**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

# BENTONİT VE KAOLİN KİLLERİNİN KOLEMANİT MİNERALİ İLE STABİLİZASYONU

**CANSU BOSBIYIK**

**KOCAELİ 2020**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

# BENTONİT VE KAOLİN KİLLERİNİN KOLEMANİT MİNERALİ İLE STABİLİZASYONU

**CANSU BOSBIYIK**

| | | |
|---|---|---|
| **Doç. Dr. Utkan MUTMAN** | | |
| **Danışman,** | **Kocaeli Üniv.** | **.....** |
| **Prof. Dr. Safa Bozkurt COŞKUN** | | |
| **Jüri Üyesi,** | **Kocaeli Üniv.** | **.....** |
| **Prof. Dr. Niyazi Uğur TERZİ** | | |
| **Jüri Üyesi,** | **Aksaray Üniv.** | **.....** |

**Tezin Savunulduğu Tarih: 03.09.2020**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışma kapsamında, yüksek plastisite özelliğine sahip bentonit ile düşük plastisite özelliği gösteren kaolin killerinin mühendislik özelliklerinin, bor madeninin yaygın olarak kullanılan, stratejik ve ticari öneme sahip mineral çeşitlerinden biri olan kolemanit ile iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bentonit ve kaolin killerinin laboratuvar deneyleri ile kıvam limitleri, sıkışabilirlik, taşıma gücü parametreleri belirlenerek mühendislik özellikleri ortaya konulmuştur. İlgili killerin kolemanit mineralinin belirlenen oranlarda katkı maddesi olarak kullanılmasıyla mühendislik parametrelerinde meydana gelen değişimler gözlemlenerek, uygun ve etkin stabilizasyon sağlayıp sağlamayacağı ve kolemanit mineralinin katkı malzemesi olarak hangi oranlarda kullanılmasıyla, nicelik ve nitelik olarak en elverişli performansı sağladığını belirlemek için Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği, Geoteknik Anabilim Dalı laboratuvarında geoteknik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu yüksek lisans tezi laboratuvar çalışmaları ile yüksek ve düşük plastisite özelliğine sahip killerin katkı maddeleri kullanılmasıyla mühendislik parametrelerinin kıyaslanabilmesi, bor minerallerinin stabilizasyonda kullanılabilirliğine yüksek ve düşük plastisite özelliğine sahip killerin davranışlarının öngörülmesi ve yorumlanabilmesine ve son yıllarda büyük bir öneme sahip olan bor madeninin kullanım alanlarına yeni bir saha eklenebileceğine katkı sağlayacağı kanısındayım.

Deneysel çalışmalarımın organizasyonu ve yönetimini sağlayan, bu alanda çalışma fırsatı veren, yüksek lisans laboratuvar ve tez çalışmam süresince yanımda olan kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Utkan MUTMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar deneylerinde kullanılan bentonit kilinin temini için, Eczacıbaşı- Esan Endüstriyel Maddeler San. Tic. A.Ş. ve katkı maddesi olarak seçilen kolemanit mineralinin temanini sağlayan ETİ Maden Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü 'ne teşekkürlerimi sunarım.

Akademik çalışmalarım boyunca ilgi ve bilgileriyle tezime yön veren, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen meslektaşlarım İnşaat Yüksek Mühendisi Merve BULUT'a, İnşaat Mühendisi Muhammed KILIÇ'a ve Mimar Ahsen YÜKSEL'e sonsuz şükranlarımı sunarım.

Hayatım boyunca her koşul ve durumda, her türlü desteklerini hissettiğim, her zaman fedakarlıkla yanımda olan aileme minnetlerimi sunarım.

Ağustos - 2020 Cansu BOSBIYIK

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR ..... i
İÇİNDEKİLER ..... ii
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... v
TABLOLAR DİZİNİ ..... ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... x
ÖZET ..... ..xii
ABSTRACT ..... xiii
GİRİŞ ..... 1
1. AMAÇ VE TEZİN ORGANİZASYONU ..... 6
1.1. Zemin Stabilizasyonu İle İlgili Literatür Çalışması ..... 7
1.2. Katkı Malzemeleri İle Zemin Iyileştirme Çalışmalarına Örnekler ..... 30
2. ZEMİN OLUŞUMU VE ZEMİN STABİLİZASYONU ..... 41
2.1. Zemin Oluşumu ..... 41
2.1.1. Yerinde oluşmuş zeminler (residüel) ..... 41
2.1.2. Taşınmış zeminler (transported) ..... 42
2.2. Zemin Sınıflandırması ve Zemin Türleri ..... 43
2.2.1. Zemin sınıflandırması ..... 43
2.2.2. Zemin türleri ..... 44
2.3. Killer ve Mineralleri ..... 45
2.3.1. Killerin oluşumu ..... 45
2.3.2. Killerin sınıflandırılması ..... 47
2.3.2.1. Kaolinit grubu kil mineralleri ..... 47
2.3.2.2. Klorit grubu kil mineralleri ..... 48
2.3.2.3. İllit gubu kil mineralleri ..... 49
2.3.2.4. Montmorillonit grubu kil mineralleri ..... 50
2.4. Killerin Şişme Özelliği ..... 50
2.5. Zemin Stabilizasyonu ..... 53
2.5.1. Zeminlerde mekanik ve kimyasal iyileştirme yöntemleri ..... 55
2.5.1.1. Mekanik iyileştirme yöntemi ..... 54
2.5.1.2. Kimyasal iyileştirme yöntemi ..... 57
2.5.1.3. Stabilizatör seçimi ..... 59
2.5.2. Killi zeminlerde katkı maddesi ile iyileştirme ..... 62
2.5.2.1. Kireç ile stabilizasyon ..... 63
2.5.2.2. Çimento ile stabilizasyon ..... 66
2.5.2.3. Uçucu kül stabilizasyonu ..... 70
2.5.2.4. Bitüm ile stabilizasyon ..... 71
2.6. Bor Elementi ..... 72
2.6.1. Bor elementi ve oluşumu ..... 72
2.6.2. Bor elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri ..... 74
2.6.3. Bor madeninin tarihçesi ..... 76
2.6.4. Türkiye'de bor madeninin tarihi ..... 77
2.6.5. Dünya'da bor madenin gelişimi ..... 78

2.6.6. Türkiye'de bor madeninin gelişimi ..... 80
2.6.7. Bor madeni ve mineral çeşitleri ..... 80
2.6.8. Bor madeninin kullanım alanları ..... 83
3. MATERYAL, YÖNTEM VE HESAPLAMALAR ..... 86
3.1. Deneysel Çalışmalar ..... 86
3.1.1. Deney numunelerinin hazırlanması ve isimlendirilmesi ..... 86
3.1.2. Deneysel çalışmaların şeması ..... 89
3.1.3. Deneylerde referans alınan standartlar ..... 89
3.2. Materyaller ..... 90
3.2.1. Bentonit kili ve özellikleri ..... 90
3.2.2. Kaolin kili ve özellikleri ..... 93
3.2.3. Kolemanit minerali ..... 95
3.3. Yöntem ..... 98
3.3.1. Kıvam (atterberg) limitlerinin belirlenmesi ..... 99
3.3.1.1. Likit limit deneyi ..... 100
3.3.1.2. Plastik limit deneyi ..... 102
3.3.2. Kompaksiyon deneyi ..... 104
3.3.3. Serbest basınç deneyi ..... 107
4. BULGULAR VE TARTIŞMA ..... 111
4.1. Atterberg (Kıvam) Limitleri Bulguları ve İrdelenmesi ..... 112
4.2. Kompaksiyon Deneyi Bulguları ve İrdelenmesi ..... 121
4.3. Serbest Basınç Deneyi Bulguları ve İrdelenmesi ..... 134
4.3.1. Bentonit kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları ..... 136
4.3.1.1. Saf bentonit kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları ..... 136
4.3.1.2. %8 Kolemanit bentonit kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları ..... 137
4.3.1.3. %2 kolemanit katkılı bentonit kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları ..... 140
4.3.1.4. %4 kolemanit katkılı bentonit kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları ..... 142
4.3.1.5. %6 kolemanit katkılı bentonit kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları ..... 143
4.3.1.6. %10 kolemanit katkılı bentonit kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları ..... 145
4.4. Kaolin Kili Serbest Basınç Dayanım Deneyi Bulguları ..... 147
4.4.1. Saf kaolin kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları ..... 147
4.4.1.1. %2 kolemanit katkılı kaolin kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları ..... 149
4.4.1.2. %4 kolemanit katkılı kaolin kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları ..... 150
4.4.1.3. %6 kolemanit katkılı kaolin kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları ..... 152
4.4.1.4. %8 kolemanit katkılı kaolin kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları ..... 153
4.4.1.5. %10 kolemanit katkılı kaolin kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları ..... 154
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 158
KAYNAKLAR ..... 164

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER ..... 175
ÖZGEÇMİŞ ..... 176

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Zemin profilinin şematik gösterimi ..... 41
Şekil 2.2. Jeolojik dönüşüm çemberi ..... 42
Şekil 2.3. Plastisite grafiğinde bölgeler..... 44
Şekil 2.4. Kaolin minerali ..... 48
Şekil 2.5. Klorit minerali..... 49
Şekil 2.6. İllit minerali ..... 49
Şekil 2.7. Montmorillonit minerali ..... 50
Şekil 2.8. Kil-elektrolit sistemi içinde anyon ve katyonların dağılımı a) Suyun dipolar karakteri b) Diffüz çift tabakada dipolar moleküllerin çekimi..... 51
Şekil 2.9. Spesifik yüzey kavramı..... 52
Şekil 2.10. Sahada mekanik stabilizasyon uygulamaları ..... 56
Şekil 2.11. Kompaksiyon eğrisi ..... 57
Şekil 2.12. Zemin stabilizasyon uygulamaları ..... 58
Şekil 2.13. Zemin stabilizasyonu uygulama örneği ..... 58
Şekil 2.14. Zemin gradasyon üçgeni ..... 60
Şekil 2.15. Kireç içeriğinin zemin tiplerine etkisi..... 64
Şekil 2.16. Serbest basınç mukavemeti ile çimento içeriği ilişkisi ..... 67
Şekil 2.17. Bor mineralinin periyodik cetveldeki yeri ..... 73
Şekil 2.18. Bor mineralinin oluşumu ..... 74
Şekil 2.19. Dünya bor üretiminin bölgelere göre dağılımı (B2O3 bazda, %(Etimaden)..... 79
Şekil 2.20. Bor mineralinin ticari kullanım alanları (Etimaden)..... 83
Şekil 3.1. Deneysel çalışmaların şeması ..... 89
Şekil 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere temin edilen bentonit kili..... 92
Şekil 3.3. Kolemanit minerali ..... 97
Şekil 3.4. Kohezyonlu zeminler kıvam limitleri ilişkisi ..... 100
Şekil 3.5. Casagrande aleti ile likit limit deneyinin gerçekleştirilmesi..... 101
Şekil 3.6. Likit limit deneyi sonrası numunelerin tartılması ve etüvde kurutulması..... 102
Şekil 3.7. Plastik limit deneyi ile hazırlanan numunelerin tartılması ..... 103
Şekil 3.8. UCSC sınıflandırma sistemi ..... 103
Şekil 3.9. Killer üzerinde kompaksiyon deneyinin uygulanması..... 105
Şekil 3.10. Minyatür proctor aleti ile kompaksiyon deneyinin gerçekleştirilmesi ..... 106
Şekil 3.11. Desikatörde bekletilen numuneler ile serbest basınç deneyinin gerçekleştirilmesi ..... 108
Şekil 3.12. Serbest basınç deneyinde deformasyona uğrayan bentonit kili numuneleri..... 109
Şekil 3.13. Serbest basınç deneyi öncesi kaolin kili ve deney sırasında deformasyona uğrayan kaolin kili numuneleri..... 109
Şekil 4.1. Likit limit değerinin logaritmik gösterimi ..... 114

Şekil 4.2. Saf bentonit ile bentonit kolemanit karışım numunelerinin anlık likit limit değerleri ..... 114
Şekil 4.3. Saf bentonit ile bentonit kolemanit karışım numunelerinin 1 günlük likit limit değerleri ..... 115
Şekil 4.4. Saf bentonit ile bentonit kolemanit karışım numunelerine ait anlık likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri ..... 116
Şekil 4.5. Saf bentonit ile bentonit kolemanit karışım numunelerine 1 günlük likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri ..... 116
Şekil 4.6. Saf kaolin ile kaolin kolemanit karışım numunelerinin anlık likit limit değerleri ..... 117
Şekil 4.7. Saf kaolin ile kaolin kolemanit karışım numunelerinin 1 günlük likit limit değerleri ..... 118
Şekil 4.8. Saf kaolin ile kaolin kolemanit karışım numunelerine anlık likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri ..... 118
Şekil 4.9. Saf kaolin ile kaolin kolemanit karışım numunelerine 1 günlük likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri ..... 119
Şekil 4.10. Bentonit ve kaolin killerinin kolemanit ilaveli anlık kıvam limitleri değerleri ..... 119
Şekil 4.11. Bentonit ve Kaolin killerinin kolemanit ilaveli 1 günlük kıvam limitleri değerleri ..... 120
Şekil 4.12. Saf bentonit ve bentonit kolemanit ilaveli karışım numunelerinin kompaksiyon deney sonuçları ..... 122
Şekil 4.13. Saf kaolin ve kaolin kolemanit ilaveli karışım numunelerinin kompaksiyon deney sonuçları ..... 122
Şekil 4.14. Saf bentonit kilinin kompaksiyon eğrisi ..... 123
Şekil 4.15. Kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi ..... 123
Şekil 4.16. Saf bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi ..... 124
Şekil 4.17. %2 kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi ..... 124
Şekil 4.18. %2 kolemanit ilaveli kaolin kilinin kompaksiyon eğrisi ..... 125
Şekil 4.19. %2 kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi ..... 125
Şekil 4.20. %4 kolemanit ilaveli bentonit kilinin kompaksiyon eğrisi ..... 126
Şekil 4.21. %4 kolemanit ilaveli kaolin kilinin kompaksiyon eğrisi ..... 126
Şekil 4.22. %4 kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi ..... 127
Şekil 4.23. %6 kolemanit ilaveli bentonit kilinin kompaksiyon eğrisi ..... 128
Şekil 4.24. %6 kolemanit ilaveli kaolin kilinin kompaksiyon eğrisi ..... 128
Şekil 4.25. %6 kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi ..... 129
Şekil 4.26. %8 kolemanit ilaveli bentonit kilinin kompaksiyon eğrisi ..... 129
Şekil 4.27. %8 kolemanit ilaveli kaolin kilinin kompaksiyon eğrisi ..... 130
Şekil 4.28. %8 kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi ..... 130
Şekil 4.29. %10 kolemanit ilaveli bentonit kilinin kompaksiyon eğrisi ..... 131
Şekil 4.30. %10 kolemanit ilaveli kaolin kilinin kompaksiyon eğrisi ..... 131
Şekil 4.31. %10 kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi ..... 132

Şekil 4.32. Saf bentonit ve kaolin killeri ile kolemanit ilaveli karışım numunelerinin optiumum su muhtevası (%) değerleri ..... 132
Şekil 4.33. Saf bentonit ve kaolin killeri ile kolemanit ilaveli karışım numunelerinin maksimum kuru birim hacim ağırlık(Kn/$m^3$) değerleri ..... 133
Şekil 4.34. Saf bentonit kiline ait serbest basınç dayanım grafiği ..... 136
Şekil 4.35. Saf bentonit kiline ait 6 adet numunenin mukavemet değerleri ..... 137
Şekil 4.36. %8 kolemanit ilaveli bentonit kilinin anlık serbest basınç dayanım grafiği ..... 138
Şekil 4.37. %8 kolemanit ilaveli bentonit kilinin 1 günlük serbest basınç dayanım grafiği ..... 138
Şekil 4.38. %8 kolemanit ilaveli bentonit kilinin 1 haftalık serbest basınç dayanım grafiği ..... 139
Şekil 4.39. %8 kolemanit ilaveli bentonit kiline ait 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği ..... 139
Şekil 4.40. Kür sürelerine göre saf bentonit ve %8 kolemanit ilaveli 6 adet karışım numunelerine numunenin kür sürelerine göre mukavemet değerleri ..... 140
Şekil 4.41. %2 kolemanit ilaveli bentonit kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği ..... 141
Şekil 4.42. Saf bentonit ve %2 kolemanit katkılı bentonite ait 6 adet numunenin mukavemet değerleri ..... 141
Şekil 4.43. %4 kolemanit ilaveli bentonit kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği ..... 142
Şekil 4.44. Saf bentonit ve %4 kolemanit katkılı bentonite ait 6 adet numunenin mukavemet değerleri ..... 143
Şekil 4.45. %6 kolemanit ilaveli bentonit kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği ..... 144
Şekil 4.46. Saf bentonit ve %6 kolemanit katkılı bentonite ait 6 adet numunenin mukavemet değerleri ..... 144
Şekil 4.47. %10 kolemanit ilaveli bentonit kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği ..... 145
Şekil 4.48. Saf bentonit ve %10 kolemanit katkılı bentonite ait 6 adet numunenin mukavemet değerleri ..... 146
Şekil 4.49. 28 günlük kür süresine göre saf bentonit ve kolemanit ilaveli karışım numunelerine ait mukavemet değerleri ..... 146
Şekil 4.50. Saf kaolin kiline ait serbest basınç dayanım grafiği ..... 148
Şekil 4.51. Saf kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri ..... 149
Şekil 4.52. %2 kolemanit ilaveli kaolin kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği ..... 150
Şekil 4.53. Kaolin ve %2 kolemanit katkılı kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri ..... 150
Şekil 4.54. %4 kolemanit ilaveli kolemanit kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği ..... 151
Şekil 4.55. Saf kaolin ve %4 kolemanit katkılı kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri ..... 151
Şekil 4.56. %6 kolemanit ilaveli kaolin kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği ..... 152

Şekil 4.57. Saf kaolin ve %6 kolemanit katkılı kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri ..... 153
Şekil 4.58. %8 kolemanit ilaveli bentonit kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği ..... 153
Şekil 4.59. Saf kaolin ve %8 kolemanit katkılı kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri ..... 154
Şekil 4.60. %10 kolemanit ilaveli bentonit kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği ..... 155
Şekil 4.61. Saf kaolin ve %10 kolemanit katkılı kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri ..... 155
Şekil 4.62. 28 günlük kür süresine göre saf kaolin ve kolemanit ilaveli karışım numunelerine ait mukavemet değerleri ..... 156
Şekil 4.63. 28 günlük kür süresine göre kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin mukavemet değerleri ..... 157

## TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. USCS ve diğer bazı ölçütlere göre grupların sınır çapları ..... 43
Tablo 2.2. Kil minerallerinin ana ve kaya ve iklim şartlarına göre oluşumu ..... 46
Tablo 2.3. Kil minerallerinin ağırlığına göre kimyasal bileşimi (%) ..... 47
Tablo 2.4. Yaygın kil minerallerinin spesifik yüzey ve kalınlıkları ..... 52
Tablo 2.5. Uygulama derinliğine göre zemin sınıflandırması ..... 55
Tablo 2.6. Zemin bileşenlerine göre tavsiye edilen stabilizasyon metodları . ..... 59
Tablo 2.7. Zemin stabilizasyonu için stabilizör seçimi. ..... 61
Tablo 2.8. Inglea ve Mercalf tarafından önerilen kireç oranları ..... 65
Tablo 2.9. Bu değerler optimum kireç değerleri içindir ..... 66
Tablo 2.10. %10 çimento için zemin- çimento karışımları özellikler ..... 68
Tablo 2.11. Zemin çimento karışımları için gerekli çiemento miktarı ..... 69
Tablo 2.12. Borun atomik yapısı ..... 73
Tablo 2.13. Bor madeninin fiziksel özellikleri ..... 75
Tablo 2.14. Bor madeninin kimyasal özellikleri ..... 75
Tablo 2.15. Dünya bor rezervlerinin dağılımı (Etimaden) ..... 79
Tablo 2.16. Eti maden rezerv miktarları ..... 80
Tablo 2.17. Ticari öneme sahip Boratlar (Boren) ..... 81
Tablo 2.18. Bor madeninin kullanım alanları (DPT) ..... 84
Tablo 3.1. Bentonit ve kolemanit karışım isimlendirmeleri ..... 87
Tablo 3.2. Kaolin ve kolemanit karışım isimlendirmeleri ..... 87
Tablo 3.3. Deneylerde referans alınan standartlar ..... 89
Tablo 3.4. Bentonit kilinin mühendislik özellikleri ..... 92
Tablo 3.5. Bentonit kilinin kompaksiyon parametreleri ..... 92
Tablo 3.6. Bentonit kilinin dayanım parametreleri ..... 92
Tablo 3.7. Kaolin kilinin mühendislik özellikleri ..... 94
Tablo 3.8. Kaolin kilinin kompaksiyon parametreleri ..... 95
Tablo 3.9. Kaolin kilinin dayanım özellikleri ..... 95
Tablo 3.10. Kolemanit mineralinin içerik, birim ve değer tablosu ..... 96
Tablo 3.11. Kolemanit mineralinin özellikleri ..... 96
Tablo 3.12. Kolemanit mineralinin ağır metal içeriği ..... 98
Tablo 3.13. Bentonit kili ve kolemanit ilaveli karışım numuneleri üzerinde gerçekleştirlen deneyler ..... 98
Tablo 3.14. Kaolin kili ve kolemanit ilaveli karışım numuneleri üzerinde gerçekleştirlen deneyler ..... 99
Tablo 4.1. Saf bentonit kili plastik limit değeri ..... 114
Tablo 4.2. Anlık gerçekleştirilen saf bentonit kiline ait serbest basınç dayanım deneyi verileri ..... 135
Tablo 4.3. Anlık gerçekleştirlen saf kaolin kiline ait serbest basınç dayanım deneyi verileri ..... 148

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al : Alüminyum
BK0 : %100 Bentonit + %0 Kolemanit
BK2 : %98 Bentonit + %2 Kolemanit
BK4 : %96 Bentonit + %4 Kolemanit
BK6 : %94 Bentonit + %6 Kolemanit
BK8 : %92 Bentonit + %8 Kolemanit
BK10 : %90 Bentonit + %10 Kolemanit
$B_2O_3$ : Bor trioksit
$CaCO_3$ : Kalsiyum karbonat
CH : Yüksek plastisiteli inorganik kil
CI : Orta plastisiteli inorganik kil
CL : Düşük plastisiteli inorganik kil
D : Numune çapı
GC : Killi çakıl
GM : Siltli çakıl
GP : Kötü derecelendirilmiş çakıl
GW : İyi derecelendirilmiş çakıl
K : Kireç
K-Ç-U : Kireç, çimento ve puzolan kombinasyonu
KK0 : %100 Kaolin + %0 Kolemanit
KK2 : %98 Kaolin + %2 Kolemanit
KK4 : %96 Kaolin + %4 Kolemanit
KK6 : %94 Kaolin + %6 Kolemanit
KK8 : %92 Kaolin + %8 Kolemanit
KK10 : %90 Kaolin + %10 Kolemanit
MH : Yüksek plastisiteli inorganik silt
MI : Orta plastisiteli inorganik silt
ML : Düşük plastisiteli inorganik silt
ppm : Miligram/kilogram
$q_u$ : Serbest basınç dayanımı
SC : Killi kum
SI : Büzülme indisi
Si : Silisyum
SM : Siltli kum
SP : Kötü derecelendirilmiş kum
SW : İyi derecelendirilmiş kum
$w_{opt}$ : Optimum su muhtevası (%)
$w_L$ : Likit limit
$w_P$ : Plastik limit
$^oC$ : Santigrat derece
$\gamma k$ : Kuru birim hacim ağırlık
$\gamma k_{max}$ : Maksimum kuru birim hacim ağırlık

μm : Mikrometre

**Kısaltmalar**

| | |
|---|---|
| AASHTO | : American Association of State Highway and Transportation Officials (Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği) |
| ASTM | : American Society for Testing and Materials (American Test ve Materyaller Topluluğu ) |
| kN | : Kilonewton |
| KPa | : Kilopascal |
| LL | : Likit Limit |
| Mm | : Milimetre |
| MPa | : Megapascal |
| MTA | : Maden Tetkik Arama |
| PI | : Plastisite İndisi |
| PL | : Plastik Limit |
| TS | : Türk Standardı |
| USCS | : Unified Soil Classification System ( Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi) |

## BENTONİT VE KAOLİN KİLLERİNİN KOLEMANİT MİNERALİ İLE STABİLİZASYONU


## ÖZET

Günümüzde nüfus artışı ile birlikte barınma, ulaşım gibi temel ihtiyaçların karşılanmasında ortaya çıkan problemler giderek artmaktadır. İnşaat mühendisliğinde mevcut zeminlerin, yapı yükünü taşıyabilecek dayanımda olması beklenmektedir. Ancak kentlerin birincil sorunu haline gelen, her zaman yapı yükünü taşıyabilecek sağlam zeminler ile karışılaşılmaması mevcut zeminler üzerine yapıların inşa edilmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle kullanımı zorunlu hale gelen, düşük direnç ve yüksek deformasyon özelliği gösteren zayıf zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında yüksek plastisite özelliği gösteren bentonit ve düşük plastisite özelliği gösteren kaolin ile bor madeninin yaygın olarak kullanılan mineral çeşidi olan kolemanit ile hazırlanan numunelerin mühendislik parametrelerinin iyileştirilmesi amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Öncelikle bentonit ve kaolin killerinin kıvam limitleri, kompaksiyon, taşıma gücü parametrelerini belirlemek amacıyla serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Bor mineralleri arasında ticari öneme sahip kolemanit katkı maddesi olarak, bentonit ve kaolin killerin ağırlıklarınca %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarda ilave edilmesiyle deneysel çalışmalara devam edilmiştir. Daha sonra bentonit ve kaolin kileri ile belirlenen oranlarda ağırlığınca kolemanit eklenerek optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler dayanım testine tabi tutulmuştur. Ayrıca kür süresinin mukavemet değerlerine etkisini görebilmek amacıyla hazırlanan numunelere, 28 günlük kür süresi sonrası dayanım testi uygulanmıştır. Stabilizasyonda en etkin oranın seçilmesiyle %8 kolemanit katkılı bentonit için anlık, 1, 7 ve 28 günlük kür süresine tabi tutularak serbest basınç deneyi ile numunenin dayanım değerleri kıyaslanmıştır. Elde edilen veriler analiz edilerek kolemanitin yüksek plastisiteli kil grubunu temsilen bentonit üzerinde dayanım parametrelerini arttırdığı saptanmıştır. Ancak kolemanitin dayanıma olan etkisi düşük plastisite kil özelliği gösteren kaolin için oldukça az düzeyde olduğu görülmüştür.



