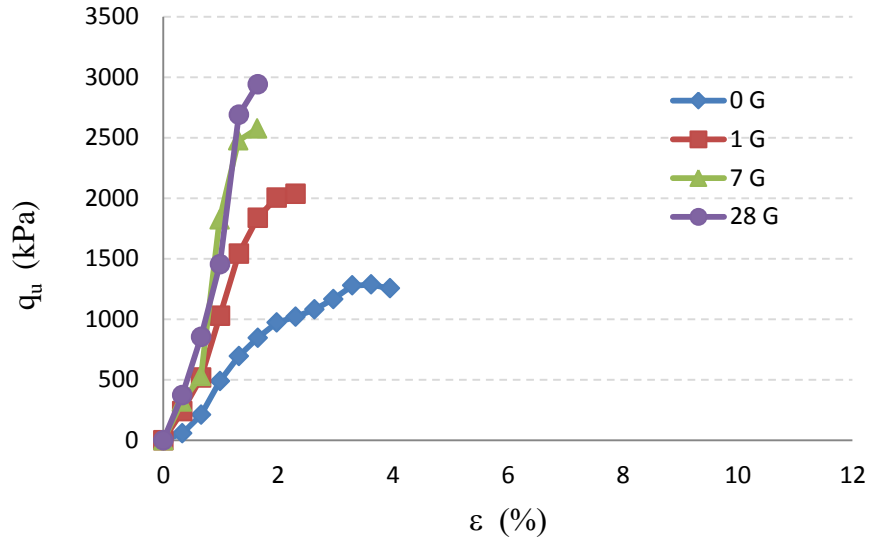
Şekil A.10: 0L3,33BOSBS numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



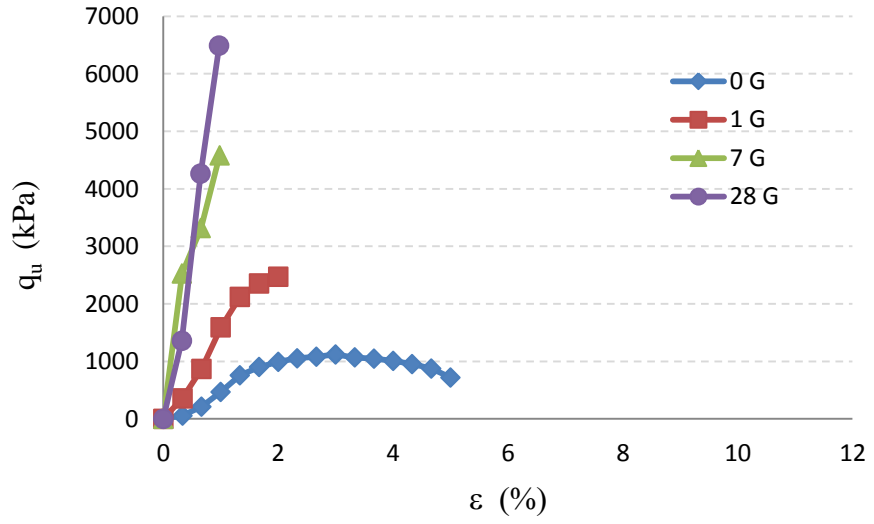
Şekil A.11: 5L0BOSBS numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



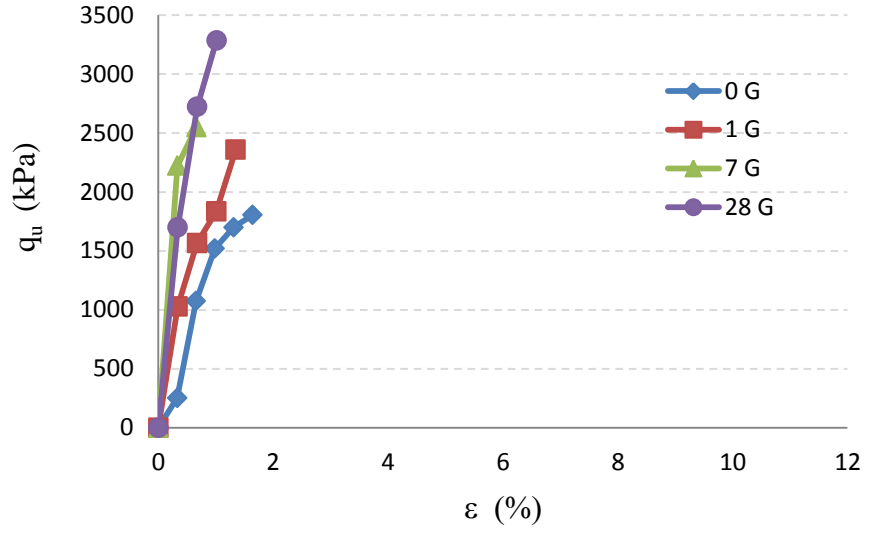
Şekil A.12: 4L2,66BOSBS numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



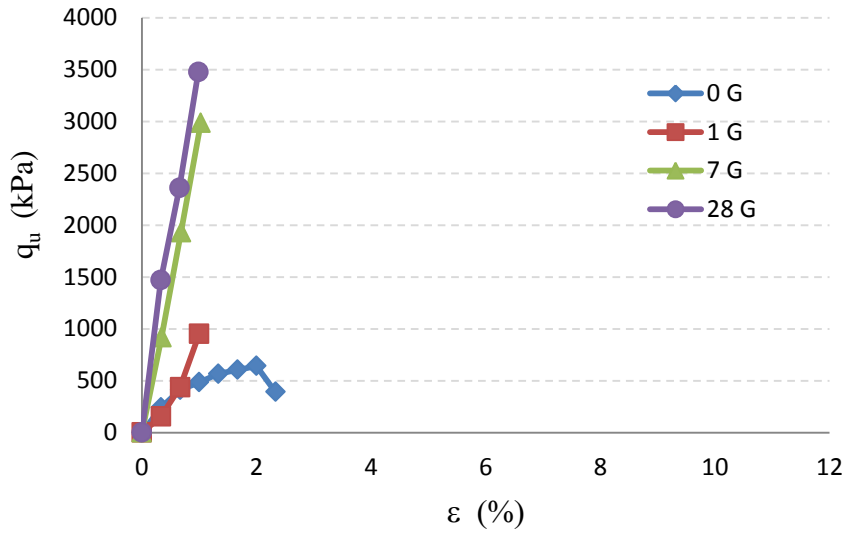
Şekil A.13: 4L6BOSBS numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



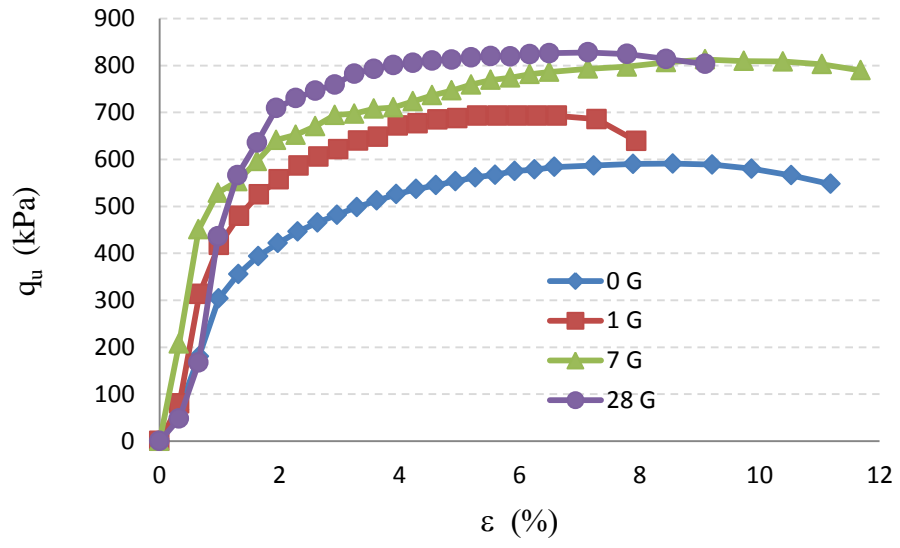
Şekil A.14: 5L3,33BOSBS numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



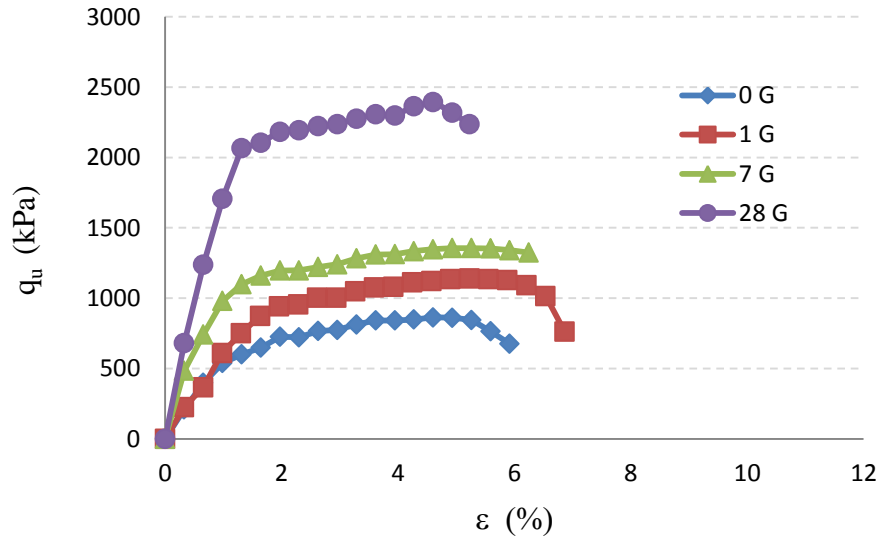
Şekil A.15: 5L7.5BOSBS numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



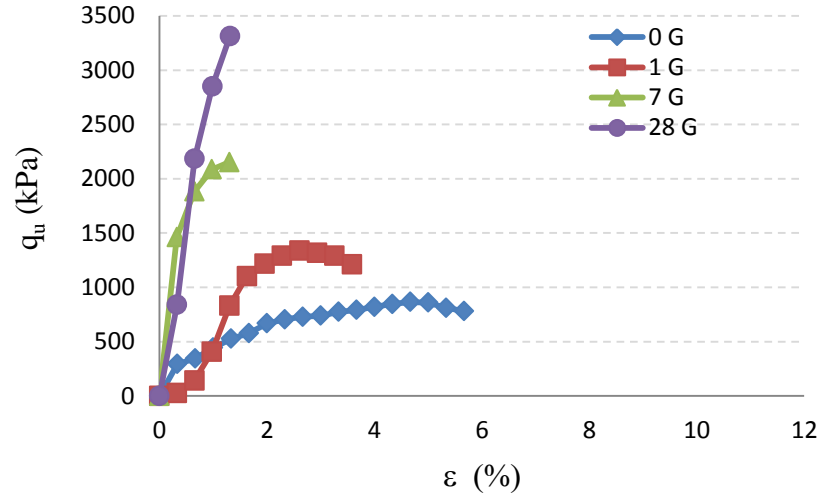
Şekil A.16: 7.5L5BOSBS numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



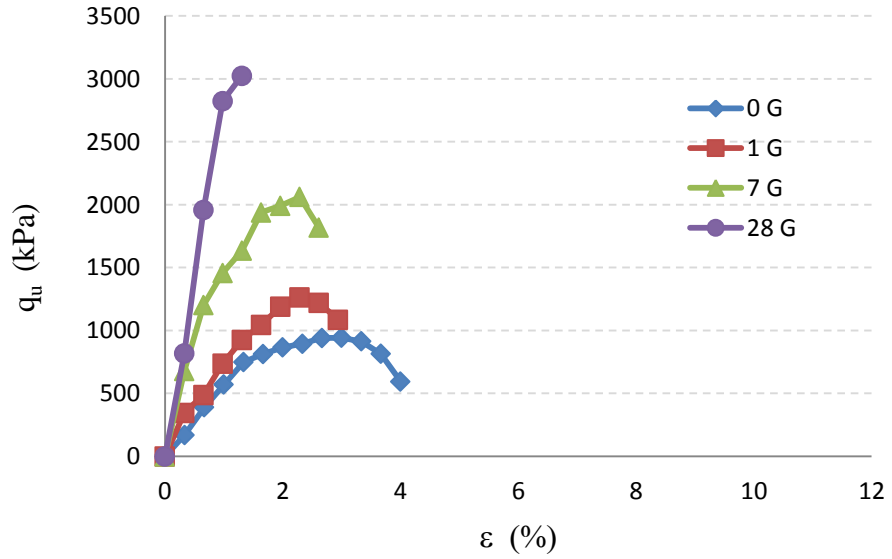
Şekil A.17: 0L0BOSUS numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



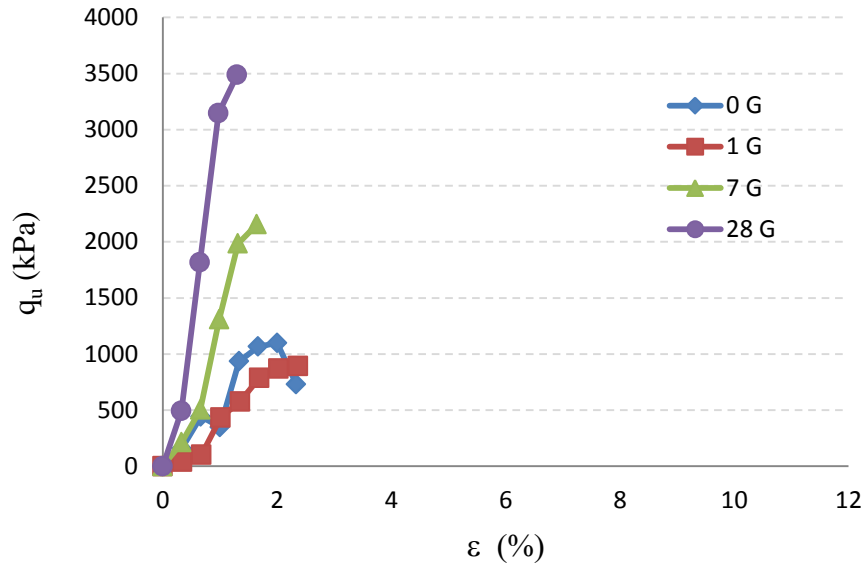
Şekil A.18: 0L3.33BOSUS numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



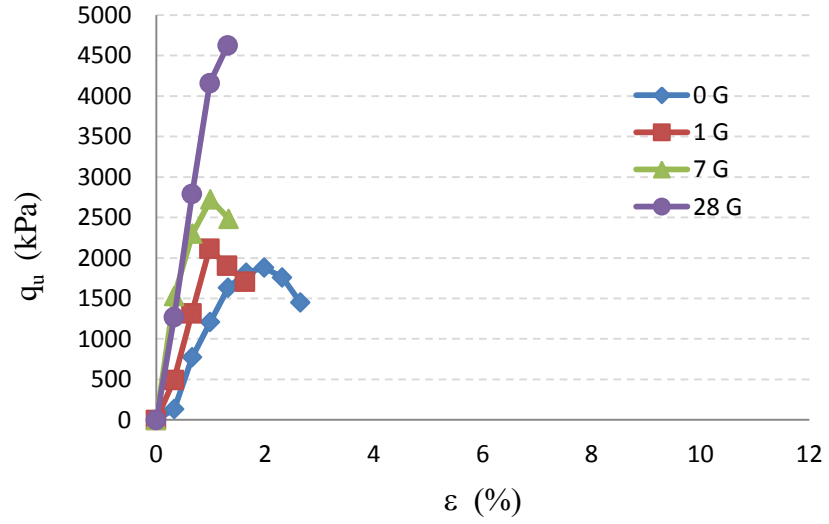
Şekil A.19: 5L0BOSUS numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



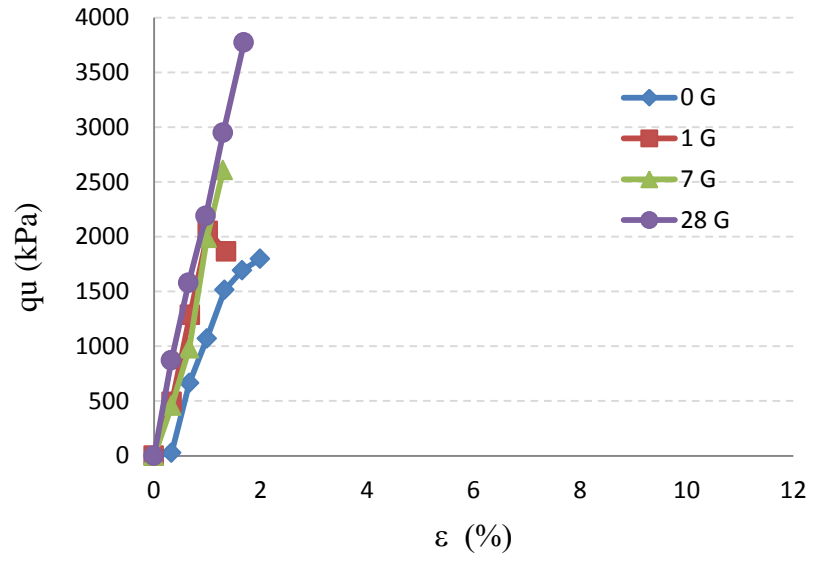
Şekil A.20: 4L2.66BOSUS numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



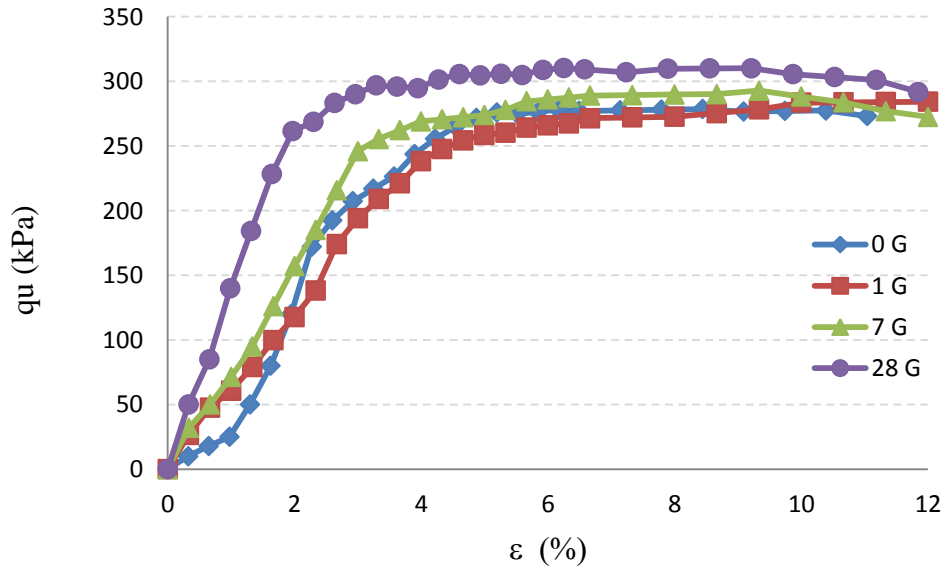
Şekil A.21: 4L6BOSUS numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



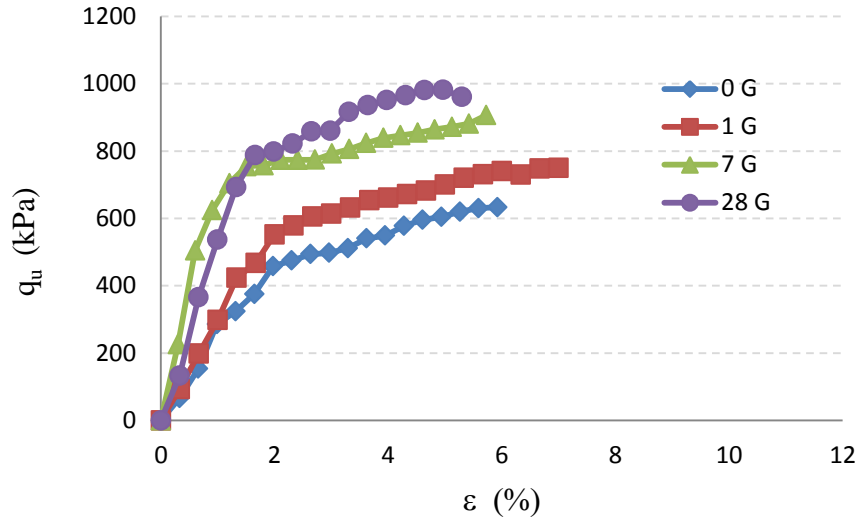
Şekil A.22: 5L3.33BOSUS numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



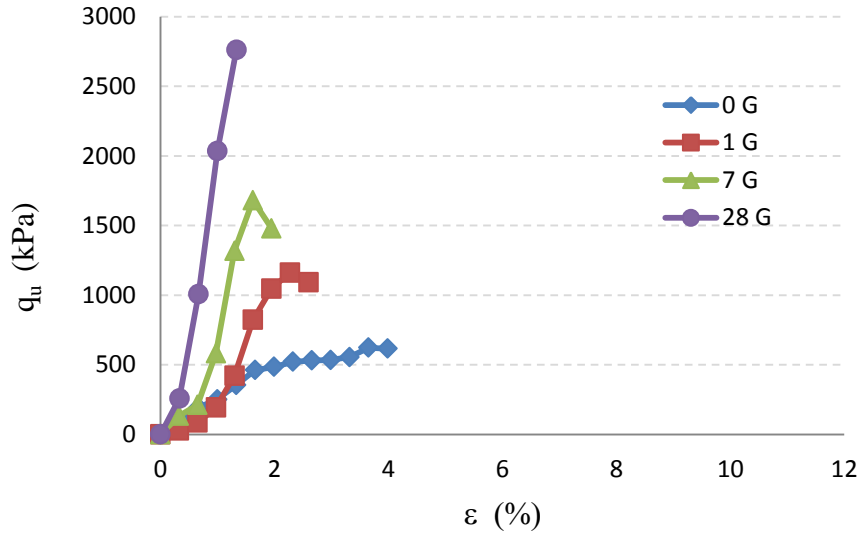
Şekil A.23: 5L7.5BOSUS numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