**Anahtar Kelimeler:** Bentonit, Kaolin, Kolemanit, Serbest Basınç Deneyi, Zemin Stabilizasyonu.

**STABILIZATION OF BENTONITE AND CAOLINE CLAYS WITH COLEMANITE MINERAL**


## ABSTRACT

Today, with the increase in population, the problems arising in supplying basic needs such as shelter and transportation are gradually increasing. In civil engineering, the existing soils are expected to be strong enough to bear the structural load. For this reason, it is aimed to improve the engineering properties of weak soils which have to be used and have low resistance and high deformation. Within the scope of this study, experimental studies were carried out to improve the engineering parameters of samples prepared with bentonite which shows high plasticity and kaolin which has low plasticity, and colemanite which is the common mineral type of boron mine. Experimental studies have been continued with the addition of 2%, 4%, 6%, 8% and 10% by weight of bentonite and kaolin clays as colemanite additives having commercial importance among boron minerals. Strenght test was applied after 28 days curing period on the samples prepared to see the effect of curing time on strenght values. By selecting the most effective rate in stabilization, the bentonite added with 8% colemanite was subjected to an instant, 1, 7 and 28-day curing period and the strenght values of the sample were compared with the nonconfined compressive test. By analizing obtained data it is determined that colemanite representing high plasticity clay group increases the strenght parameters on the bentonite. However, the effect of colemanite on strength was found to be very low for kaolin which has a low plasticity clay feature.



**Keywords:** Bentonite, Kaolin, Colemanite, Free Pressure Test, Ground Stabilization.

# GİRİŞ

İnşaat mühendisliğinde, inşa edilecek yapıların zeminlerinin yapı yüklerini taşıyacak mukavemette olması istenmektedir. Ancak günümüzde giderek artan nüfus, sanayileşme, tarım alanlarına ayrılan arazilerin azalması gibi durumların ortaya çıkması beraberinde her zaman yapı yükünü taşıyabilecek, zemin türleri ile karışılaşılmamasına sebep olmaktadır. Dünya genelinde nufus son 20 yılda yaklaşık 2 milyar artmıştır ve bu artış ülkemizde de giderek ciddi boyutlara ulaşmıştır. Türkiye'de nufusun % 92,8'i şehirlerde ikamet etmektedir buna bağlı olarak yıllara göre giderek artan şehirleşme, sanayileşme, çevre ve iklim değişikliği, düzensiz göçler gibi faktörler düşünüldüğünde insanların temel ihtiyacı olan barınma, ulaşım gibi elzem konular büyük sorun teşkil etmektedir. Bu sorunların temelinde, artan insan popülasyonu ile birlikte barınma, ulaşım gibi temel ihtiyaçların karşılanmasında ortaya çıkan, sağlam zemin bölgelerinin azalması ve buna bağlı olarak direnci düşük ve deformasyon özelliği yüksek olan zayıf zeminlerin kullanıma açılması zorunluluğu yatmaktadır. Zemin üzerine inşa edilmesi planlanan yapılar çeşitli amaçlara yönelik tasarlanır. Böylelikle farklı amaçlarla inşa edilmesi planlanan yapılar ile karşılaşılan zeminler her zaman yapı yükünü taşıyabilecek durumda olamamaktadır. İnşa edilecek yapının, mühendislik özelliklerinin yanı sıra zeminin dayanım parametreleri ile kayma - göçme mukavemetlerinin çözümlenebilmesi etkin yapı-zemin ilişkisinin kurulabilmesinde oldukça önemli rol oynamaktadır. Yapı yükü ile beraber zeminde oluşabilecek yanal yüklerden kaynaklanan deformasyonlar zamana bağlı olarak büyük oranda taşıma gücü problemlerini ortaya çıkarmaktadır. Zeminin maruz kaldığı yükün emniyetli taşıma gücü sınırına yaklaştığı andan itibaren dayanım parametreleri değeri azalmaya başlamaktadır, bu nedenle zeminde oluşan deformasyonlar beraberinde, oturma göçme problemlerini ortaya çıkarmaktadır. Mühendislik yapılarında oluşan hasarlaraın birçoğu zemin hareketlerinden meydana gelmektedir. Bu hareketlenmeler zeminin fiziki, kimyasal ve minerolojik yapısı ve dokusal özelliklerine göre farklılıklar göstermektedir.

Bu nedenle zeminin yapı yükünü taşıyamayacağı mukavemeti düşük olduğu durumlarda, yapıyı geoteknik şartlara uygun olarak tasarlamak veya inşa edilecek yapının karşılaştığı problemli zemini en uygun şartlarda iyileştirmek gerekmektedir.

Zemin iyileştirmede birçok yöntem vardır. Bu yöntemler öncelikle zemin iyileştirmenin amacına, zeminin türüne, yöntemlerin uygunabileceği derinliğe, yöntem için kullanılan özel araç gereç ve malzemelere, yöntemlerin performansına göre değişkenlik göstermektedir. Seçilen İyileştirme yöntemlerinin temel amaçları zemin/kaya ortamının mukavemetini arttırmak ve zeminlerin su tutma ve permeabilitelerini azaltmaya dayanmaktadır.

Zayıf zeminlerin ıslah edilmesinde 3 yöntem bulunmaktadır. İlk olarak problemli zemin kaldırılarak bertaraf edilir, kaldırılan zayıf zemin yerine daha uygun özellikteki zeminin yerleştirilmesidir. Fakat bu yöntem kaldırılan zeminin hacimsel büyüklüğü arttıkça, hafriyat sırasında çıkacak iş işçi giderlerinin artmasından dolayı ekonomik olmaktadır. İkinci yöntem olarak,inşa edilecek yapının mühendislik özelliklerini, zayıf zeminin durumuna göre seçmek ve tasarlamak ve bu sayede zayıf zemin aşılarak yapı yükünü alttaki sağlam zemine taşıtılmaktadır. Bu yöntemde ise sağlam zemin her zaman yüzeye yakın olmayabilir ve inşa edilecek yapı maliyetini ekonomik halden uzaklaştırabilmektedir.Üçüncü ve son olarak diğer bir zemin iyileştirme yöntemi ise zayıf zemine ait özellikleri uygun hale getirmek maksadıyla, zemine uygun yerinde bir stabilizasyon yönteminin seçilmesidir. Bu tür uygulamalar, yüzyıllardan beri zemin ıslahın tercih edilmektedir. Zemine kimyasal maddeler katılması, zeminin ısıtılması, dondurulması, sıkıştırılması gibi işlemlerle zayıf zeminin özellikleri iyileştirilmektedir. Bu sayede zemine, dayanım rijitlik, geçirgenlik, şişme potansiyeli, drenaj ve donma problemleri gibi istenmeyen durumlar bertaraf edilir ya da en aza indirgenmektedir. Şişen killerin iyileştirilmesinde düşük maliyetle en iyi performans alınacak yönteminlerin başında katkı maddesi ile yapılan ıslah çalışmalarıdır.

Yüksek oranda hacim değiştirebilen kil minerallerine sahip killi zeminler Geoteknik Mühendisliği açısından bakıldığında en çok problem ile karşılaşılan zeminlerdir. Kuru iklim şartlarında suyun buharlaşmasına bağlı olarak büzülme özelliği gösteren bu tür zeminler yeniden su ile temas ettiklerinde çok büyük oranlarda hacim artışı gösterebilmektedir. Kil sınıfında yer alan zemin türleri, mühendislik uygulamarı

sırasında gelecek yüklerden ve çevresel faktörlere bağlı olarak içerisinde bulunan doğal su oranı değişmektedir.

Şişme potansiyeline sahip killi zeminler, içerisindeki su oranına bağlı olarak kıvamlarında farklılık göstermektedir. Yüksek ve düşük plastisye sahip killerin kıvam özellikleri ve kilin yapısı, zemin dayanımında etkn rol oynamaktadır. Şişme potansiyeli yüksek killi zeminler mühendislik yapılarında ciddi hasarlara sebep olmaktadır. Killerin taşıma gücü ve mukavemet özelliklerinin yol açtığı sonuçları bertaraf edebilmek için Dünya genelinde kapsamlı birçok çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar öncelikle killi zeminlerin herhangi bir iyileştirmeye tabii tutulmadan yapıya verdiği zararı öngrmekle başlanmıştır. 1987 yılında Amerika Birleşik Devletlerin'de yapılan bir araştırmada ise şişen zeminlerin; binalara, havaalanlarına, yollara, kaldırımlara, otopark alanlarına, boru hatlarına ve diğer tesislere verdiği yıllık zarar 9 milyar dolar olarak tespit edilmiştir (Jones and Holtz, 1973).

Killi zeminler maruz kaldıkları gerilimler, doğal ve yapay yükler sebebiyle içerisinde nem hareketine yol açmaktadır. Bu faktör göz önünde bulundurulduğunda killerin plastisite seviyesi şişme potansiyeli ile ilişkilendirlmektedir. Bu sayede plastiklik indisine göre düşük veya yüksek plastiste özelliklerine sahip killer zeminin mühendislik özelliklerinde belirleyici olmaktadır.

Bir zeminin özellikleri, birbiriyle ilişkili olan tane boyutu, zemin mineraloji ve zeminin su muhtevasına bağlıdır. Kil mineralleri su muhtevası yüksek olabilen zemin türleridir. Su içeriği ile ilgili olan kıvam, ince daneli zeminler için kritik kavramdır. Bu nedenle yüksek ve düşük plastisieye sahip killer farklı katkı maddeleri eklenerek su içeriklerinde değişimler meydana gelebilmektedir. Bu değişimlere bağlı olarak killi zeminlerde dayanım artmaktadır.Killi zeminleri stabilizasyonunda çeşitli katkı maddeleri mevcut olup, seçilen herbir katkı maddesi kilin mühendislik özelliklerinde olumlu yönde arttırması amaçlanmaktadır. Zayıf dayanım gösteren şişme potansiyeli yğksek olan killerin katkı maddeleri ile iyileştirlmeye tabii tutalmasının nedenleri;

- Zeminin taşıma gücünü arttırmak,
- Meydana gelebilecek deformasyonları ve toplam oturmayı azaltmak,
- Geçirimlilik seviyesini düşürmek,
- Zeminin sıvılaşma ihtimalini azaltmak veya tamamen kaldırmak,

- Kayma dayanımını yükseltmek,
- Boşluk sularından kaynaklanan basıncı düşürmek,
- Şişme/kabarma ve don kabarması gibi çevre etkilerini azaltmak gibi kilin mühendislik özelliklerini arttırmayı amaçlamaktadır.

Dünya bor rezervlerinin, %73'üne (3,3 milyar ton) sahip olan Türkiye'de bor madeni ve türevleri giderek artan çalışmalarla oldukça büyük bir önem kazanmıştır. Çağımızın en büyük sorunlarından olan üretim ve tüketim arayışı ve buna bağlı olarak ham maddeye duyulan ihtiyaç son derece önemli bir artış göstermektedir. Dünya genelinde ham madde kaynaklarının hızlıca tükenmesi ve sanayinin birçok dalında kullanması sebebiyle mevcut ham maddelere alternatif olarak bor madeni ve türevlerinin, her geçen gün kullanımı ve önemi artmaktadır. 21. yüzyıl petrolu olarak atfettirlen bor madeni bir çok alanda kullanılabilirliği nedeniyle stratejik olarak da büyük bir öneme sahiptir. İlk kez, borun saf elementi Fransız kimyager J.L. Gay-Lussac ve Baron L.J. Thenard ile İngiliz kimyager H. Davy tarafından 1808 yılında elde edilmiştir. 1865 yılında ise Osmanlı devleti'i zamanında bor madeni çıkarılmaya başlanmıştır. MTA ve Etibank gibi yerel kurumlar 1935 yılında arama ruhsatlarını alarak II. Dünya Savaşı'ndan sonra arama faaliyetlerini yaygınlaştırmışlardır. Şu an ki mevcut durumda Türkiye, rafine bor ürünlerinin üretilmesinde ilk sıradadır. Yıllık kapasitesi 2,7 milyon ton olan Türkiye'de, 2019 yılı ilk 6 ayı itibarıyla 1,018 milyon ton rafine bor ürünleri üretimi gerçekleştirilmiştir. Türkiye, Amerika, Rusya ve Güney Amerika'da gibi ülkelerde önemli bor yatakları yer almaktadır. Ülkemizin bilinen bor madeni yatakları Eskişehir-Kırka, Kütahya-Emet, Bursa-Kestelek ve Balıkesir-Bigadiç'te bulunmaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı). Bor ürünleri tüketimi sektörlere göre şu şekildedir: %47 cam sektörü, %16 tarım-gübre, %15 seramik sektörü, %2 temizlik ve deterjan sektörleri ve %20 diğer sektörleri.

Tüm bu edinilen bilgiler ışığında, birincil olarak zemin stabilizasyonu ve türleri ikincil olarak ise bor mineralleri ve yine bor türevi olan kolemanit ile ilgili kapsamlı literatür çalışması yapılmıştır. Ülkemizde de bor madeni ve türevleri ile cam, tarım, kimya, temizlik ürünleri, seramik ve polimerik malzemeler, metalürji, nanoteknolojiler, otomotiv ve enerji, elektronik ve haberleşme, hava ve uzay taşıtları, nükleer uygulamalar, askeri araçlar, yakıtlar ve inşaat gibi pek çok farklı alan ve sektörde çalışmalar yapılmıştır. Ancak yapılan İlteratür çalışmasında ülkemizde bor minerali

ve ürünleri ile zemin iyileştirme üzerine yapılan çalışmaların hemen hemen yok seviyesinde olduğu görülmektedir.

Günümüzde ülkemiz genelinde yapılan birçok büyük ölçekli inşaat yatırımlarında zemin iyileştirmelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Her ne kadar inşaat sektörü teknolojik ve endüstriyel olarak görülmese de büyük yatırımlardır ve yatırımın en az %20'si alt yapı çalışmalarına harcanmaktadır. Ülkemizde, Dünya rezervlerinin büyük bir kısmını oluşturduğu bor madeninin fazla miktarda kullanılabileceği yeni bir kullanım alanı olarak inşaat sektöründe kullanılması ile hedeflenmektedir. Bor, minerallerin yeni bir kullanım alanı olarak zemin iyileştirmesinde kullanılması hem ülke ekonomisine olan katkıyı artıracak hem de çevreci bir yaklaşım sunacaktır. Bor ürünlerinin de yeni kullanım alanlarının ortaya konmasında önemli bir çalışma olacaktır.

Bu çalışma ile ayrıca seçilen iki farklı kil çeşidi olan bentonit ve kaolin kili ile çalışılacaktır. Zemin dayanımına katkı maddelerinin eklenmesinin killerin plastisite özelliklerine göre değişkenlik arz edip etmeyeceği araştıralacalktır. Katkılı zemin stabilizasyonu ile, zemin özellikleri iyleştirilmesi planlanan Yüksek plastisiteli bentonit ve düşük plastisiteli kaolin killerinin fiziksel - kimyasal özellikleri ve killerin yapıları bor minerali olan kolemanitin katkı olarak eklenmesiyle dayanıma etkisini gözlemlenmiş olacaktır. İki farklı kıvam özelliklerine sahip bentonit ve kaolin killerine kolemanitin eklenmesiyle yapılacak deneysel çalışmaları sonucu elde edilen verilerin, bundan sonra killi zeminlerle bor türevleri ile yapılacak zemin iyileştirmesinde katkı sunması beklenmektedir.

# 1. AMAÇ VE TEZİN ORGANİZASYONU

Bu tez çalışması kapsamında ilk olarak zemin stabilizasyonu ile ilgili daha önce yapılmış olan çalışmalar hususunda kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Yapılan araştırma sayesinde, kohezyonlu zeminlerin yol açabileceği genel problemler ortaya konmuştur. Killi zeminlerin mühendislik problemlerinin bertaraf edilmesinde uygulanan metotlar irdelenmiştir. Zemin stabilizasyonunda farklı zemin türleri için en uygun yöntemin seçilmesi gerektiği yapılan çalışmalar ile ortaya konulmuştur. Bu sayede killi zeminlerin daha çok kimyasal stabilizasyon yöntemi ile farklı katkı maddeleri kullanılarak iyileştirilmesi amaçlandığı görülmüştür. Ülkemiz, dünyadaki toplam rezervin %73'üne sahip, bor madeninin en yaygın bilinen minerali olan 'kolemanit' ile zemin stabilizasyon çalışmalarının yok denecek kadar az olduğu saptanmıştır. Kolemanitin, inşaat mühendisliğinin farklı alanlarında kullanılmasının yanı sıra, geoteknik mühendisliğinde stabilizasyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılması hedeflenmiştir. Bu amaçla tez kapsamında, Balıkesir ili, Bigadiç ilçesinde yer alan ETİ MADEN Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü'nden temin edilen mikronize kolemanit katkı maddesi olarak zemin stabilizasyonunda kullanılmak üzere temin edilmiştir. Yapılan kapsamlı literatür taramalarında, düşük plasitisite ve yüksek plasitiste özelliği gösteren killere uygulanan katkılı stabilizasyon yöntemlerinde, farklı sonuçların elde edildiği görülmüştür. Bu sebeple, laboratuvar çalışmalarında, zemin malzemesi olarak kullanılması amacıyla, düşük plasitiste killeri temsilen 'kaolin' kili ve yüksek plastisite özelliğine sahip killeri temsilen ise montmorillanit grubu olan 'bentonit' kili, Eczacıbaşı- Esan Endüstriyel Maddeler San. Tic. A.Ş. Fabrikalarından öğütülmüş ve paketlenmiş olarak tedarik edilmiştir. Kullanılacak zemin malzemesi ve stabilizatör olarak seçilen mineralin, stabilizasyonda kullanıp kullanılamayacağı, mühendislik özelliklerinin katkı oranlarına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ve en yüksek performansın gözlemlendiği oranın saptanması hedeflenmektedir.

Tez çalışması kapsamında, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik Laboratuvarı'nda deneysel çalışmalar yapılmıştır. Düşük ve yüksek plasitiste özelliğine sahip her iki kile, yapılan literatür çalışmaları

sonucu belirlenen katkı oranları göz önünde bulundurularak farklı oranda katkı maddesi eklenmiştir. Deneyler, Saf bentonit ve saf kaolin ile %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit+bentonit, kolemanit+kaolin olmak üzere farklı karışım numuneleri hazırlanarak yapılmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde, sınıflandırma deneyleri, su muhtevası, kuru birim hacim ağırlıkları arasındaki ilişkiyi kurmak için kompaksiyon deneyleri ve taşıma gücünün belirlenebilmesi için serbest basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. ASTM standartlarına göre yapılan deneyler Bölüm 4'te ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

### 1.1. Zemin Stabilizasyonu İle İlgili Literatür Çalışması

Işık (2019), bu çalışmasında, yüksek plastisiteli bentonit kili ile düşük plastisiteli kaolin kilinin mukavemet ve donma-çözülme davranışlarının iyileştirilmesi amacıyla, killere belirli yüzdelerde (%5, %10, %15, %20) poliüretan, epoksi, reçine ve stiren akrilik ilave ederek katkılı numuneler elde etmiştir. 1 ve 7 gün kürde bekletilen katkı içeren numunelerde serbest basınç ve donma çözülme deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneyler neticesinde, poliüretan, epoksi reçine ve stiren akrilik katkılarının düşük ve yüksek plastisiteli killerin serbest basınç ve donma çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri üzerinde olumlu etkilerinin olduğunu görmüştür.

Şenol (2019), çalışmasında bir yapı malzemesi olarak ince taneli zeminlerin geoteknik özelliklerini yükseltmek için fosfojips gibi atık maddelerin kullanımını araştırmıştır Kalsine Fosfojips (CPG) ile stabilize edilen zemin numuneleri üzerinde, standart proctor deneyi, Kaliforniya taşıma gücü ve serbest basınç ve optmum su muhevası deneyleri yapmıştır. Gübre fabrikası atığı olan fosfojips 150 ºC gibi düşük sıcaklıkta kalsine edilmiştir. Kalsine edilmiş fosfojips (CPG) katılan ince taneli zeminlerin maksimum kuru yoğunluğu azalmıştır, ancak optimum su muhtevası değerleri artmıştır. Serbest basınç mukavemetinin, California taşıma gücü oranının, doğal ve stabilize zemin örnekleri üzerindeki etkileri araştırmıştır. Deney sonuçları, stabilize edilmemiş numunelere kıyasla CPG katkılı karışımların daha yüksek dayanıklılığa sahip olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, CPG katkılı karışımların, yol inşaatları ve hafriyat dolgu uygulamaları için ince taneli zeminlerin dış etkilere karşı mukavemetinde başarılı bir şekilde kullanılabilineceği sonucuna varmıştır. Test sonuçları, CPG içeren stabilize ince taneli zemin numunelerinin, doğal ince taneli

zemin numunelerine kıyasla daha yüksek CBR direnci ve serbest basınç mukavemeti sergilediğini gözlemlemiştir.

Demir (2019), ferrosilisyum alaşımlarının ve silisyum metalinin üretimi sırasında elde edilen endüstriyel bir atık olan silis dumanı ile mermer tozu killi bir zeminin stabilizasyonunda puzolonik katkı olarak kullanmıştır. Yüksek plastisiteli killi bir zeminin stabilizasyonunda kullanılan mermer tozu ve silis dumanı %0, %5, %10, %15, %20 doğal malzeme ile kireçsiz ve %6 kireçli (optimum kireç oranı) olarak karıştırmıştır. Hazırlanan karışımların durabilite ve dayanım gibi geoteknik özellikleri detaylı olarak incelemiştir. İncelenen numunelerin dayanım değerlerinde silis dumanının kireçle beraber kullanıldığında doğal zemine, mermer tozuna ve sadece kireçli karışımlara göre daha yüksek çıktığı gözlemlenirken, durabilite özelliklerinde ise mermer tozunun daha etkin olduğunu saptamıştır.

Yemenici (2019) çalışmasında Samsun-Kalın (Sivas) Demiryolu Modernizasyonu Projesi'nde güzergâhtaki zayıf zeminlerin çimento ile iyileştirilmesi araştırmıştır. Araştırma kapsamında zeminlerin çimento ile iyileştirilmesinde çimentonun mühendislik özelliklerine katkı sağlayan puzolanik, saf, toz, bağlayıcı mineralin (NovoCrete) çimento ve zemin iyileştirmesine etkisi değerlendirmiştir. laboratuvar ortamında farklı zemin türlerinde, farklı oranlarda çimento ve NovoCrete eklenerek yapılan deneyler sonrasında, proje ölçütlerini sağlayan ideal katkı oranları belirlemiştir. katkı oranları 1 metrekare iyileştirilecek zemin için 60 kilogram çimento ve çimentonun %2 oranına karşılık gelen 1,12 kilogram NovoCrete kullanmıştır. Gerçekleştirilen uygulama sonrası yapılan laboratuvar ve arazi deneyleri ile elde edilen zemin özellikleri ile uygulama öncesine ait mevcut zemin özellikleri karşılaştırmıştır. NovoCrete Teknolojisi ile yapılan iyileştirme sonuçlarının zeminin mühendislik özelliklerine olumlu etkileri saptamıştır. Değerlendirme sonucunda, proje için ilk başta ön görülen geleneksel iyileştirme yöntemine kıyasla NovoCrete Teknolojisi ile iyileştirme yönteminin projeye önemli ölçüde hız ve zaman kazandırdığı ve zemin türüne göre belirlenen katkı oranları ile yerinde iyileştirilmiş zemin tabakasında mukavemeti ve esnekliği arttırarak proje ölçütleri üzerindeki değerlere ulaşıldığı tespit etmiştir.

Çağlar (2019), çalışmasında kızıl çamur ve atık uçucu kül iyileştirici katkı maddeleri olarak kullanmıştır. Şişen killi zemin, kaolin ve bentonit karıştırılarak, laboratuvar ortamında hazırlamıştır. Kızıl çamurun zemin iyileştirmesi amacıyla kullanımının etkileri incelemiştir. Katkı maddeleri zemine farklı yüzdelerde ve ayrı ayrı eklenerek karışımların etkileri gözlemiştir. Hazırlanan numunelerin tane boyutu dağılımları, kıvam limitleri, şişme yüzdeleri, şişme hızları, tek eksenli basınç dayanımları, direkt ve yarma çekme dayanımları belirlemiştir. Numuneler şişme yüzdeleri, şişme hızları, drenajsız kayma mukavemetleri ve çekme mukavemetlerine göre değerlendirmiştir. Çalışma sonucunda; kızıl çamur, uçucu kül ve çimento eklenmesiyle, A numunesinin drenajsız kayma mukavemetinin 4 kat arttığını, şişme yüzdesinin 3 kat azaldığını ve şişme süresinin 4 kat azaldığını kanıtlamıştır.

Diallo ve Ünsever (2019), çalışmalarında araziden alınan bir kil üzerine sabit %2 kireç ve %5 ile %35 arasında değişen oranlarda inşaat yıkıntı beton atıkları katılarak iyileştirme yapmışlardır. Öncelikle araziden elde edilen numuneye, Elek deneyi, Hidrometre deneyi ve Atterberg deneyleri yapılmıştır ve zemin yüksek plastisiteli kil olarak sınıflandımışlardır. Daha sonra, proktor deneyi yardımıyla hazırlanan numunelerin optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri elde etmişlerdir. Karışımların mukavemetini belirlemek için ise bulunan optimum su muhtevasına uygun olarak 38 mm çapında ve 76 mm uzunluğunda silindirik numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde 3 gün, 7 gün ve 28 gün kür süresinden sonra dayanımlarını belirlemek için serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Bu deneylerin sonucunda, yüksek plastisiteli kilin mühendislik özeliklerinin kullanılan kireç ve inşaat atıklarıyla birlikte farklı yüzdelerde arttığını bulmuşlardır.

Ocakbaşı (2019), çalışmasında killi bir zeminin serbest basma dayanımına rastgele dağıtılmış bazalt fiber eklenmesinin etkilerini araştırmıştır. Çalışma için bir kil zemin örnek olarak seçilmiş ve bu zemin farklı yüzdelerde olmak üzere 6 mm, 12 mm, 24 mm uzunluğunda bazalt fiber ile karıştırmıştır. yüksek plastisiteli kil (CH) olarak sınıflandırılmıştır. 6 mm, 12 mm ve 24 mm uzunluklarındaki fiberler, doğal zemine ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında karıştırmış ve kil bazalt karışımı farklı su muhtevalarında hazırlanarak standart sıkıştırma (Proktor) enerjisi ile sıkıştırmıştır. numuneler üzerinde serbest basma (UC) deneyi yapmıştır. Ayrıca makroskopik görüntüler ve mikro yapı arasındaki ilişkiyi oluşturmak için, doğal zemin örnekleri ve

bazalt fiberleri ile güçlendirilmiş örnekler üzerinde Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri yapmıştır. Yapılan deneyler sonucunda bazalt fiber katkısının kullanılan tüm uzunluk ve oranlar için kayma direncini arttırdığını; kuru zemin ağırlığına göre %2 oranında bazalt fiber eklenen zeminlerin mukavemetinde maksimum gelişme sağlandığını gözlemlemiştir. Çalışma ile bazalt liflerinin zemin özelliklerini iyileştirmek için diğer lif ve katkı türlerine alternatif olabileceğini ortaya koymuştur.

Geçkil ve diğ. (2019), çalışmalarında kil bir zemine kireç katılmasının dayanıma etkisi araştırmışlardır. Kil içerisinde %2,5, %5, %7,5, %10, %15 ve %20 oranlarında kireç eklenerek karışımlar oluşturulmuştur. Homojen bir şekilde numune hazırlanması işlemi yapıldıktan sonra, hazırlanan bu numunelere atterberg kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç ve Kaliforniya taşıma gücü oranı (CBR) deneyleri uygulamışlardır. Yapılan deneyler neticesinde, kireç oranı numunelerin plastisite indeksi ve maksimum kuru yoğunluğu azalmış, optimum su muhtevası artmıştır. Ayrıca, 7 ve 28 gün süre ile küre tabi tutulan numuneler içerisinde maksimum serbest basınç mukavemeti değeri %5 kireç oranında elde edilmiştir. Bu oranda yine aynı kür sürelerine tabi tutulan numunelerin CBR değerleri saf kil zemine göre sırasıyla 1,37 ve 2,08 kat yüksek sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir.

Dayan (2019), çalışmasında kireç ile zenginleştirilmiş kaolin kiline silis dumanı ve polipropilen lif eklemiştir, bu katkı maddelerinin kilin dayanımına ve donma-çözünme davranışlarına etkisini araştırmıştır. Dayanımdaki değişimleri gözlemlemek için serbest basınç deneyi uygulamıştır. Ayrıca modifiye edilmiş numunelerin donma-çözünme etkisi altındaki dayanım kaybı da ölçmüştür. 28 günlük Kürlenme döneminden sonra numuneler donma-çözünme kabinine yerleştirilerek 2, 5 ve 8 günlük döngüye tabi tutmuştur ve numunelere basınç testi uygulamıştır. Hazırlanan numunelerde sentetik polipropilen liflerin içeriği kaolin kilinin kuru ağırlığınca yüzde 0,25 ile yüzde 1 oranı arasında ve silis dumanı içeriği ise kaolin kilinin kuru ağırlığınca yüzde 2,5 ile yüzde 10 oranı arasında değiştiğini ve kireçle iyileştirilmiş kaolin kil numunelere silis dumanı, sentetik lif ve bu katkıların farklı oranlardaki kombinasyonlu karışımların eklenmesi numunelerin basınç dayanımını ve donma-çözünme döngülerine olan direncini artırdığını gözlemlemiştir. Fiber katkısı karışımda sürtünme direncini artırmış ve kireçle zenginleştirilmiş kil, silis dumanı ve fiberler arasındaki

çimentolaşma reaksiyonlarında kenetlenme etkisi oluştuğunu gözlemlemiştir. Maksimum dayanıma yüzde 0,25 fiber ve yüzde 10 silis dumanı içeriğine sahip kireçle modifiye edilmiş kil numunelerde ulaşılmıştır ve ayrıca fiber oranı arttıkça basınç dayanımlarında düşüş olduğunu gözlemlenmiştir. Sentetik lif, silis dumanı ve sentetik lif-silis dumanı ile modifiye edilmiş numunelerin dayanımında kürlenme süresinden sonra artış gerçekleşmiştir ve donma-çözünme döngülerinden sonra katkılarla modifiye edilmiş numunelerde kontrol numunelerine göre daha düşük dayanım kaybı oluşmuştur. Serbest basınç dayanım testlerinde en yüksek dayanım değerlerine sahip numuneler, donma-çözünme döngülerinde de düşük dayanım kaybı ile en iyi performansı göstermiştir. Deney sonuçlarına göre endüstriyel atık kullanılarak yapılan zemin iyileştirme projelerinde, silis dumanı ve sentetik lifler ile modifiye edilmiş kireç katkılı kil çalışmasının ekonomik ve çevre dostu bir alternatif olduğunu gözlemlemiştir.

Şentürk (2019), çalışmasında dört çeşit sentetik lif ve kimyasal maddenin şişen zeminin şişme potansiyeline olan etkilerini araştırmıştır. Stabilizatör olarak kopolimer, homopolimer polipropilen, uçucu kül ve kireç kullanarak Bentonit'in şişme basıncını azaltmaya çalışmıştır. Optimum durumu hesaplamak için ek maddeler türlerine bağlı olarak bentonitle farklı oranlarda karıştırmıştır. Ulaşılan sonuçlara göre bentonit-lif karışımların şişme basıncı üzerinde oldukça etkili olduğu ve %68'e kadar azaltma imkanı tanıdığı görülmüştür.

Albayrak ve Turan (2019), çalışmalarında yüksek plastisite özelliği gösteren bir kile %10, %30, %50 ve %70 oranlarında kil pestilleri ilave ederek, kil pestillerinin stabilizatör olarak kullanılmaya uygun olup olmadığını araştırmışlardır. Amaçları doğrultusunda, yüksek plastisite özelliği gösteren doğal kil, çeşitli oranlarda kil pestili muhteva eden killer ve kil pestili üzerinde kıvam limitleri deneyleri, standart proktor deneyi ve serbest basınç deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyler neticesinde kil pestillerinin, yüksek plastisite özellikli killerde serbest basınç dayanımını artırdığını görülmüştür. Bentonit kili içerisine çeşitli oranlarda Kolemanit minerali ilave ederek farklı karışımlar elde etmişlerdir. Birinci aşamada hazırlanan karışımların optimum su muhtevaları belirlenmiş ve sonrasında serbest basınç ve şişme deneylerinde kullanılacak olan numuneler belirlenen optimum su muhtevalarında hazırlanmıştır. Yapılan deneyler neticesinde ağırlıkça %2 kolemanit minerali içeren karışımda

maksimum serbest basma dayanımı ve maksimum birim hacim ağırlık elde edilirken, minimum optimum su muhtevası değeri elde edilmiştir. Ayrıca karışım içerisinde kolemanit miktarının artmasına bağlı olarak şişme basıncının azaldığı görülmüştür.

Arslan (2019), çalışmasında yüksek plastisite özelliğine sahip bentonit kilinin kireç ile stabilizasyonu sonucunda meydana gelen serbest basınç mukavemetindeki artışları incelemiştir. Sonrasında ise kireç ile stabilizasyonu yapılmış bentonit kilinin, ek olarak çimento, polimer ve silikon malzemeleri ile ayrı ayrı ve farklı oranlarda stabilizasyonunu incelemiştir. Öncelikle bentonit kil numuneleri üzerinde atterberg limitleri deneyi ile uygun kireç karışım oranını belirlemiş sonrasında ise sönmüş kireç kullanarak farklı oranlarda karışımlı ve karışımsız serbest basınç deneyleri yapmıştır. Deneyler neticesinde 28 gün kürde bırakılan kireç katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde 123,84 kPa ile 843,33 kPa arasında iyileşme gözlemlemiştir. Bentonit kili ve %7,5 kireç karışımına ilave olarak sırasıyla %5 ve %7,5 oranında çimento, %4 oranında silikon ve %2 oranında polimer malzemesi karıştırılarak hazırlanan tüm numuneler anlık, 1,7 ve 28 günlük kür sürelerini tamamladıktan sonra serbest basınç deneyleri yapmıştır. 28 günlük serbest basınç mukavemetlerinde sırası ile bentonit kil numunesi optimum su muhtevasında %7,5 kireç ilavesi sonucunda 123 kPa'dan 843 kPa 'a yükselmiştir. Daha sonrasında bentonit ve %7,5 kireç karışımı, çimento ilaveleri sonucunda 952 kPa 'a kadar serbest basınç mukavemetinde yükselme meydana gelmiştir. %4 silikon ilavesi sonucunda 1759 kPa ve %2 polimer ilavesinde sonucunda ise 2117 kPa 'a ulaşmıştır. Kireç katkılı numunelerdeki boy kısalma oranı %12 'den %1,5 'e azalmıştır. Çalışmalardaki sonuca göre artan mukavemet artışları ve deformasyonlardaki azalma sayesinde yol alt yapısında kullanılabilecek olan kireç, çimento, polimer ve silikon karışımları yol kesitlerinde küçültme ve buna bağlı olarak maliyetlerde azalma sağlayabileceğini göstermiştir.

As (2019), çalışmasında sülfatın ($Na_2SO_4$ ve $CaSO_4.2H_2O$) C sınıfı uçucu kül ile stabilizasyonu sağlanan şişen zemin üzerindeki etkisi incelemiştir. Şişen zemin laboratuvar ortamında kaolin ve bentonit kullanmış ve Soma ve Sivas-Kangal Termik santrallerinden temin edilen C sınıfı uçucu küller ana katkı malzemeleri olarak seçmiştir. Optimum uçucu kül oranı Soma (SFA) ve Sivas-Kangal (KFA) uçucu külleri için sırasıyla %15 ve %10 olarak seçmiştir. Uçucu külün sülfat içeren zeminler üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacı ile tanımlama, şişme ve tek eksenli basınç

dayanımı deneyleri yapmıştır. Aynı zamanda XRD analizleri, zeta potensiyel testleri ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri kullanmıştır. %15 SFA ile iyileştirilen numunenin şişme potansiyeli sülfat eklenmesinden pozitif olarak etkilediğini gözlemlemiştir. sülfat eklemek %4 oranında kireç ile stabilize edilen numunenin şişme potensiyelinde genelde bir artışa neden olduğunu, %10 KFA ile iyileştirilen numunenin şişme potansiyeli özellikle CaSO4.2H2O'dan olmak üzere sülfat eklenmesinden pek fazla etkilenmediğini gözlemlemiştir. Na2SO4 eklemek uçucu kül ve kireç ile iyileştirilen numunelerin dayanımlarını genelde olumsuz etkilemiş ancak $CaSO_4.2H_2O$ eklemenin dayanıma önemli bir etkisi olmadığını saptamıştır Tuzlanma (salination) ve etrenjit oluşumu nedeniyle 10ºC'de kürlenen 40000ppm $Na_2SO_4$ eklenmiş uçucu kül ile iyileştirilen numunelerde ciddi dayanım kayıpları olduğunu gözlemlemiştir.

Saygılı (2018), sıvı melamin formaldehit polimerinin, kaolen türü killerin mukavemetine etkisini incelemiştir. Optimum su muhtevasına getirilerek sıkıştırılan kaolen numunelerinin içerisinde sıvı melamin formaldehit polimeri ekleyerek serbest basınç dayanımlarını araştırmıştır. Kullanılan sıvı polimer optümum su muhtevsına dikkat edilerek yüzde 3, 6, 9 ve 12 oranlarında eklenmiştir. Hazırlanan bu polimer katkılı numuneler 3, 7, 14 ve 28 gün süre ile kürleme işlemine tabii tutmuştur. Kür süresi sonunda serbest basınç testleri yapılan numunelerde, polimer katkı oranı ve kür süresi arttıkça mukavemet özelliklerinde büyük oranda artışlar gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuca göre melamin formaldehit sıvı polimer katkısı zemin iyileştirme yöntemi olarak killi zeminlere uygulanabileceğini saptamıştır.

Taş ve diğ. (2018), çalışmalarında düşük plastisite özelliği gösteren killi bir zeminin stabilizasyonunda kullanılan %25 uçucu küle, %0, %5, %10, %15, %20 gibi farklı oranlarında Bayburt taşı ilave etmişlerdir. Yapılan tek eksenli serbest basınç deneyi sonuçlarına göre Bayburt taşının %10 oranında katıldığı %25 uçucu kül içeren karışımın en yüksek dayanım değerine ulaştığı görülmüştür.

Özenç (2018), biyopolimer ve polimer kullanılarak stabilize edilmiş zeminlerde değişen kürleme süresine bağlı olarak donma – çözülme etkisi altında mekanik özelliklerinde meydana gelen değişim ile ilgilenmiştir. Kaolin kiline %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 oranlarında ksantan gam ve guar gam biyopolimerleri ile anyonik polimer

kullanarak 5 ve 10 döngü donma-çözünme etkisine maruz bırakmıştır. 7, 14 ve 28 gün kürleme işlemi neticesinde serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen değişimleri gözlemlemiştir. Deney sonuçları neticesinde biyopolimer katkılı örneklerde katkı yüzdesine ve kür süresine bağlı olarak serbest basınç dayanımında artış olduğunu; anyonik polimer katkı kullanıldığı durumunda artışın belli bir değere kadar olduğu sonrasında ise azaldığı görmüştür. Donma – çözülme etkisine maruz bırakılan numunelerde serbest basınç dayanımında ciddi oranda azalma olduğunu ve daha gevrek bir davranış gösterdiğini gözlemiştir.

Alami (2018), çalışmasında kırıntı lastik parçalarını kil zemin ve kum zemin ile farklı yüzdelerde kullanarak zeminin dayanımı üzerindeki etkisi araştırmıştır. %100, %80, %70 ve %60 kaolini kili %0, 20, %30 ve %40 oranlarındaki kum ile karıştırmıştır. Yapılan laboratuvar çalışmasında %5 kireç zemine eklenerek kirecin etkisi de incelemiştir. Hızırlanan numune 28 gün boyunca desikatörde bekletilmiş, 28 gün sonra serbest basınç deneyi yapılarak numunelerin mukavemeti belirlemiştir. Daha sonra %100, %80, %70 ve %60 oranında kaolin kilini %0, %20,%30 ve %40 oranlarında kum ile karıştırarak, her biri karışım için, zemine belli oranlarda eklenen lastik çiplerinin (%0, %1, %2 ve %4 etkisi incelemiştir. Deney sonuçlarına göre, zeminde kullanılacak kırıntı lastik oranının optimum değeri %2' olduğunu, bu değerden daha fazla kırıntı lastik kullanılması dayanımda aşırı düşüşlere sebep olduğunu görmüştür. Kil-kum karışımlarına eklenen %5 kirecin dayanımı artırdığı ve bu artışın bazı numunelerde %146 civarında olabildiği belirlemiştir.

Yorulmaz (2018), çalışmasında mermer toz atıkları ile stabilize edilmiş kil zeminin mukavemeti üzerinde, donma-çözülme ve kür süresi etkisinin CBR deneyleri ile değerlendirilmesi yapmıştır. Bentonit ve Kaolen kil zeminlerine, katkısız ve belirlenen oranlarda Kalsitik ve Dolomitik mermer tozu karıştırılarak kıvam limitleri, plastisite indisi ve zemin sınıfları belirlemiştir. Standart proktor deneyleri ile belirlenen optimum su içeriğinde hazırlanan numunelerin; anlık, 7 günlük, 1 ve 2 aylık kür süreleri ve donma-çözülme sonrası CBR deneyi üzerindeki etkileri araştırlmıştır. Ayrıca numuneler üzerinde SEM ve EDS analizleri yapılarak artan atık oranına bağlı olarak mikro yapı açısından değerlendirilmesi yapmıştır. Deney sonucunda atık mermer tozlarının plastisite indisinin azaltılması ve zemin stabilizasyonu üzerinde olumlu etkidini gözlemlemiştir. Dayanım değerlerinde anlık deney verilerinde büyük

bir değişiklik olmadığını, kür süresi ile dayanımda artışlar meydana geldiğini ve donma-çözülme deneylerinde ise 3. ve 5. çevrimlere kadar dayanımın azaldığı ve daha sonra artışların olduğu görmüştür.

Eskişar ve Altun (2017), çalışmalarında kaolin ağırlıklı bir zeminde iyileştirme amacıyla kalsiyum karbür kullanımının zeminin mühendislik özelliklerini nasıl etkilediği araştırmışlardır. Farklı oranlarda kalsiyum karbür katılarak zemin örneklerinin önce atterberg limitleri belirlenmiş ardından kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Zemin örnekleri optimum su içeriklerine göre hazırlanmışlardır. Silindirik zemin örnekleri üzerinde serbest basınç deneyleri yapılarak farklı kür sürelerindeki mukavemet gelişimleri incelemişlerdir. Plastisite indisinin sabit bir değere yakınsadığı %7-8 oranındaki kalsiyum karbür miktarı sabitlenme noktası olarak belirlmişlerdir. Kalsiyum karbür katkısının sağladığı en büyük mukavemet değeri de %12 oranında kalsiyum karbür kullanıldığı zaman gözlemlemişlerdir. %10 kalsiyum karbür eklenirse katkısız zeminin iki katı kadar mukavemet elde etmişlerdir. Kalsiyum karbürün Portland çimentosuna alternatif olabilecek bir zemin katkısı olduğunu saptamışlardır.

Yeşilçiçek (2016), çalışmasında yüksek plastisiteli killi yol taban zemininin, bor minerali olan kolemanitin işlenmesi sonucu açığa çıkan atık ve kireç katkılarıyla stabilizasyonu deneysel olarak araştırmıştır. Kireçsiz %0, %5, %10, %15 ve %20 oranları ile %2,5, %5, %7,5 ve %10 kireçli karışımlar hazırlamıştır. Yapılan deney sonuçları, kolemanit atığı ve kirecin kombinasyonunun zemininin işlenebilirlik, plastisite, sıkışabilirlik ve dayanım gibi mühendislik özelliklerini sadece kolemanit atığına göre daha çok iyileştirdiğini göstermiştir. Fakat sadece kireçli karışımlara göre daha az iyileştirme yaptığını belirlemiştir. Bu çalışmada, %10 kolemanit ve %10 kireç içeren karışımın çalışılan zeminin stabilizasyonunda en uygun çözüm olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Alpyürür (2016), çalışmasında gazbetonu (GB) öğütürek kullanmış ve yüksek plastisiteli bentonit kili (CH), düşük plastisiteli kil (CL) ve kum zeminler ile karıştırarak deney numuneleri hazırlamıştır. Saf halde CH, CL ve kum numunelerine ek olarak kuru ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında öğütülmüş gazbeton içeren CH-GB, CL-GB ve Kum-GB numuneleri kullanarak elek analizi ve hidrometre deneyleri, Harvard minyatür kompaksiyon, serbest basınç, kesme kutusu, kaliforniya

taşıma oranı deneyleri yapmıştır. Bu deneylere ilave olarak yüksek plastisiteli bentonit kili ile hazırlanan numunelere şişme basıncı deneyleri de uygulayarak, öğütülmüş gazbeton atıklarının bentonitin şişme parametrelerine etkisini araştırmıştır. Çalışma neticesinde, öğütülmüş gazbetonun problemli zeminlerin yüzeysel stabilizasyonunda kullanılmasının uygun olduğu, özellikle düşük mukavemet ve yüksek şişme potansiyeline sahip zeminlerde oldukça etkili olabileceği belirlemiştir.

Pulat ve diğ. (2016), çalışmalarında zantan gam, kitosan ve kitin olmak üzere üç farklı biyopolimer kullanarak doğal kaolin, bentonit ve kum karışımlarının permeabilite ve kayma dayanımı davranışlarını araştırmışlardır. Deneyler neticesinde zantan gam ve kitosan kullanılan deney numunelerinin geçirimlilik katsayısında 30 kata varan azalmalara neden olduğu görmüşlerdir. Biyopolimerlerin kayma mukavemetine etkisine incelendiğinde ise %1'lik zantan gam ve kitosan konsantrasyonunun içsel sürtünme açısı değerinde %10-15 civarında bir artış meydana getirdiği belirlenmiştir. Bu çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar biyopolimerlerin geçirimsiz kil kullanılacak baraj gövdelerinde ve çöp depolama alanlarında kullanılabilineceği sonucuna ulaşılmıştır.

Ghabaee (2015), yüzeysel zemin stabilizasyonu kapsamında bentonit kiline kireç ilave ederek taşıma gücünün değişimini gözlemlemiştir. Optimum su muhtevasında hazırlanan saf bentonit numunesi kullanılarak serbest basınç deneyi ile, bentonitin taşıma gücü belirlenmiştir. Saf bentonite, kuru zemin ağırlığının %3, %6 ve %9'u oranlarında kireç ekleneyerek serbest basınç deneylerinde kullanılmak üzere numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere, 7, 14 ve 28 gün kürleme işlemine tabii tutulmuş ve sonrasında serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler neticesinde, yüksek plastisiteli bentonitin mukavemetinde farklı yüzdeler ve farklı kür sürelerinde artış görüldüğü gözlemlenmiştir.

Özkan (2015), çalışmasında Kaolinit ve bentonit karışımına ağırlıkça %5 ve %25 oranında fosfojips eklemiş ve şişme kapasitesine etkisini incelemiştir. Çalışma kapsamında granülometri tespiti, atterberg kıvam limitler, şişme yüzdesi ve karışımların şişme oranları belirlenmiştir. Kullanılan fosfojipsin şişme potansiyelini azalttığını ancak fosfojips oranının %15 üzerine çıktığında herhangi bir etki olmadığı gözlemlenmiştir. İlave olarak fosfojips, %15 öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve

%15 kireç ile beraber kullanılmış, şişme potansiyelinin %43,16'dan %9,16'ya indiği görülmüştür.

Batman (2015), Erzurum Oltu – Narman yöresinde iki farklı bölgeden yüzeyden 1 m. derinlikte normal konsolide olmuş kırmızı ve yeşil kil tabakalardan numune almıştır. Alınan numunelere ağırlıkça %10, %20, %30 ve %50 oranlarında öğütülmüş kuvars kumu ekleyerek karışımlar oluşturmuş ve optimum su içeriğini belirlemiştir. Optimum su içeriğine göre deney numuneleri hazırlayarak deneyler yapmış, deneyler neticesinde öğütülmüş kum oranı arttıkça şişme basıncında ve atterberg kıvam limitlerinde azalma gözlemlemiştir. Kırmızı kil numunesi hariç diğer numunelerde ise serbest basınç dayanımının da azaldığı görülmüştür. Artış gösteren parametreler ise maksimum kuru birim ağırlık ve içsel sürtünme açısı olarak belirlenmiştir.

Çimen ve Dereli (2014), çalışmalarında yüksek plastisite özelliği gösteren kile, ağırlıkça belirli oranlarda volkanik tüf ve amorf silika eklemiş ve Geoteknik özellikler incelenmiştir. Sonraki aşamada ise %5 oranında kireç, kil içerisine eklenmiş ve katkılı deneyler tekrarlanmıştır. Karışımların optimum su içerikleri belirlendikten sonra serbest basınç deneyi ve sabit hacimli şişme deneyi yapılmıştır. Serbest basma deneylerinden sonra numunelerin SEM analizleri yapılarak görüntüleri alınmıştır. Deneyler neticesinde, volkanik tüf etkisiyle basınç dayanımının arttığı, şişme basıncının ilk olarak azaldığı sonrasında yeniden yükseldiği görülmüştür. Kireç ve volkanik tüf katkılı deneylerde ise serbest basınç mukavemetinin daha fazla arttığı, şişme basıncının daha fazla azaldığı ve kireç ve amorf silika katkılı deneylerde ise serbest basınç mukavemetinin daha fazla arttığı, şişme basıncının daha fazla azaldığı belirlemişlerdir. Aynı orandaki amorf silika katkısının basınç mukavemetine etki ettiği, volkanik tüfün ise şişme basıncını azalttığı görülmüştür.

Deewal (2014), boksitten alüminyum üretimi sırasında atık olarak meydana gelen kırmızı çamurun stabilizasyonunda kireç ve alçıtaşının kullanılabilirliğini araştırmıştır. Kırmızı çamura %4, %8 ve %12 oranlarında kireç ilave etmiş, daha sonra bu kireçli karışımlara %1 oranında alçıtaşı eklemiştir. Toplam 7 farklı numune üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre serbest basınç dayanım değeri en yüksek olan numune %12 kireç + 14 %1 alçıtaşı karışımlı numune olduğunu bu karışım numunesinin de %7,9 ile en yüksek CBR değerini verdiğini belirlemiştir.

Tülek ve diğ. (2014), yaptıkları çalışma ile kimyasal atık alçıların stabilizasyon malzemesi olarak kullanılıp kullanımayacağının araştırmasını yapmışlardır. Deneylerde fosfoalçı, kalsiyum tuzlu boroalçı, sodyum tuzlu boroalçı, desülfoalçı kullanılmışır. Bu alçı çeşileri %0, %5, %10 ve %15 oranlarında zemin içerisine eklenmiş ve deney numuneleri hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde 2 ve 7 günlük serbest basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. %5 ve %10 kalsiyum tuzlu boroalçı ve sodyum tuzlu boralçı, %10 ve %15 fosfoalçı ve desülfoalçı katkısı; plastisite indislerini düşürmüş, ancak maksimum kuru birim hacim ağırlıklarını, optimum su içeriklerini ve serbest basınç dayanımlarını arttırdığı gözlemlenmiştir.

Çetiner (2014), çalışmasında uçucu kül ve desülfojipsin şişen zemin stabilizasyona etkisini incelemek amacıyla kireç kullanmış, ve şişen zemine 0'dan %8'e kadar eklemiştir. Uçucu kül, desülfojips ve kireç eklenmiş numuneleri 7 ve 28 gün süre ile küre tabii tutmuş ve serbest şişme deneyi yapmıştır. Deneyler sonucunda şişme yüzdesinin azaldığı, şişme hızının ise arttığı gözlemlenmiştir.

Yılmaz (2014), çimnto fırını tozunun (ÇFT) şişme potansiyeline etkisi incelemiştir. Kaolin ve bentonit karıştırılarak zemin numunesi hazırlamıştır. Çimento fırını tozu ağırlıkça %0 ila %12 oranında katmıştır, 7 ve 28 gün kür uygulamıştır. Deneyler karşılaştırma amacıyla, şişen zemin numunesine CKD yerine kireç (%3, %6 ve %9), çimento (%3, %6 ve %9), ve kum (%3, %6, %9, %12 ve %15) katılarak da tekrar etmiştir. %12 çimento fırın tozu kullanılarak şişen zeminin şişme yüzdesi kürsüz %36,63'den %6,74'e, 7 gün kür ile %35,58'den %6,32'ye ve 28 gün kür ile %33,63'den %6,00'ya düştüğünü gözlemlemiştir. Çalışma sonucunda, şişen zeminlerin çimento fırın tozu kullanılarak iyileştirilebileceği sonucuna varmıştır.