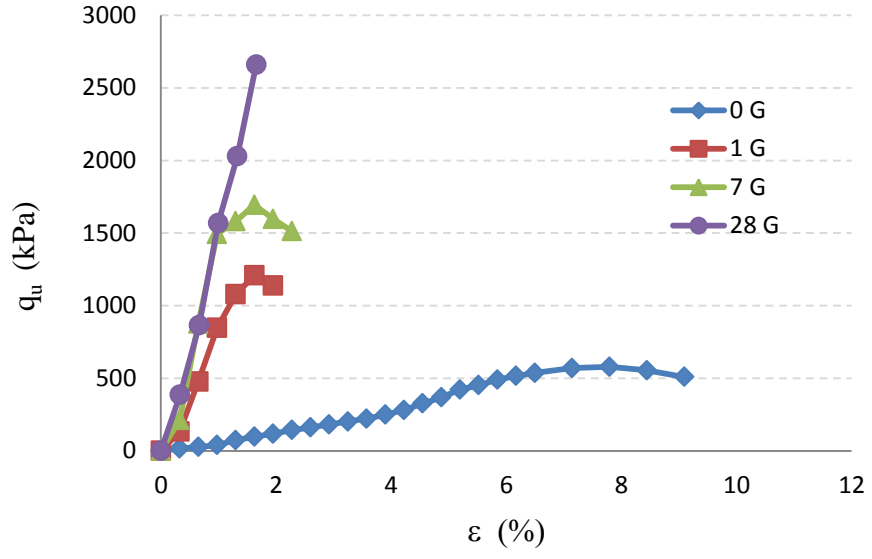
Şekil A.24: 0L0BOSUT numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



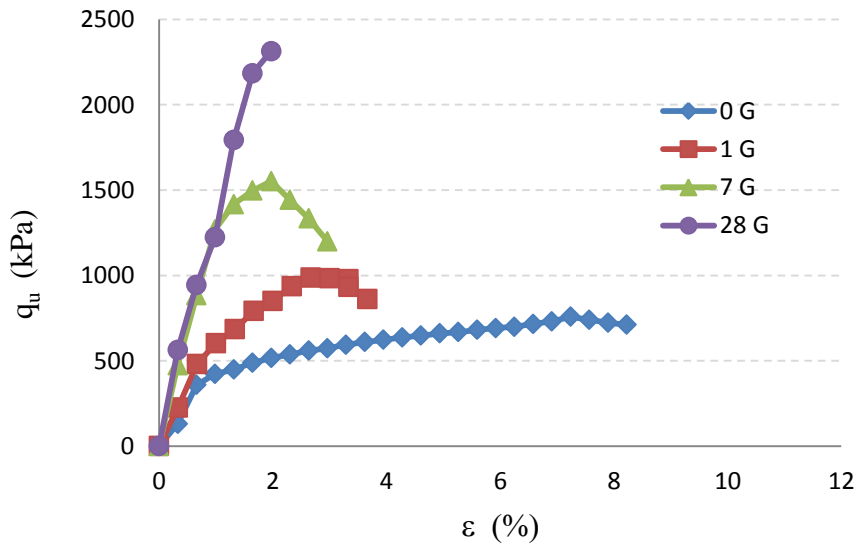
Şekil A.25: 0L3.33BOSUT numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



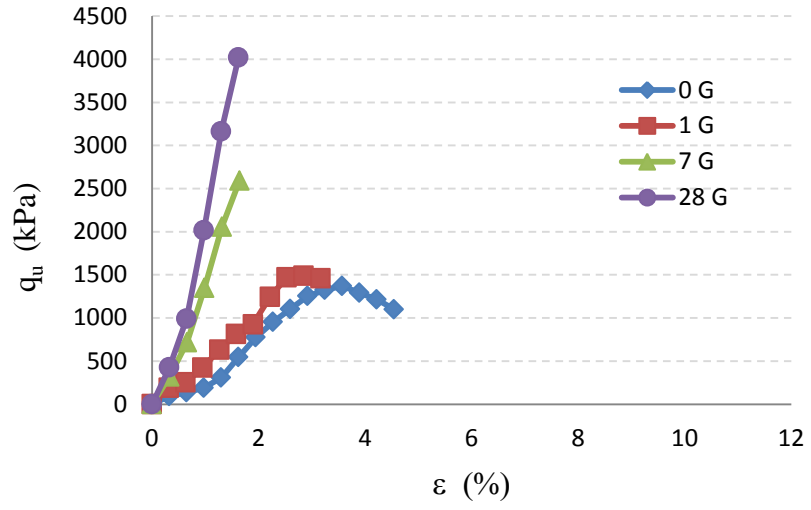
Şekil A.26: 5L0BOSUT numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



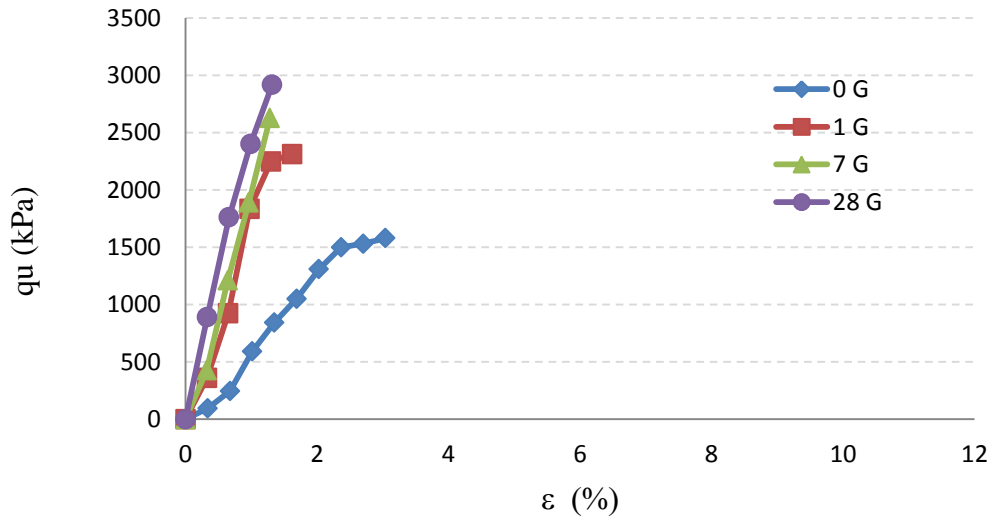
Şekil A.27: 4L2.66BOSUT numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



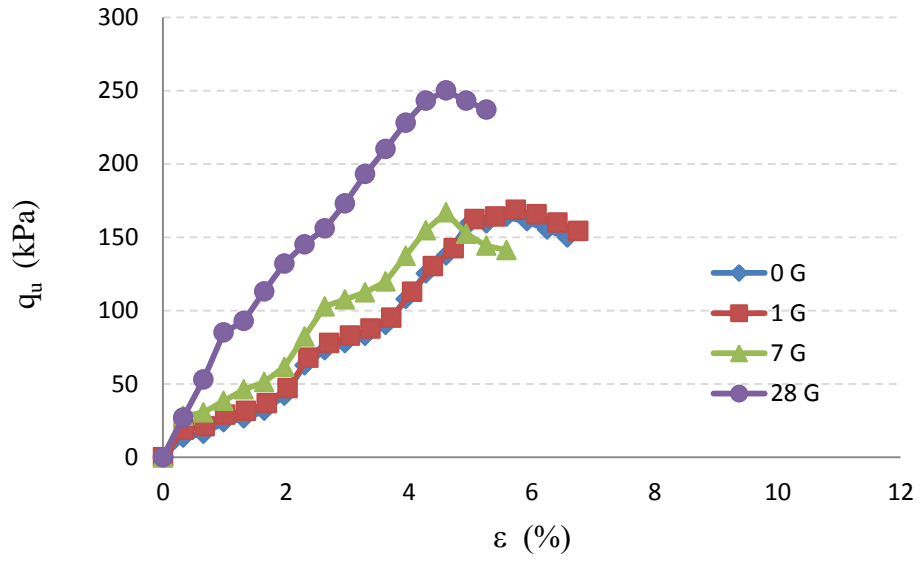
Şekil A.28: 4L6BOSUT numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



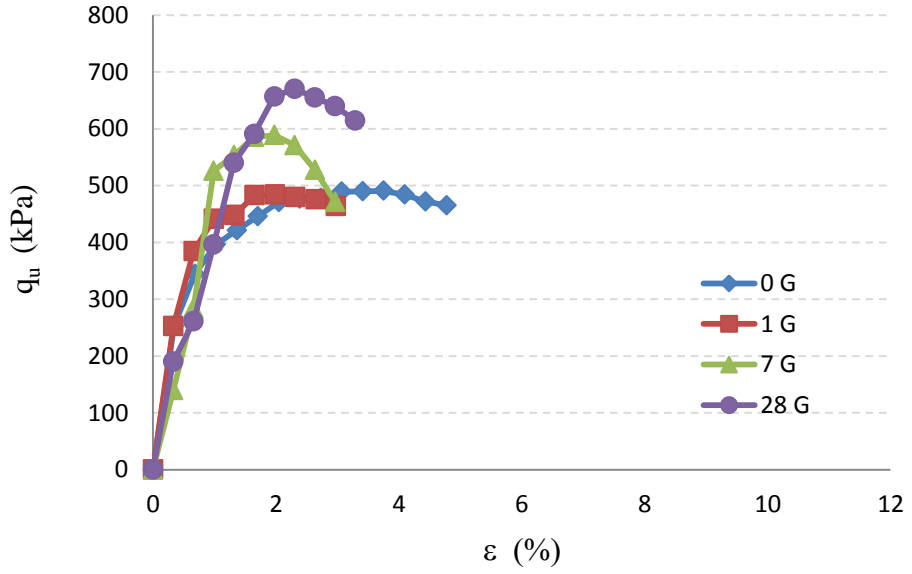
Şekil A.29: 5L3.33BOSUT numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



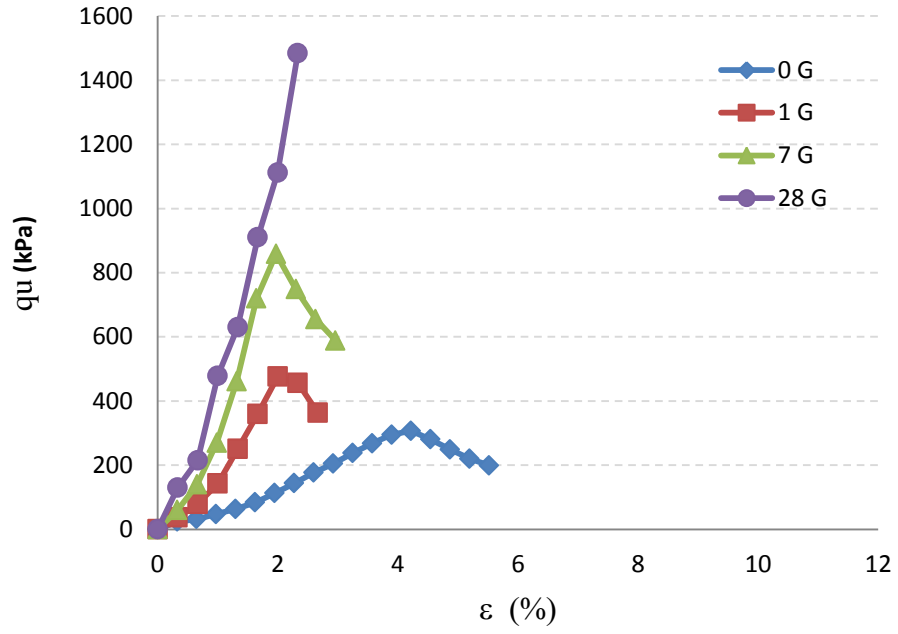
Şekil A.30: 5L7.5BOSUT numunesi serbest basınç değerleri (modifiye sıkıştırma)



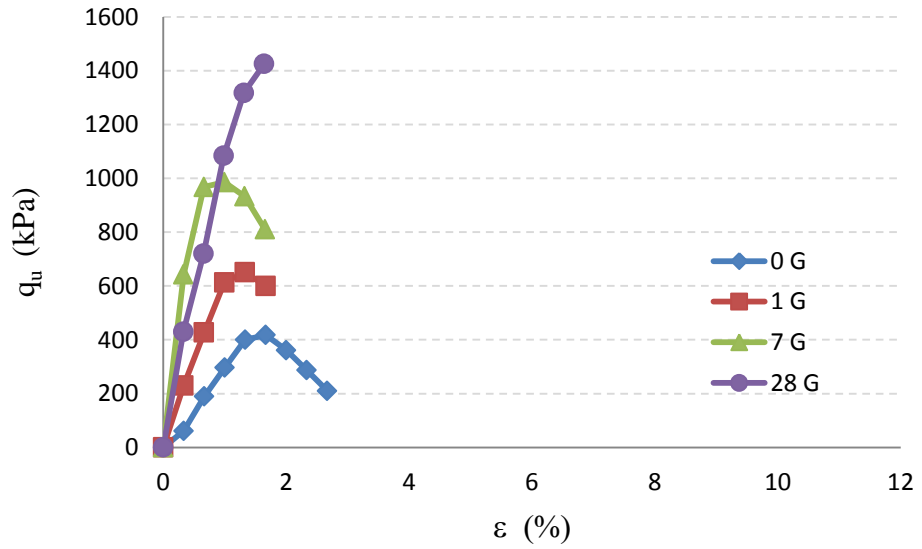
Şekil A.31: 0L0BOSUT numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



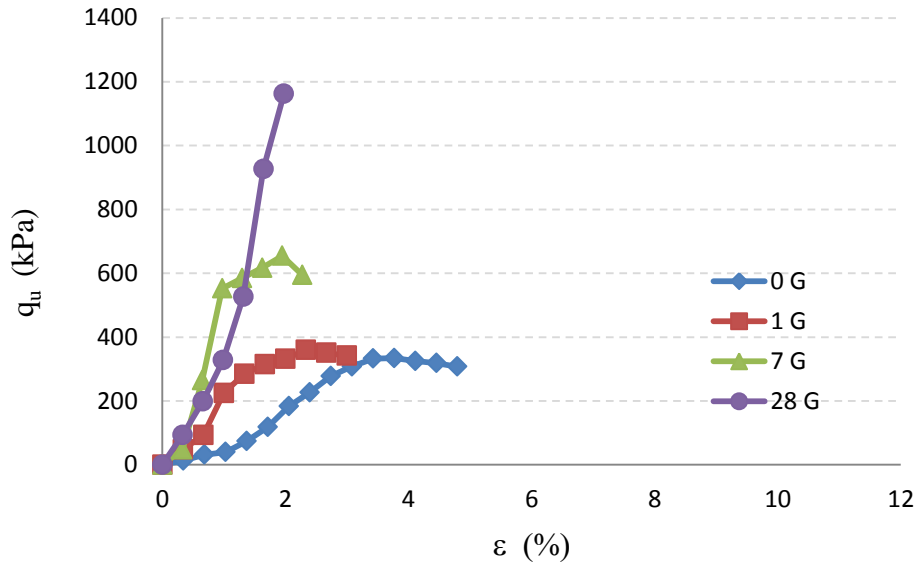
Şekil A.32: 0L3.33BOSUT numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



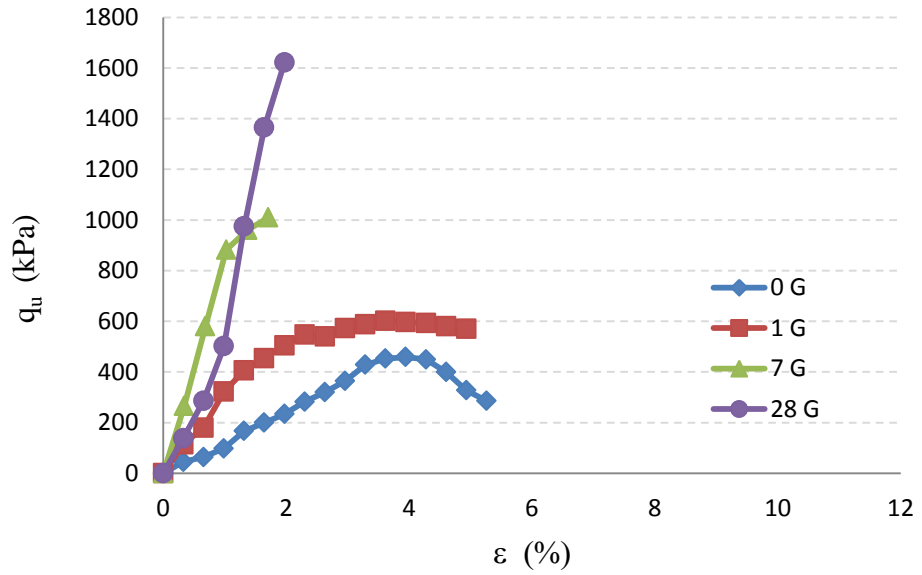
Şekil A.33: 5L0BOSUT numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



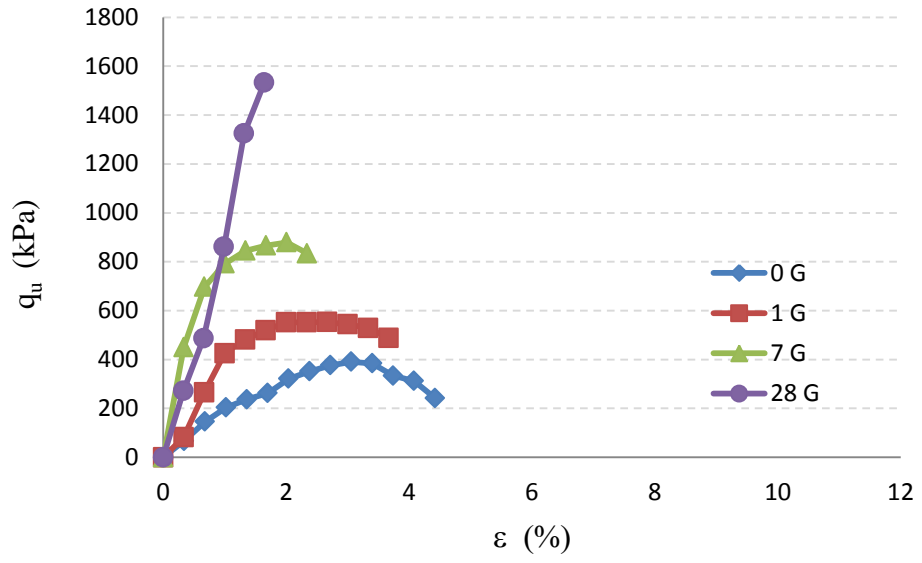
Şekil A.34: 4L2,66BOSUT numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



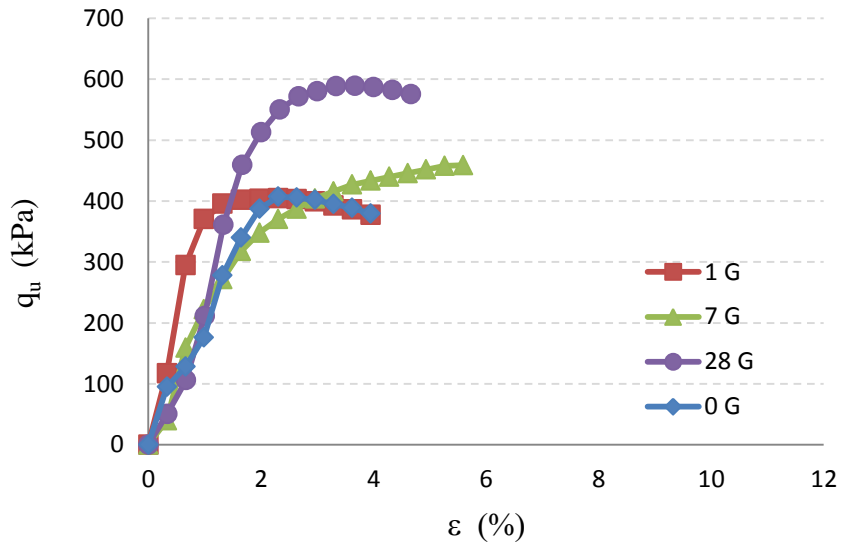
Şekil A.35: 4L6BOSUT numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



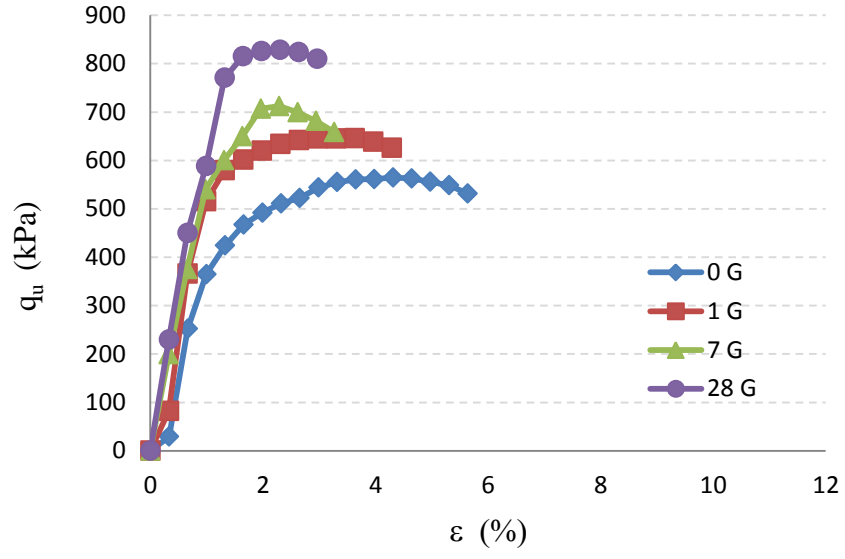
Şekil A.36: 5L3.33BOSUT numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



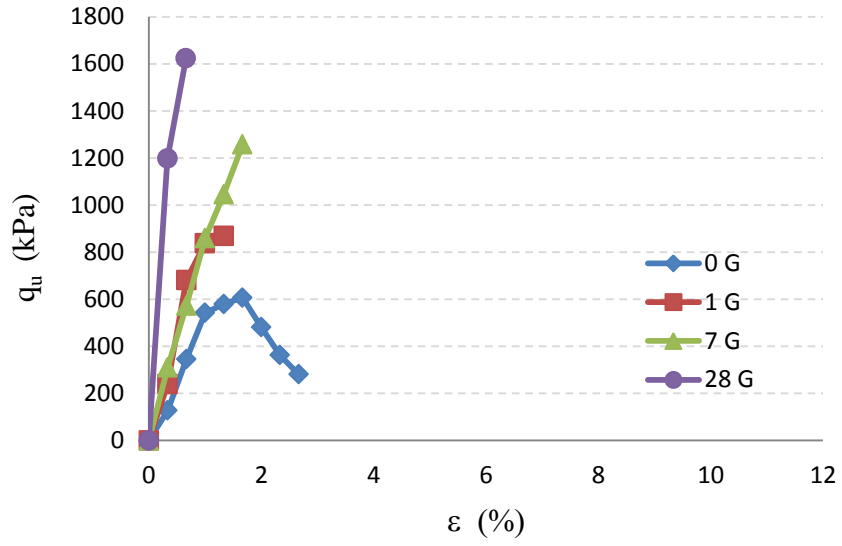
Şekil A.37: 5L7.5BOSUT numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



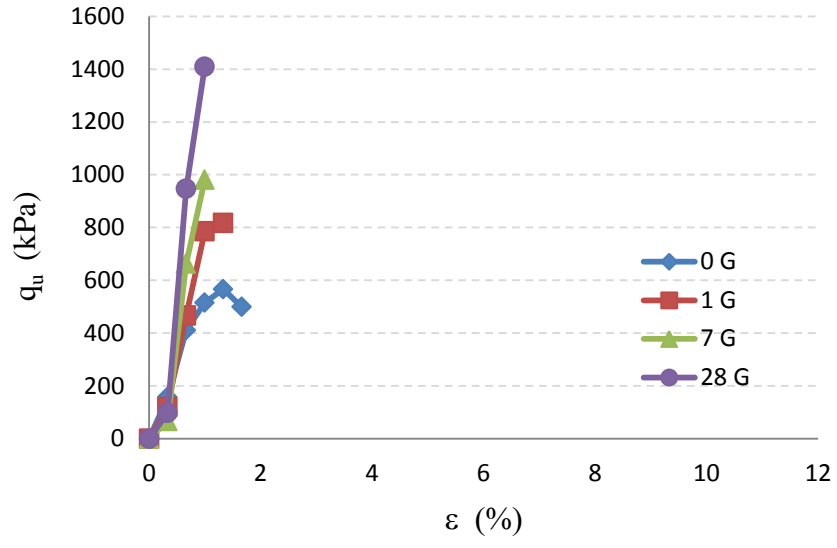
Şekil A.38: 0L0BOSUS numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



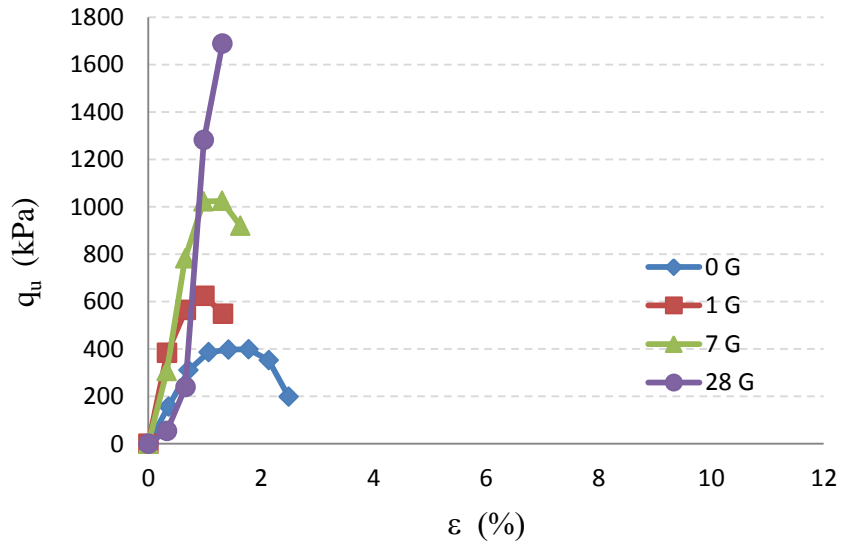
Şekil A.39: 0L3.33BOSUS numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



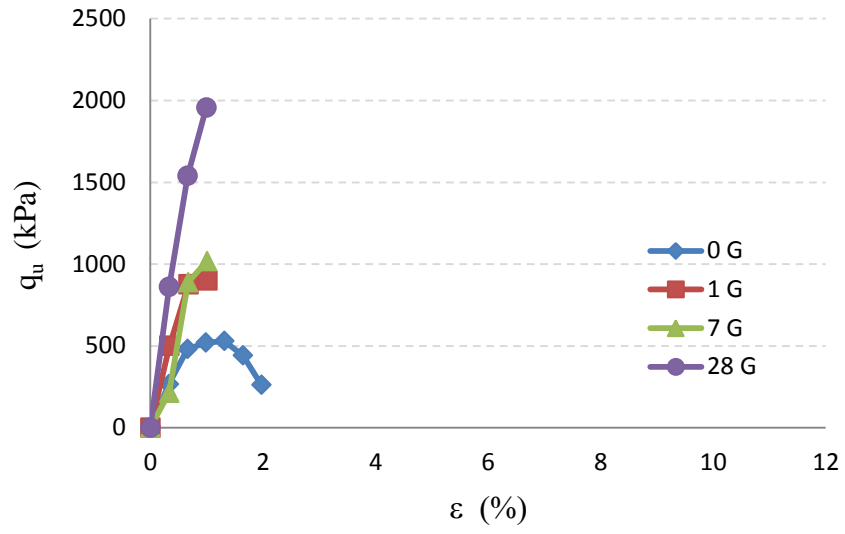
Şekil A.40: 5L0BOSUS numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



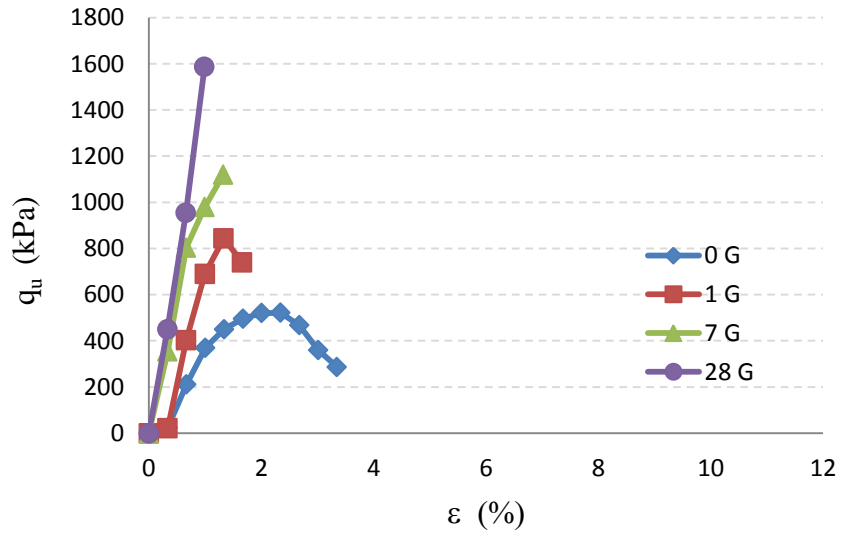
Şekil A.41: 4L2.66BOSUS numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



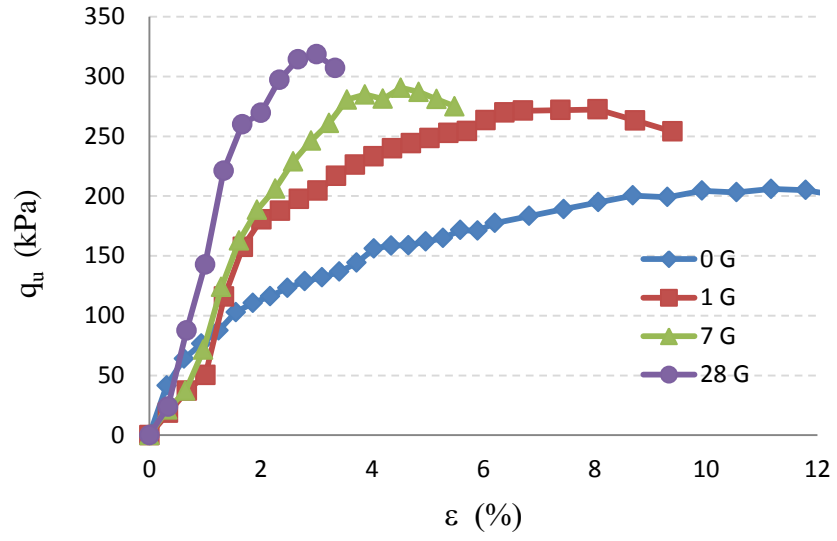
Şekil A.42: 4L6BOSUS numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



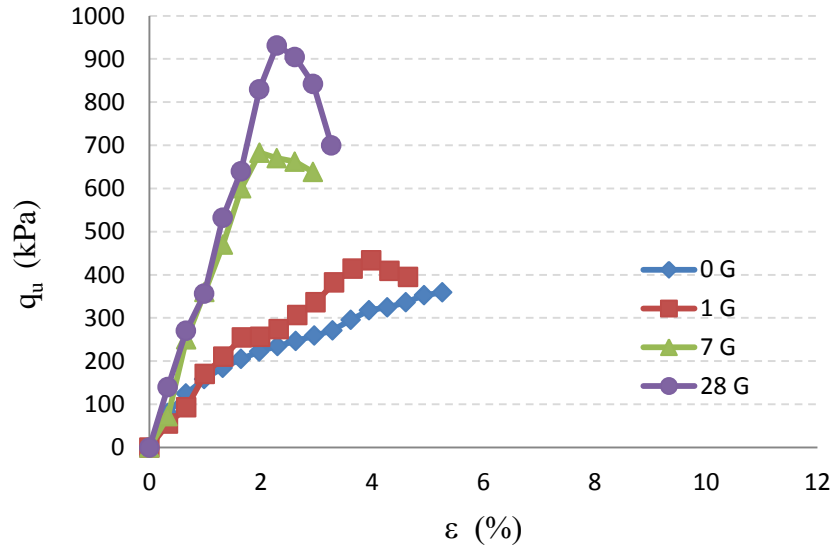
Şekil A.43: 5L3,33BOSUS numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



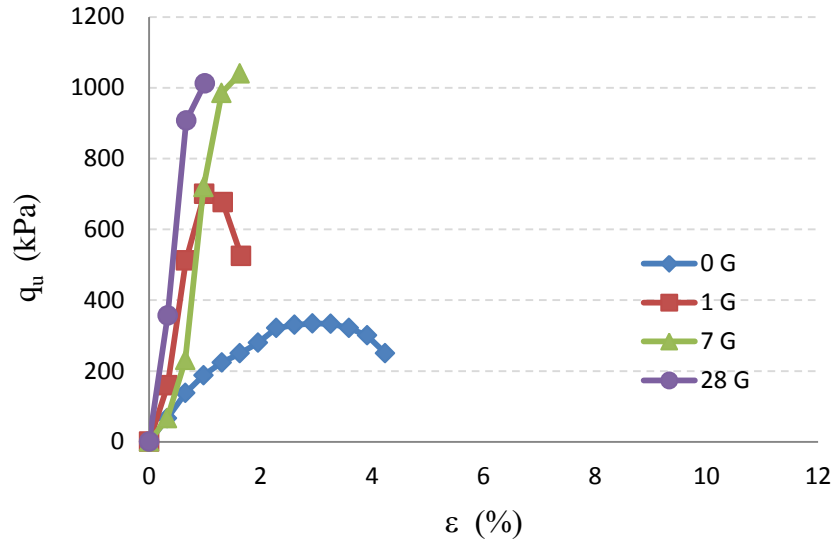
Şekil A.44: 5L7.5BOSUS numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



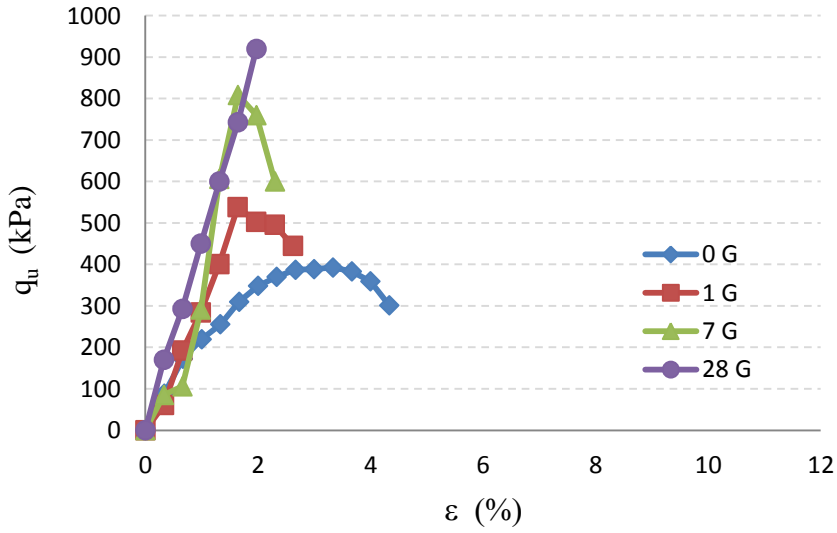
Şekil A.45: 0L0BOSBT numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



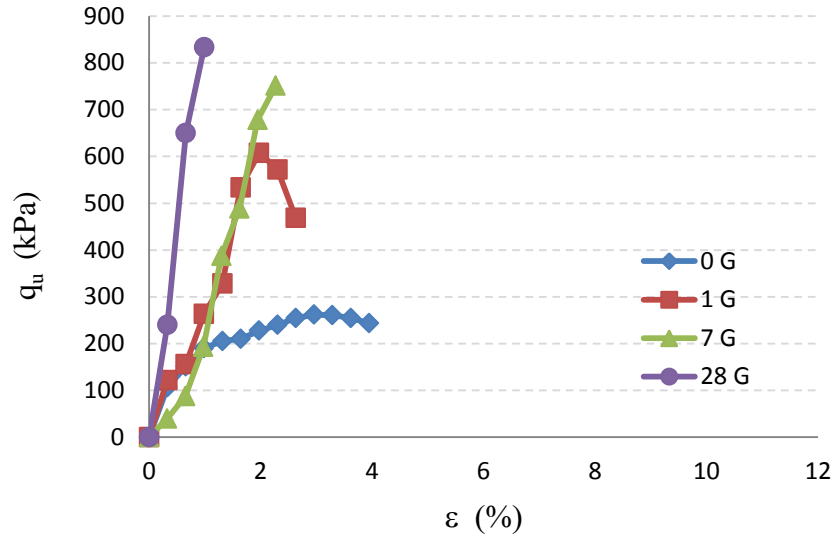
Şekil A.46: 0L3,33BOSBT numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



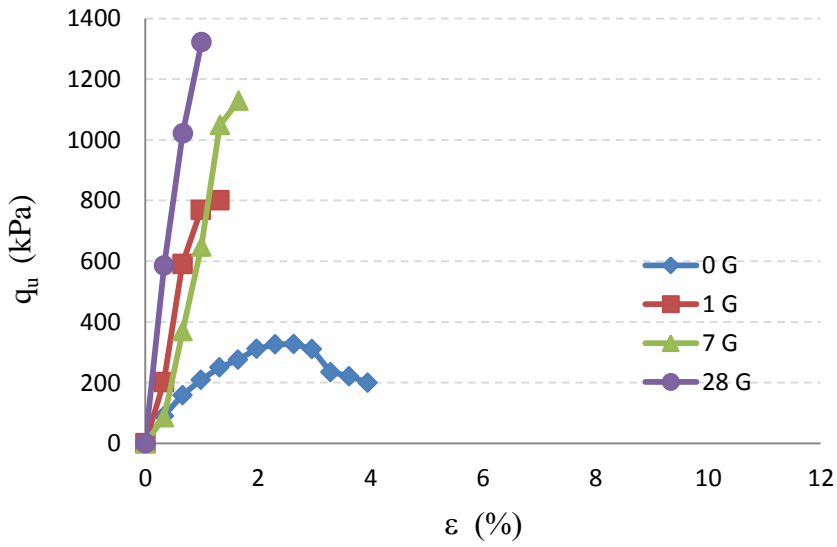
Şekil A.47: 5L0BOSBT numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



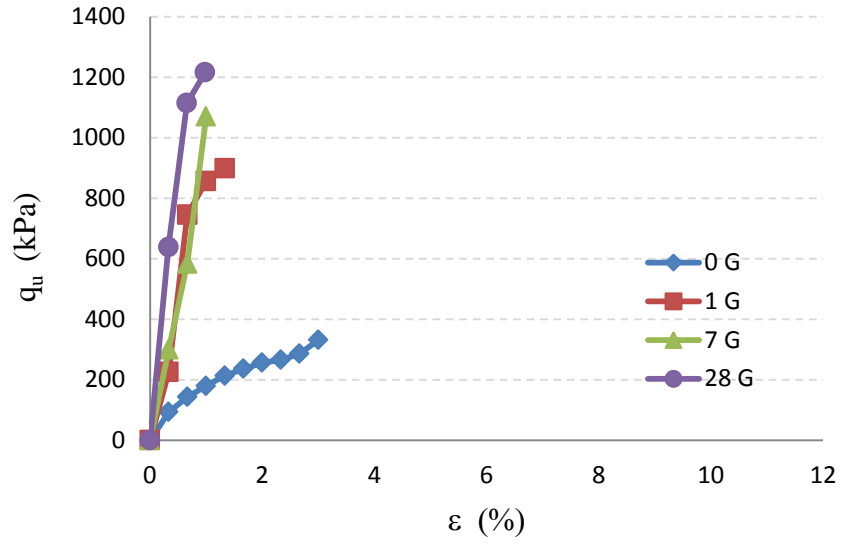
Şekil A.48: 4L2,66BOSBT numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



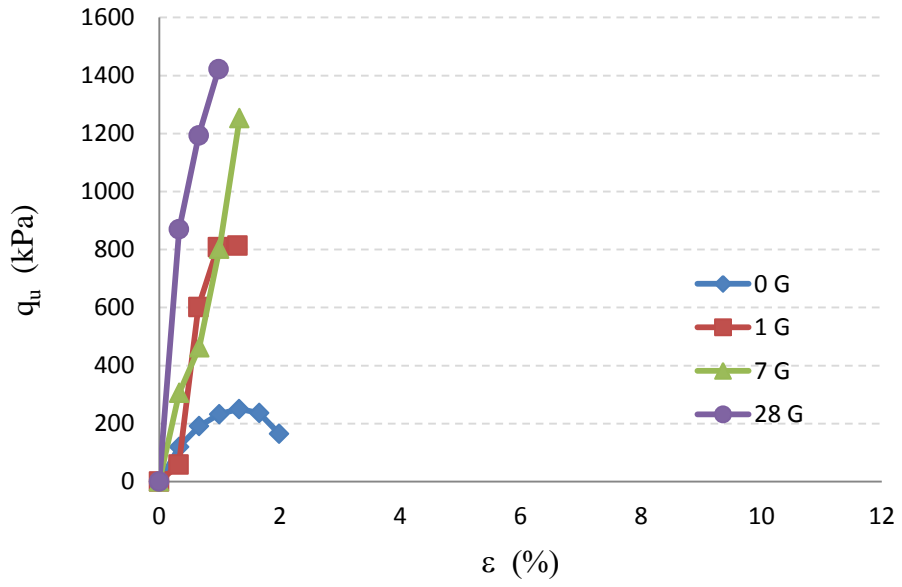
Şekil A.49: 4L6BOSBT numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



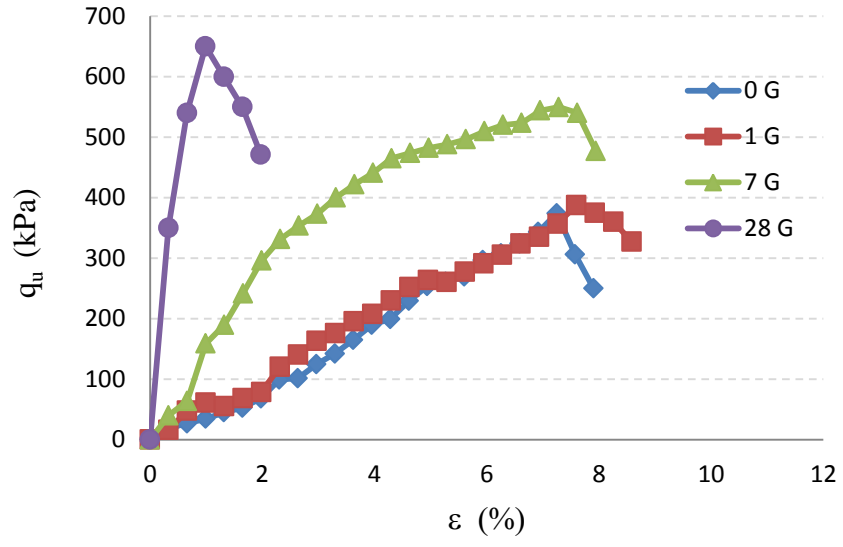
Şekil A.50: 5L3,33BOSBT numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



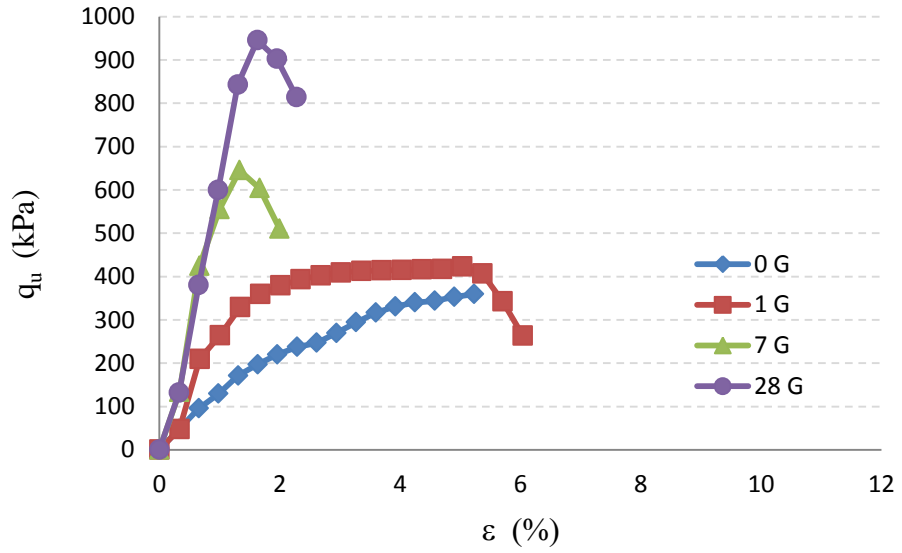
Şekil A.51: 5L7.5BOSBT numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