Çoruh ve diğ. (2014), çalışmalarında borojips maddesinin, yol üstyapılarındaki alttemel tabakalarında bağlayıcı madde olarak kullanımını incelemişlerdir. Borojips atığı ile alttemel malzemesi çeşitli oranlarda karışırılmış ve bu numunelere serbest basınç dayanım deneyi ve cbr deneyi yapılmıştır. %20 borojips ilaveli karışımlardan 9.5 kg/cm²'lik maksimum serbest basınç dayanım değeri elde edilirken %50 borojips ilaveli karışımlardan %70' lik maksimum CBR değeri elde edilmişir. %50 borojips içeren alttemel tabakası kullanılarak AASHTO esnek üstyapı tasarımı yapmışlardır. Yapılan bu tasarımda, üstyapıda kullanılan toplam agrega miktarı %43, yol yapım

maliyeti ise %12 azalmıştır. Sonuç olarak esnek üstyapılarda borojips kullanımıyla, üstyapı maliyetinin ve bor atığının sebep olduğu çevre kirliliğinin azalabileceğini görmüşledir.

Pekdemir (2013), çalışmasında bir firmadan temin edilen mikronize bir kil, silis dumanı, kırmızı çamur ve kireç ile muamele edilerek bazı özellikleri iyileştirilmesi üzerinde çalışılmıştır. Bu amaçla mikronize kilin dayanım özellikleri, şişme potansiyeli, geçirimlilik özellikleri incelemiştir. Deney sonuçlarına göre silis dumanı, kırmızı çamur ve kireç mikronize kilin dayanımını yükseltirken, şişme basıncını ve geçirimliliğini azalttığını gözlemlemiştir. Sonuç olarak, silis dumanı kırmızı çamur ve kireç ile muamele edilmiş mikronize kilin zemin özelliklerini iyileştirerek, Geoteknik problemler açısından olumlu olduğu görülmüştür.

Mutman (2013), çalışmasında zeytinyağı atığı olan prinanın 50 ºC' de 1 saat süre ile yüksek ısı fırınında yakılmasıyla elde edilen prina külünün saf bentonit kilinin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini incelemiştir. Deneysel çalışmada öncelikli olarak saf bentonit kilinin kimyasal ve minerolojik analizini yaptıktan sonra 0,425 mm elekten geçirdiği prina külünü %1 artışlarla %10 oranına kadar zemin numunesine ekleyerek kıvam limitleri ve kompaksiyon deneylerini yapmıştır. Optimum su içerikleri belirlenen karışım numuneleri 0, 1, 7 ve 28 günlük kür sürelerinin sonunda serbest basınç deneyine tabi tutmuştur. Serbest basınç deneyi sonucunda en yüksek değeri veren katkılı numuneye konsolidasyon deneyi uygulamıştır. %5 prina külü oranına kadar LL değeri azalmakta sonra tekrar artmakta olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca şişme basıncı değeri saf bentonit kilinde daha yüksek iken, %1 prina külü katkılı numunede %50 oranında azaldığını belirlemiştir.

Dereli (2013), tez çalışmasında şişme özelliği yüksek olan bentonit kiline belirli oranlarda amorf silika ve kolemanit minerali ayrı ayrı karıştırarak mühendislik özelliklerine olan etkilerini araştırmıştır. Deney sonuçları değerlendirilerek iki katkı arasından amorf silika seçilerek; %5 kireç katkısı sabit tutularak deneyler tekrarlanmıştır. %5 kireç katkılı amorf silikalı numuneler 7, 14, 28 gün küre bırakılarak serbest basınç deneyleri yapmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda %2 kolemanit katkısı ve %6 amorf silika katkısının şişen zeminlerde iyileştirme amaçlı kullanılabileceği belirlemiştir. %5 kireç katkısı sabit tutularak amorf silika değişiminin

incelendiği deneylerde ise artan amorf silika miktarının serbest basınç mukavemetini arttırdığı saptamıştır.

Aksoy ve diğ. (2013), çalışmalarında kil ile uçucu kül ve polipropilen lif malzemesi kullanılarak elek analizi, hidrometre, atterberg limitleri, piknometre ve standart proktor deneyleri yapmışlardır. İlaveten uçucu kül ile kil numunesini yarı yarıya karıştırarak kil-uçucu kül karışımı oluşturmuş ve içerisine ağırlıkça %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0'si oranında polipropilen lif karıştırmışlardır. Zayıf zemine uçucu kül ve fiber malzeme katılarak zemin iyileştirme yöntemi uygulanarak yapılan deneyler sonucunda fiberli kil-uçucu kül karışım malzemesinin CBR ve serbest basınç değerlerinde büyük ölçüde iyileşme olduğu tespit etmiş ve kil-uçucu kül karışımı için en uygun fiber katkı oranı karışımın ağırlıkça %1,0'i olarak belirlenmişlerdir. Yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde; kil-uçucu kül karışımının ağırlıkça %1,0'i oranında fiber katkısıyla hazırlanan fiberli kil-uçucu kül karışımında yapılan laboratuvar deney sonuçları fibersiz kil-uçucu kül karışımının değerleriyle karşılaştırıldığında, fiberli kil-uçucu kül karışımının CBR değerinin %100, serbest basınç değerinin ise %48 artış gösterdiği görmüşlerdir. %1,0 fiber katkılı kil-uçucu kül karışımının CBR ve serbest basınç değerleri kilin yalın haldeki değerleriyle karşılaştırıldığında; fiberli karışımın CBR değerinin %500, serbest basınç değerinin ise %108 artış gösterdiği görmüşlerdir.

Koteswara ve diğ. (2012), şişen zeminlerin stabilizasyonunda potasyum klorür (KCL) ve pirinç kabuğu külünün kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Zemin sınıfı CH olarak belirlenen zemine ait parametrelerin belirlenmesi için gerekli deneyleri uygulamışlardır. KCL çözeltisi %0~3 arasında, pirinç kabuğu külünü %0~16 arasında zeminin kuru ağırlığınca ilave ederek şişme basıncı ve şişme yüzdelerini belirlemişlerdir. KCL oranı arttıkça LL değerinde ve şişme basıncında azalma olduğunu, %0,5 KCL ilavesi ile 14 günlük serbest basınç dayanım değerlerinin %100'den fazla arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca KCL + pirinç kabuğu külü karışımlarını 1, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonunda serbest basınç deneyine tabi tutmuşlardır. Sonuç olarak, 28 gün küresi sonunda %1 KCL + %12 pirinç kabuğu külü karışım numunesinin mukavemet değerinin %515 arttığını gözlemişlerdir.

Bilgen ve diğ. (2012), çalışmalarında Düşük plastisiteli, Uzunçiftlik kiline çeşitli oranlarda BOS ve kireç karıştırarak numune hazırlamış, ve bu numunelere ASTM

D4609 standardına göre deneyler yapmışlardır. Deney neticesinde, Uzunçiftlik kilinin serbest basınç dayanımının 279 kPa olduğu ve bu basınç etkisinde %15 birim şekil değiştirme yaptığı belirlenmiştir. Uzunçiftlik kiline ağırlıkça %3,33 oranında BOS eklenmesi halinde, serbest basınç değeri 28 gün küre tabi tutulması sonucunda, 960 kPa'a çıkmaktadır. %5 kireç ile hazırlanan karışımda ise serbest basınç değeri 2700 kPa'ya kadar artmaktadır. %5 kireç ve %3,33 BOS ile hazırlanan karışım da ise serbest basınç 4000 kPa değerine yükseltmekte ve birim şekil değiştirme oranı %2'ye düşmektedir. Aynı karışım, %6 olan yaş Kaliforniya taşıma oranı (CBR) değerini %135'e arttırmaktadır. Bu çalışma, Çelikhane cürufunun, killerin mukavemet özelliklerinde etkili olduğu ve kireç ile birlikte kullanıldığında çok daha etkili bir stabilizasyon malzemesi olduğu görülmüştür.

Etminan (2012), bu çalışma kapsamında yüksek ve düşük plastisiteli killi zeminlerin uçucu kül, yapay polimerler (polipropilen, kopolimer ve Vhp fiber) ile stabilizasyonunu incelemiştir. Çalışmasında ilk olarak, iki farklı özellikteki zeminlerin mühendislik özelliklerini belirledikten sonra uçucu külün kimyasal ve fiziksel özelliklerini, üç farklı fiberin fiziksel özelliklerini ayrı ayrı saptamıştır. İki farklı zemin sınıfına farklı oranlarda katkı maddelerini ekleyerek oluşturulan karışım numuneleri üzerinde kompaksiyon, CBR ve serbest basınç deneylerini uygulamıştır. Deney sonuçlarına göre, katkı maddelerinin ayrı ayrı veya uçucu kül ile karıştırılarak deneye tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre her iki zemin sınıfı için de mühendislik özelliklerini iyileştirdiğini görmüştür.

Çalık (2012), çalışmasında montmorillonit ve nontronit içeren yüksek plastisiteli killi bir zeminin perlit ve kireç katkılarıyla stabilizasyonunu incelemiştir. %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 perlit oranları ile kireçsiz ve %8 (optimum kireç oranı) kireçli karışımlar hazırlanmıştır. Deney sonuçları, perlit ve kirecin kombinasyonunun; zeminin işlenebilirlik, plastisite, permeabilite, kompaksiyon, mukavemet ve durabilite gibi teknik özelliklerini sadece perlite veya sadece kirece göre daha çok iyileştirdiğini gözlemlemiştir. %30 perlit ve %8 kireç içeren SKP30 karışımının bu zeminin stabilizasyonunda optimum çözüm olduğunu ortaya çıkarmıştır. Yapılan regresyon analizleriyle üretilen matematiksel denklemler, geoteknik özellikler ile perlit oranı ve zaman değişkenleri arasında güçlü ilişkilerin mevcut olduğunu göstermiştir.

Vural (2012), çalışmasında farklı olarak yüksek şişme potansiyeline ve dispersibilite özelliğine sahip Afyon ve Urfa bölgelerine ait killerin çimento ve zeolit (doğal puzolan) ile aynı anda hem şişme hem de dispersibilite özelliklerine ilaveten dayanım parametrelerine olan etkileri de araştırmıştır. Bu kapsamda, çeşitli yüzdelerde doğal zeolit ile karıştırılmış çimento katkısının killi zeminlerde şişme potansiyeli ve dispersibilite özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çimento yüzdesi (%3) sabit tutularak farklı yüzdelerde doğal zeolit kuru ağırlığın yüzdesi olarak (%1, 3, 6, 10, 15 ve 20) dört farklı kil zemin numuneleri ile karıştırmıştır. Hazırlanan katkılı ve katkısız örnekler üzerinde; şişme yüzdesi, şişme basıncı, serbest basınç, dağılma ve iğne deliği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Dayanım deneyleri sonucunda kil tipine ve kür süresine bağlı olarak dayanım parametrelerinde önemli artışlar belirlemiştir. Deneyler neticesinde, bu killi zeminlerinçimento ve doğal zeolit karışımı ile etkin bir biçimde iyileştirilebileceğini görmüştür.

Aziz (2012), çalışmasında lignin, kablo kaplaması plastik, pirinç kabuğu unu (RHP), pirinç kabuğu külü (RHA) ve araba lastiği külü (TA) kullanılarak şişen killerin iyileştirilmesi çalışmıştır. Deneylerde kullanılan şişen kil kırmızı kil ile bentonitin karıştırılmasıyla elde etmiştir. Lignin, kablo kaplaması plastik ve pirinç kabuğu unu ağırlıkça %20 ye kadar ve pirinç kabuğu külü (RHA) ile araba lastiği külü (TA) ise %10 a kadar değişik oranlarda şişen kile katmıştır. Hazırlana numuneler üzerinde kıvam limitleri, şişme ve serbest basınç deneyleri yapmıştır. Deney sonuçlarında %20 lignin katılan numune hariç bütün numunelerde likit limit ve plastisite indeklerinde azalma gözlemlemiştir. Ayrıca, kablo kaplaması plastik, RHP ve RHA artmasıyla şişme yüzdesinde azalma gözlemlenmiştir. Bununla beraber, ligninde %10 a kadar ve TA %5 e kadar şişme oranında azalma gözlenmiştir. Ligninin ve TA in oranlarının artmasıyla şişmede yüzdesinde artış gözlendi. Lignin için %10 ve TA için %5 şişme yüzdesi açısından değerlendirildiğinde optimum olarak belirlendi. Lignin, RHP ve RHA katılması ve ayrıca kür zamanının şişen kilin serbest basınç dayanımı üzerinde iyileştirirci etkisi olduğu gözlemiştir.

Bilge (2011), çalışmasında zemin stabilizasyonunda katkı malzemesi olarak yüksek fırın cürufu, uçucu kül, kireç ve zeolit kullanabilirliğini araştırmıştır. Bentonit kili içerisine %10 oranında kireç, %5, %10 ve %15 oranlarında ise yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve zeolit eklenmiştir. Homojen bir biçimde iyice karıştırılan numuneler

üzerinde özgül yoğunluk, atterberg limitleri, hidrometre, kompaksiyon ve serbest basınç deneyi uygulamıştır. Yapılan deneyler neticesinde, yüksek plastisite özelliği gösteren killi zeminlerde yüksek fırın cürufu, kireç, uçucu kül ve zeolitin zemin iyileştirme çalışmalarında alternatif çözüm olarak kullanılabileceği belirlemiştir. Küre tabii tutulan numuneler arasında maksimum mukavemeti %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit karışımında gözlemlenmiştir.

Öztürk (2011), çalışmasında Seyitömer uçucu külü (UK), yapay granit atığı (polisaj) ve bağlayıcı malzeme olarakta kireç kullanılarak, mevcut olan zayıf zeminlerin iyileştirmesi üzerine etkileri araştırmıştır. Kaolen kili içerisine UK, polisaj ve kireç belirli oranlarda eklenmiş ve homojen olarak karıştırılarak deney numuneleri oluşturulmuştur. Bu numuneler hazırlanırken kireç ve uçucu kül miktarı %15 oranında sabit tutulmuş, polisaj oranı ise %10, %15, ve %20 şeklinde ayarlanmıştır. Hazırlanan her malzemenin laboratuvar ortamında özgül ağırlık değerleri, zemin sınıflandırma deneyleri ve kompaksiyon deneyleri yapmıştır. CBR deneyleri için hazırlanan numuneler 1 gün, 7 gün, 14 gün, 28 gün ve 56 gün sürelerinde sabit nem ve sabit sıcaklığa sabit bir ortamda bekletildikten sonra deneye tabi tutmuştur. Yapılan tüm deneysel çalışmalar sonucunda kaolen kiline ilave edilen katkı maddeleri ile hazırlanan zemin numunesinin mevcut durumdaki zeminin mukavemet değerlerini artırdığı gözlemlemiştir.

Yavaşcan (2010); bu çalışmasında, İskenderun demir-çelik fabrikasında yapılan üretimler sonucunda atık malzeme olarak açığa çıkan yüksek fırın cürufu, iki farklı incelik düzeyine kadar öğütülmüş ve %5, %10, %20, %30 ve %50 çeşitli oranlarda düşük plastisite özelliği gösteren Kolsuz kili ile çok yüksek plastisite özellikli bentonit kilinin; dane birim hacim ağırlığı, atterberg limitleri ve kompaksiyon parametreleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Deney neticelerine göre, bentonit kilindeki iyileşmenin Kolsuz kilinden daha yüksek olduğu fakat her ikisi içinde yeterli iyileşme sağlanamadığı gözlemlenmiştir.

Bozkurt Sarıalioğlu (2010), zeminin stabilizasyonu için, üç farklı oranda yüksek kalsiyumlu kireç ve Consolid444+Solidry (C+S) katkısı kullanılarak deneysel bir çalışma yürütmüştür. Yapılan şişme deneyleri değerlendirildiğinde, (C+S) ve yüksek kalsiyumlu kireç katkılarının, şişme davranışını önemli ölçüde değiştirdiği

belirlemiştir. Kireç katkısının büzülme davranışı üzerinde daha etkili olduğu görmüştür. CBR değerleri açısından her iki katkı da oldukça iyi artış oranlarına ulaşırken, (C+S) katkısı daha yüksek sonuçlar vermiştir. Karayolları teknik şartnamesi'ne uygun bir üstyapı tabanı malzemesi oluşturması açısından, %7 oranında kireç katkısı yeterli olmuştur. %2 oranında (C+S) katkısının da LL, PI ve ?dmax kriterleri dışında, stabilizasyon şartlarını sağladığı belirlemiştir. Her iki katkının artan oranlarıyla kür edilen zeminin serbest basınç dayanımlarında artış gözlemlemiştir. Üç eksenli basınç (UU) deney sonuçlarına göre, kohezyon değerlerinin benzer mertebelerde azaldığı ve içsel sürtünme açısı değerlerinin de arttığı görülmüştür. Her iki katkı, üstyapı tasarımında alttemel ve seçme malzeme gereksinimini ortadan kaldırmıştır. Ancak (C+S) katkısı plentmiks temel tabakasının 5 cm arttırılmasını gerektirmiştir. Bu çalışmada yapılan birim fiyat analizi ile kireç katkısının daha ucuz bir stabilizasyon yöntemi olduğu ortaya koymuştur.

Kızılçelik (2010), yüksek plastisi özellikli ve yüksek su içeriğine sahip killi zeminin hem sönmüş kireç hem de sönmemiş kireç kullanarak stabilize edip hangi oranda başarı sağladığını araştırmıştır. Yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda doğal su muhtevasında sönmemiş kireç kullanılarak hazırlanan numunelerin serbest basınç değerleri anlık, 1 ve 7 günlük deney sonuçları, sönmüş kireç kullanılarak hazırlanan numunelerin serbest basınç değerlerine oranla daha düşük kalmasına rağmen 28 günlük kür süresi sonucunda çok daha iyi sonuç verdiğini belirlenmiştir. Yaş CBR deneylerinde %5 sönmüş kireçli numuneler doğal numuneye göre %4'ten %23'e kadar artmıştır.

Buna göre, artan mukavemet ve azalan deformasyonların sayesinde yol altyapısında kullanılabilecek kireç karışımı yol kesitlerinde küçülmeye ve buna bağlı olarak da maliyetlerin azalmasına sebep olacaktır.

Civelekoğlu (2009), çalışmasında şişebilen killerin şişme ve dayanım özelliklerinin iyileştirilmesinde jipsin katkı maddesi olarak kullanım performansını araştırmıştır Çalışmada Bentonitin en iyi kompaksiyonu için gerekli olan optimum su içeriğini belirlemek üzere standart kompaksiyon deneyi gerçekleştirmiştir. %2,5, %5, %7,5 ve %10 gibi kütlece çeşitli oranlarda jips bentonite karıştırılmış ve hesaplanmış olan optimum su içeriğinde sıkıştırmıştır. Daha sonra; hem karışımsız hem de 7 günlük küre

bırakılmış jips karışımlı numuneler üzerinde kıvam limitleri, serbest şişme ve serbest basınç dayanımı deneyleri yapmıştır. Jips katkı maddesine bağlı olarak plastisite, şişme ve dayanımda meydana gelen değişimler jipsin şişebilen killerin iyileştirilmesinde etkin bir katkı maddesi olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Başer (2009), şişen zeminlerin stabilizasyonu için kireçtası tozu atığı ve dolomitik mermer tozu atığı kullanmıştır. Kaolin ve bentonit killerine %0 ile %30 arasında değişen oranlarda kireçtaşı tozu atığı ve dolomiy mermer tozu eklenerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Bu numunelere elek analizi, atterberg limitleri, kimyasal ve mineralojik bileşim, yüzdece şişme ve şişme hızı deneyleri yapılmıştır. Artan katkı oranıyla birlikte şişme yüzdesinde düşüş meydana geldiği, şişme hızının ise arttığı görülmüştür. Kürleme süresinin de etkisinin görülebilmesi amacıyla 7 ve 28 günlük kür uygulamaları yapılmış ve kürleme işleminin de olumlu yönde etki ettiği görülmüştür.

Gündüz (2008), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi kampüsünde bulunan yüksek şişme özelliği gösteren killi bir zemine %1, %3, %5, %7, %10 ve %20 oranlarında tinkal atığı karıştırarak stabilizasyonda iyileştirme yapıp yapmadığını araştırmıştır. Araştırmada Tinkal atığı-şişme yüzdesi, Tinkal atığı-serbest basınç değerlerinin zamanla değişimi araştırılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde Tinkal atığının şişme potansiyeli üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı, taşıma gücüne de katkısının bulunmdığı gözlenmiştir.

Aksoyve diğ. (2008), çalışmalarında killi bir zemini, Tunçbilek uçucu külü ile stabilize etmiştir. Killi zemine %0, %3, %5 ve %10 gibi çeşitli oranlarda uçucu kül katılmış ve optimum su muhtevasında dört farklı numune elde edilmiştir. Her bir numune üzerinde 1 günlük, 7 günlük ve 30 günlük serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Deney sonucunda uçucu kül ilavesine bağlı olarak zeminin plastisitesinin kayda değer bir değişme göstermediği, optimum su muhtevası ve serbest basınç dayanımının arttığı gözlemlenmişlertir.

Eren ve Yıldız (2007), çalışmalarında çöp depolama alanları, baraj inşaatı gibi alanlarda su ve sıvı sızdırmazlığının sağlanması amacıyla kullanılan beyaz bentonit malzemesinin; çimento, kireç ve consolid444+solidry katkı maddeleri ile kullanılmasının uygun olup olmadığını araştırmışlardır. Bentonit kilinin optimum su

içeriğini ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlenmiş, sonrasında yaş CBR deneyi yapılmış ve zemin çok kötü olarak tanımlanmıştır. Bentonit kiline geçirimlilik deneyi de yapılmış olup, permeabilite katsayısı $1{,}73243x10^{9}$ $cm/sn^{2}$ olarak belirlenmiştir. Bu sonuç ile bentonit kilinin çöp depolama alanı, barajlar vb. yapılarda su ve sıvı sızdırmazlığı amaçlı kullanıma uygun olduğu belirlenmiştir. Bentonit numunesinin ıslak C.B.R. yüzdesi düşük bulunduğundan dolayı bentonit içerisine ayrı ayrı olmak üzere kireç, çimento ve consolid444+solidry katkıları ilave edilmiş ve bentonitin taşıma gücü arttırılmaya çalışılmışlardır. Tüm katkılar CBR yüzdelerinde artış meydana getirmiştir.

Çakılcıoğlu (2007), bentonit kiline %10 kireç, %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında uçucu kül ve zeolit ilave etmiştir. Homojen bir şekilde karıştırılan numuneler üzerinde özgül ağırlık, kıvam limitleri, hidrometre, kuru elek ve kompaksiyon deneyleri uygulamıştır. Kompaksiyon deneyinden bulunan optimum su muhtevası oranında tekrar numuneler hazırlanıp gününde, 7 günlük ve 28 günlük kürde bırakmıştır. Bentonit kiline ilave edilen her katkının mukavemeti arttırdığı gözlemlemiştir. Kürde bekletilen numunelerde en yüksek mukavemeti %100 Kil + %10 Kireç + %5 Zeolit + %5 Uçucu Kül göstermiştir. CH sınıfı killi zeminlerde kireç, zeolit ve uçucu külün zemin iyileştirilmesinde etkili bir çözüm olarak kullanılabileceğini belirlemiştir.

Motor (2007), çalışmasında borojips atı maddesinin alttemel tabakasında stabilizasyon malzemesi olarak kullanılmasını araştırmıştır. Başlangıçta çimento ile borojipsli numuneler hazırlamış fakat suya dayanımı olmayan numuneler üzerinde serbest basınç deneylerini uygulayamamıştır. Daha sonra alttemel malzemesi ile borojips %10, %20, %30, %40, %50 ve %100 oranlarında karıştırılarak CBR ve serbest basınç deneylerini uygulamıştır. %20 borojips ilaveli numunelerin serbest basınç dayanım değerlerinin ve %7 borojips ilaveli karışımların CBR değerlerinin maksimum olduğunu görmüştür. Ayrıca %100 granüler malzeme kullanılarak yapılan bir yol alttemelinin yerine %50 borojips kullanılarak alttemel inşa etmek, tabaka kalınlığını 35 cm'den 30 cm'ye düşürmüş, böylece kullanılan agrega miktarının %43, yol yapım maliyetinin tüm yol için %12, alttemel için %50 azaldığını belirlemiştir.

Taşpolat (2006), çalışmasında Afyon atık mermer tozu ve Şırnak Asfaltit tozlarının geçirimsiz kil tabakalarında kullanılmasının etkilerini araştırmıştır. Geçirimsiz kil tabakası olarak %90 kaolin ve %10 bentonit kullanmış, kil karışımına da %5, %10, %15 oranlarında mermer tozu ve asfaltit tozu ilave ederek deney numuneleri hazırlamıştır. Hazırlanan her bir deney numunesine üç eksenli, permeabilite, dane çapı dağılımı, Atterberg limitleri, elek analizi ve hidrometre deneyleri, Ph, Elektriksel iletkenlik ve Katyon Değişim Kapasitesi deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçları katı atık yönetmeliği ve literatür ile karşılaştırma yapılmış, her iki malzemenin de uygun olduğu görülmüştür.

Eroğlu ve diğ. (2005), çalışmalarında kireç çamurunun özelliklerinin belirlenmesini ve bu malzemenin orman yollarında iyileştirme amacıyla kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Seka–Afyon İşletmesi'nde üretim aşamasında ortaya çıkan kireç çamuru yaklaşık %47 rutubet oranıyla sağlanarak fiziksel ve kimyasal özellikleri standart metotlara uygun olarak belirlemişlerdir. Kireç çamurunu hava kurusu hale getirdikten sonra katkılı çimentoya, kumlu kil, balçıklı kil ve ağır killi zeminlere belirli oranlarda katılarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Deney sonucunda bu malzemenin belirli oranlarda kullanılmasının uygun olduğu değerlendirilmiştir.

İnan ve diğ. (2005), İzmir Çiğli Jet Üssü'nden aldıkları yumuşak kile, iki farklı uçucu kül ilave ederek stabilizasyon üzerine bir deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Bu kapsamda, ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında uçucu kül içeren karışımları hazırlamışlardır. Hazırlanan numunelerin optimum su muhtevaları belirlenmiş ve sonrasında numuneler optimum su muhtevasında sıkıştırmışlar; 1, 7, 28 ve 90 günlük serbest basınç dayanımları ölçmüşlerdir. Çalışma sonucunda, uçucu kül eklenmesinin zeminin serbest basınç mukavemetine olumlu etki ettiği, bu artışın da uçucu kül türüne göre değişimler gösterdiği tespit dilmiştir. Artan kül içeriği ve külün kireç içeriğine bağlı olan bu artışlar, puzolanik reaksiyon, uçucu külün boşlukları doldurma etkisi ve uçucu külün serbest kireç içeriğinin etkisi ile açıklamışlardır.