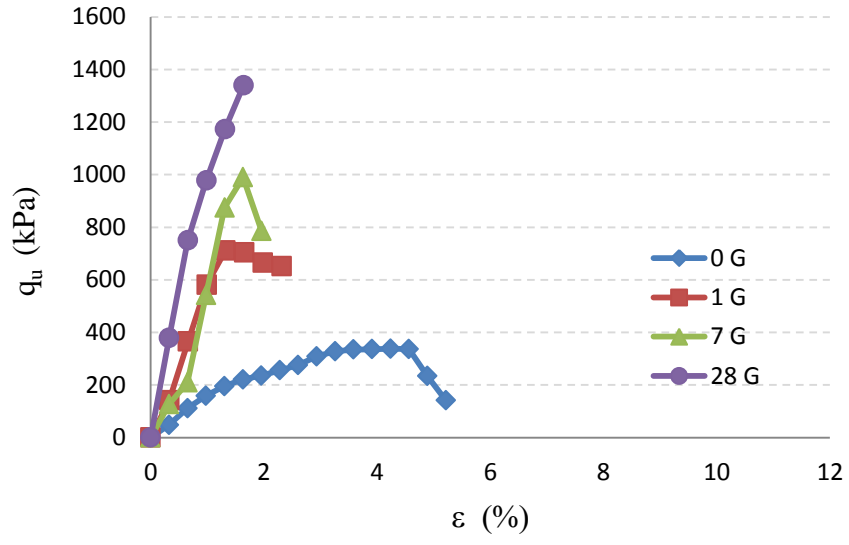
Şekil A.52: 7,5L5BOSBT numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



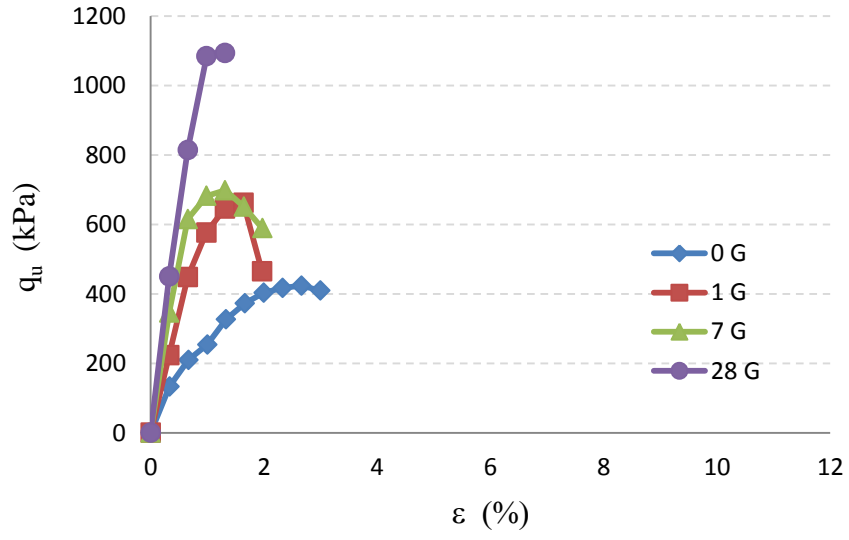
Şekil A.53: 0L0BOSBS numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



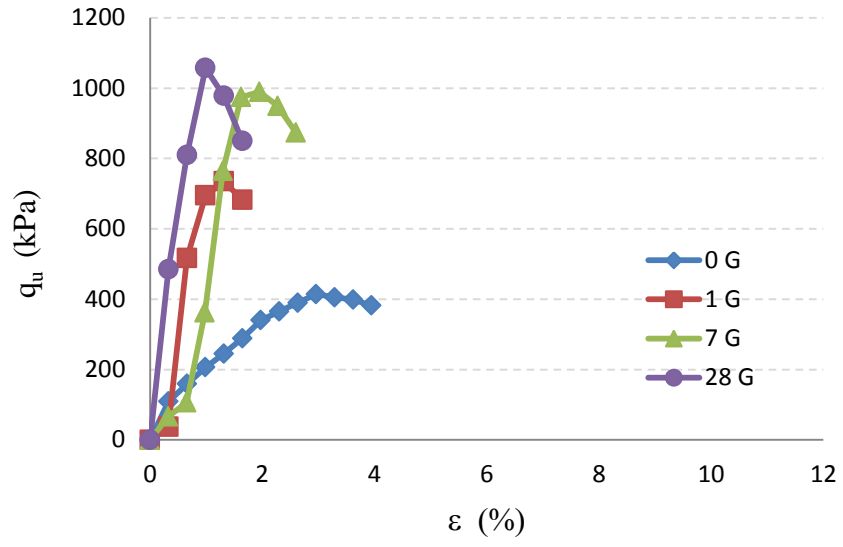
Şekil A.54: 0L3,33BOSBS numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



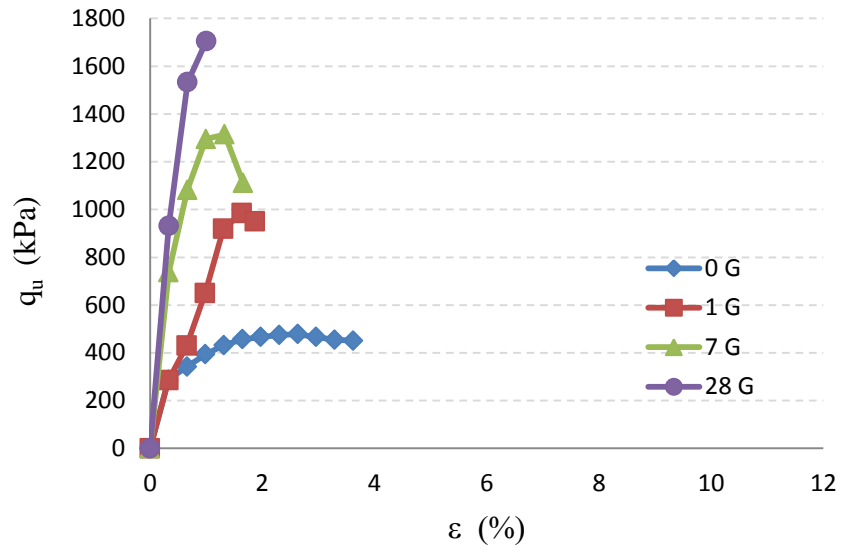
Şekil A.55: 5L0BOSBS numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



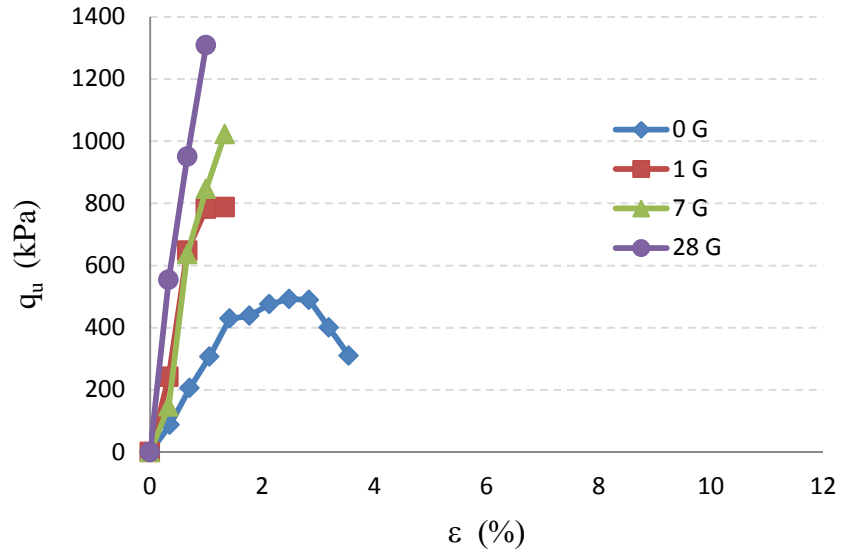
Şekil A.56: 4L2,66BOSBS numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



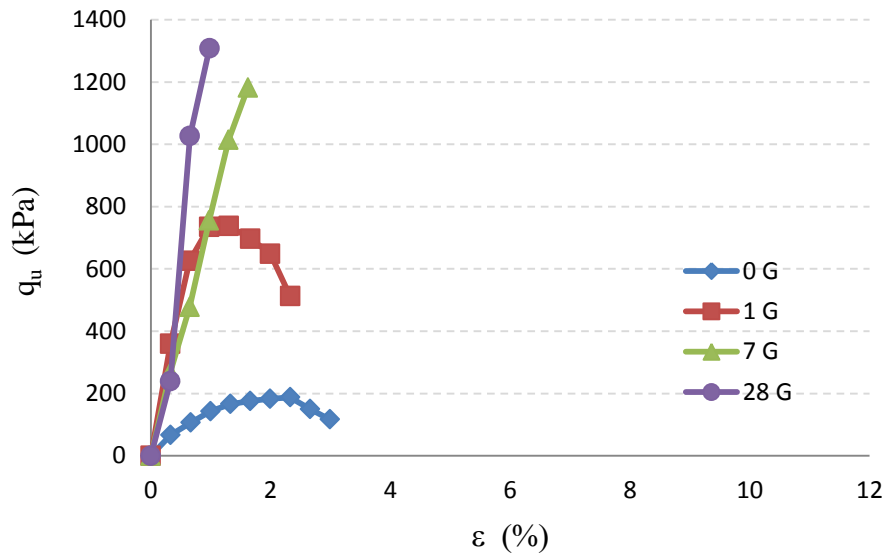
Şekil A.57: 4L6BOSBS numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)



Şekil A.58: 5L3,33BOSBS numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)

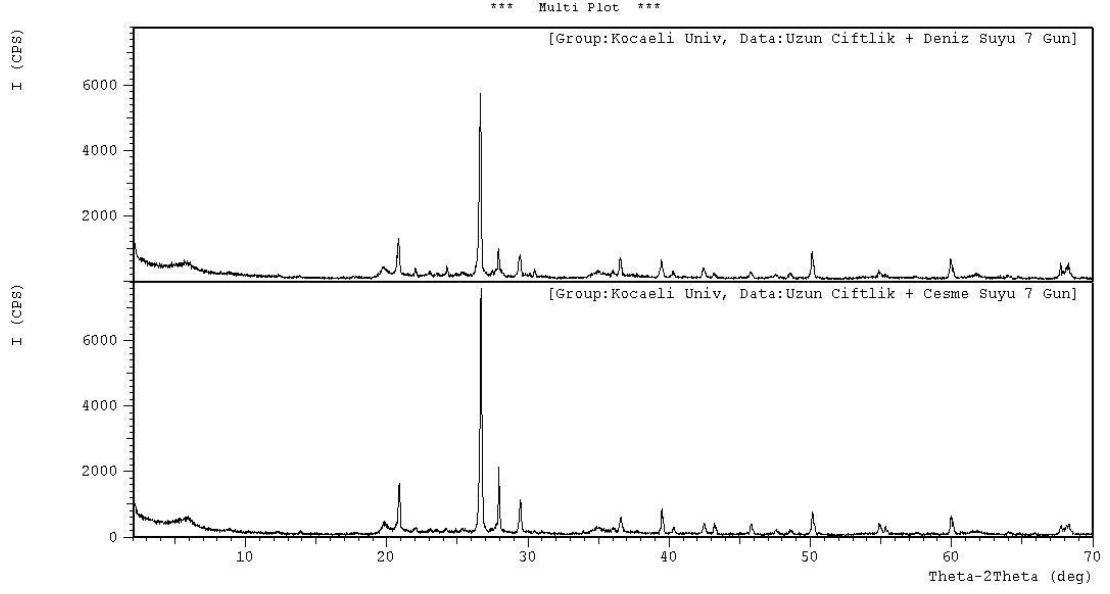


Şekil A.59: 5L7.5BOSBS numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)

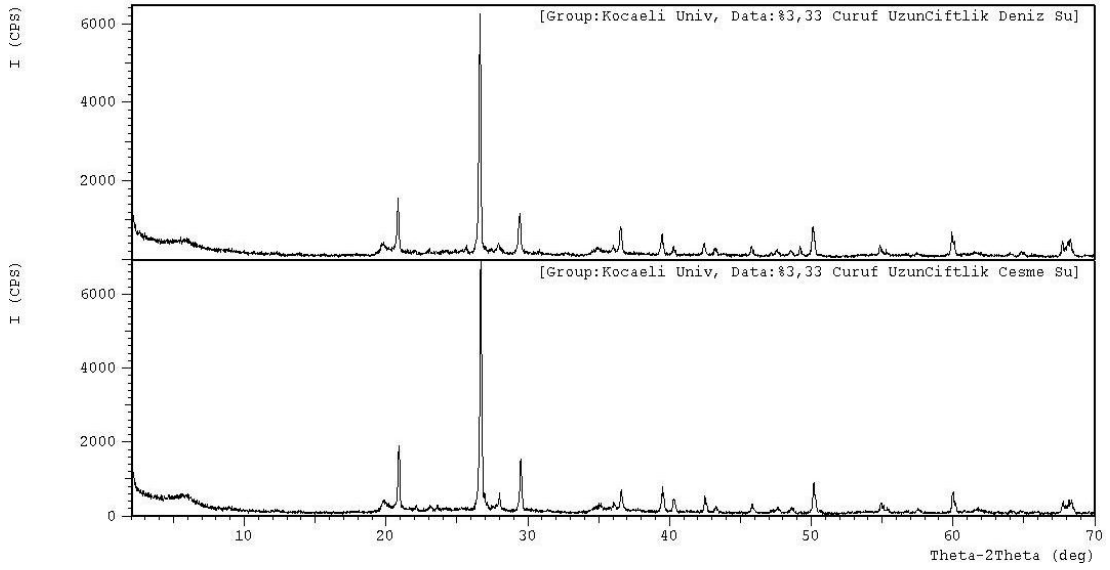


Şekil A.60: 7,5L5BOSBS numunesi serbest basınç değerleri (standart sıkıştırma)

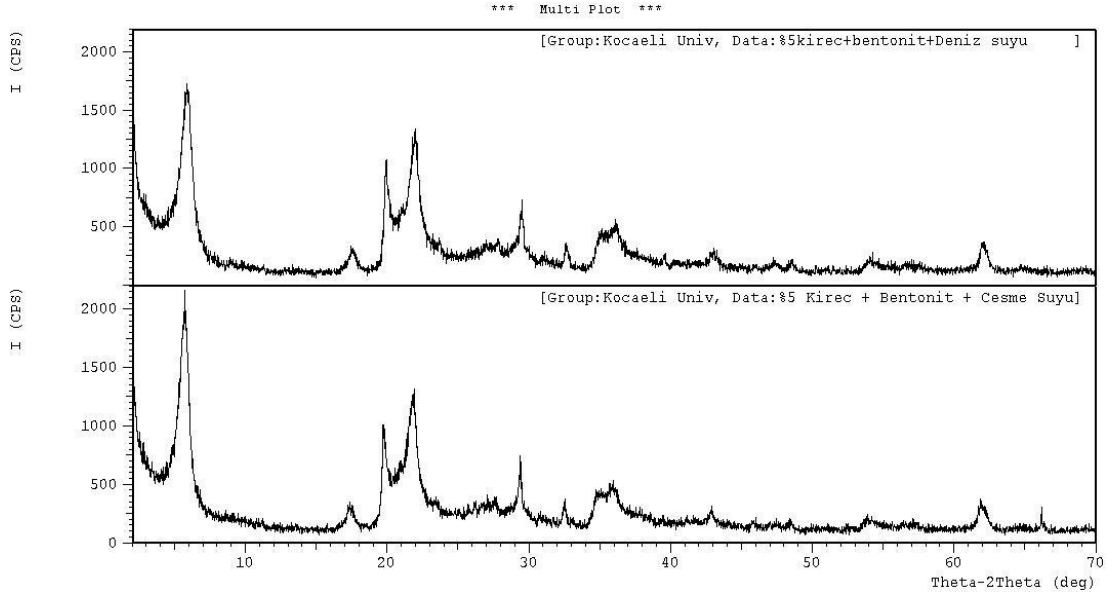
EK-B



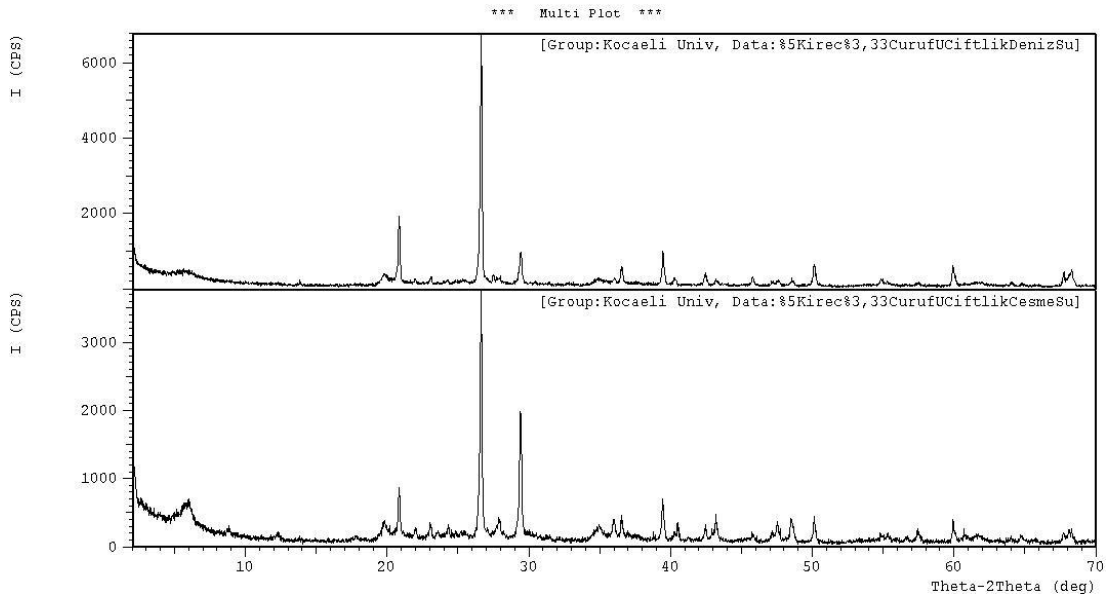
Şekil B.1: 0L0BOSUS ve 0L0BOSUT numunelerine ait XRD Grafiği



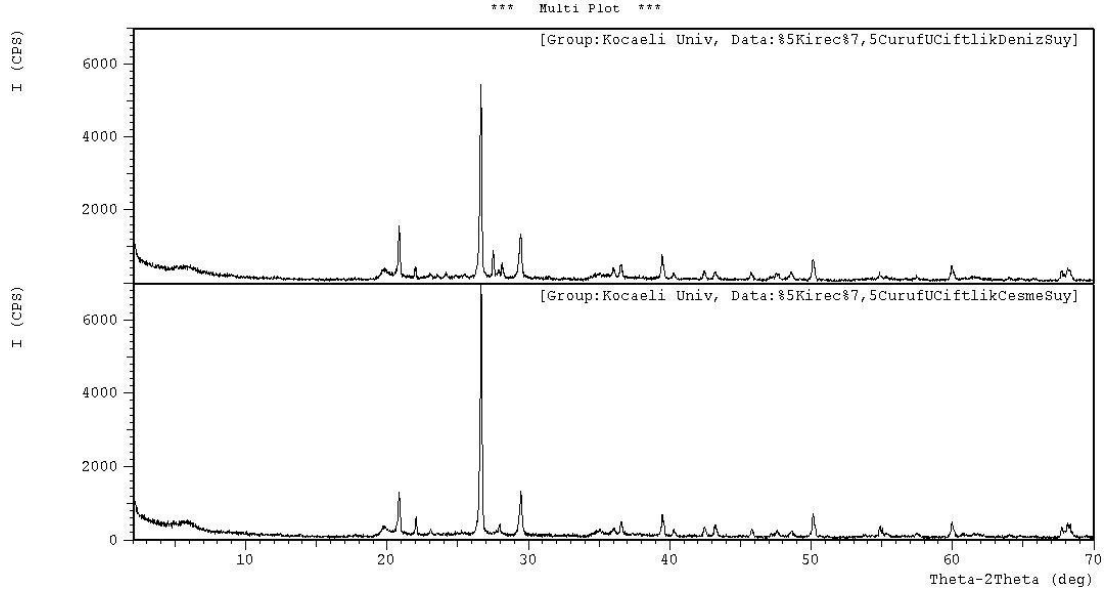
Şekil B.2: 0L3.33BOSUS ve 0L3.33BOSUT numunelerine ait XRD Grafiği



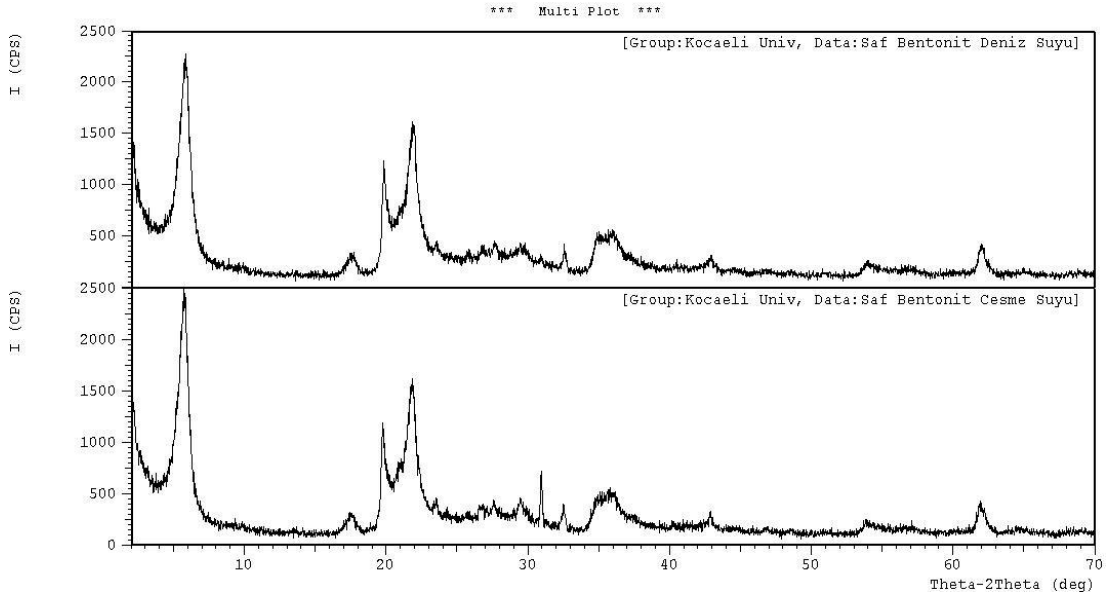
Şekil B.3: 5L0BOSUS ve 5L0BOSUT numunelerine ait XRD Grafiği



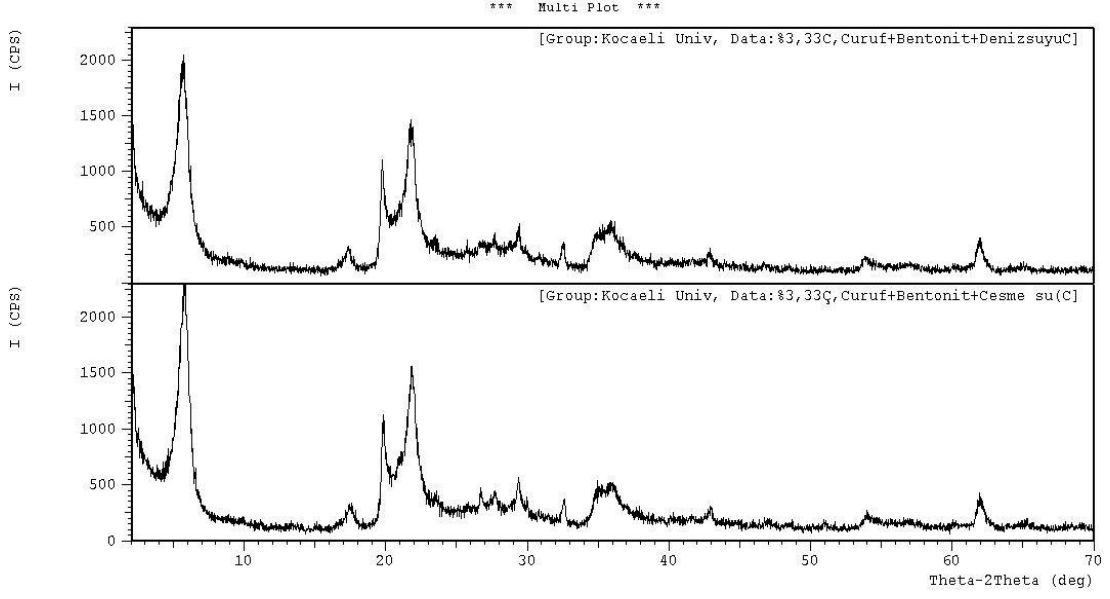
Şekil B.4: 5L3.33BOSUS ve 5L3.33BOSUT numunelerine ait XRD Grafiği



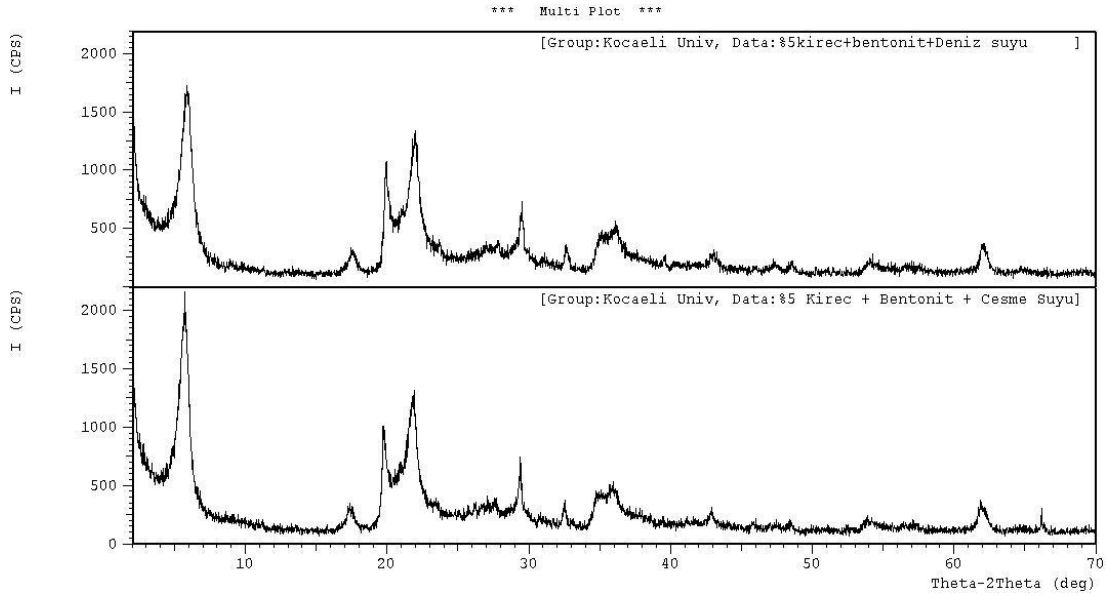
Şekil B.5: 5L7.5BOSUS ve 5L7.5BOSUT numunelerine ait XRD Grafiği



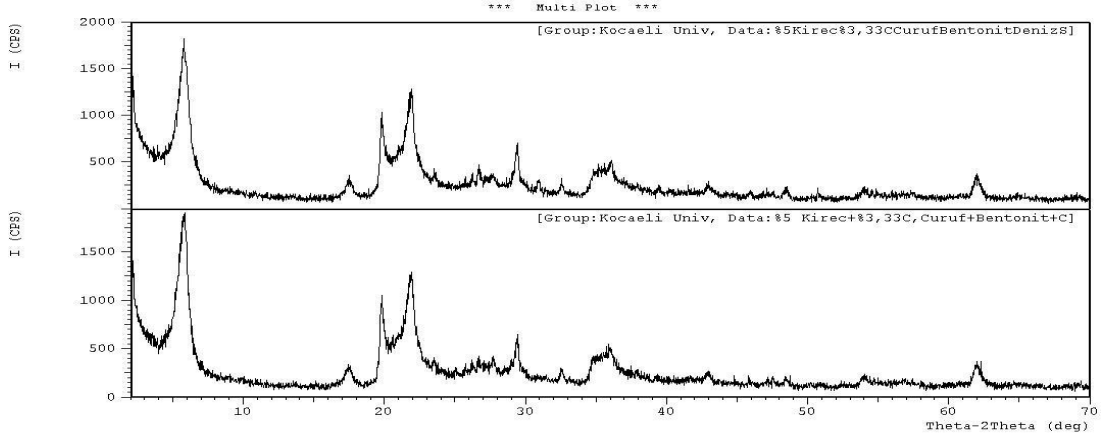
Şekil B.6: 0L0BOSBS ve 0L0BOSBT numunelerine ait XRD Grafiği



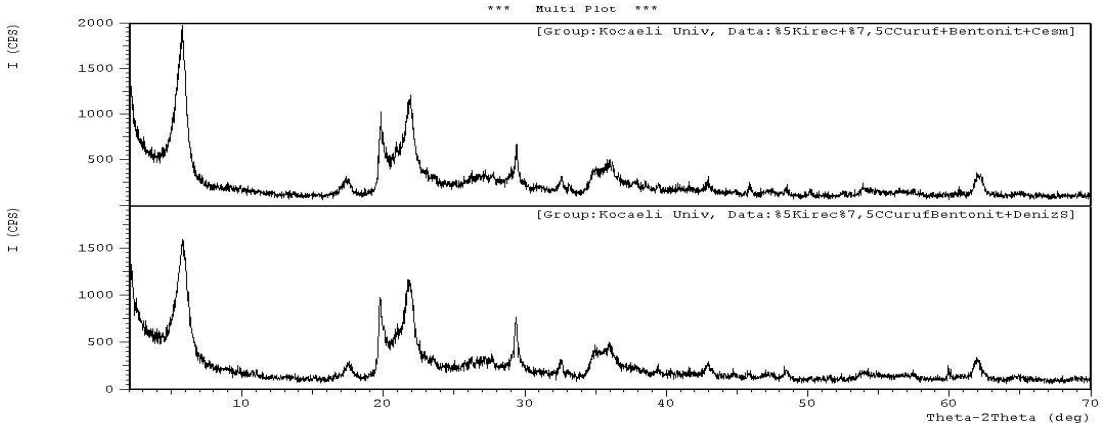
Şekil B.7: 0L3.33BOSBS ve 0L3.33BOSBT numunelerine ait XRD Grafiği



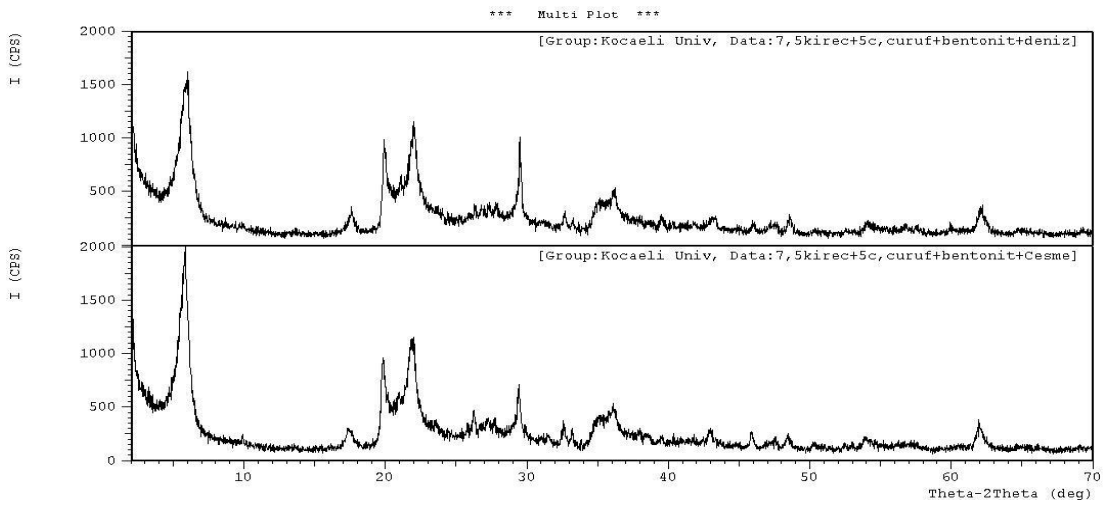
Şekil B.8: 5L0BOSBS ve 5L0BOSBT numunelerine ait XRD Grafiği



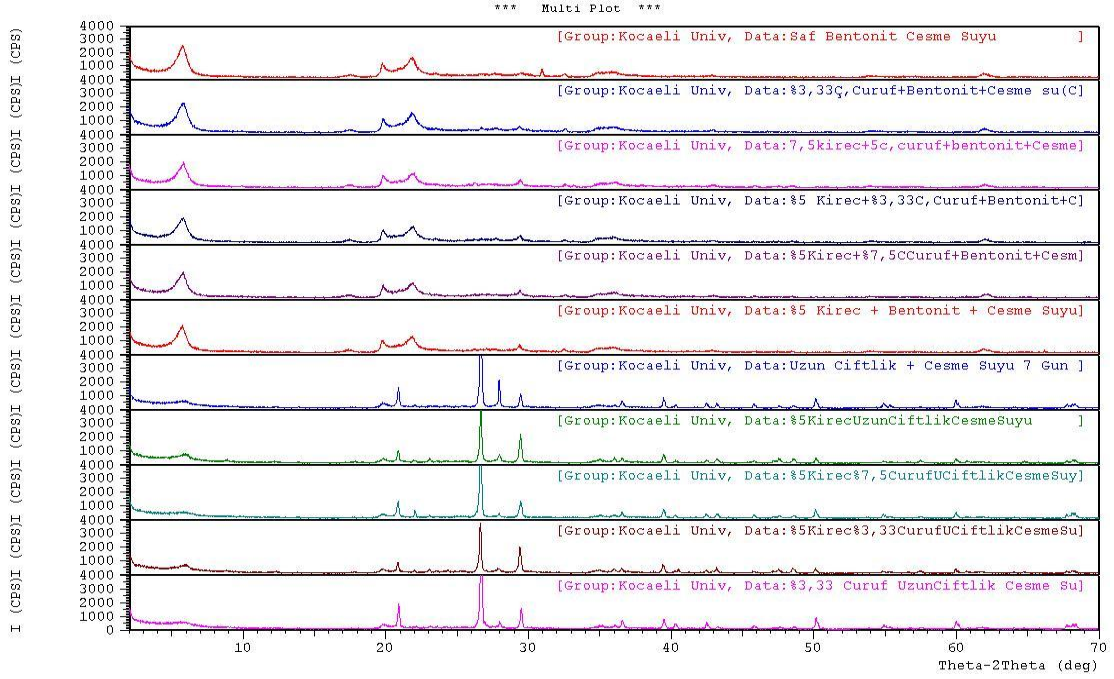
Şekil B.9: 5L3.33BOSBS ve 5L3.33BOSBT numunelerine ait XRD Grafiği



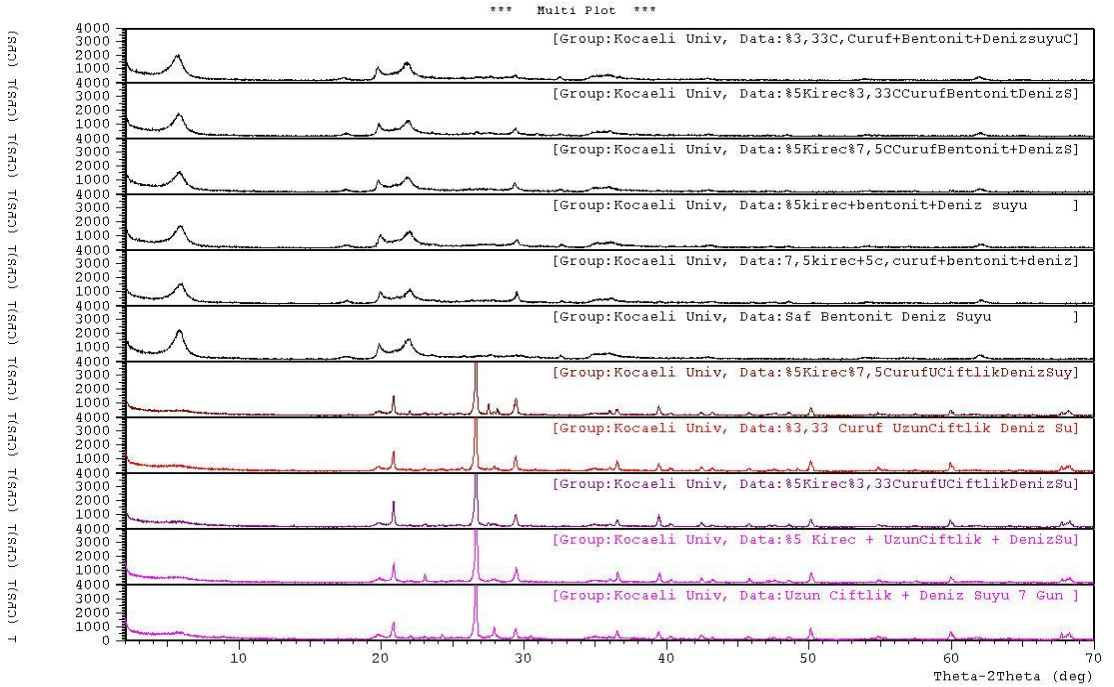
Şekil B.10: 5L7.5BOSBS ve 5L7.5BOSBT numunelerine ait XRD Grafiği



Şekil B.11: 7.5L5BOSBS ve 7.5L5BOSBT numunelerine ait XRD Grafiği

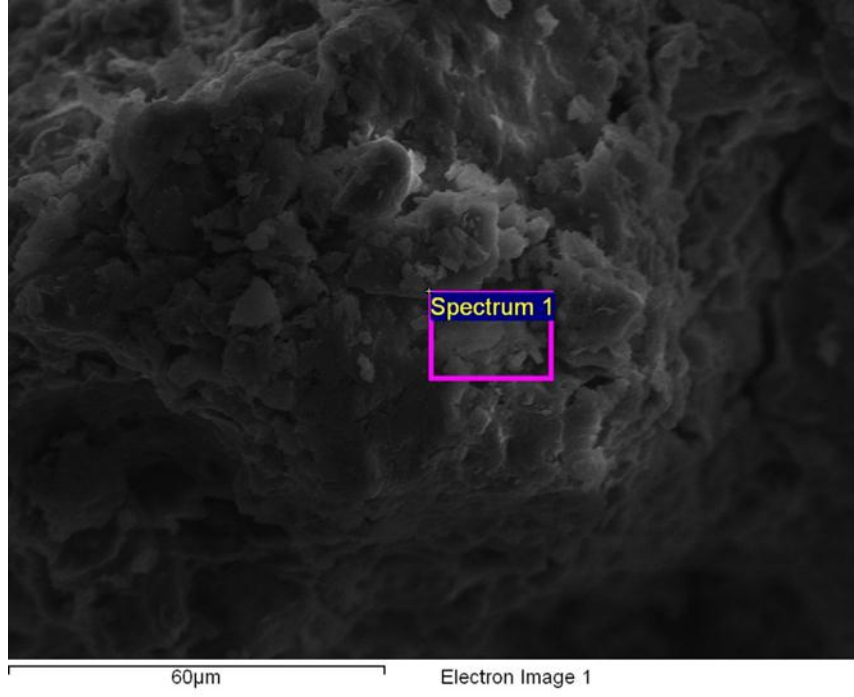


Şekil B.12: Çeşme suyu ile hazırlanmış numunelere ait XRD Grafiği

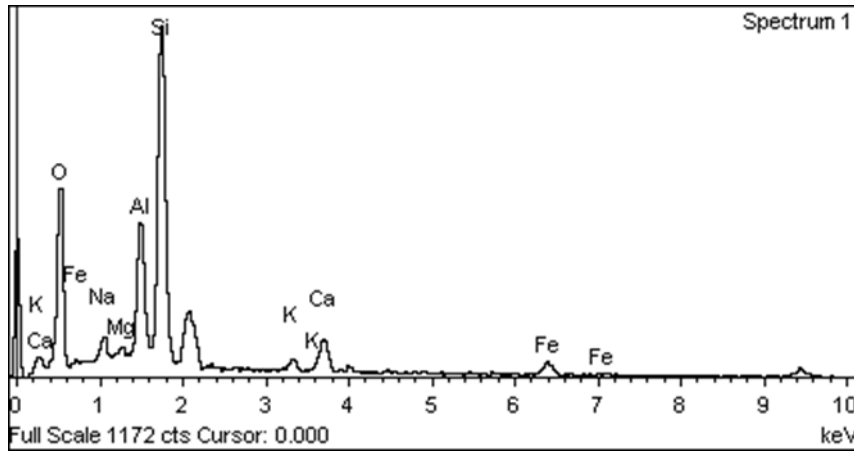


Şekil B.13: Deniz suyu ile hazırlanmış numunelere ait XRD Grafiği

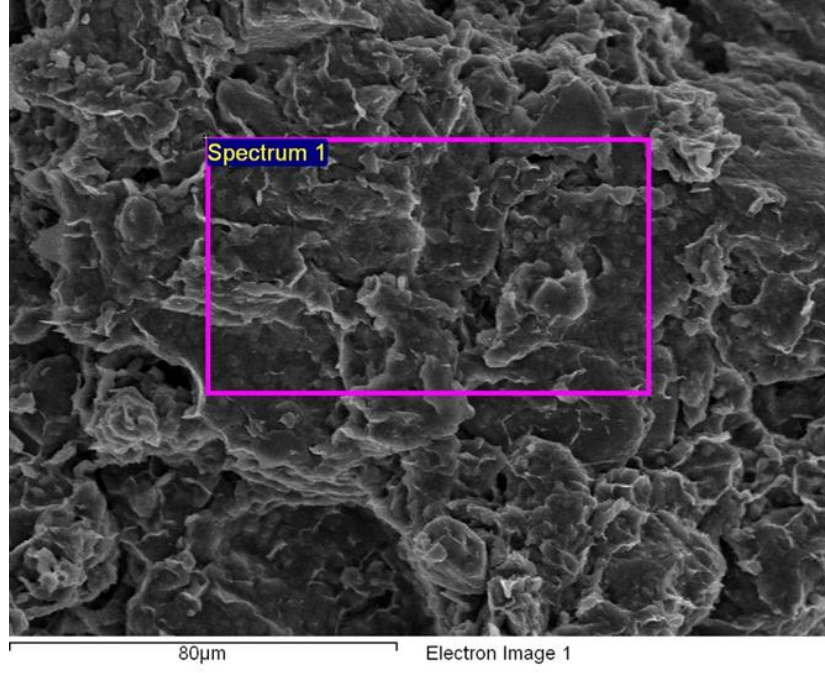
EK-C



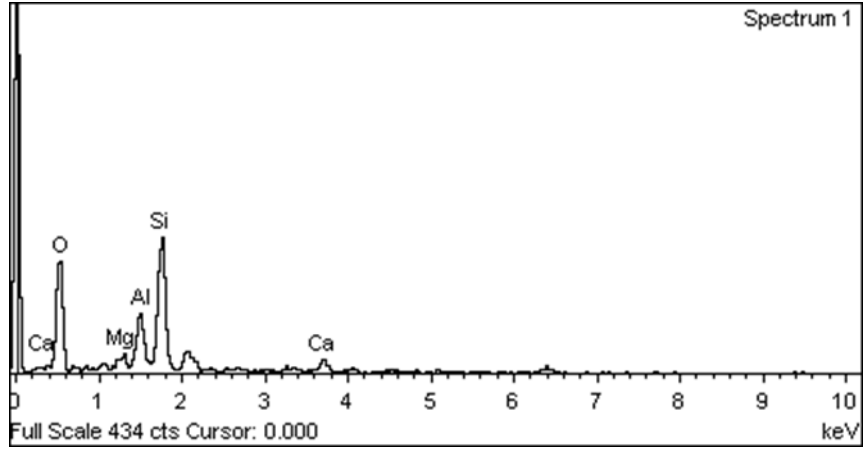
Şekil C.1: 0L0BOSUT numunesine ait SEM görüntüsü