Yeşilbaş (2004), çalışmasında taş unu ve agrega artığının killerin şişme potansiyeline etkisini araştırmıştır. Şişen zemin numunesi olarak Kaolin ve bentonit karışımı kullanılmıştır. Bu karışıma ağırlıkça %0 ila %9 arasında değişen kireç katılmıştır. Agrega artığı ve taş unu ise ağırlıkça %0 ila %25 oranında katmıştır. Örneklerin dane

çapı dağılımı, atterberg limitleri, şişme yüzdeleri ve şişme hızı tespit edilmiş ayrıca 7 ve 28 günlük kür uygulaması yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde katkı yüzdesi arttıkça şişme yüzdesi ve şişme potansiyelinde azalma meydana geldiği belirlenmiştir.

Çabalar (2002), çalışmasında yapışkanlık özelliği gösteren veya katı partikül üretebilen bakteriler ile bunların zemin mekaniğindeki kullanılabilirliği araştırmıştır. Doğal polimerik malzeme üreten bu bakterilerin yanında, yapışkanlık özelliğine sahip olan sentetik polimerlerin yapısı üzerinde de durmuştur. Deneysel çalışmalarda Leighten Buzzord kumuna biopolimer eklenerek yapılan kesme kutusu deneyi yapmıştır. Yapılan bu çalışmada, yapılar için uygun olmayan zeminlerin bakteriler ve polimerik malzemeler kulanılarak iyileştirilebileceğini gözlemlemiştir.

Çakır (1999), çalışmasında uçucu küllerin zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini araştırmak üzere iki farklı oranda hazırlanan zemin ve uçucu kül karışımları üzerinde Standart Proktor ve Üç Eksenli Basınç Deneyleri gerçekleştirmiştir. Ayrıca uçucu külün zeminin mukavemetinde meydana getirdiği değişimin kür süresine bağlı olarak değişimini belirlemek üzere 1 günlük, 7 günlük, 33 günlük ve 195 günlük deney numuneleri de kullanmıştır. Standart proktor deneyleri neticesinde, zemine uçucu kül ilavesi ile maksimum kuru birim hacim ağırlığın azaldığı, optimum su muhtevasının ise arttığı tespit etmiştir. Gerçekleştirilen üç eksenli basınç deneyleri sonucunda ise, zemine uçucu kül ilavesi neticesinde maksimum deviatör gerilme değerlerinde %100 artış sağlamıştır. Drenajsız şarlardaki kohezyon değerleri yaklaşık %20 oranında artarken, kayma direnci açısında, bir günlük kür süresi sonunda 10°'lik bir artış meydana gelmiş ve artış zamana bağlı olarak devam etmiştir. Dayanımda meydana gelen artışın zamanla birlikte devam ettiğini göstermektedir. Öyle ki, mukavemet 1 günlük kür süresinde dahi %50 artarken, artışın büyük bir bölümü 33 günlük kür süresinde tamamlanmakta fakat artış, artım hızını azaltarak, zamana bağlı olarak devam etmektedir. %10 ve %20 uçucu kül ilavesinin incelendiği bu çalışmada, artan uçucu kül / zemin oranının mukavemette büyük bir değişim meydana getirmediği gözlenmiştir. çalışması neticesinde, uçucu külün zemin stabilizasyonu çalışmalarında kullanılabileceği sonucuna ulaşmıştır.

Acar (1998), çalışmasında Çinko-Kurşun-Metal Sanayii A.Ş 'den getirilen cürufun, endeks, kompaksiyon, konsolidasyon, kayma mukavemeti, CBR (Taşıma Oram) gibi

mühendislik özellikleri araştırarak, zemin stabilizasyonun da kullanılabilirliği incelemiştir. Kesme Kutusu Deneyleri, daha önceden belirlenmiş olan maksimum kuru birim hacim ağırlığında ve optimum su muhtevasında olacak şekilde Standart Proctor, Modifiye Proctor' da ve numune kurutulduktan sonra maksimum ile minimum boşluk oranında hazırlamış numuneler üzerinde yapmıştır. Yapılan çalışmada, cürufun,endeks, kompaksiyon, kayma mukavemeti, CBR (Taşıma Oram) gibi mühendislik özellikleri, karayollarında istenen standartlara yaklaştığı için, yol yapımında değerlendirilmesi üzerinde durulmuş, dolgularda ve yol üst yapısında alt temel malzemesi olarak kullanılabileceği görülmüştür. Ayrıca diğer ocak malzemeleri ile karıştırılarak, mekanik özellikleri iyi olmayan bir zeminin ıslahında da cüruftan yararlanılabilineceğini saptamıştır.

Bell (1996), bu çalışmasında killi zeminlerin üç önemli bileşiği olan kaolin, montmorillonit ve ince taneli kuvars minerallerine %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kireç ilave ederek elde edilen karışım numunelerinin mühendislik özelliklerini incelemiştir. Hazırlanan karışım numuneleri üzerinde kıvam limitleri, kompaksiyon deneyi, CBR ve serbest basınç deneyi yapmıştır. Serbest basınç deneyi için hazırlanan karışım numuneleri, 1, 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonunda incelemiştir. Yapılan laboratuvar deney sonuçlarına göre, plastik limit değerleri montmorillonit kilde çok, kaolinde az ve kuvars mineralinde ise önemli bir değişim olmadığını görmüştür. Likit limit değerleri ise kaolin ve kuvars mineralinde artmış, montmorillonit de azalmıştır. Serbest basınç dayanımları ve CBR değerlerinin kür süresinin artmasıyla arttığını görmüştür.

Tavus (1995), çalışmasında sıkıştırılmış kaolin kiline kireç ilavesinin etkilerini incelemeyi amaçlamıştır. Değişik kür ortamlarında farklı kireç muhtevalı numuneler üzerinde testler yapmıştır. Rijit-duvarlı sıkıştırma-kalıbı permeabilite aletleri kullanarak,sıkıştırma nem muhtevaları optimumun kuru veya yaş tarafında tutmuştur. Çalışma sonucunda, uygun miktarda kirecin eklenmesi sıkıştırılmış kaolin kilinin permeabilitesini düşürdüğünü, en etkili kireç oranı ağırlıkça %2 ve %5 olduğunu gözlemiştir.

## 1.2. Katkı Malzemeleri İle Zemin Iyileştirme Çalışmalarına Örnekler

Güner (2019), çalışmasında ticari kolemanit hem de kalsine edilmiş kolemanit minerali betona ilave edilmiş ve betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinde değişimi incelemiştir. Kolemanit minerali, dmax'ı 31,5 mm olan beton karışım hesabına, çimento ağırlığına göre %1,25, %2,5, %5, %7,5, %10, %12,5 ve %15 oranlarında ilave etmiştir fakat istenilen sonuçlar alamamıştır. Daha sonra dmax 24 mm olan beton karışım hesabı yapılmış ve kolemanit minerali aynı oranlarda betona ilave etmiştir. Çalışma sonucunda dmax'ı 24 mm olan betona kolemanit ilavesi betonun fiziksel özelliklerinde beton yollarda kullanılabilirliği açısından olumlu sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir.

Kara (2019), çalışmasında kolemanit minerali çimentoya %0, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında ikame edilerek Su/Çimento oranı 0,45 olan C30/37 beton üretimi yapılması amaçlamıştır. Çalışma kapsamında Ttaze betonların hava içeriği ve çökme miktarı belirlemiş olup küp,silindir ve prizmatik kalıplara dökülen beton örnekleri üzerinde 7, 28 ve 90. günlerde kapiler su emme, Schmidt çekici, ultrases geçiş hızı, aşınma, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak %5'e kadar kolemanit ikamesinin C30/37 beton sınıfında hedef basınç dayanımını sağladığı görmüştür. Dayanım ve durabilite özelliklerini geliştiren optimum kolemanit ikame oranının ise %3 olduğu tespit etmiştir. Çalışma sonucunda, malzeme özelliklerinin geliştirildiği görülmüştür ve çimentodan tasarruf sağlanması, bor madeni minerallerinin değerlendirilmesi bağlamında beton yollarda kolemanit kullanımının uygun olduğu kanısına varmıştır.

Elbistan (2019), çalışmasında termik santrallerde çıkan uçucu külün, kimyasal kompozisyonun standartların belirlediği kriterleri sağlamamasında dolayı çok az bir kısmının değerlendirilebildiğini öngörmüştür. Yapılan çalışma ile uçucu külün depolama sorunu ve çevre kirliliğine etkisini azaltmayı aynı zamanda üülke ekonomisine katkı sağlamayı amaçlamışlardır. Yapılan araştırmada, referans karışıma göre %40 oranında çimento azaltılmış, onun yerine %20 oranında uçucu külü, %10 pomza, %5 kolemanit ve %5 cam tozu kullanılarak, 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımları belirlemiştir. Basınç dayanımları, 7 günlük numunelerde referans numunelerinin %50'sine ulaşırken 90 günlük numunelerde ise referans numune basınç

dayanımının yaklaşık %72'sine ulaştığı görülmüştür. Sonuç olarak yeni bir mineral katkı elde edilmiş ve uçucu külü standarda uygun hale getirmiştir.

Baytekin Çiçek (2019), bu çalışma kapsamında yüksek sıcaklığa maruz kalmış, kolemanit konsantratör atığı katkılı harçların basınç ve eğilme kapasitelerindeki değişimler deneysel olarak araştırılmıştır. kolemanit konsantratör atığı ile çimento, %0, %2, %3, %4, %5, %6, %7, %8, %9 ve %10 oranlarında yer değiştirilerek harç numuneleri hazırmıştır. Bu numuneler 20, 150, 300, 450, 600 ve 750□C sıcaklıklara maruz bırakılmış ve havada soğutma işlemi gerçekleştirmiştir. Numuneler üzerinde basınç ve eğilme deneyleri yapmıştır. basınç dayanımında kolemanit katkısız referans numunelerinde basınç dayanımı kaybı 750□C'de %68, %10 kolemanit konsantratör atığı katkılı numunelerde ise %12 olarak bulmuştur. Kolemanit konsantratör atığı katkılı harç numunelerinde düşük sıcaklık seviyelerinde, basınç dayanımlarının arttığı ancak %4 kolemanit konsantratör atığı katkısı sonrası dayanımın azalma eğiliminde olduğu belirlemiştir. Aynı şekilde, Eğilme dayanımı kaybı, kolemanit katkısız numunelerde 750ºC'de %71, %10 atık katkılı numunelerde ise %59 olarak bulmuştur. Düşük sıcaklık seviyelerinde, Kolemanit katkılı harç numunelerinde, eğilme dayanımlarının arttığı ancak %5 kolemanit konsantratör atığı katkısı sonrası dayanımın azalma eğiliminde olduğu belirlemiştir.

Mushurov (2018), çalışmasında Portland çimentosu (PÇ) ile birlikte kolemanit, metakaolin ve süperakışkanlaştırıcıların yer alacağı en uygun bileşimi elde etmeyi amaçlamıştır. %1'lik süperakışlantırıcı çözeltinin kolemanit ve metakaolinle ayrı ayrı ve birlikte kullanımı ve 2, 7, 28 ve 90 günlük Basınç ve eğilme dayanımı, fiziksel ve mekanik özelliklerin yanı sıra birim ağırlık, su emme, boşluk yapısı, yayılma tablası ile kıvamı ve priz süresi testleri belirlemiştir. Çalışma sonrasında kolemanitin tek başına çimento harcına ilavesinin %43'e varan oranlarda basınç dayanımını düşürmesi ve %215'in üzerinde erken priz süresini uzattığını ve Karışıma %1'lik süperakışkanlaştırıcı ilave ile, kolemanitin basınc mukavemetine olan olumsuz etkisini azaltmış ve referans harç nümünesi ile kıyaslandığında basınç mukavemetini arttırdığını gözlemlemiştir.

Aygörmez (2018), çalışmasında metakaolin kısmi olarak silis dumanı ve kolemanit ile %40 oranına kadar ikame edilmiş ve bu malzemelerin, elde edilen geopolimer

kompozitlerin davranışına etkisi, mekanik ve durabilite özellikleri açısından incelemiştir. Başlangıç olarak, birim hacim ağırlık, su emme ve boşluk oranı değerleri araştırılmış, daha sonra polipropilen lifli ve lifsiz numunelerin basınç ve eğilme davranışı, aşınma direnci ve ultrases geçiş hızı deneyleri ile bir karşılaştırma yapmıştır. İkame malzemelerinin faydalı olduğunu kanıtlamıştır. Deney çalışmalarında 28 günlük sonuçlarda %100 metakaolin tabanlı geopolimer numuneler ile karşılaştırıldığında %10 kolemanit ve %20 silis dumanı katkılı numunelerde basınç dayanımı davranışında sırasıyla %2,02 ve %11,48'lik bir artış görülürken eğilme dayanımındaki artış ise %14,61 ve %29,44 olmuştur.

Eken (2018), çalışmasında laboratuvar ortamında üretilen organik küllerle ( mısır sapı külü, buğday sapı külü, çınar yaprağı külü ve ayçiçeği sapı külü) ve inorganik mineral katkılarla (kolemanit, diatomit, yüksek fırın cürufu, zeolit, bazaltik pomza ve uçucu kül) üretilen betonlarda dayanım ve dayanıklılık performanslarının incelenmesi amaçlanmıştır. Organik küllerin ve inorganik minerallerin tekli ve ikili kombinasyonları oluşturularak beton ve boya üretimi gerçekleştirmiştir. Beton numunelerin 7, 28, 90 ve 180 günlük basınç dayanımı, aşınma dayanımı, ultrasonik ses, kapiler su emme, sülfat dayanımı, donatı korozyon, donma- çözülme, Mikroyapı özellikleri araştırılmıştır. Küllerin betonda dolgu malzemesi görevi gördüğü ve boşlukları azalttığı görülmüştür. Minerallerle üretilen tekli ve ikili karışmların betonda kullanılması ile birçok mühendislik özelliklerinin iyileştirildiği belirlemiştir.

Korkmaz (2017), çalışmasında (bor endüstri atıkları ve borojips) ve Tokat-Turhal bölgesinde faaliyet gösteren ve traverten üretimi yapan fabrikanın atıklarının çimento içerisine eklenerek katkı maddesi olarak kullanılması ve bu şekilde değerlendirilmesi amaçlamıştır. Bor endüstri atıkları (kolemanit konsantratör atığı), traverten atığı ile perlit çeşitli oranlarda (%5, %10, %15 ve %20) çimentoya ilave edilmesiyle hazırlanan çimentoların priz süresi, hacim genleşmesi, basınç dayanımı ve ögütme performansı gibi özellikleri incelmiş ve TS 24 de verilen değerler ile uyumlu olduğu ve bu katkıların maksimum %20 oranına kadar çimentoya katılmasının uygun olduğu gözlemlemiştir. Hazırlanan katkılı numuneler Xray Fluoresans yöntemi ile kimyasal analize tabii tutulmuş ve Türk Standartları'na da uygun olduğu görülmüştür.

Durmuş (2016), kolemanit ve üleksit minerallerinin Portland çimentosu klinkerine belli oranlarda katılması ile elde edilen harç karışımlarının bazı özellikleri incelemiştir. Harç karışımlarında kolemanit ve üleksit mineralleri yüzde 2, 4, 6, 8 ve 10 oranlarında öğütülmüş klinker yerine kullanmıştır. Hazırlanan karışımların su miktarı sabit bir yayılma çapı sağlayacak şekilde belirlemiştir. Bor minerali (kolemanit ve üleksit) ile öğütülmüş klinker karışımından oluşan hamurlar üzerinde priz başlangıç ve bitiş deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bor minerali katkılı harç örneklerinin su emme özellikleri ve kür koşullarının mekanik özelliklere etkisi incelemiştir. Yapılan deneyler sonucunda kolemanit katkılı örneklerin mekanik özelliklerinin üleksit katkılı örneklerden daha iyi olduğu, bor minerali katkı oranı arttıkça priz başlangıç ve bitiş sürelerinin uzadığı belirlemiştir.

Emre (2016), çalışmasında konsantre bor bileşiklerinden kolemanit ile üleksit, beton karışımında farklı oranlarda beton agregası olarak kullanmış ve üretilen betonun fiziksel, mekanik özellikleriyle birlikte radyasyona karşı soğurma özelliği fiziksel yöntemlerle araştırmıştır. Kalıplarda 24 saat bekletilen numuneler ıslak kür ortamında 28 gün bekletildikten sonra basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı, schmidt çekici, elastisite modül tayini ölçüm sonuçları belirlemiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, üretilen betonlarda ikame edilen bor miktarı artırıldıkça betonun mekanik özelliklerinin zayıfladığı ve gama ışınları için radyasyon soğurma katsayılarının azaldığı tespit etmiştir.

Yaltay (2015), pomza agregalı hafif betonu, kolemanit katkısı bulunan çimento ile üretmiş ve fiziksel özelliklerini incelemiştir. Beton üretimi esnasında %0, %0,4, %0,6, %0,8, %1,0 ve %2,0 oranlarında kolemanit katkılı çimento kullanmıştır. Hazırlamış olduğu betonları 28, 56 ve 360 gün süre ile küre tabii tutmuş, beton numunelerin gama radrasyon soğurganlıklarını deneysel olarak incelemiş, WinXcom programını kullanarak teorik radrasyon zırhlama değerleriyle karşılaştırmıştır. Bu deneylerin yanısıra kılcal su emme, porozite, ultrases hızı geçiş, basınç dayanımı ve yüksek sıcaklık dayanımım deneyleri de yapılarak kür süresinin bu parametrelere etkisini irdelemiştir. Deneyler sonucunda kolemanit katkısının betonun radrasyon zırhlama özelliğine olumlu yönde etki ettiği fakat kolemanit oranı ile lineer ve kütle soğurma katsayıları arasında doğrusal bir ilişki olmadığı görülmüştür.

Örtlek (2015), harç içerisine çimento yerine buğday, mısır ve ayçiçeği sapı külü, agrega yerine ise kolemanit ve barit kullanarak betonların dayanıklılığı ve dayanımı üzerinde çalışmalar yürütmüştür. Betonları 7, 28 ve 180 gün küre tabii tutmuş, basınç dayanımı, donma-çözünme etkisi, aşınma dayanımı gibi özelliklerinin yanısıra mikro yapısını da incelemiştir. Deneyler neticesinde çimento yerine kül kullanılmasının betonunu mühendislik özelliklerini iyileştirdiği, dolgu etkisi yaparak beton içerisindeki boşlukları azalttığı belirlenmiştir. Yapılan çalışma, kolemanit ve baritin küller ile yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılmaya uygun olduğunu göstermiştir.

Korçak (2014), kolemanit atıklarının doğal alçı taşı yerine çimento üretiminde kullanılarak çimentonun özelliklerindeki değişimler incelemiş, bu malzemenin endüstriye bir değer olarak katılması ve çevre kirliliğinin önlenmesi amaçlamıştır. CEM I (42,5R) çimentosu klinkerine %3, %5, %7 ve %10 oranlarında kolemanit kaynaklı borik asit fabrikası atığı (KKBAFA) katkısı ilave edilerek çimento numuneleri hazırlamıştır. Yapılan deneyler sonucunda KKBAFA katkısının çimentoda priz süresinin artırdığı, basınç dayanımını azalttığı gözlemiştir. Laboratuvar ortamında öğütülen KKBAFA katkılı numunelerin CEM I (42,5 R) çimentosuna göre daha iri tane dağılımına sahip olduğu anlaşılmıştır. Numunelerde KKBAFA miktarı arttıkça özgül ağırlığın ve özgül yüzeyin azaldığı bulmuştur. KKBAFA katkılı çimentolarda katkı oranı arttıkça, hacim sabitliğinde önemli bir değişiklik gözlenmezken, kıvam suyu ihtiyacı ve su emme oranını az da olsa artmıştır. Çalışmalar sonucunda, %5 KKBAFA' ın çimento içerisinde alçı taşına alternatif olarak priz süresini geciktirici katkı maddesi olarak değerlendirilebileceği ortaya çıkmıştır. Deney sonuçları, borik ait fabrikası kolemanit atıklarının çimento sektöründe değerlendirilebileceğini göstermiştir.

Selman (2015), çalışmasında Tinkal ismi verilen bor atığı malzemeyi kurutarak, öğütmüş ve 200 no'lu elekten eledikten sonra bitümlü sıcak karışımlarda filler malzeme olarak kullanılabilirliğini incelemiştir. Deney numunelerini hazırlarken ağırlıkça %4, %5, %6, %7 ve %8 oranlarında Tinkal filler malzeme kullanmış ve bitümlü sıcak karışım hazırlamıştır. Ek olarak %6 oranında kireçtaşı filler kullanarak bitümlü sıcak karışımlar hazırlamış ve bunları karşılaştırma maksatlı kullanmıştır. Deney aşamasında ise Marshall Stabilite ve Akma deneyi, Mekanik Marshall Batırma

Deneyi, Donma-çözünme çevriminden sonra Marshall Stabilite ve Akma Deneyi, Dolaylı Çekme-Rijitlik Modülü deneyleri yapmıştır. Bu deneyler neticesinde Tinkal malzemesinin bitümlü sıcak karışım hazırlanırken filler malzeme olarak kullanılmaya uygun olduğunu göstermiştir.

Sarıkaya (2014), yaptığı çalışmasında agrega ile kolemanit ve üleksit bor cevherlerinin tüvenan ve konsantre ürünleri kullanılarak Su/Çimento (w/c) oranı C30 betonu için 0,40; C35 betonu için 0,35 alınarak, çeşitli amaçlara yönelik özellikli betonlar elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda bor oranının artmasıyla betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinde azalma meydan geldiğini gözlemlemiştir. Betonun nötron tutma kapasiteleri ise olumlu yönde artış göstermiştir.

Eyüboğlu (2013), birbirlerinden farklı üç ayrı oranda $B_2O_3$'e sahip kolemanit konsantratör atığını çimentoya ilave ederek katkı malzemesi olarak kullanmıştır. Kullanılan $B_2O_3$ oranları %5,56, %10,47 ve %15,89 olan kolemanit konsantratör atıkları ile klinker ve alçıtaşı kullanılarak hazırlanmış kompoze çimento karışımları oluşturmuştur. Klinker ve alçıtaşı içerisine de ağırlıkça %1, %3, %5, %10 oranlarında, farklı $B_2O_3$ oranlarına sahip bor atıkları ilave edilmiştir. Çalışma kapsamında 12 farklı çeşit bor katkılı çimento ve CEM I çimentosu olmak üzere toplam 13 çeşit çimento üretmiştir. Üretilen bu numunelerin fiziksel ve kimyasal analizlerinin yanısıra 2,7,28,56 ve 90 günlük basınç dayanımları, çekme dayanımı, yüksek sıcaklık ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Çalışmalar neticesinde $B_2O_3$ oranlarının farklı olmasının sonuçlar üzerinde çok etkili olmadığı, asıl olumlu etkinin katkı miktarından kaynaklandığı anlaşılmıştır.

Sallı Bideci (2013), kolemanit ile çimentonun belirli oranlarda (%0, %7,5, %12,5, %17,5) karıştırılmasıyla oluşturulan karışımın pomza yüzeyine kaplanmasıyla kolemanitin kullanabilirliği amaçlanmıştır. Laboratuvar çalışmaları kapsamında agrega ve beton deneyleri karışımlar üzerinde uygulamıştır. Çalışma sonuçlarına göre pomza agregaların kolemanit ile kaplanmasının basınç dayanımına olumlu etki ettiği, su emme oranını %50 azalttığı, bu agregaların kullanılmasıyla üretilen betonların ultrases geçiş hızlarının, sülfat dayanımının, basınç altında su işleme derinliğinin ve hızlı klor geçirimliliğinin olumlu etkilendiği görülmüştür. Böylece kolemanitli

çimentolarla kaplı hafif agregalı betonların yapılarda taşıyıcı özel hafif beton olarak kullanılabileceği tespit etmiştir.

Polat (2012), çalışmasında beton numuneleri oluşturulurken agrega yerine kolemanitin katkı olarak kullabilirliğini amaçlamıştır. Bu kapsamda su/çimento oranı 0,48 ve çimento dozajı 400 kg/m3 sabit tutularak, kolemanit normal agrega ile %10, %20, %30,%40 ve %50 oranlarında yer değiştirilerek beton numuneler üretmiştir. 28 günlük suda, havada, %5'lik $Na_2SO_4$ ve $MgSO_4$ ortamlarına 28, 56 ve 90 günlük ilave kür sürelerine tabii tutulan numuneler ayrıca her kür süresi için tahtibatlı ve tahribatsız uyglanan beton deneyleri ile kür sürede incelemiştir. kolemanit oranının artmasıyla betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinde azalma meydan gelmiştir. Mekanik ve fiziksel özelliklerinde en büyük azalma hava küründen elde edilmişken, 56 ve 90 günlük kür sürelerinde %40 ve %50 kolemanit oranlarında mekanik ve fiziksel özelliklerindeki azalmalar. Betonun durabillite özellikleri açısından %30 kolemanit oranının betonda kullanılabilir olduğu sonucuna varmıştır.

Durgun (2011), çalışmasında bazalt kökenli pomza, kolemanit, barit ve yüksek fırın cürufu katkılı boyalarla kaplanmış donatıların paslanma performansı ve betonları bazı mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlamıştır. Çalışmada bazaltik pomza, kolemanit, barit ve yüksek fırın cürufunun tek başına kullanımı ve aralarında ikili, üçlü ve dörtlü kombinasyon oluşturarak boyalar üretilmiş olup boyalar donatı ve beton yüzeylerine uygulamıştır. Yapılan denysel çalışmalarda numunelere kütle kaybı yönteminin yanı sıra galvanik pil yöntemi, hızlandırılmış korozyon deneyi yapılmış ve deney süresince gözlemsel veriler toplamıştır dış yüzeyi kaplanmış beton numuneler %3,5'luk tuzlu su ortamında bir yıl süreyle bekletilmiş, ve kütle kayıpları ve basınç dayanımları incelemiştir. Çalışma sonuçlarına göre kolemanit ve barit katkısı ile yapılan kaplamanın korozyona karşı dayanım sağladığı, pomza katkısının ise kaplama malzemesi üretiminde diğer malzemelere göre daha az etkili olduğu görülmüştür.

Altınköprü (2010), çalışmasında kolemanit konsantratör atıkları, borojips ve zeytinyağı fabrikası atıklarının çimento içerisine katkı maddesi olarak karıştırılarak değerlendirilmesi amaçlamıştır. Kolemanit atığı, prina atığı ve borojips öncelikle hep birlikte belirli oranlarda çimento klinkerine katılmış daha sonra Kolemanit konsantratör atığı ve prina atığı birlikte belirli oranlarda çimento klinkerine katılıp son

olarakta prina atığı tek başına çimento klinkerine katılarak denemeler yapmıştır. Katkıların çimentonun mekanik özelliklerinden, priz süresine, hacim genleşmesine, basınç dayanımına, öğütme süresi üzerine etkileri incelemiştir. Kolemanit konsantratör atığı katkısının çimento klinkerine ilave edilmesiyle özellikle priz süreleri ve basınç dayanımları olumsuz etkilenmektedir. Prina atığı çimentonun özelliklerini olumlu yönde etkilemiş fakat basınç dayanımlarında istenilen değerlere ulaşamamıştır.

Gençel (2009), çalışmasında bor içerikli kolemanitin beton agregası olarak kullanılmasıyla üretilen kolemanit katkılı betonun, fiziksel ve mekanik özellikleri ile birlikte radyasyona karşı bir kalkan olarak kullanılabilirliği fiziksel ve biyolojik yöntemlerle araştırmıştır. Taze ve sertleşmiş beton deneylerinden elde edilen sonuçlara göre betona kolemanit ilave edilmesiyle betonun fiziksel ve mekanik özellikleri azalma gösterdiği gözlemlemiştir. 25 MeV foton enerjisi ve ortalama 4,5 MeV nötron ışınına karşı fiziksel yöntemle yapılan ölçümlerde, kolemanit katkılı betonun zırhlama performansının nötronlara karşı daha etkin olduğu gözlemiştir.

Aydın (2009), çalışmasında kolemanit atığının beton numunelerinin basınç ve silindir yarma dayanımına olan etkisi araştırmıştır. KA atığı çimento ile %3, %5, %10 ve %15 yer değiştirme oranlarında kullanmıştır. Basınç dayanımları beton presi, beton Schmidt çekici ve ses hızı vasıtası ile ölçülmüş ve bu üç yöntemin sonuçlarının bir birleri ile olan ilişkisi ayrıca değerlendirmiştir. Basınç ve silindir yarma dayanımı sonuçları %3 ve %5 KA katkısının betonun mukavemet özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. Özellikle KA katkı ilave edilen bütün karışımların uzun dönemde şahit numuneden daha fazla dayanım geliştirmesi, KA' nın betona eklenerek mineral katkı olarak kullanılabileceği göstermiştir.

Uğurlu (2009), çalışmasında boraks üretimi esnasında üretilen katı atık malzemelerin çimento içerisinde uçucu kül ve volkanik tüf ile birlikte katkı maddesi yerine kullanılmasını araştırmıştır. Puzolanik açıdan daha aktif olan uçucu kül ve volkanik tüf gibi puzolanlar ileçimentodaki kil pestili kullanım oranının arttırılması amaçlamıştır. Yapılan çalısmalarda önce kil pestili ile uçucu kül ile ve daha sonra da volkaniktüf ile degisik karısımlar üzerinde deneyler gerçeklestirilerek en iyi puzolan+kil pestilikarısımları saptamıstır. belirlenen %10 ve %15 kilpestili kullanım oranlarında degisik oranlarda kil pestili+uçucu kül+volkanik tüftenolusan farklı

karısımlar hazırlamıstır. Deneyler neticesinde, kil pestilinin çimentoya bu puzolanlar ile %10-15oranında kullanılabilecegi belirlemistir.

Fındık (2007), kolemanit konsantratör atığının (KKA) çimento ve beton katkısı olarak kullanılabilirliği hazırladığı harç ve beton numuneleri üzerinde yapılan deneylerle araştırmıştır. (KKA) %3 ve %5 oranında içeren harç ve beton numunelerinin büyük bir kısmı şahit beton ve harç numunelerinin dayanımını karşılamıştır. Boşluk oranı, aşınma, karbonatlaşma deneyleri de gerçekleştirilmiş olup bu deneyler sonucunda şahit numunelerde en yakın sonucu yine %3 ve %5 katkılı harçlar vermiştir. Tüm KKA katkılı harçlar, şahit numunelerden daha düşük rötre yapmışlardır. %3 KKA katkılı harçların şahit numunelere göre %40 mertebesinden daha düşük rötre değeri verdiği belirlenmiştir. Bu yüzden KKA 'nın rötre azaltıcı katkı olarak kullanılabileceği düşünülmektedir.

Erdoğmuş (2006), çalışmalarında uçucu kül, kolemanitı ve yüksek fırın cürufu atıklarının çimentoya katkı maddesi olarak kullanlabiliriği ve bu katkıların çimento üretiminden açığa çıkan enerji giderlerini azaltması ve çimentonun mekanik özelliklerine katkı sağlanması amaçlamıştır. Atık olarak bol miktarda bulunan ve çevresorununa neden olabilecek boyutlardaki demir cürufu ve kolemanit atıklarınındaha önce denenmemiş ikili karışımlarının çimentoya katkı maddesi olarak ilave edilmesi ve bu katkıların çimentonun mekanik özelliklerine etkisini araştırılmıştır. Uçucu kül, Cürufu ve kolemanit konsantratörü atığı önce farklı oranlarda çimento klinkerine ilave edilmiş, daha sonra biribiriiçerisinde farklı kombinasyonlar oluşturlarak, Katkıların çimentonun mekanik özelliklerinden, priz süresine, hacim genleşmesine, basınçdayanımına, öğütme süresi üzerine etkileri incelenmiştir. Sonuçlar SEM analiziyle desteklemiştir. Çalışma sonucunda ; Uçucu kül ve Karabük Cürufu atıklarının çimentonun mekaniközelliklerine katkı sağladığı, ASR `na, Sülfatlı ortama, asitli ortama dirençlerini artırdığı,kolemanit konsantratör atığının belli bir değeri aşmasından sonra mekanik özelliklere katkı sağlamadığını hatta olumsuz etkilediğini tespit etmiştir. Fakat bu olumsuzluğunarağmen kolemanit konsantratörü atığı ilavesiyle oluşan çimento harçlarının ASR `na, sülfatlıortama ve asitli ortama direnci artırmada katkı sağladığı çalışma bulgularındandır. Kolemanitkonsantratör atığı katkısının çimento klinkerine ilave edilmesiyle özellikle priz süreleri vebasınç dayanımları olumsuz etkilenmektedir.

Zorer (2005), çalışmasında kolemanit katkılı çimento üretiminde kolemanit mineralinin klinkerin öğütülebilirliği üzerine etkisinin belirlenmesi hedeflemiştir. Bu amaçla klinkerin,kolemanitin ve değişik oranlarda kolemanit içeren karışımların Standart Bond Testiyardımıyla öğütülebilirlik değerleri ve iş indeksleri belirlenerek, bor varlığının öğütmeüzerindeki etkisi incelemiştir. Bond öğütülebilirlik testi sonucunda klinkerin iş indeksi 18,89 kwh/t, kolemanitin işindeksi 12,33 kwh/t olarak bulunmuştur. Deneysel olarak elde edilen iş indeksi değerleri,hesaplanan değerden daha küçüktür. Bu kolemaniti klinker öğütülmesinde fayda sağladığıama belli bir oran (%20) üzerine çıkıldığında klinkerde yastıklanma etkisi göstererek işindeksinde artma gözlemlenmiştir.

Özmal (2005), kolemanit konsantratör atığı(KKA), tinkal konsantratör atığı(TKA), uçucu külü(UK) ve taban külü(TK), alünit(A) ile birlikte çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılarak çimento üretiminde enerji tasarrufu sağlanması ve atık maddelerin çevreye verebilecekleri zararların giderilmesi amaçlamıştır. Belli orandaki alünit mineraline değişik oranlarda KKA-TK, KKA-UK, TKA-TK, TKA-UK varyasyonları katılarak, çimentonun priz süresi, hacim genleşmesi, basınç dayanımı gibi fiziksel ve mekaniksel özelliklerine etkileri incelemiş, kimyasal analizleri X-RF metoduyla yapmıştır. Bu katkı maddelerinin kullanılabilirliği incelemiştir.

Targan (2002), çalışmasında doğal puzolan olan Kula cürufu, bentoniti, (uçucu kül ve taban külü ve kolemanit konsantratör) atık maddeler ile birlikte değerlendirilmesi amaçlamıştır. Kula cürufu ve bentonit önce ayrı ayrı belirli oranlarda çimento klinkerine katılmış, sonra farklı oranlarda Kula cürufu-uçucu kül, Kula cürufu-taban külü, Kula cürufu-kolemanit konsantratör atığı ve bentonit-uçucu kül, bentonit-taban külü, bentonit- kolemanit konsantratör atığı varyasyonları katkı maddesi olarak denenmiştir. Katkıların, çimento priz süresi, hacim genleşmesi, eğme ve basma dayanımı, öğütme süresi gibi özellikleri üzerine etkileri incelemiştir. Çalışmada kullanılan katkıların çimento üretimi esnasında katkı maddesi olarak kullanılabileceği bulmuştur.

Kula (2000), kolemanit konsantratör, tinkal konsantratör atıkların ve Termik Santrali atıklan (uçucu kül ve taban külü) ile birlikte çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanmıştır. Kolemanit, tinkal, uçucu kül ve taban külü atıklarıönce ayrı ayrı daha

sonra farklı oranlarda kombinasyonlarla çeşitli varyasyonlarıyla katkı maddesi oluşturmuştur. Katkı maddelerinin çimentonun priz süresi, hacim genleşmesi, basınç dayanımı, öğütme süresi gibi özellikleri üzerine etkileri incelemiştir. Kimyasal analizler ise XRF ve volumetrik metotlara göre yapmıştır. Böylece bu çalışmada kullanılan katkılann çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabileceği bulmuştur.

Zeybek (2000), çalışmasında Kütahya-Emet Espey ve Hisarcık Kolemanit Konsantratör Tesislerinden elde edilen 25 mm elekaltı atığı ve atık çamurunu çimento katkılan olarak kullanmıştır. Farklı oranlarda atık, Portland çimentosu ve klinkerine katılarak çimento karışımları hazırlamıştır. Çimento karışımlarından hazırlanan 4x4x16 cm ebatlanndaki beton blokların nötron absorpsiyonu ölçülmüş ve sonuçlar kontrol numuneleri ile karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Deneyler neticesinde kullanılan atıkların Portland çimentosu için katkı maddesi olarak kullanılabileceği ve bu çimentolardan hazırlacak beton blokların nötron zırhlamada kullanılabileceği sonucuna ulaşmıştır.

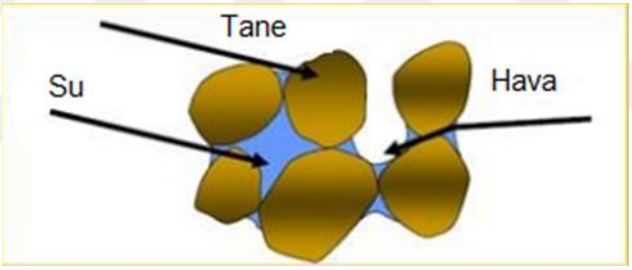
Tonak (1997), çalışmasında bor atıklarını incelenmiş ve bu atık malzemelerin çimento üretimi esnasında katkı malzemesi olarak kullanılabilirlikleri araştırmıştır. Çalışmalar esnasında bor cevherleri ve atıklarının en uygun hammaddeler olduğu görmüş ve çalışmalar yapmıştır. Kolemanit içeren bor cevheri veya atığının çimento hammadde karışımına ilave edilerek karıştırılmasıyla, değişen katkı oranlarında iki farklı belit ($C_2S$) yapısının oluştuğu görülmüştür. Bu iki değişik kristal yapıya ait belitli çimentolar hazırlanarak bunların mekanik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen a'-C2S ve a-C2S yapısmdaki belit'in hidrolik aktivitesinin Portland çimentosundaki p~C2S yapısmdaki belit'e nazaran çok daha yüksek, dolayısıyla çimentonun dayanımı üzerindeki olumlu etkisinin p-C2S belit'e göre çok daha fazla olduğu tesbit etmiştir.

Sengü (1994), demir cevheri peletlenmesinde bağlayıcı olarak kolemanit kalsine kolemanit ve kolemanit + bentonit kullanılmasının etkilerini araştırmak için bir seri deney yapmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, en iyi sonuçlar kalsine kolemanit ile yapılan peletlerden elde etmiştir. Kolemanitin kalsine edildikten sonra bağlayıcı olarak kullanılabileceği ve pişirme işleminden sonra kolemanit veya kolemanit + bentonit ile yapılan peletlerden daha yüksek bir düşme dayanımı verebileceği görülmüştür.

# 2. ZEMİN OLUŞUMU VE ZEMİN STABİLİZASYONU

## 2.1. Zemin Oluşumu

Zemin; tanelerden oluşan, taneler arası boşluklarında su ve/veya hava bulunduran, çökel ortamlarında çökelmiş fakat diyajeneze (taşlaşma) uğramamış, gevşek tutturulmuş kırıntılı çökellerden meydana gelen doğal malzemelerdir. Zemin diğer bir tanımla katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç fazdan oluşan, izotrop ve homejen özellik göstermeyen, özellikleri; zaman, jeolojik tarihçe ve çevre koşullarına bağlı olarak kayaların ayrışması sonucu büyük değişiklikler gösteren malzemeler olarak da tanımlanabilir (Özaydın, 2011). Zemin profilinin şematik gösterimi Şekil 2.1'de verilmişir.




Şekil 2.1. Zemin profilinin şematik gösterimi (Özaydın, 2011)

Kaya, kristalleri veya taneleri arasında su etkisi altında bile zamanla bozulmayan sağlam bağlar bulunan ve az veya çok süreksizlik içeren doğal ortamdır. Kayalardan zemin oluşumuna neden olan parçalanma ve ayrışma süreçleri önemli rol oynamaktadır. Kayalardan zemin oluşumu süreci mekanizmasına göre taşınmış (sedimanter) ve yerinde oluşan (rezidüel) zeminler olarak gruplandırılmıştır.

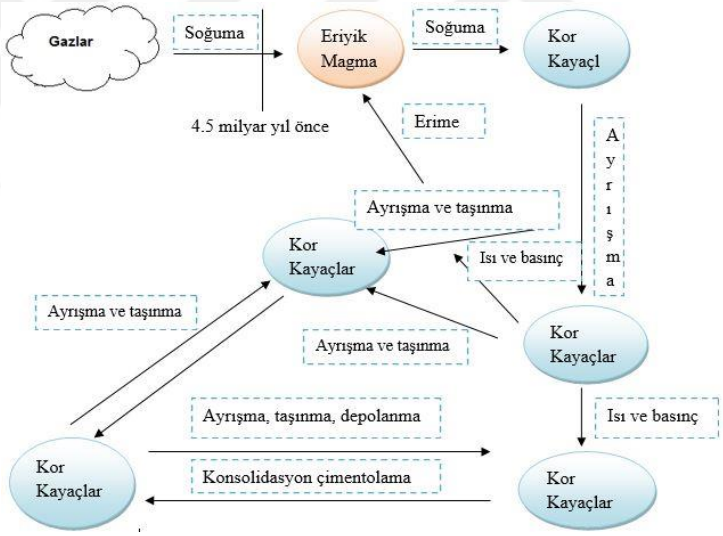
### 2.1.1. Yerinde oluşmuş zeminler (residüel)

Kayalar bulunduğu ortamda fiziksel ve kimyasal etkilere maruz kaldıklarında aşınmaya uğrararlar. Aşınmaya uğrayan kaya taneleri ufak parçalara ayrılarak veya ufalanarak zemini oluşturmaktadır. Burada fiziksel ve kimyasal bozunmaların meydana gelme süresi, taşınma hızına fırsat vermeyecek seviyede olursa kayaların yer

değiştirmeden oluşturduğu rezidüel zeminler meydana gelmektedir. Yerinde oluşan zeminler killi, iri daneli, organik zemin türlerinden oluşabilmektedir. Kaya malzemesinin çimentolaşmamış kısımlarının çökelmesi sonucunda kumlu ve çakıllı zeminler meydana gelmektedir. Kayaçlar fiziksel ve kimyasal bozunmaya maruz kaldığı esnada içerisindeki kireçtaşlarındaki $CaCO_3$ çözünmesi ve ufalamalar sonucu killer ve siltler oluşmaktadır. Kaya ortamındaki su, bitkisel ortam ve değişen iklimsel faktörlere bağlı olarak organik zeminlerin oluşma süresi başlayabilmektedir.

### 2.1.2. Taşınmış zeminler (transported)

Kayaların bulunduğu ortamda bozunması sonucunda meydana gelen aşınmalarla yer değişmesiyle oluşturduğu sedimenter zeminlerdir. Sedimenter zeminlerin çoğunluğu aşınma sonrasında akarsu, rüzgar, gravite, buzullar, ve volkanik lavların çökelmesiyle meydana gelmektedir. Jeolojik dönüşüm çemberi Şekil 2.2'de verilmektedir.




Şekil 2.2. Jeolojik dönüşüm çemberi (Cernica, 1995)

Zeminler, milyonlarca yıl öncesinden günümüze kadar kayaçların fiziksel veya kimyasal ayrışmalara maruz kalmasıyla oluşmaktadır. Kaya parçaları, fiziksel veya kimyasal etmenlerle ayrışarak taşınmasıyla, birikintiler sonucu zemini oluştururlar. Zeminler ise, iklim koşulları, sıcaklık farklı ve basıncın etkisiyle yeryüzünde tekrar kaya parçaları meydana getirmektedir.

## 2.2. Zemin Sınıflandırması ve Zemin Türleri

### 2.2.1. Zemin sınıflandırması

Zeminler, yapı yükünü karşılayabilecek taşıyıcı ortam olmasının yanı sıra, baraj, dolgu, istinat gibi sanat yapılarının inşa edilmesinde kullanılan doğal bir yapı malzemedir. Kullanılan alanlarda zeminin inşa edilecek yapıya uygunluğunun bilinmesi son derece önemli olmaktadır. Zeminlerin mühendislik uygulamalarında kullanabilirliğini belirmek amacıyla bazı sınıflandırmalar yapılmıştır. Bu sınıflandırmalar yapılırken zeminin sadece türü tane çapı gibi parametreler yeterli olmamaktadır. Bu nedenle zeminin, sıkışabilirlik, permeabilite, şişme ve hacim değiştirme potansiyeli, oturma ve kayma direnci, sıvılaşma gibi zeminin mühendislik özellikleri hakkında bilgiye sahip olunması gerekmektedir. Aynı türe sahip zeminler farklı kıvam özelliklerine sahip olabilmektedir bu durum ise farklı oturmalar ve taşıma gücü problemlerini ortaya çıkarmaktadır.

En yaygın kullanımı olan Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS), hemen hemen tüm ülkelerde kullanılmaktadır. Bu sınıflandırma sistemi baz alınarak bazı ülkeler küçük çapta değişimlerle sınıflandırma sistemlerini standartlarına uygun hale getirmişlerdir. Zemin türlerinin sınır çapları Tablo 2.1'de verilmiştir.

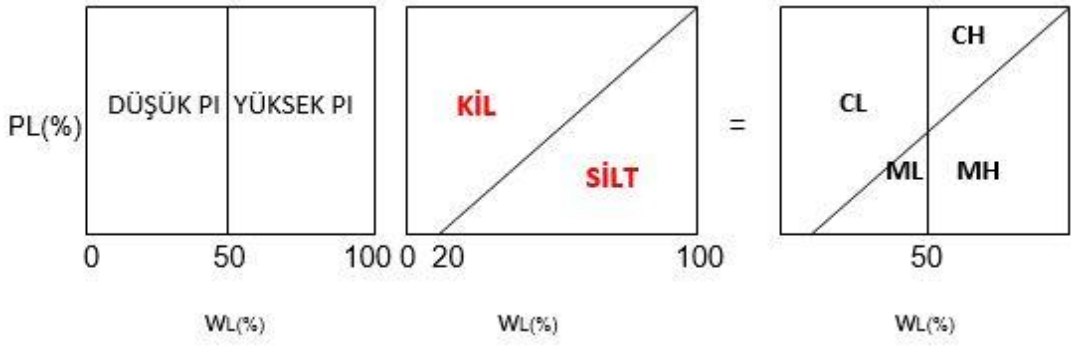
Tablo 2.1. USCS ve diğer bazı ölçütlere göre grupların sınır çapları (Uzuner, 2012)

| Adı | USCS | | ASTM D(mm) | TS 1500 D(mm) | MIT D(mm) | BS D(mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Elek No. | D(mm) | | | | |
| Blok | - | >300 | >300 | >200 | >200 | >200 |
| Taş | -3'' | 300-76.2 | 300-76.2 | 200-60 | 200-60 | 200-60 |
| Çakıl | 3''- 4 No. | 76.2-4.76 | 76.2-4.76 | 60-2 | 60-2 | 60-2 |
| Kum | 4 No.-200 No. | 4.76-0.074 | 4.76-0.0074 | 2-0.074 | 2-0.06 | 2-0.06 |
| Silt | <200 No. | <0.074 İnce(silt+kil) | 0.074-0.002 | 0.075-0.002 | 0.06-0.002 | 0.06-0.002 |
| Kil | | | <0.002 | <0.002 | <0.002 | <0.002 |

Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi'nde tane çapına göre tanımlama yapılır. Bu tanımlamaya göre çapı; 300 mm den büyük olanlar blok, 75- 300 mm arasında olanlar kaya, 75 mm- 4,75 mm aralığındakiler çakıl, 4,75 mm ile 0,075 mm aralığındakiler

kum, 0,075 mm ile 0,002 mm aralığındakiler silt, tane boyutu 0,002 mm den küçük olanlar ise kil olarak sınıflandırılır (USCS).

Ayrıca bu sınıflandırma sisteminde tane boyundan farklı olarak Atterberg limitleri göz önünde bulundurularak kapsamlı sınıflandırma yapılmıştır. Yapılan bu sınıflandırmada bazı harfler kullanılarak zemin türlerine atfedilmiştir. Daha sonra harflendirilen zemin türleri şişme özellikleri ve granüler yapısına göre iki harfle simgelenerek ayrıntılı sınıflandırmaya dahil edilmiştir. İri daneli olarak bilinen kum (S), çakıllar ise (G) harfiyle simgelenmiştir. Yine aynı şekilde harflendirme yapılarak, inca deneli zemin özelliğine sahip kil (C), silt (M) olarak simgelenmişlerdir. Ayrıca killer mühendislik bakımından farklı kıvam özelliklerine göre de ayrılmaktadır. Kıvam özelliklerine göre, plastisitesi yüksek kil (CH), plastisitesi düşük kil (CL) olarak harflendirlerek sınıflandırma sistemine dahil edilmiştir. Burada ilk verilen harf zeminin türünü dane boyutuna göre tipini verirken, ikinci harf ile zeminin kıvam özellikler belirtilmiş olmaktadır. Plastisite kartında bulunan bölgeler Şekil 2.3'de gösterilmiştir.




Şekil 2.3. Plastisite grafiğinde bölgeler

### 2.2.2. Zemin türleri

Zeminleri oluşturan tane boyutları taneler arası mesafelerin yakınlığı-uzaklığı ve zemin içerisindeki boşluk oranları taneleri arasındaki çekim kuvvetlerindeki bir takım farklılıklar göstermektedir. Tabii zeminler, çeşitli standartlarla belirlenen tane çapı dağılım oranlarına göre analiz edilen, iri ve ince daneli olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar. Zemin türlerinin oluşumları esnasında taneleri arasında fiziksel bağların olmaması sebebiyle direkt olarak çökmektedir. Böyle durumda zemin taneleri arasında oluşan boşluklar, dışarıdan sızan suyu zemin içine alınmasına sebep olmaktadır. Sızan su, taneciklerin yapısına girememekte bu sebeple zemin sus tutma

kapasitesi zayıf kohezyonsuz zemin özelliliğine sahip olmaktadır. Yine zemin taneleri arasında meydana gelen partiküller arası oluşan bağlardan dolayı dışarıdan sızmaya çalışan su, zemin içerisine kolaylıkla giremezler. Taneciklerin yapısında bulunun su ise kolaylıkla çıkamadığı için, bu tür zeminlersu tutma kapasitesi yüksek, kohezyonlu zemin özelliği kazanmış olmaktadır. Su tutma kapasitelerine göre ayrılan kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler, boşluk oranı, içsel sürtünme açısı, sıkışma, plastisite, geçirimlilik, şişme potansiyeli gibi mühendislik özelliklerinde farklılıklar göstermektedir.

Genel olarak kohezyonlu zeminler, su tutma özelliklerine bağlı olarak bünyelerinde zamanla hacimsel değişimlere sebep olmaktadırlar.

Özellikle suya doygun halde iken içsel sürtünme açısının sıfır olan, şişme kapasitelerin yüksek olduğu killer ve siltler; havalanları, bina yapıları, yollar, bahçe ve park alanları, istinat duvarları vb. mühendislik inşaalarında ve uzun vadede kullanımlarında ciddi taşıma gücü ve oturma problemlere sebep olmaktadır.

Tüm bu bilgilere bakıldığında ülkemizde kohezyonlu zeminlerin oldukça fazla olması bu tür zeminlerin iyileştirilmesini, kullanım alanı çokluğu ve ekonomiklik açısından zaruri duruma getirmiştir.