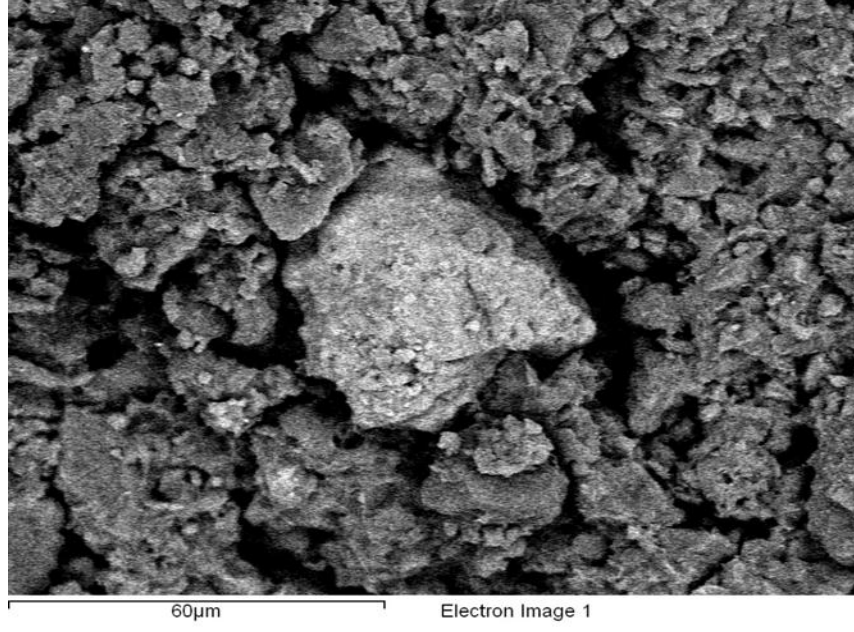
Şekil C.2: 0L0BOSUT numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



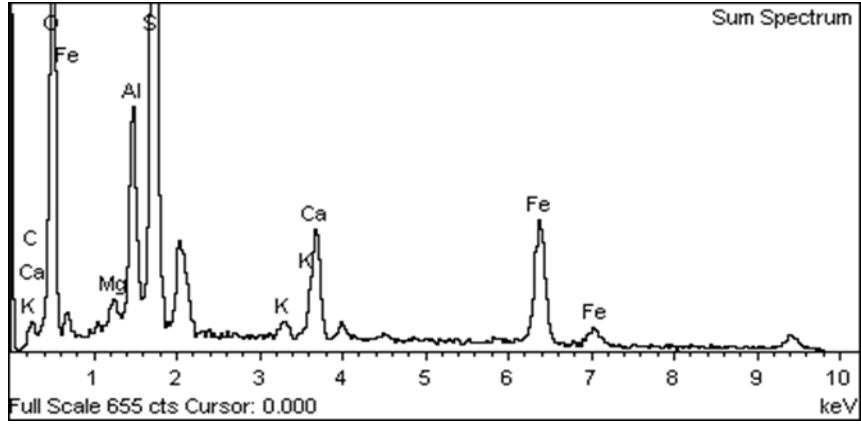
Şekil C.3: 0L0BOSUS numunesine ait SEM görüntüsü



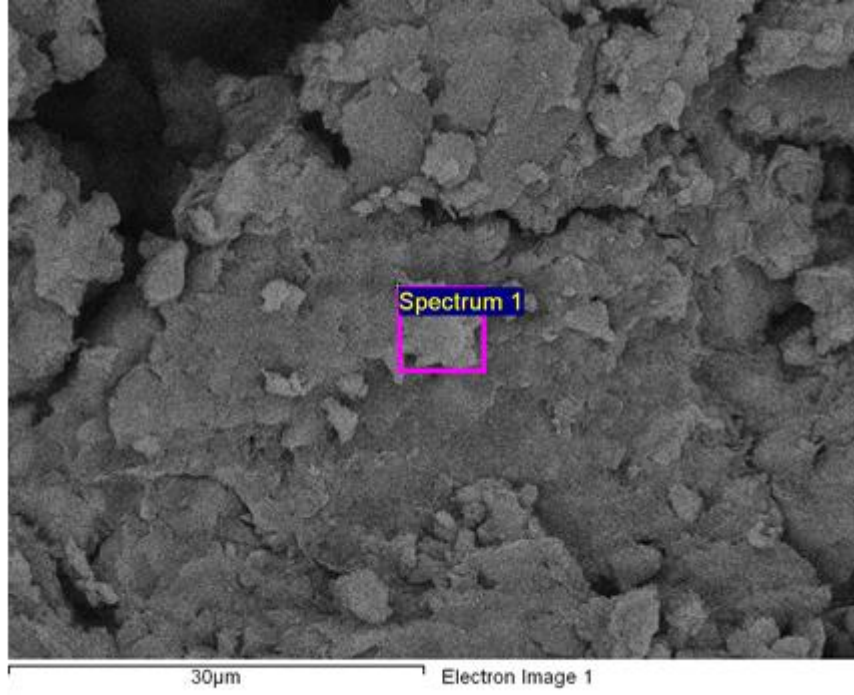
Şekil C.4: 0L0BOSUS numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



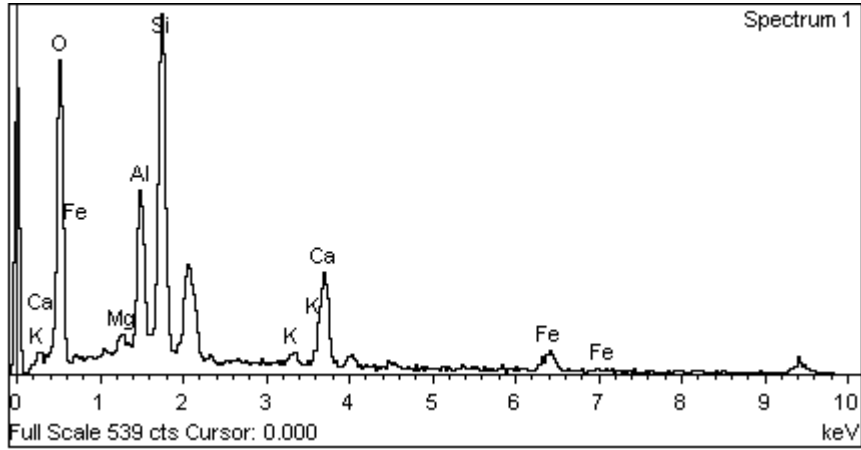
Şekil C.5: 0L3.33BOSUT numunesine ait SEM görüntüsü



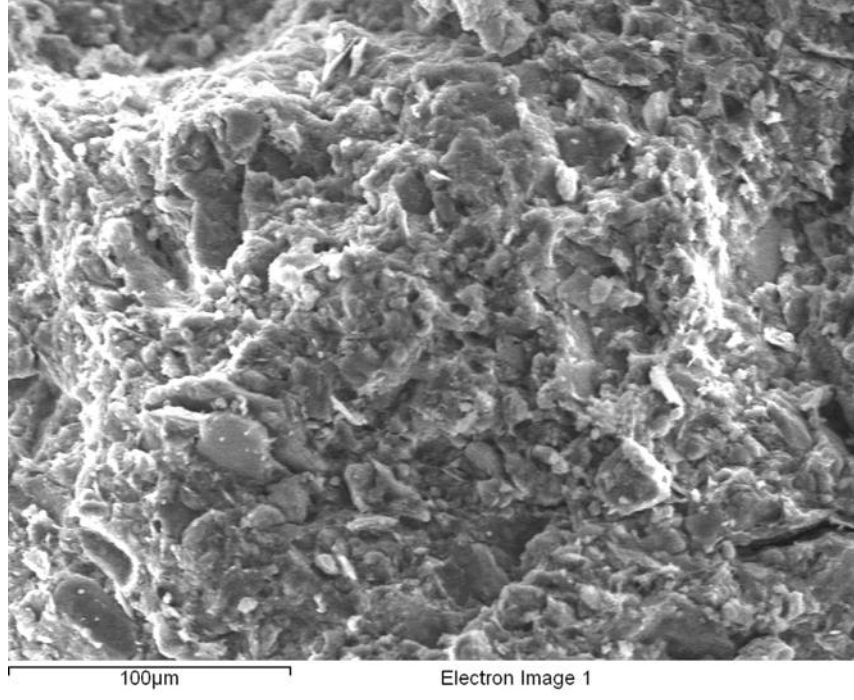
Şekil C.6: 0L3.33BOSUT numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



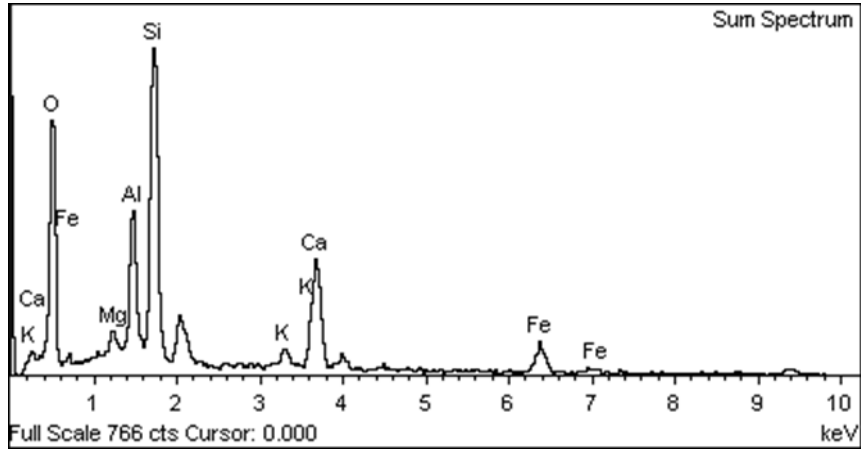
Şekil C.7: 0L3.33BOSUS numunesine ait SEM görüntüsü



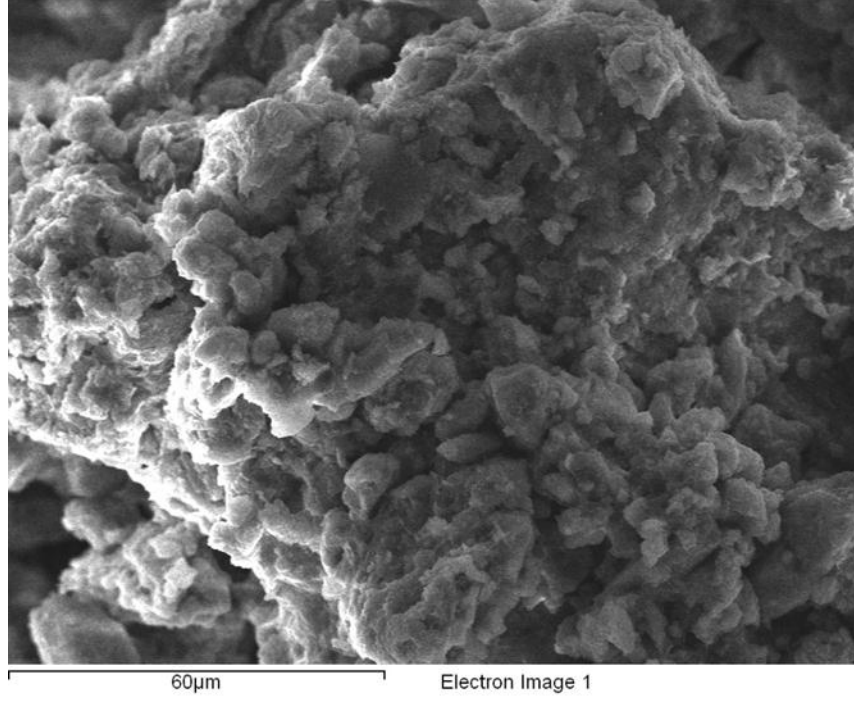
Şekil C.8: 0L3.33BOSUS numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



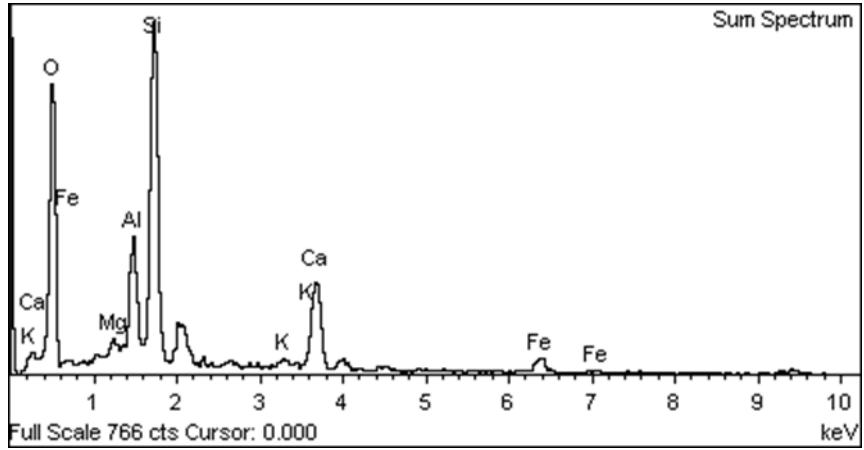
Şekil C.9: 5L0BOSUT numunesine ait SEM görüntüsü



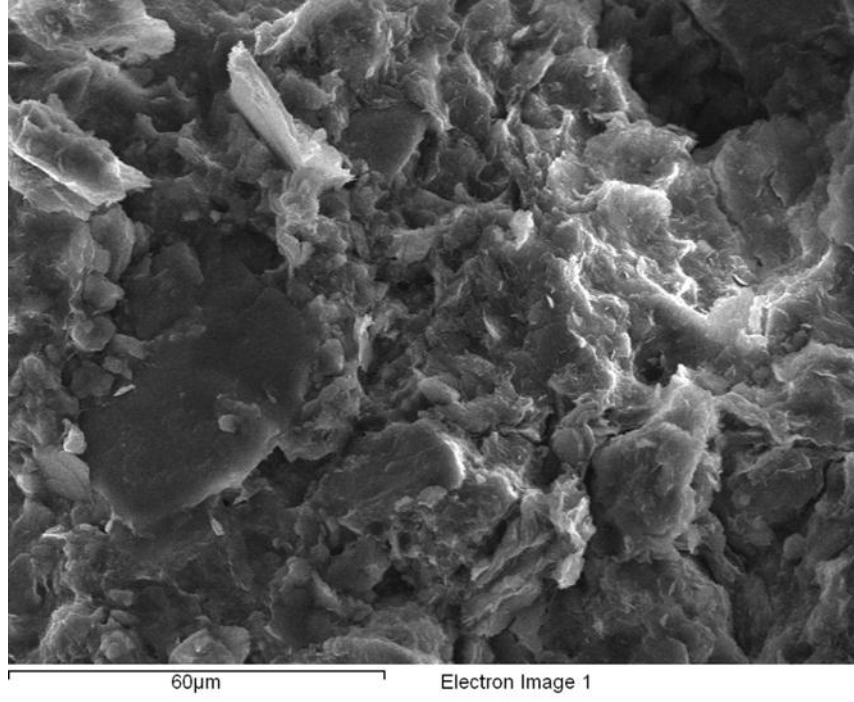
Şekil C.10: 5L0BOSUT numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



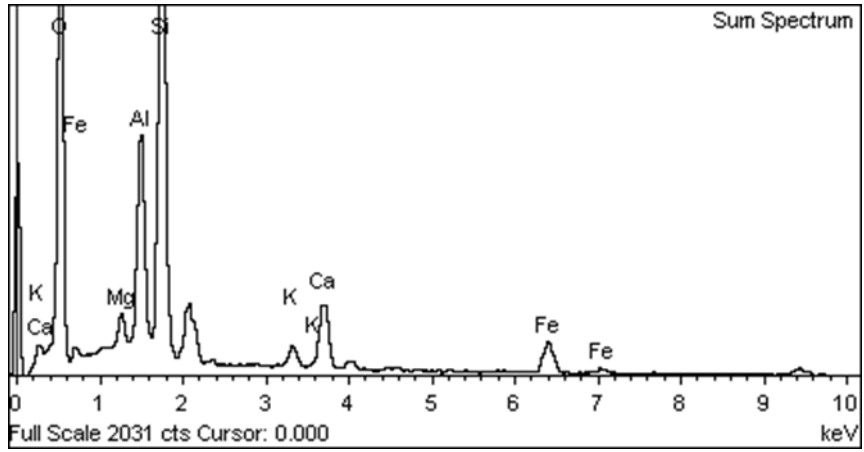
Şekil C.11: 5L0BOSUS numunesine ait SEM görüntüsü



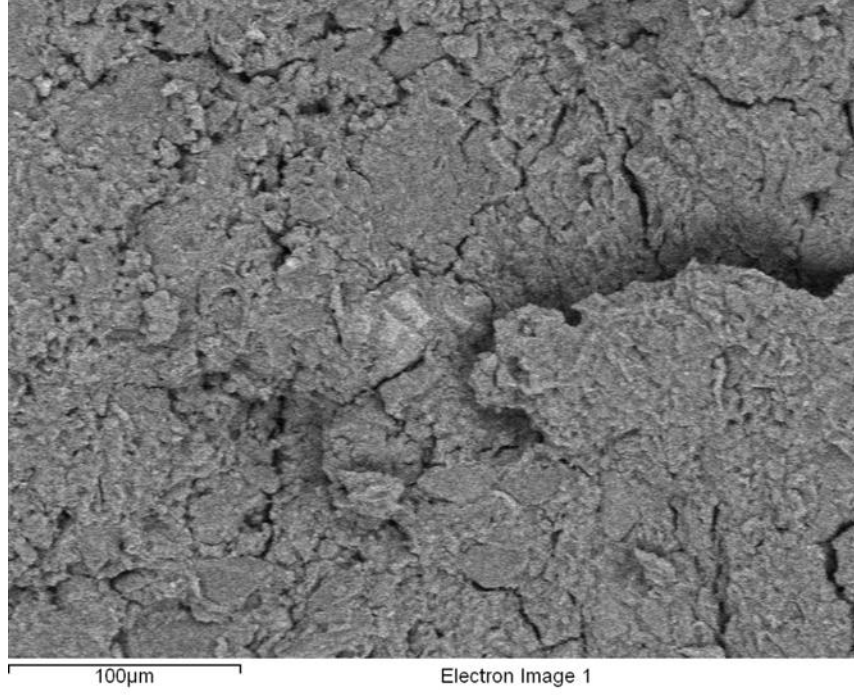
Şekil C.12: 5L0BOSUS numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



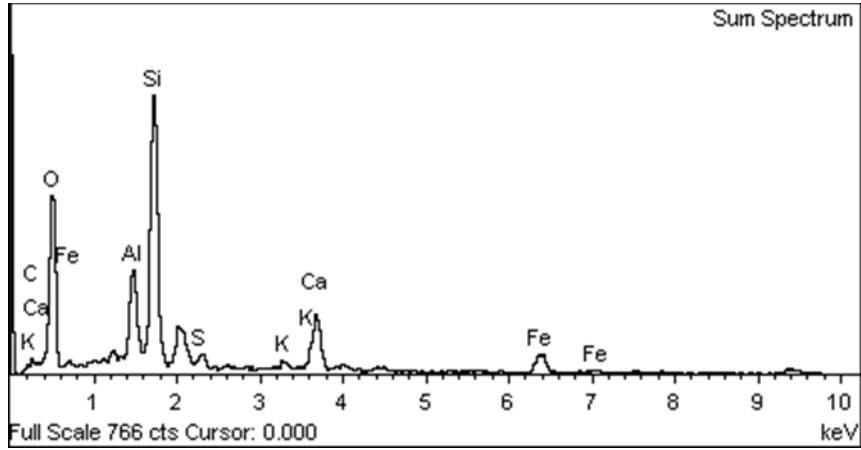
Şekil C.13: 5L3.33BOSUT numunesine ait SEM görüntüsü



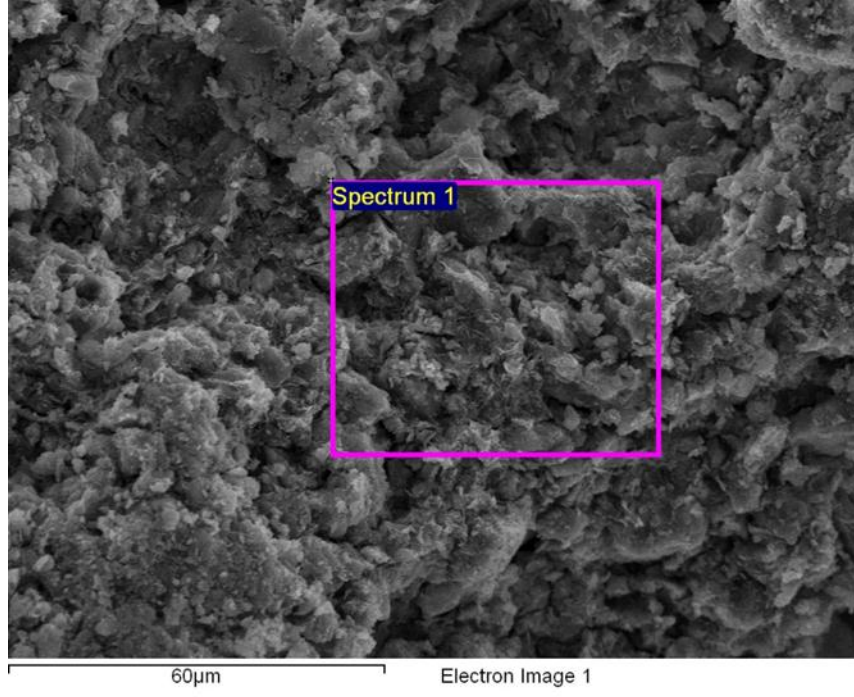
Şekil C.14: 5L3.33BOSUT numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



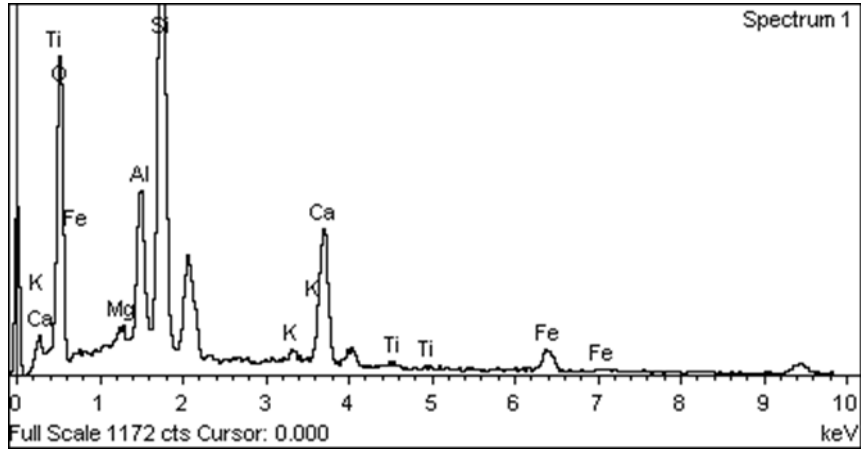
Şekil C.15: 5L3.33BOSUS numunesine ait SEM görüntüsü