## 2.3. Killer ve Mineralleri

### 2.3.1. Killerin oluşumu

Killer, kayaçların ve maden kütlelerinin fiiziksel ve kimyasal ayrışmaları sonucu oluşan, boyutu 0,002 mm ve daha küçük taneciklerin bir araya geldiği tortul kayaçlardır. Killerin oluşumunu etkileyen, toprağın yer kabuğundaki yeri, mevsimsel değişimler, kilin oluştuğu topografik konum ve ph bitki örtüsü ve zaman gibi birçok faktör bulunmaktadır. Ayrıca killer oluşum süreçlerinde, karbonasyon, hidratasyon, oksidasyon, hidroliz ve solisyon gibi kimyasal ayrışmalara maruz kalmaktadır. Oluşum sürecinde gerçekleşen ayrışmlar killerin farklı özellikte ve yapıda olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle killer sus tutma, şişme veya yapısındaki minerallerin yüzde oranı bakımından farklılık göstermektedir. Kilin yapısındaki bu farklılıklar su tutma, şişme ve minerallerin yüzde oranı bakımından çeşitli killerin meydana

gelmesine neden olmuştur. Kil minerallerinin oluşum koşulları Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Kil minerallerinin ana ve kaya ve iklim şartlarına göre oluşumu (Lambe, 1960)

| Kil Minerali | Oluşumu |
|---|---|
| Kaolinit | Tropik ve astropik alanlarda volkanik kökenli kayaçların aşınması sonucu oluşur. |
| Klorit | Metamorfik ana kaya alanlarında, genellikle deniz tortularda ve çökelti kayalarda oluşur. |
| İllit | Çökelti kayaların sıcak ve kurak bölgelerde ayrışması ile oluşur. |
| Montmorillonit | Volkanik kül ve kayaların zayıf drenaj koşullarından dolayı aşınması sonucu, genellikle kurak alanlarda illit ile beraber bulunur. |

Genel itibariyle killerin özelliklerine bakıldığında, kil minerallerinin yapısında en çok kalker, silis, mika, demir oksit gibi bileşimler bulunmaktadır. Dünya üzerinde bilinen tüm mineral arasında plastisite özelliği gösteren tek mineral kildir. Killer yapısı itibari ile su çekme özelliğine sahiptirler bu nedenle kil daima nemlidir. Kurutulduk veya pişirildikten sonra çok sertleşir, suyu ve elektriği geçirmezler ve yüksek sıcaklıklara da dayanıklı hale gelirler. Ayrıca ısıtıldıklarında veya yoğurulduklarında plastik özellikleri sayesinde elle veya deney aletleriyle kolayca şekil alabilmektedirler. Killerin sahip oldukları bu özelliği ile birçok alanda kullanımı tercih edilmekte, çeşitli sanayi alanlarında kullanılmaktadırlar. Bu nedenle killer sanayi madenleri arasında en yaygın bulunan ve kullanılan, endüstriyel çalışmalarda oldukça geniş sahaya sahip, mineral grubu içerisinde yer almaktadır.

Kili meydana getiren maddeler sulu alüminyum silikatlar olması sebebiyle killer su tutma ve iyon değiştirme güçleri yüksek alüminyum silis bileşiklerni oluşturmaktadırlar. Plastik özellikleri tabakalarının plaka (pseudo hexagonal plakacıklar) biçiminde olması ve bu plakalarının birbiri boyunca su sayesinde kayma özelliğine dayandırılır. Killer yapıları itibariyle kılcal çatlaklı veya çatlaklı olabilir. Tabii durumda kılcal çatlaklı killer kıvamdadır ve yüksek kohezyona sahiptir. Normal olarak kılcal çatlaklar kapalıdır. Ancak kazı sonucu üzerindeki yük kalktığında bu çatlaklar açılır, çatlaklardan giren su zemini yumuşatır, ayrıştırır ve duraylılık problemlerinin ortaya çıkmasına neden olur.

### 2.3.2. Killerin sınıflandırılması

Çok küçük kristallerden meydana gelmiş olmaları killeri kayalardan ayıran en önemli özellikleridir. En az bir boyutta çok küçük boyutlu olmasına karşın geniş yüzey alanlarına, fiziksel olarak yüksek adsorbsiyon özelliğine, bazı killer ise yüzeylerinde negatif yüklere sahiptir. Killer tabakalı ya da lifli olmalarına ve kristal yapılarına göre sınıflandıralabilmektedir. Kilin şişme özelliği, katyon değişim kapasitesi,plastiklik düzeyi, reolojik ve adsorblama özellikleri, kilin çeşitlenmesinde etkendir.

Doğada 20 'den fazla kil minerali olmasına rağmen oluşumlarına göre yaygın olarak kaolin, illit, klorit ve montmorillonit olmak üzere dört ana grup altında incelenmektedir. Kil minerallerinin kimyasal bileşimi Tablo 2.3.'de verilmiştir.

Tablo 2.3. Kil minerallerinin ağırlığına göre kimyasal bileşimi (%) (Kızılçelik,2010)

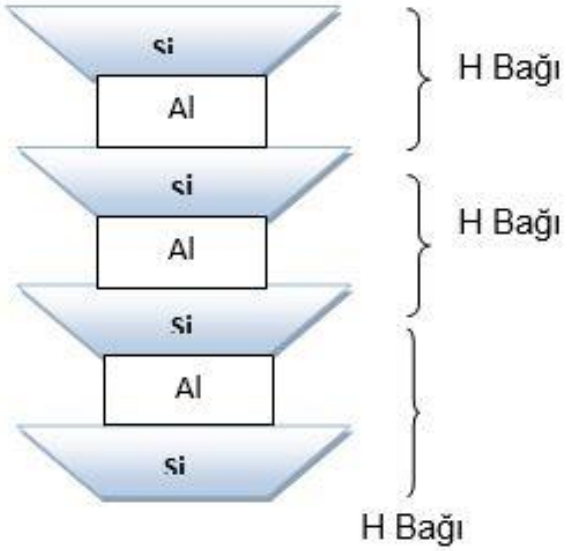
| Kil Mineralleri | $SiO_2$ | $AlO_3$ | $FeO_3$ | $TiO_2$ | CaO | MgO | $K_2O$ | $Na_2O$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Kaolinit | 45-48 | 38-40 | - | - | - | - | - | - |
| İllit | 50-56 | 18-31 | 2-5 | 0-0.8 | 0-2 | 1-4 | 4-7 | 0-1 |
| Klorit | 22-35 | 12-24 | 0-15 | - | 0-2 | 12-34 | 0-1 | 0-1 |
| Montmorillonit | 42-55 | 0-28 | 0-30 | 0-0.5 | 0-3 | 0-2,5 | 0-0,5 | 0-3 |
| Vermikulit | 33-37 | 7-18 | 3-12 | 0-0,6 | 0-2 | 20-28 | 0-2 | 0-0,04 |

#### 2.3.2.1. Kaolinit grubu kil mineralleri

Kaolinit grubu kil mineralleri sulu alüminyum silikatlarıdır. Bu tür kil mineralleri uygun kimyasal ve fiziksel koşullarda feldispatça zengin magmatik kayaçların (granit, gnays, diyorit) ayrışması sonucu oluşur. Kaolin mineralinin bağ yapısı Şekil 2.4.'de verilmiştir.

Kaolinit grubunda bulunan killerin plastiklik seviyeleri orta düzeydedir. Bunun sebebi, kaolinit grubundaki killeri oluşturan tabakların üst üste yapışık konumda olması ve tabakalar arasında kurulan hidrojen bağları ve van der waals kuvvetleri nedeniyle suyun tabakalar arasına girememesine sebebiyet vermektedir. Bu durum kaolinit grubu

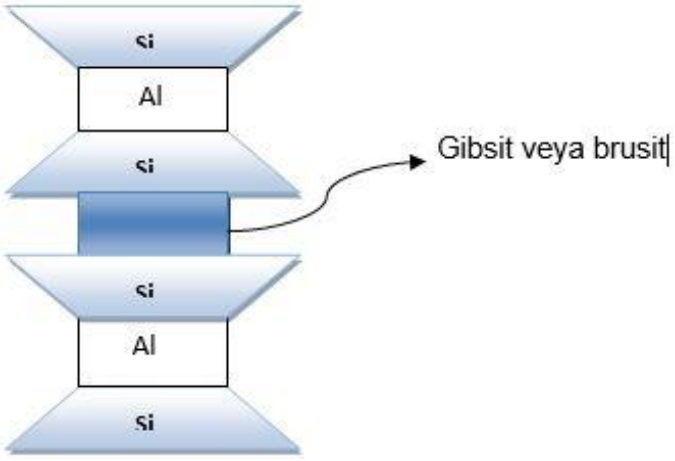
killerin şişme potansiyelinin önlenmesini sağlamaktadır. Şişme potansiyeli düşük olan kaolinitler su ile karıştırdıklarında herhangi bir dayanım sorunu yaşamaktadır. Kaolinitin kristalleri montmorillonite göre daha büyüktür. Diğer kil minerallerine göre kohezyon, plastiklik, şişme ve büzülme özellikleri kaolinitin çok zayıf olmakla birlikte kaolinit ıslandığında plastisitesi orta dereceli olup, içsel sürtünme açısı diğer kil minerallerinden daha büyük olur. Ayrıca asitlere karşı direnç olduğu için çözünmeye maruz kalmazlar. Özgül ağrlığı 2,6-2,68 gr/cm³ ve özgül yüzeyleri 10 m²/gr civarında olan kaolinitler optik ve x ışınları ile gözlemlenebilirler. Dünya genelinde geniş bir hammadde pazarı bulunan kaolinit grubu killer, sanayi ve endüstride oldukça kullanılmaktadır.




Şekil 2.4. Kaolin minerali (Cernica, 1995)

### 2.3.2.2. Klorit grubu kil mineralleri

Bir silis, bir alümina, bir diğer silis levhası ve sonra da gibsit (al) ve brusit (mg) levhasından oluşmaktadır. Klorit minerali monmorillonit mineralinden daha az aktif özellik göstermektedir (Holtz ve Kovacs, 2010). Klorit mineralinin bağ yapısı Şekil 2.5.'de verilmiştir.

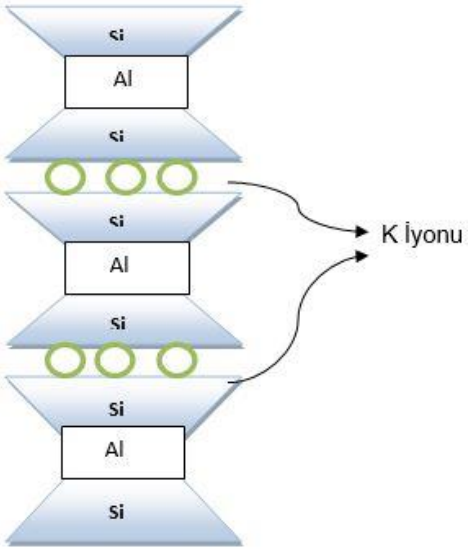



Şekil 2.5. Klorit minerali (Mitchell, 2005)

### 2.3.2.3. İllit gubu kil mineralleri

Kil minerallerinin yapısı genel olarak montmorillonit grubuna ait killer ile benzerlik göstermektedir. Montmorillont grubu killer ile aynı yapı özelliğine sahip olan ilitler, tabakaları arasına giren potasyum iyonları sayesinde daha güçlü bağ yapısına sahip olmaktadırlar. Bu durum ilitlerin, içeri sızmaya çalışan suya karşı gösterdikleri direnci arttırmaktadır.

Tabakalar arasına sızamayan su, tabakalar arasındaki bağları kıramadığı için kil içerisinde şişme potansiyelini oluşturamazlar. İlitler bu sayede montmorilant grubu killer gibi şişme özelliği göstermezler. İllit minerali bağ yapısı Şekil 2.6'da verilmiştir.



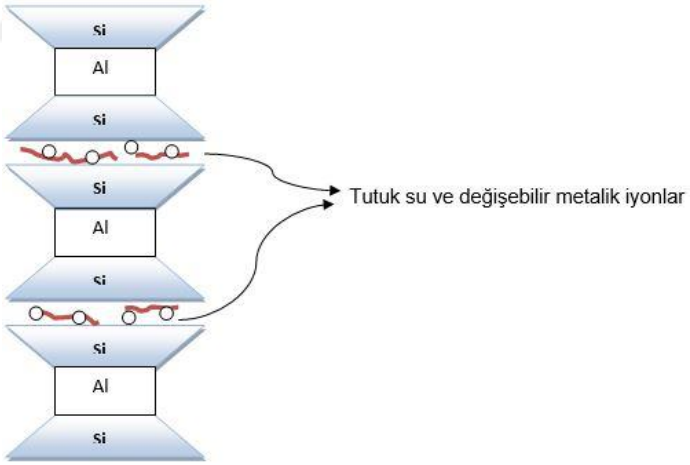

Şekil 2.6. İllit minerali (Cernica, 1995)

### 2.3.2.4. Montmorillonit grubu kil mineralleri

Bu gruptaki killer, iki silis ve bir alümina levhasından oluşan önemli bir kil mineralidir.

Montmorilllonit grubu killeri oluşturan tabakalar arasın da kurulan van der waals bağları katyonlarla oluşturdukları için, bağlar oldukça zayıftır. Kil içerisine sızmaya çalışan su, kili oluşturan zayıf tabakalar arası bağları kolaylıkla aşarak kil içersine girmektedir. Bu grupta bulunan killer tabakalar arasına kendi ağırlığının 20 katı kadar suyu hapsedebilme özelliğine sahiptirler. Özellikle bu grupta yer alan bentonit kili tabakaları arasında bulunan zayıf bağlar sebebiyle dışarıdan aldığı su oranı %500'e kadar çıkmaktadır.

Yüksek miktarda suyu içerisine hapseden montmorilant killeri oldukça fazla şişme potansiyeli gösterirler ve suya geçirimsiz hale geritilrilmektedir. Bu sayede geçirimsiz tabaka olarak, çöp depoların, sonda çamurlarında, endüstriyel sanayi atılkşlarının ve maden işletme sahalarında kullanımı tercih edilmektedir. Montmorillonit mineral yapısı şekil 2.7'de verilmiştir.




Şekil 2.7. Montmorillonit minerali (Cernica, 1995)

## 2.4. Killerin Şişme Özelliği

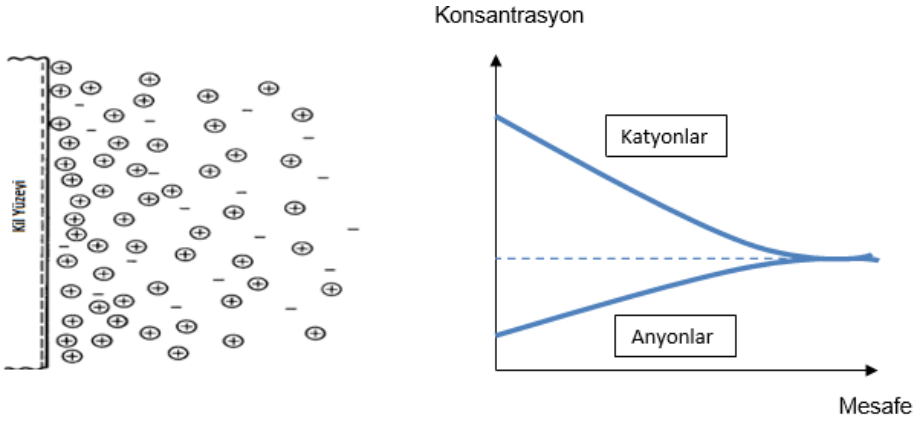
Kurak iklim özelliklerine sahip alanlarda suya doygun halde bulunmayan killi zeminlerin su içeriğindeki artış, önemli hacim değişikliklerine neden olmaktadır. Bu tür zeminlerde su ile temas sonrasında ortaya çıkan hacim artışlarının büyük miktarlarda olması ve meydana gelen hacim değişimlerinin üst yapı veya var olan mühendislik yapılarınca engellenmesi ile oluşan basınç, yapılarda önemli maddi

hasara sebep olabilmektedir. Suya doygun olmayan bazı killerin su ile etkileşime girerek bünyelerine su alması ve bu duruma bağlı olarak gelişen hacim artışı ve ilave basınç, kilin şişme (swelling) özelliği olarak adlandırılmaktadır. Oluşan bu basınçların etkisiyle temel sisteminde veya döşeme elemanında yapısal hasarlar meydana gelebilmektedir.

Ağırlığı az olan kaldırımlarda, karayolları ve havaalanı pistleri gibi yapılarda, şişme problemine oldukça sık rastlanılmaktadır. Sistemin belirli dönemlerde yüklenip boşaltıldığı, sızan ve kaçak sulardan dolayı temel zemininin su ile etkileşime girme olasılığının fazla olduğu kanal kaplaması, borulu sulama ve içme suyu şebekeleri gibi hafif su yapılarında çatlama, kırılma ve kabarma, ve sifon, menfez ve sel alt geçidi gibi yardımcı yapılarda da yer değiştirme, dönme ve devrilme gibi sorunlarla karşı karşıya kalınmaktadır.

Kil mineralleri, çoğunlukla yüzeylerinde negatif ve uç bölgelerinde ise pozitif elektrik yüklerine sahiptir. Su elektriksel olarak nötr olsa da biri negatif biri de pozitif olmak üzere iki yük merkezi bulunmaktadır. Periyodik tabloda benzer yerlerde bulunan $H_2S$ ve $NH_3$ gibi elementler hidrojen bağlarından dolayı sıvı durumdadır ve su molekülü kil kristalin yüzeyi tarafından çekilmektedir.

Buna ek olarak sudaki hidrojen kil yüzeyindeki oksijenler veya hidroksiller tarafından çekilir. Üçüncüsü negatif yüklü kil yüzeyi su içerisindeki katyonları çekmektedir. Kil-elektrolit sistemi içinde anyon ve katyonların dağılımı Şekil 2.8.'de verilmiştir.



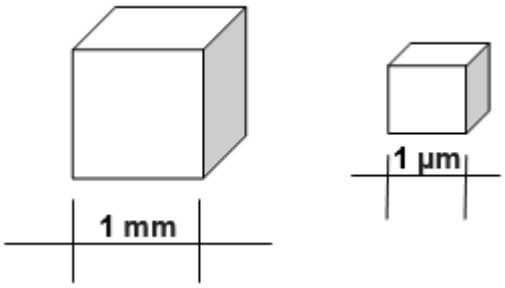

Şekil 2.8. Kil-elektrolit sistemi içinde anyon ve katyonların dağılımı a) Suyun dipolar karakteri b) Diffüz çift tabakada dipolar moleküllerin çekimi (Mitchell, 1976)

Kil minerallerinin su ile etkileşimini etkileyen diğer bir faktör ise spesifik yüzey kavramıdır. Spesifik yüzey bir materyalin yüzey alanının hacmine oranı veya yüzey alanının kütlesine oranı olarak tanımlanmaktadır. Yani yüzey alanı küçüldükçe spesifik yüzey değeri büyümekte buna bağlı olarak kil mineralini saran su miktarı aynı oranda artmaktadır. Tablo 2.4'de bazı kil minerallerinin spesifik yüzey değerleri görülmektedir (Das, 2008).

Tablo 2.4. Yaygın kil minerallerinin spesifik yüzey ve kalınlıkları (Das, 2008)

| Kil Minerali | Spesifik Yüzey ($m^2$/gr) | Kil Kalınlıkları |
|---|---|---|
| Kaolinit | 10-20 | 3 |
| İlit | 80-100 | 25 |
| Montmorillonit | 800 | 100 |
| Klorit | 5-50 | 20 |

Spesifik yüzey kavramını görsel olarak tanımlamak için biri 1 mm diğeri de 1 µm boyutlarında olan farklı boyutta iki küp numunesini kıyaslarsak yüzey alanı küçük olan küpün spesifik yüzey alanının diğer küpe göre daha büyük olduğu görülmektedir. Spesifik yüzey kavramı Şekil 2.9'da gösterilmiştir.




Şekil 2.9. Spesifik yüzey kavramı

Spesifik Yüzey: $(1\ mm)^2 / (1\ mm)^3 = 1/\ mm$

Spesifik Yüzey: $(1\ \mu m)^2 / (1\ \mu m)^3 = 1000/\ mm$

Kil minerali içeren zeminler genellikle kimyasal iyileştirme yöntemleri tercih edilerek iyileştirilmektedir. Bunun nedeni ise, kil minerali içerisindeki yüksek değerlikli katyonların daha düşük değerlikli katyonlar ile yer değiştirebilmesidir. Ayrıca iyon değeri ne kadar büyükse değişim gücüde o kadar büyük olmaktadır. Artan değişme

gücüne göre iyon sıralaması $Al^{+3}$ > $Ca^{+2}$ >$Mg^{+2}$ >$NH^4$ + >$K^+$ >$H^+$ >$Na^+$ >$Li^+$ şeklinde olmaktadır. Bu serideki bir katyon sağındaki iyonun yerine geçebilir Buna örnek olarak kireç (CaOH), kalsiyum iyonu sodyum iyonundan daha büyük yer değiştirme gücüne sahip olduğundan, zemin içindeki sodyum ile yer değiştirerek sodyum kilini dengeler ve daha büyük tanecikler oluşur. Bu sebeple; Sodyum montmorilloniti içeren killerin şişme potansiyeli kireç eklemek suretiyle önemli ölçüde azaltılabilmektedir (Holtz ve Kovacs, 2010).

Killi zeminlerde genişlemenin ana nedeni zeminde mevcut olan montmorillonit mineralinin içeriğidir. Montmorillonitin su ile olan ilişkisi yukarıda açıklanmaya çalışılmıştır. Bu tür zemin tipleri kuru iklim alanlarında buharlaşma kaynaklı büzülür ve yeniden su ile temas ettiğinde hacminde çok büyük artışlar meydana gelir. Hacimde meydana gelen bu değişimler, inşa edilen karayolu, istinat duvarı, havalimanı gibi hafif yapılarda çok büyük hasarlara neden olabilmektedir. Bu hasarlar ile başa çıkabilmek için zeminin Geoteknik şartlara uygun olarak tasarlanması ve uygun şartlarda iyileştirilmesi gerekmektedir.

### 2.5. Zemin Stabilizasyonu

Zeminler farklı özelliklere sahip ve geoteknik özellikleri yerel koşullara bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Buna bağlı olarak farklı amaçlar için karşılaşılan zeminler her zaman kullanım amacına uygun özellikleri sağlamayabilmektedir. Zeminin özellikleri kullanım için yeterli olmadığında zeminde iyileştirme yapılır. Yumuşak kil zeminlerde taşıma gücünü artırmak, konsolidasyon oturmalarını azaltmak veya sınırlandırmak için zemin iyileştirmesine gidilir. Zemin iyileştirmesi ile zeminin mühendislik parametrelerini yapıya uygun hale getirmek amaçlanılmaktadır. Bu parametreler;

- Zeminin taşıma gücünü arttırmak,
- Meydana gelebilecek deformasyonları ve toplam oturmayı azaltmak,
- Geçirimlilik seviyesini düşürmek,
- Zeminin sıvılaşma ihtimalini azaltmak veya tamamen kaldırmak,
- Kayma dayanımını yükseltmek,
- Boşluk sularından kaynaklanan basıncı düşürmek,

- Şişme/kabarma ve don kabarması gibi çevre etkilerini azaltmak gibi kilin mühendislik özelliklerini arttırmayı amaçlamaktadır.

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 durumunda 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 açısında da çoğu kez diğer yöntemlere göre daha uygundur (Robinson ve diğ., 2004); (Moseley, 2004); (Demiröz ve diğ., 2009).

Geçmişen günümüze kadar zemin iyileştirme yöntemleri ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, zemin iyileştirmesinin uygulanacağı zeminin türüne göre, zemin türüne ve zemine katkı katılıp katılamayacağına göre, bazı çalışmalar zeminin yüzeyinde veya derinde olmak üzere farklı şekilde iyileştirme yöntemlerini kapsamaktadır.

Zeminler uygulama derinliğine göre, zemine katkı katılıp katılamayacağına göre yüzeysel iyileştirme ve derin iyileştirme olmak üzere iki ana grupta da sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma Tablo 2.5'deki gibidir.

#### 2.3.2.5. Mekanik iyileştirme yöntemi

Mekanik stabilizasyon, zeminlerin mühendislik özelliklerinin zayıf olduğu durumlarla karşılaşıldığında, zemine ait fizksel ve mekanik özelliklerini stabilize etmek maksadıyla iki veya daha fazla malzeminin belirli oranlarla karıştırılarak istenilen mühendislik özlliklerinin zemine kazandırılması için uygulanan yöntemdir.

Stabilizasyon sayesinde zemine gelecek yatay ve düşey yüklerden kaynaklı oluşabilecek deformasyon oturmaları mümkün olduğu kadar en aza indirgenecektir.

Tablo 2.5. Uygulama derinliğine göre zemin sınıflandırması

| Derin İyileştirme Metodu | | Yüzeysel İyileştirme Metodu | |
|---|---|---|---|
| Kohezyonlu Zeminler | Kohezyonsuz zeminler | Mekanik İyileştirme Yöntemi (Katkısız) | Kimyasal İyileştirme Yöntemi (Katkılı) |
| -Ön konsolidasyon<br>- Kum dienleri<br>- Elektro osmoz<br>-Termal işlemler | -Dinamik konsolidasyon<br>-Derin vibrasyon<br>-Patlayıcılar<br>-Enjeksiyon | -Drenaj<br>-Kompaksiyon | -Kireç<br>-Çimento<br>-Uçucu Kül<br>-Bitüm<br>-Mermer tozu ve cüruf |

### 2.5.1. Zeminlerde mekanik ve kimyasal iyileştirme yöntemleri

Mekanik yöntemler olarak grubunu 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 31(Johnson ve diğ., 1960). Yaklaşık otuz yıl sonra ise (1920) traktörler hayvanların yerini almıştır. Günümüzde sıkıştırma amacı ile kullanılan pek çok gelişmiş arazi donanımı bulunmaktadır (Coduto, 2006). Mekanik stabilizasyon uygulamalarından bir görsel Şekil 2.10'da verilmiştir.

Mekanik stabilizasyonda kullanılacak malzemeleri karıştırmada karışım oranları için belli bir sistem ve/veya yöntem yoktur. Farklı tip zeminlerin farklı oranlardaki karışımları deneme-yanılma ile hazırlanmakta ve bu karışımların mühendislik özelliklerini incelemek amacıyla karar verilmektedir. Zeminlerde mekanik stabilizasyon, ince taneli (200 No.lu elekten geçen kısmı genellikle %50 den fazla olan) zeminlere, kaba taneli zemin (kum, çakıl, teras çakılı, kırma taş, yamaç molozu vb.) karıştırılarak zeminin mühendislik özellikleri ıslah edilmektedir.