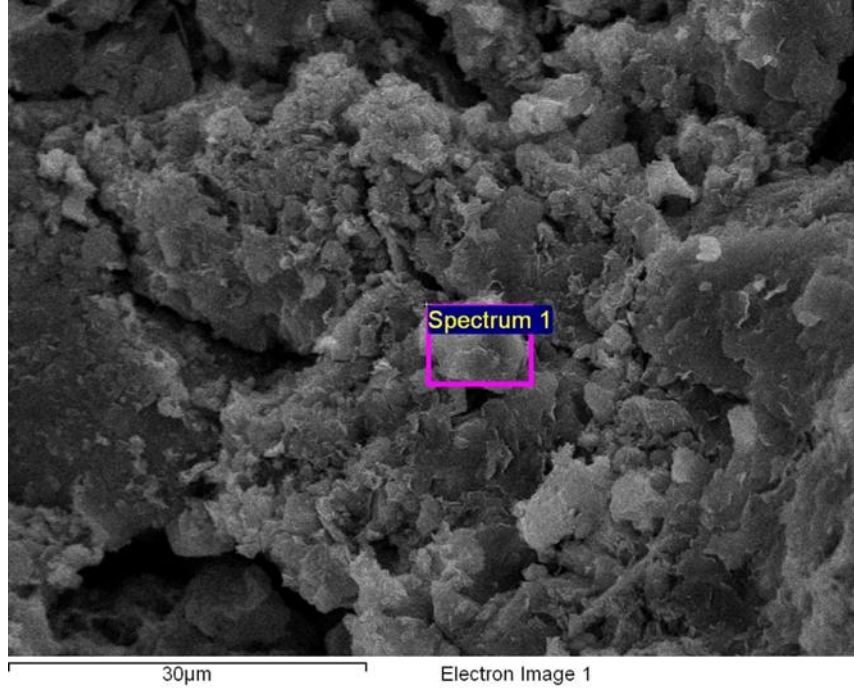
Şekil C.16: 5L3.33BOSUS numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



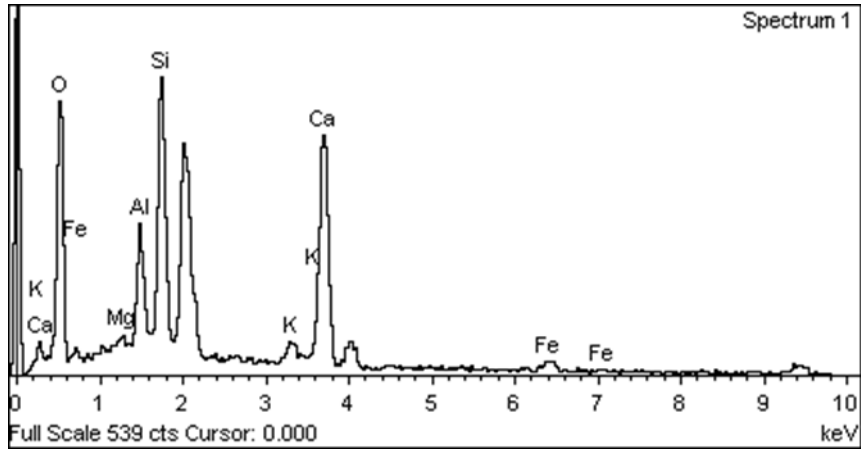
Şekil C.17: 5L7.5BOSUT numunesine ait SEM görüntüsü



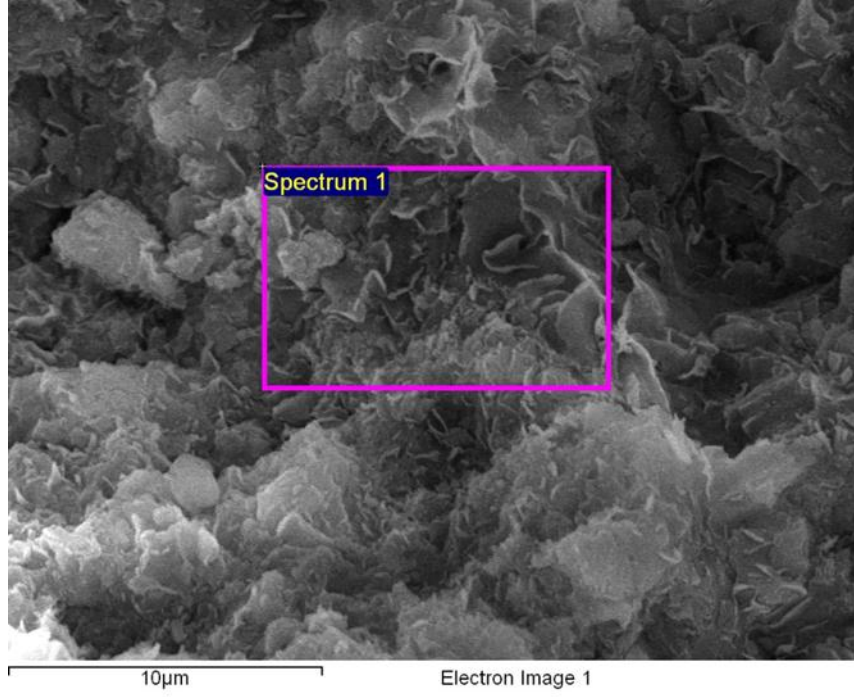
Şekil C.18: 5L7.5BOSUT numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



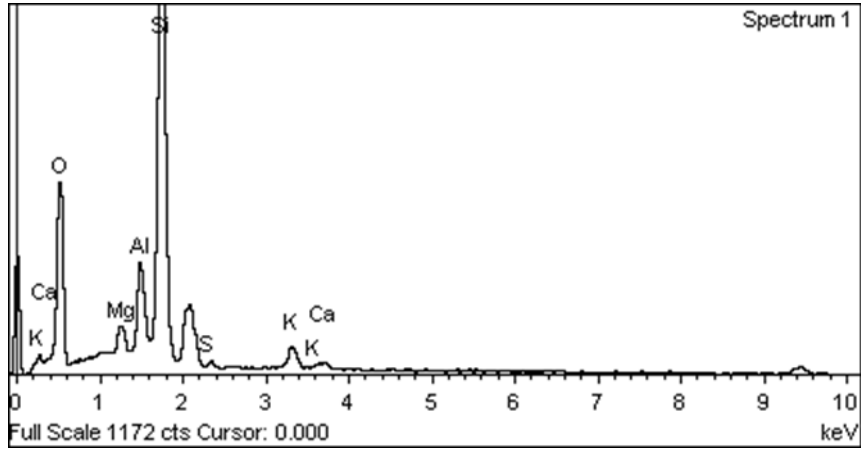
Şekil C.19: 5L7.5BOSUS numunesine ait SEM görüntüsü



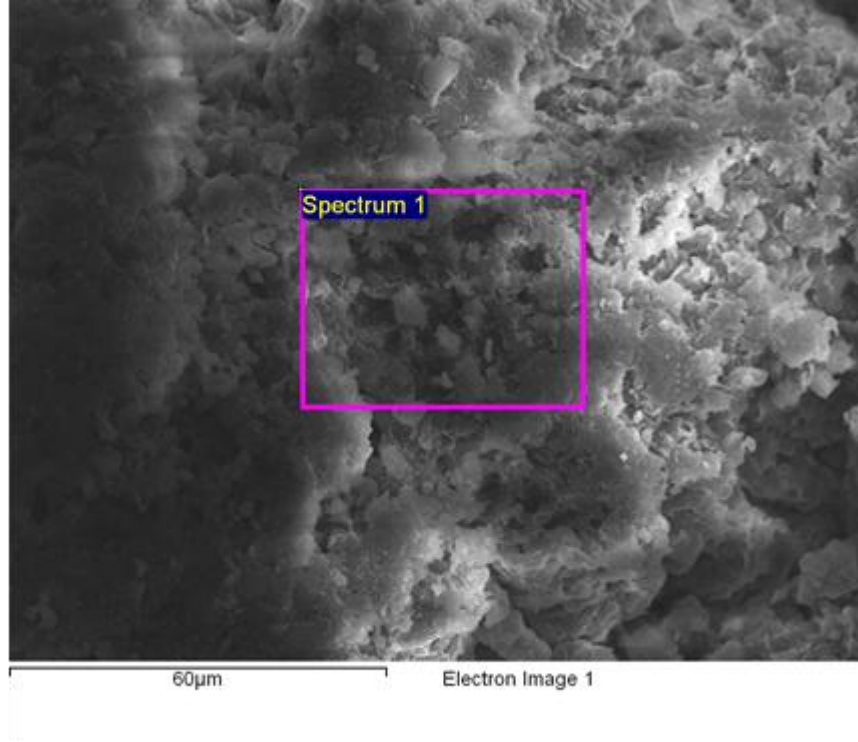
Şekil C.20: 5L7.5BOSUS numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



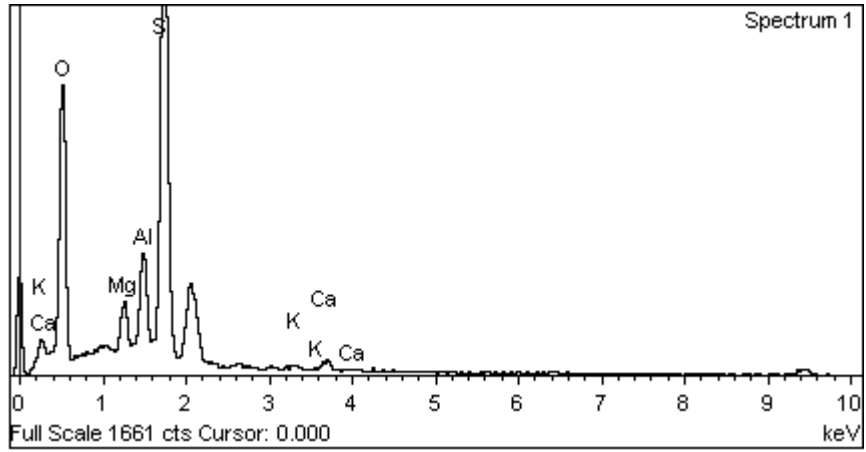
Şekil C.21: 0L0BOSBT numunesine ait SEM görüntüsü



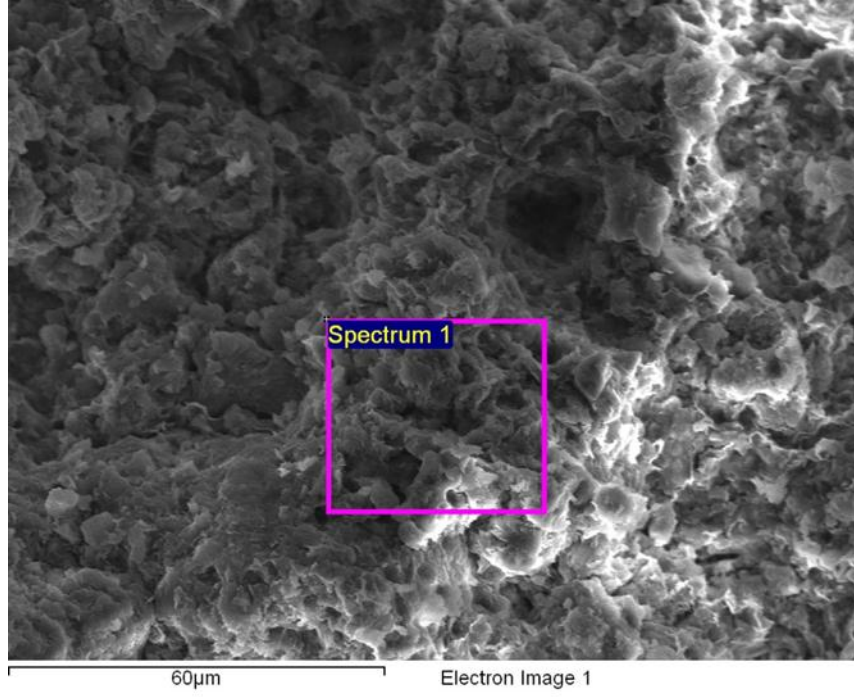
Şekil C.22: 0L0BOSBT numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



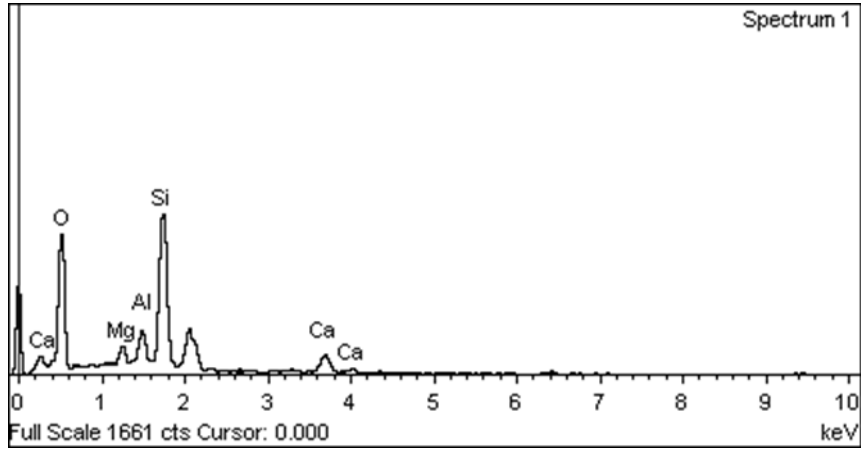
Şekil C.23: 0L0BOSBS numunesine ait SEM görüntüsü



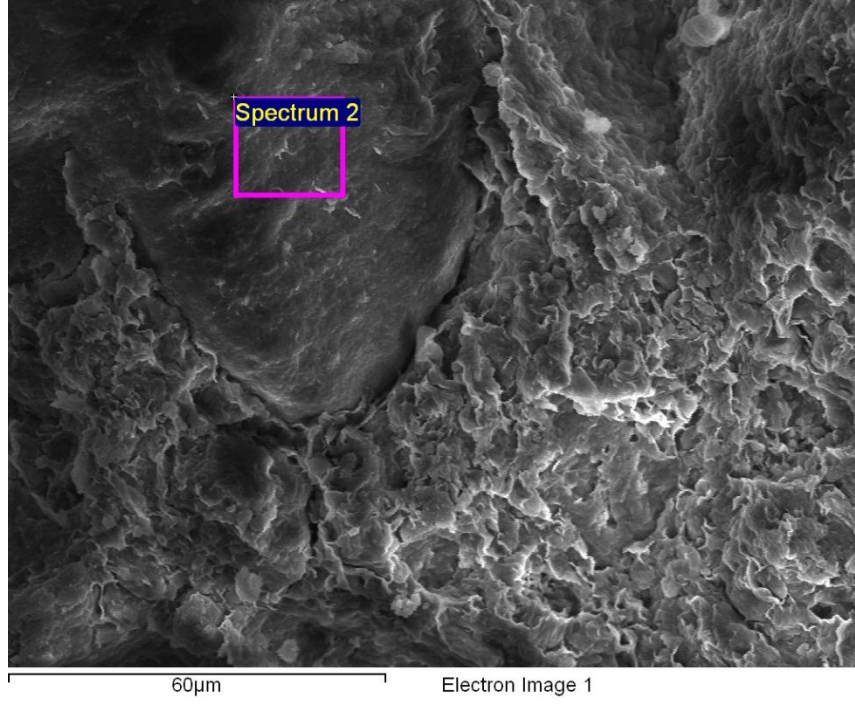
Şekil C.24: 0L0BOSBS numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



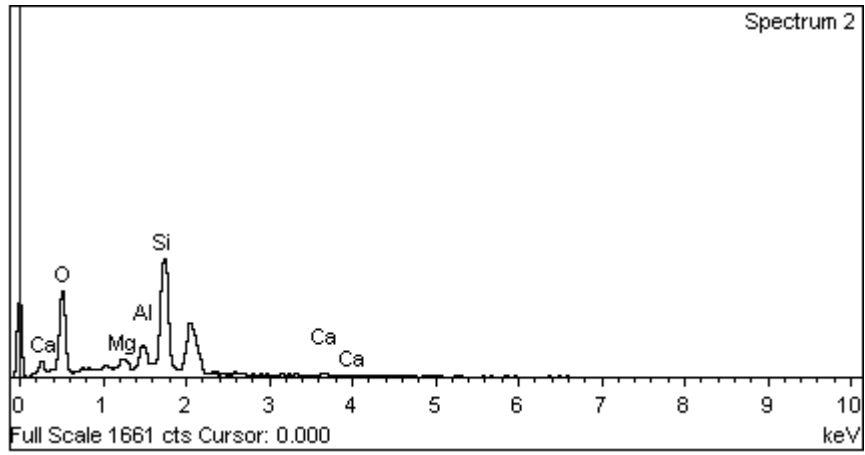
Şekil C.25: 0L3.33BOSBT numunesine ait SEM görüntüsü



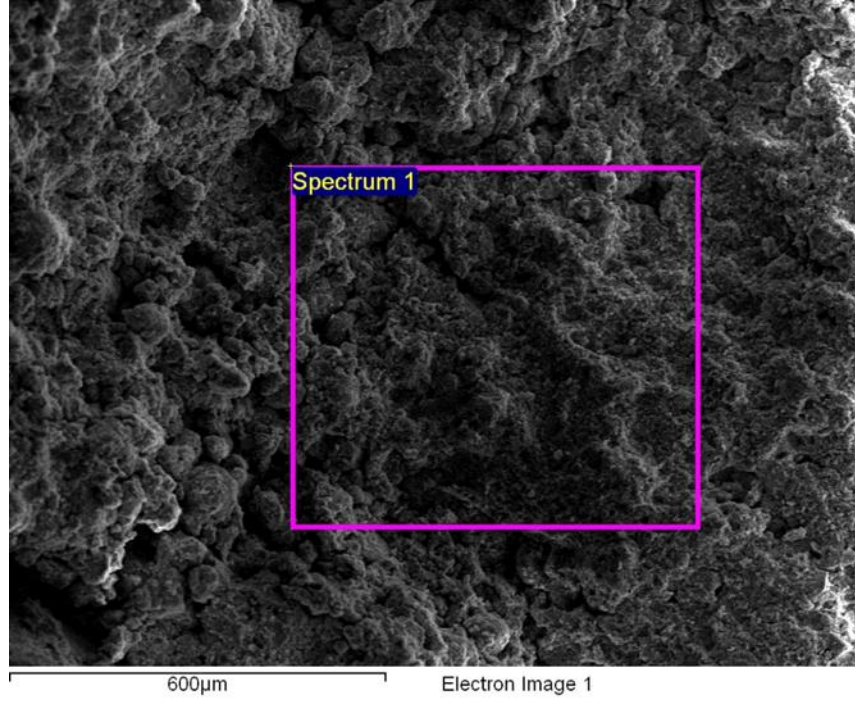
Şekil C.26: 0L3.33BOSBT numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



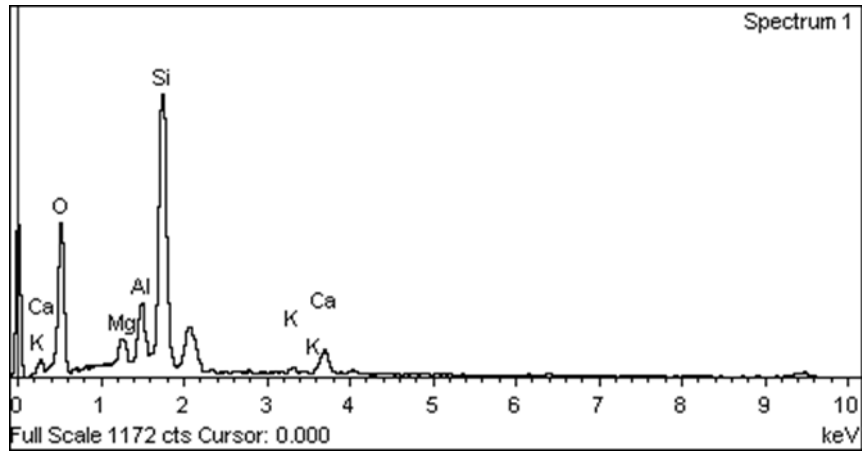
Şekil C.27: 0L3.33BOSBS numunesine ait SEM görüntüsü



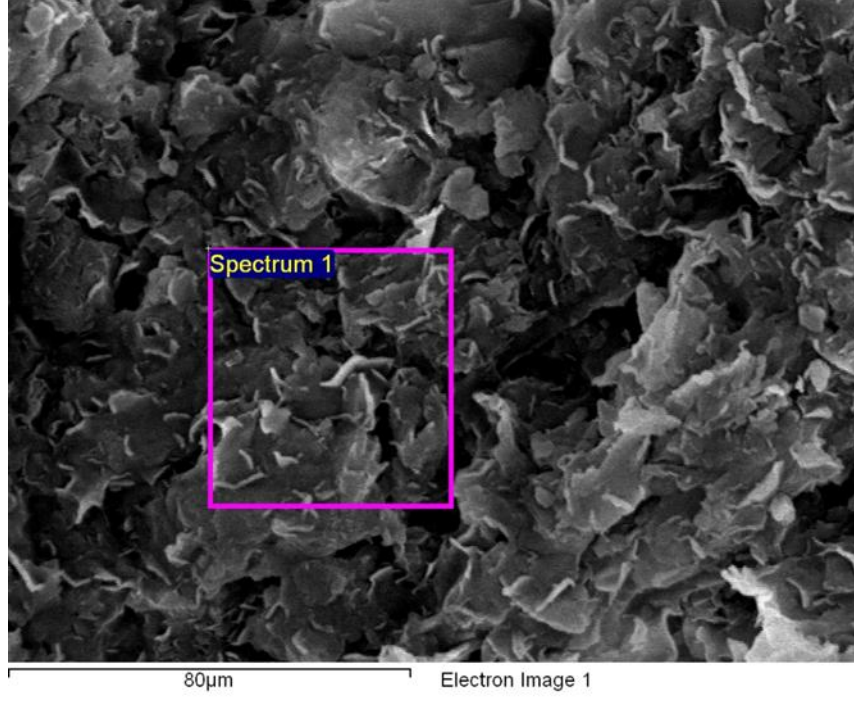
Şekil C.28: 0L3.33BOSBS numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



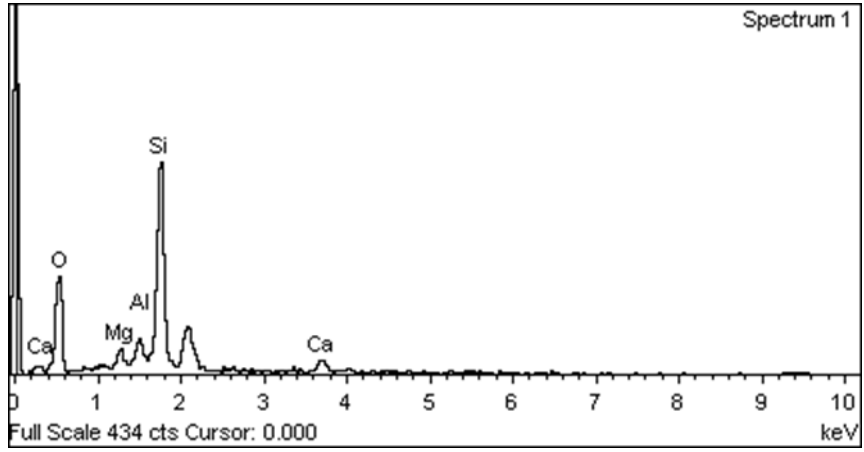
Şekil C.29: 5L0BOSBT numunesine ait SEM görüntüsü



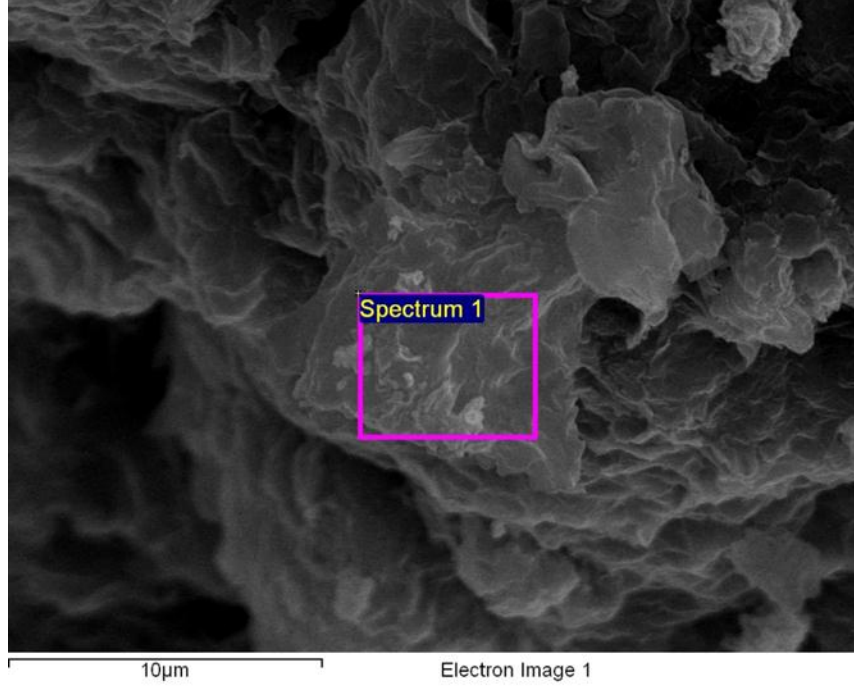
Şekil C.30: 5L0BOSBT numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



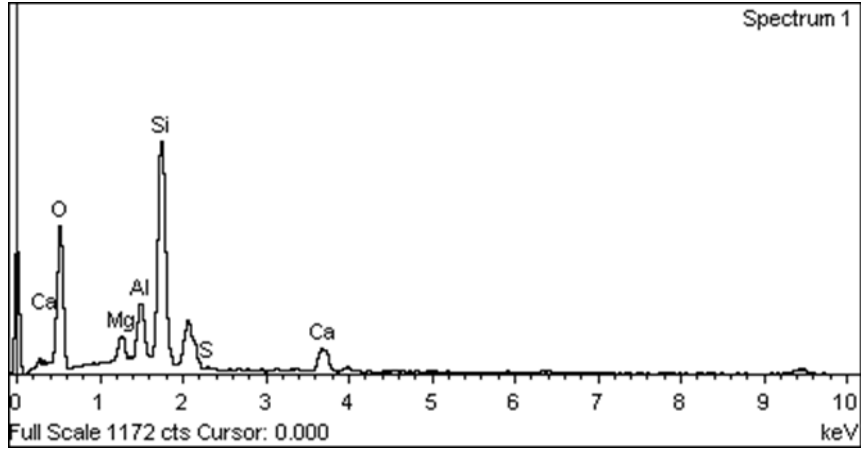
Şekil C.31: 5L0BOSBS numunesine ait SEM görüntüsü



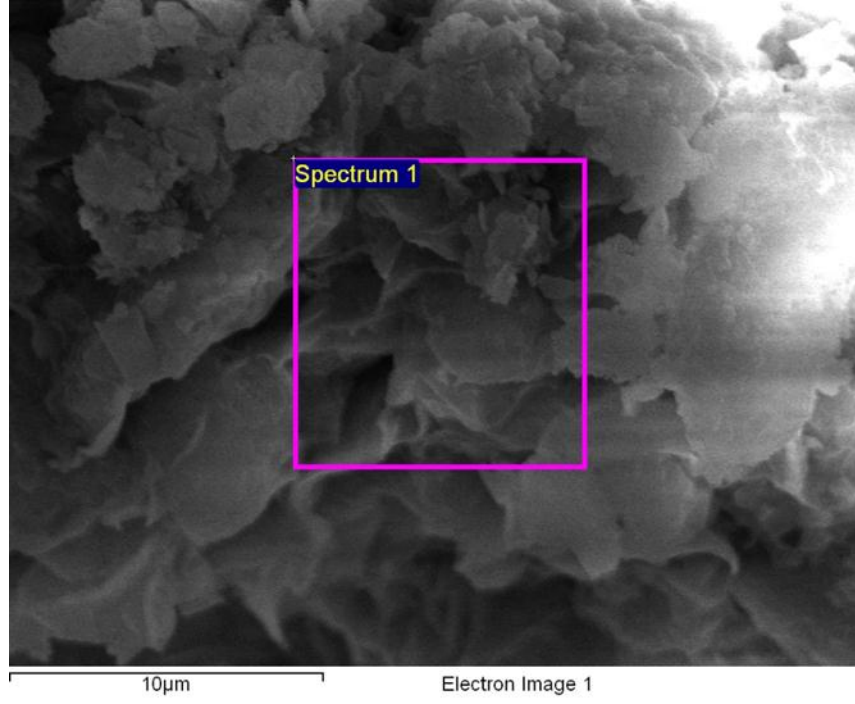
Şekil C.32: 5L0BOSBS numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



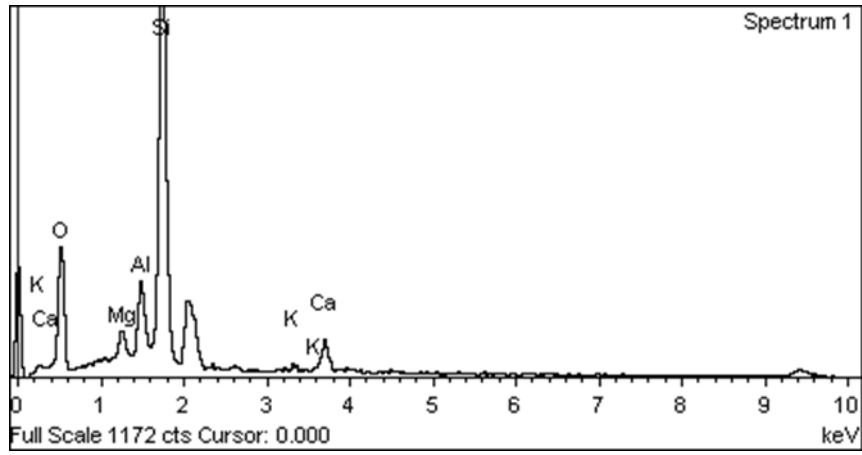
Şekil C.33: 5L3.33BOSBT numunesine ait SEM görüntüsü



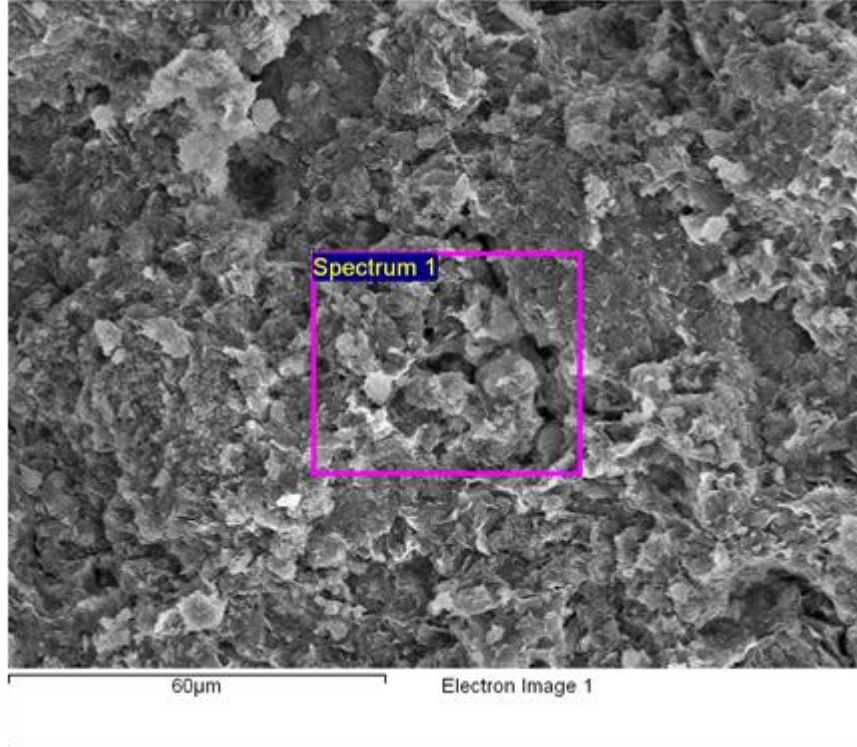
Şekil C.34:5L3.33BOSBT numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



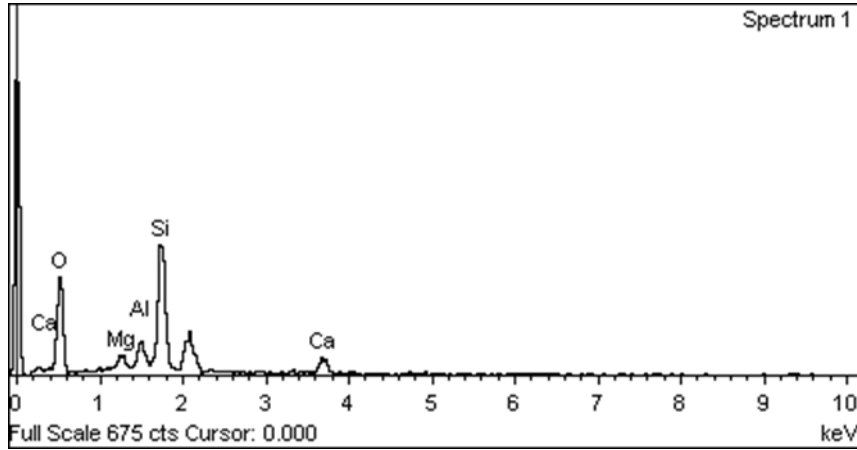
Şekil C.35: 5L3.33BOSBS numunesine ait SEM görüntüsü



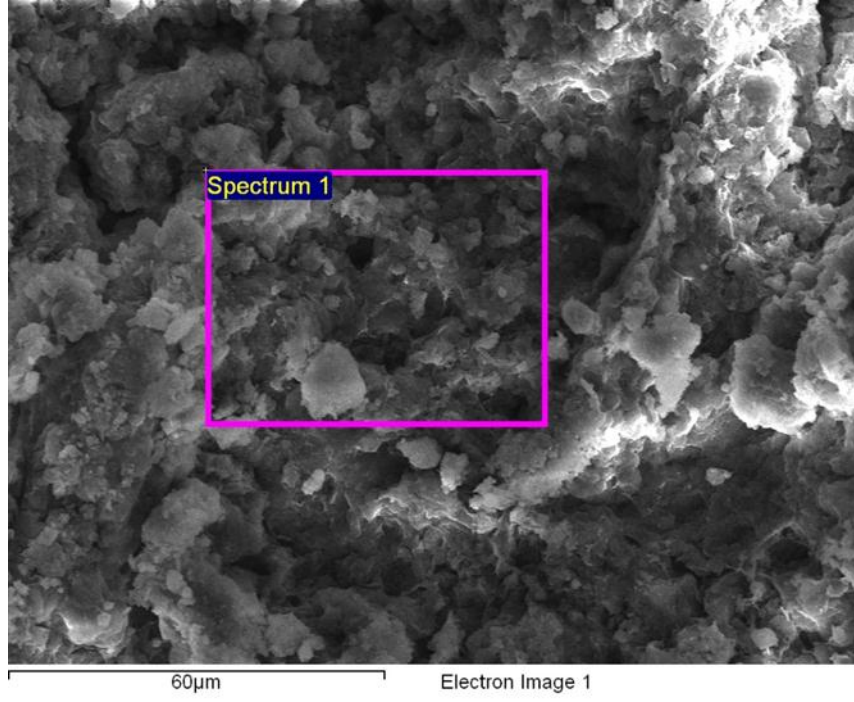
Şekil C.36: 5L3.33BOSBS numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



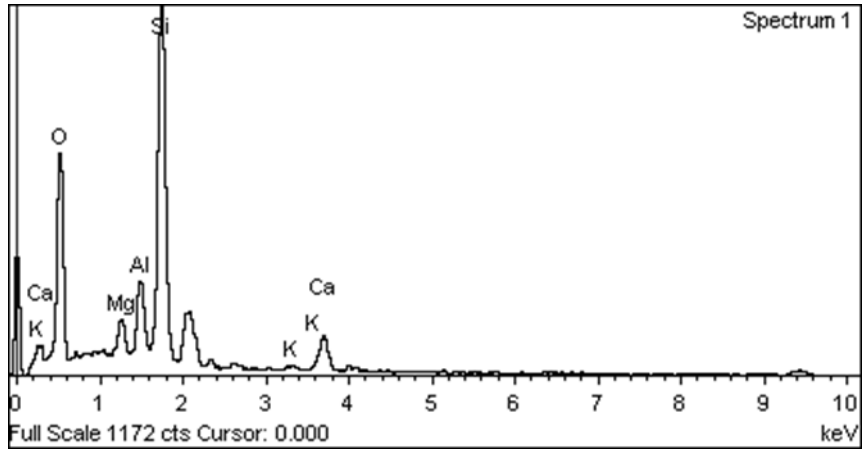
Şekil C.37: 5L7.5BOSBT numunesine ait SEM görüntüsü



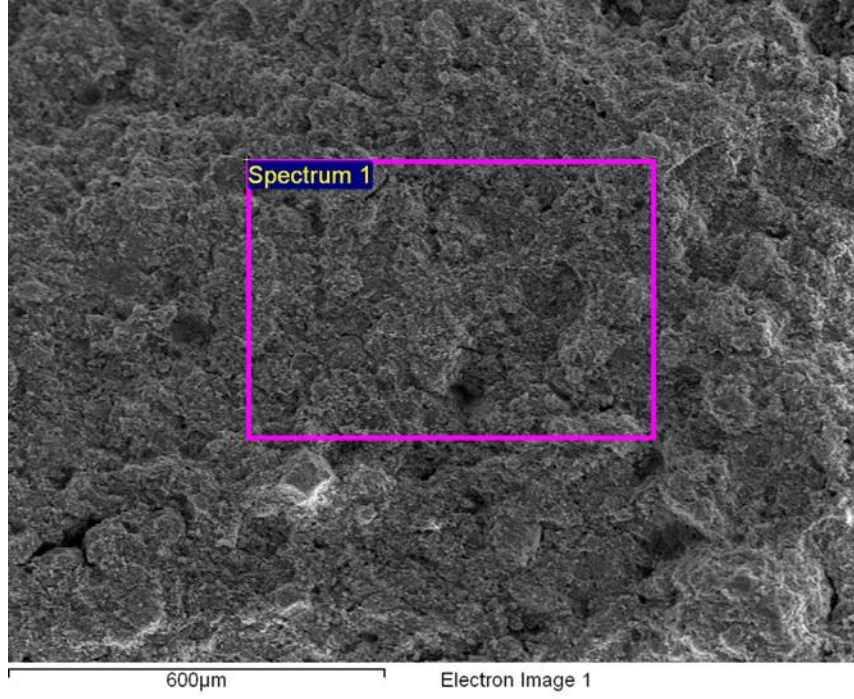
Şekil C.38: 5L7.5BOSBT numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



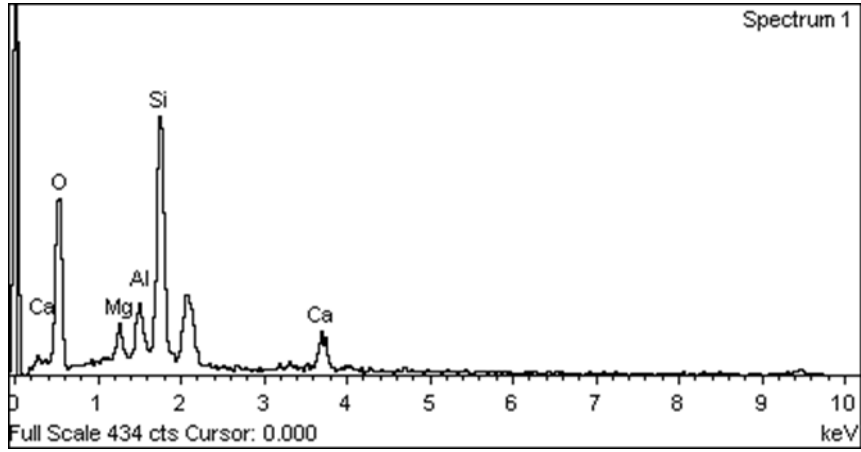
Şekil C.39: 5L7.5BOSBS numunesine ait SEM görüntüsü



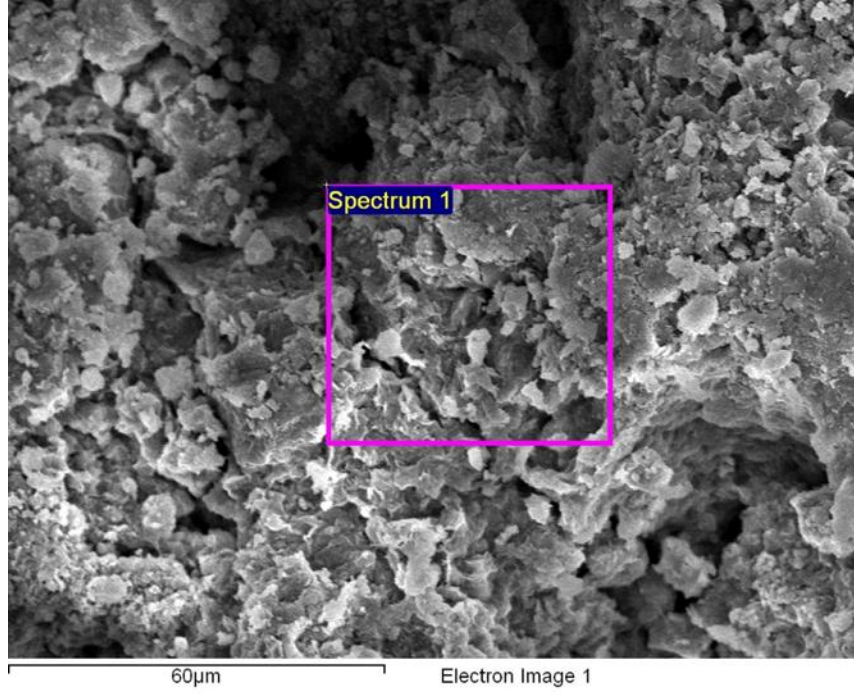
Şekil C.40: 5L7.5BOSBS numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



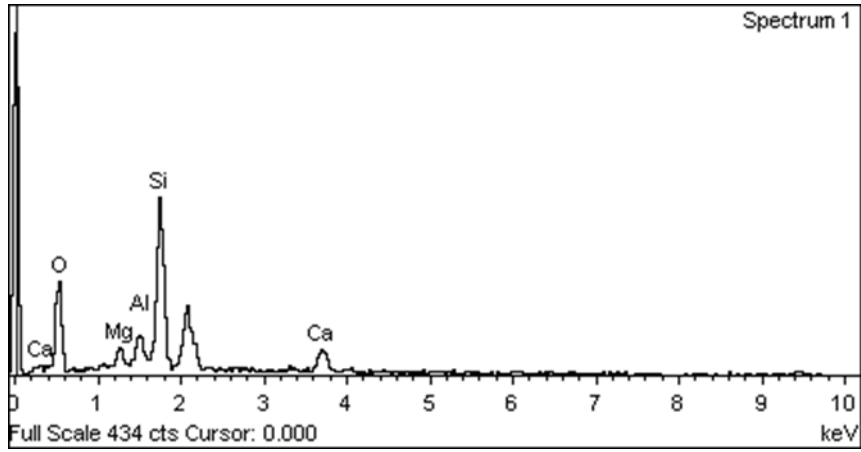
Şekil C.41: 7.5L5BOSBT numunesine ait SEM görüntüsü



Şekil C.42: 7. 5L5BOSBT numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler



Şekil C.43: 7.5L5BOSBS numunesine ait SEM görüntüsü



Şekil C.44: 7. 5L5BOSBS numunesine ait SEM görüntüsüne ait pikler

ÖZGEÇMİŞ

Adana’ da 1972 yılın da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Adana’da tamamladı. 1994 yılında Anadolu Üniversite Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Bölümü’ nden mezun oldu. 2001 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı’ ndan 2004 yılında mezun oldu. 1995-1999 yılları arasında Adana’ da şantiye şefi olarak çalıştı. 1999 yılından bu yana Karaelmas Üniversite Alaplı Meslek Yüksek Okulu’ nda Öğretim Görevlisi olarak görev almaktadır.