Şekil 2.10. Sahada mekanik stabilizasyon uygulamaları

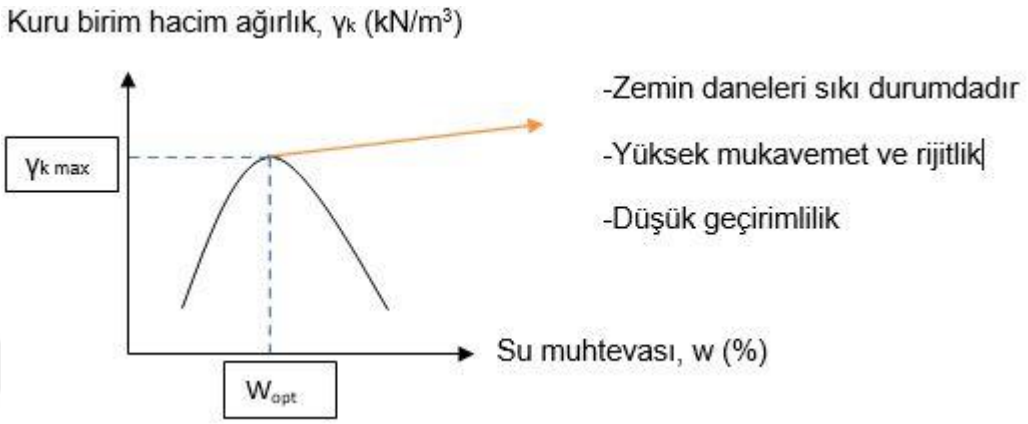
Zeminin kaba kısmının miktarı ile gradasyonu ve ince kısmının plastisite özellikleri mekanik stabilizasyonun başarısında en etkili rolü oynamaktadır. Zemindeki maksimum tane boyutunun çok büyük olması işlenebilirliği azalmakta ve kaba kısmının çok olması da segregasyona sebep olmaktadır. Gradasyon; zeminin yoğunluğu, geçirimliliği, stabilitesi, su tutma yeteneği gibi özellikler üzerinde doğrudan etkilidir. Gradasyonun sürekli olması durumunda en yoğun zemin elde edilmektedir. Buna göre zeminin en yoğun zemin olması halinde segregasyon azalmakta ve işlenebilirlik artmaktadır (Yeşilçiçek, 2016).

Mekanik stabilizasyon ile zeminin, gradasyonunun düzeltilmesi, LL veya PI indeksinin azaltılması, mukavemet ve durabilitenin arttırılması, dren kabiliyetinin arttırılması, uzun dönemli oturmaların arttırılması ve don duyarlılığının azaltılması amaçlanmaktadır (Winterkorn ve Fang, 1975)

Zemine uygulunan kompaksiyon sonrasında sıkışan zemin tabakaları sayesinde boşluk oranı (porozite) azalmaktadır. Zeminde porozite azalması, kuru birim hacim ağırlığının artmasına neden olacaktır. Zemine sıkıştırma işlemi yapılırken zemin türüne göre farklı şekilde uygulamalar yapılmaktadır.Granüler zeminde sıkıştırma yapılırken bağıl yoğunluk değerleri referans olarak kullanılırken ince daneli zeminlerde ise dinamik yükün zeminin üzerine düşürülmesi yolu ile zemin taneleri birbirlerine yaklaşır ve kısmen üniformluk sağlanmış olur (ASTM 698, 2012).

Los Angles'ta bir mühendis olan R. R. Proctor, 1930 yılında, bu günde halen kullanılmakta olan evrensel bir sıkıştırma yöntemi geliştirmiştir (Coduto, 2006).

Proktor yöntemi olarak da bilinen bu yöntemin amacı, laboratuvarda, zemin için belli bir sıkıştırma enerjisinde en iyi sıkışmayı sağlayacak olan su içeriğini (optimum su muhtevasını) ve ona bağlı maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlemektir (Aytekin, 2004). İdeal kompaksiyon eğrisi Şekil 2.11'de gösterilmiştir.




Şekil 2.11. Kompaksiyon eğrisi

### 2.5.1.1. Kimyasal iyileştirme yöntemi

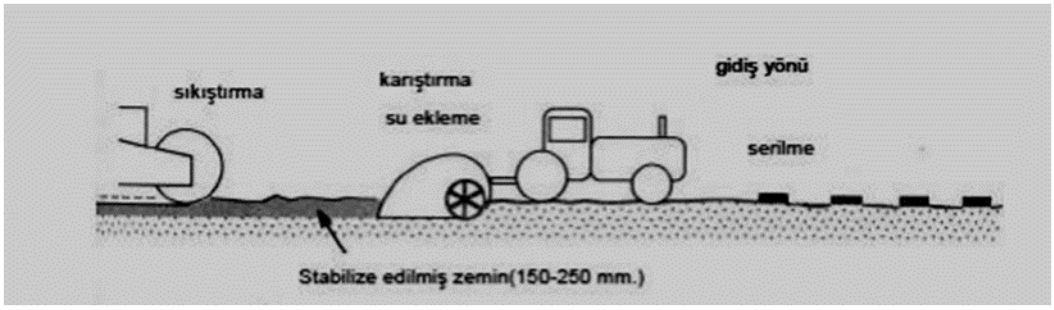
Kimyasal Stabilizasyon, mekanik iyileştirme yöntemi ile ıslahı yapılamayan zeminlerin içerisine farklı katkı maddeleri eklenip karıştırılmasıyla, meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucu zeminin fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesidir. Kimyasal iyileştirme yönteminde asıl amaç kohezyonlu zeminlerin tabakalar arası boşlukları doldurarak, var olan bağları kuvvetlendirmektir. Bu yöntem için daha çok kullanılan katkı maddeleri, kireç, çimento, mermer tozu, uçucu kül ve bitüm gibi malzemelerdir. Kimyasal Stabilizasyon ile zemine aşağıdaki özelliklerin kazandırılması amaçlanmaktadır.

- Zemine mukavemet kazandırılması
- Oluşabilecek deformasyonun azaltılması
- Hacimsel değişikliklerin önlenmesi
- Şişme ve rötre potansiyelinin kontrol altına alınması
- Zemine durabilite özelliğinin kazandırılması veya arttırılması

Geçmişten günümüze kadar stabilizasyon ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Yapılan bu çalışmalar neticesinde, zemine katkı maddesi olarak kullanılacak

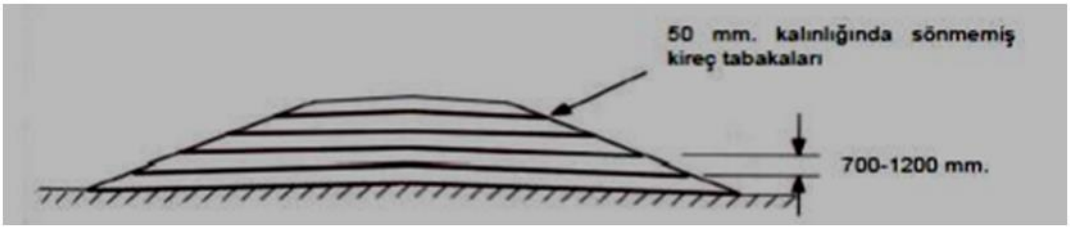
malzemelerin seçiminde stabilizasyonun amacına uygun gerçekleştirilmesinde ve verimli sonuçların elde edilebilmesinde en önemli faktör olduğu görülmektedir.

Ayrıca yapılan çalışmalar sonucu zemine katkı maddesi katılmasının yöntemleri de geliştirilmiştir. Yüzeysel stabilize yöntemi ile zemin önce kazılırak, kısım kısım parçalara ayrılmaktadır. Seçilen stabilizatör ile uygun oranda su kullanırak zemin sıkıştırmaya tabi tutulmaktadır ve daha sonra zemin katkı maddesi ile karıştırılmaktadır. 1 metreye kadar kazılarak katkı maddesi ile stabilizasyon işlemi yapılacağı gibi kireç gibi bazı katkı maddelerinin kullanılmasıyla zemin karıştırma işleme olmaksızın, direkt olarak katkı maddesinin zeminin yüzeyine serma işlemi ile de stabilizasyon gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 2.12 ve 2.13'de zemin stabilizasyon uygulamalarından örnekler gösterilmiştir.




Şekil 2.12. Zemin stabilizasyon uygulamaları

1982 yılında Yamanouchi et al yaptığı çalışmasında 50 mm kalınlığında ve sentetik filtre ile sarılmış sönmemiş kireç tabakalarını 0,7- 1m tabaka kalınlığında sıkıştırılmış kil zemin içersine ilave edilerek uygulanan bir sandviç metodu adı verilen bir yöntem geliştirmiştir (Yamanouchi ve diğ., 1982). Bu yöntem Şekil 2.13.'de verilmiştir.




Şekil 2.13. Zemin stabilizasyonu uygulama örneği

Katkı malzemelerinin zemine karıştırılması aşamasında üç farklı yöntem uygulanmaktadır. İlk yöntem olan, yerinde karıştırma yöntemi; katkı malzemesinin, zemin tabakası üzerine düzgün bir şekilde dağıtılmasından sonra zeminin arazide

karıştırılarak optimum su muhtevasında sıkıştırılması işlemidir. İkinci yöntem olan, sabit santral yöntemi ise, zemini sabit bir santrale taşıyıp katkı maddesi ve su ekleyerek karıştırdıktan sonra inşaat sahasındaki yerine geri yerleştirerek kompaksiyona tabi tutma esasına dayanmaktadır. "Gezici santral yöntemi" adı verilen son yöntemde, gezici bir mekanizma vasıtasıyla zemin yüzeyden alınarak içerisine katkı maddesi ve su katılıp karıştırılmakta ve sonrasında tekrar yüzeye yayılarak sıkıştırılmaktadır (Uzuner, 2006). Zemin bileşenlerine göre tavsiye edilen stabilizasyon metodları Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6. Zemin bileşenlerine göre tavsiye edilen stabilizasyon metodları (Tunç, 2002).

| Zemin Türü | Önerilen Stabilizasyon | Stabilizasyonun Amacı |
|---|---|---|
| Alofenler | Kireç veya kire.- uçucu kül karışımı | -Dayanımı arttırmak<br>-Stabiliteyi arttırmak |
| Kaolin | Kum ile mekanik stabilizasyon<br>Çimento- Kireç | -Kısa süreli dayanımı arttırmak<br>-İşlenebilirlik ve uzun süreli dayanımı arttırmak |
| İlit | Çimento | - Kısa süreli dayanım artışı |
| Montmorillonit | Kireç | -İşlenebilirlik ve uzun süreli dayanım arttırmak<br>-İşlenebilirlik ve kısa süreli dayanım arttırmak |
| Silt | Mekanik veya kimyasal stabilizasyon | -Zemin özelliklerini iyileştirmek |
| Kum | Mekanik stabilizasyon<br>Çimento<br>Asfalt | -İnce plastik olmayan malzeme karıştırarak stabiliteyi arttırmak<br>-Dayanımı arttırmak<br>-Kohezyon sağlamak |
| Organik madde | Mekanik stabilizasyon | -Diğer metotlar etkisizdir |

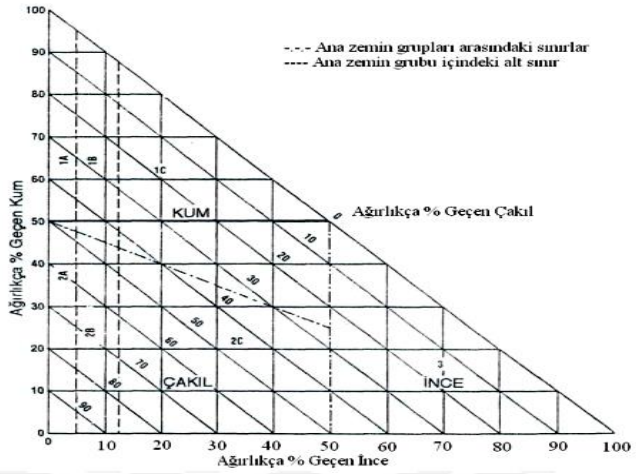
### 2.5.1.2. Stabilizatör seçimi

Kimyasal stabilizasyonda; stabilizör seçiminde, zemin cinsi, stabilizasyonun amacı (stabilite artışı, kaplama kalınlığının azalması vb.), zeminin hangi özelliğinin iyileştirileceği, maliyet ve malzeme temin etme kolaylığı gibi hususların göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Çalık, 2012).

Katkı malzemeleri ile zemin iyileştirme yöntemlerini anlayabilmek ve uygulayabilmek için öncelikle bu katkı malzemelerinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Hangi katkı maddesi hangi zeminde kullanılabilir, ne kadar kullanılmalıdır, zeminin

hangi özelliklerini ne oranda iyileştirebilir gibi sorulara cevap vermesi adına aşağıda, çimento, kireç, muhtelif geosentetik katkılar ve kimyasal katkılar gibi malzemelerin zemin özelliklerine etkileri incelenmiştir.

Zemin gradasyon üçgeni Şekil 2.14'de verilmiştir.




Şekil 2.14. Zemin gradasyon üçgeni (U.S. Army Corps. of Eng., 2003)

Zeminin ufalanma karakteristliği esas alınarak hazırlanan üçgen gradasyon nomogramı Şekildeki gibi hazırlanmıştır. İçerisindeki suyu bünyesinde hapseden killi zeminler, kuruduklarında rötre özelliği kazanır ve ufalanması oldukça güç büyük topaklar halinde kalmaktadırlar. Ancak stabilize edilecek killi zemin, stabilizasyon şartlarına uygun hale getirlmek amacıyla daha küçük parçalara ufalanması gerekmektedir. Ufalanan kil tabakalarına katkı maddesi eklenerek homojen bir karışım elde edilmesiyle stabilize işlemi tamamlanmalıdır. Zemin gradasyon üçgeni sayesinde, stabilize edilecek kilin ufalanma karakteristliği belirlenir ve sonrasınd likit limit ve plastik limit değerleri ile plastisite indisi kullanılarak tablodan zemine uygun en iyi stabilizatör seçilebilmektedir. Stabilizatör seçimine dair özet bilgiler Tablo 2.7'de verilmiştir.

Zemin gradasyon üçgeninde kullanılmak üzere Alan numaraları olarak belirlenen kısımlardan zeminin plasitk indisi ve zemin türlerinin %olarak değerleri tabloda gösterilir. Burada Alan numaralarıyla ile belirlenen grubun hangi katkı maddesinin stabilizatör olarak seçileceği plasitiste indisinin değeriyle belirlenmektedir. Bu yöntemde kullanıcak katkı maddeleri ayrı ayrı kireç, çimento, bitüm, uçucu kül olmak

üzere kullanılabileceği gibi bir ya da daha fazla karışım kombinasyonları ile de katkı maddesi homojen olarak zemine ilave edilebilmektedir. Herbir katkı maddesinin kendine ait kimyasal özelliklerinden yararlanılarak ortak bir kombinasyon gerçekleştirlmesi zemin iyileştirmesinde oldujça büyük bir fayda sağlayabilmektedir. Bu duruma çimento ve kireç kombinasyonları örnek olarak vereleblir. Zemine katkı maddesi olarak seçilen çimento, zemin içerisinde oluşturduğu kimyasal reaksiyonlarla, içinde mevcu silika, stabilizasyon için gerekli puzolanik maddeyi oluşturmaktadır bu sayede zemin daneleri arasında bağlayıcı bir işlev görmekte ve zeminin dayanımını hızlı bir şekilde artırmaktadır. Buna ilave olarak kullanılan kireç ise zeminin plastiklik seviyesini düşüreceğinden zeminin kolay işlenebilme özelliği sağlamaktadır.

Tablo 2.7. Zemin stabilizasyonu için stabilizör seçimi (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

| Alan No | Zemin Sınıfı | Önerilen Katkı | Kısıtlamalar | 200 No'lu Elekten Geçen | Açıklamalar |
|---|---|---|---|---|---|
| 1A | SW<br>SP | Bitüm<br>Çimento<br>K-Ç-U* | -<br>-<br>PI<25 | - | |
| 1B | SW<br>SP<br>SW-SC | Bitüm<br>Çimento<br>Kireç | PI<10<br>PI<30<br>PI<20 | - | |
| 1C | SM<br>SC<br>SM-SC | Bitüm<br>Çimento<br>Kireç<br>K-Ç-U* | PI<10<br>**<br>PI>12<br>PI<25 | En fazla %30<br>-<br>- | |
| 2A | GW<br>GP | Bitüm<br>Çimento<br>K-Ç-U* | -<br>-<br>PI<25 | - | Çimento katkısı sadece iyi gradasyonlu zeminlerde ve 4 N'lu elekten geçen en az .%45 olduğu durumlarda |
| 2B | GW<br>GP<br>GW-GC<br>GP-GC | Bitüm<br>Çimento<br>Kireç<br>K-Ç-U* | PI<10<br>PI<30<br>PI>12<br>PI<25 | - | |
| 2C | GW<br>GP<br>GW-GC | Bitüm<br>-<br>Kireç<br>K-Ç-U* | PI<10<br>**<br>PI>12<br>PI<25 | En fazla %30<br>-<br>- | |
| 3 | CH<br>CL<br>ML<br>ML-CL | Çimento<br><br><br>Kireç | LL<40 <ve<br>PI<20<br><br>PI>12 | -<br><br><br>- | Organik ve kuvvetli zeminler uygun olmamaktadır |

*K-Ç-U: Kireç, çimento ve puzolan kombinasyonu

** PI ≤ 20 – ((50-200 No.lu elekten geçen yüzde)/4)

Zemin stabilizasyonunda tercih edilen katkı maddesi belirlenirken birçok faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Zemin türü ve özellikleri, inşa edilecek yapının

mühendislik özellikleri, arazi koşulları, maliyet ve katkı malzemesinin bulunabiliriği ve çevreye olan etkisi gibi koşullara bağlı olarak değişmektedir.

Zeminin türü ve plastiklik indisi değeri katkkı maddesinin belirlenmesi oldukça önemli bir yere sahip olduğu görülmektedir. Özellikle yğksek şişme potansiyeline sahip, killerde stabilizasyon ile seçilen katkı maddesinin varlığıyla, zeminin, se geçirimliliği, şişme potansiyeli, dona karşı gösterdiği duyarlılık gibi birçok mhendislik özelliğinde iyileşme sağlanarak killi zeminin mukavemet parametreleri artırılmaktadır.

### 2.5.2. Killi zeminlerde katkı maddesi ile iyileştirme

Yapılaşmanın yapıldığı sorunlu zeminlerde farklı oturmalar veya deformasyonlar gösterebilmektedir ve zeminin sıkışılabilirliği yüksek olabilir. Daha önce de belirtildiği gibi temelin yapısı zeminin mühendislik özelliklerine bağlıdır ve buna bağlı olarak değişmektedir. Zeminin karakteristik özellikleri zayıf bir zemine yapılaşma söz konusu olduğunda zemin yapıyı taşımayabilir kısa süre içerisinde dayanımda ciddi yenilmeler olabilir. Buna benzer zamanlarda zeminin taşıma kapasitesinin veya dayanımının iyileştirilmesi zemin iyileştirme yöntemi ile sağlanabilir. Zemin iyileştirme tekniklerine bakıldığında katkı maddesi eklenerek yapılan iyileştirme tekniği, özellikle zemin uyumu açısından ve birçok faktörden dolayı iyileştirmek için büyük bir etkiye sahiptir.

Katkı malzemeleri ile zemin iyileştirmesi genelde çalışılabilirlik, dayanım kazanmak, geçirimsizliği azaltmak gibi nedenlerden dolayı yapılmaktadır. Zeminler farklı kil mineralleri içerdiği için doğru katkı maddesini seçmek önemlidir. Bunun için dikkate alınması gereken etkenler aşağıda verilmektedir (Küçükali, 2011).

- İyileştirmede kullanılacak katkı malzemesi kolay nüfuz etmelidir.
- Seçilen katkı maddesi miktarı ekonomi açısından uygun olmalıdır.
- İyileştirilecek kilin minerolojik yapısındaki mineral oranlarına bakılmalıdır.
- Kür süresi dikkate alınmalı ve kür zamanının stabilizasyonda olumsuz etkiler olmamalıdır.
- Kullanılacak katkı malzemelerinin herhangi bir olumsuz faktörü bulunmamalıdır.
- İyileştirme için seçilen katkı malzemesi zemine homojen şekilde eklenmelidir.

Killi zeminlerin katkı malzemesi ile iyileştirilmesi konusu çok eski bir geçmişe dayanmaktadır. (Süt, 2006) tarafından yapılan yüksek lisans tezinde 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 sapasağlam 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).

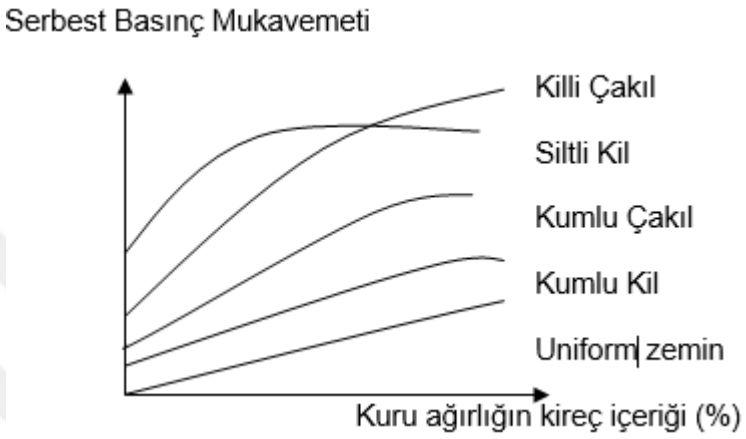
Zeminde istenilen geoteknik özelliklerin elde edilmesinde katkı kullanımı konusu 20. yüzyıl da ve 21. yüzyılda çok geniş şekilde irdelenmektedir. Birçok farklı malzeme zemin iyileştirmede kullanılmak amacı denenmiştir. Üzerinde çalışmalar yapılan malzemelerin bir kısmının katkı olarak kullanım alanlarındaki 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.

#### 2.5.2.1. Kireç ile stabilizasyon

Kireç ile stabilizasyon, bilinen en eski ıslah yöntemi olarak geçmişten günümüze kadar tercih edilmektedir. Zayıf zeminin dayanım ve taşıma gücü gibi mühendislik özelliklerini iyileştirmek maksadıyla kireç ile gerçekleştirilen işleme kireç ile stabilizasyon denilmektedir. Zemin türüne göre belirlenen stabilizasyon çeşitleri ve kullanılan katkı maddesi farklılık göstermektedir. İnce daneli kohezyonlu zeminlerde sıklıkla kireç ile stabilizasyon yöntemi tercih edilmektedir. 1924 yılında katkı malzemesi olarak sönmüş kireç zemin stabilizasyonunda kullanılmaya başlanılmıştır.

Kireç ile stabilize edilen zemin mukavemetinin ve şekil değiştirme özelliklerinin artmasına, şişme ve kabarma potansiyellerinin azalmasına ve çevresel faktörlerin etkisinde zeminin yapısının bozulmamasına veya daha az ölçüde etkilenmesini sağlayarak zeminin mühendislik özelliklerine oldukça katkı sağlamaktadır. Ayrıca

plastisitenin azalmasıının sağladığı için killi zeminlerde yaygın bir şekilde kireç stabilizatör olarak tercih edilmektedir. Killi bir zeminde kirecin stabilizatör olarak kullanılmasıyla zeminde bir takım kimyasal reaksiyonlar meydana gelerek kilin tabakaları arasında dayanım ve taşıma gücünü arttıracak bağlar mümkün seviyede kuvvetlenecektir. Kireç içeriğinin zemin tiplerine etkisini gösteren grafik Şekil 2.15'de verilmiştir.




Şekil 2.15. Kireç içeriğinin zemin tiplerine etkisi

Killi zeminlere kireç ilavesi ile birlikte kimyasal reaksiyon gerçekleşir. Bu reaksiyonlardan ilki katyon değişimidir. Katyon değişiminde kirecin killi zemine ilavesiyle, kilin yapısındaki sodyum ve potasyum iyonları ile kirecin yapısındaki kalsiyum ve magnezyum iyonları ile yer değiştirirler. Reaksiyonların bazıları hemen başlarken bazıları da kısa zamanda başlayıp uzun süre devam etmektedir. Bunlardan puzzolanik reaksiyonlar zaman içinde başlayıp uzun süre devam eden reaksiyonlardandır. Katyon değişimi sonrasında çökelmeyle kil parçacıkları birbirine doğru yönelmektedir. Kil minerallerinin kirece yapışmasıyla kilin yapısı değişir ve daha büyük parçacık haline gelerek killi zeminin yapısında değişiklikler meydana getirir. Bu durumda, zemin kil özelliklerini yitirerek silt gibi davranmaya başlar ve sertleşip plastik kıvamdan katı kıvama geçer. Bu durum, kireç ilavesi ile kalsiyum iyonu almış olan kilin çevresi kireç ile kaplandığından dolayı emme ve şişme özelliğini kaybettiği şeklinde açıklanmaktadır. Bu sayede zemine katılan kireç, likit limitin azalmasını, plastik limitin artmasını, plastisite indisinin azalmasını, büzülme limitinin artmasını, işlenebilirliğin artmasını, direnç ve deformasyon özelliklerinin iyileştirilmesini sağlamaktadır (Çakılcıoğlu, 2007).

Genel olarak kireç stabilizasyonunda sönmüş kireç olan kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) tercih edilirken son zamanlarda kullanım artmış olsa da sönmemiş kireç, kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) yakıcılık özelliği göstermesiyle sebebiyle stabilizatör olarak kullanımı yaygın değildir. Killi zeminlerin Kireç ile stabilize edilmesiyle verimle sonuçlar elde edilmesi belirli parametrelere bağlanmıştır.

Düşük ve yahut yüksek plastisite özelliği gösteren kilin yapısı ve oransal olarak zemin içersindeki yüzdesi stabilizasyonun gerçekleşmesi sonucu verimi oldukça etkilememektedir. Zeminde gerçekleştirilecek bir takım deneylerle optiumum su muhtevası ve birim hacim ağırlığında kompaksiyon uygulanan zemin kireç stabilizasyonu sonrasında oluşacak göçme durumu plastiklikten gevrek kırılma şekline geçer. Bu sayede zemin çekme mukavemeti, serbest basınç mukavemetinin %12- 15 dolaylarında olmaktadır.

1987 yılında Ingles yaptığı çalışmada kireç ile stabilize edilen zeminin mühendislik özelliklerini etkin bir şekilde iyileştirmek için stabilizatörün ve zeminin miktarı, doğru şekilde karıştırma işleminin yapılması, uygun standartlarda kompaksiyonun gerçekleştirilmesi ve kireç ile zeminin kür olarak hazırlanması gibi hususların oldukça önemli olduğunu gözlemlemiştir. Modifiye ve stabilizasyon için önerilen kireç oranları Tablo 2.8'de gösterilmiştir

Tablo 2.8. Inglea ve Mercalf tarafından önerilen kireç oranları (Ingles ve Metcalf, 1972)

| Zemin Cinsi | Modifiye için (%) | Stabilizasyon için(%) |
|---|---|---|
| İnce çatlaklı kaya | 2~3 | Önerilmez |
| İyi derecelenmiş kil | 1~3 | ~3 |
| Kum | Önerilmez | Önerilmez |
| Kumlu kil | Önerilmez | ~5 |
| Siltli kil | 1~3 | 2~4 |
| Plastik kil | 1~3 | 3~8 |
| Yüksek plastisiteli kil | 1~3 | 3~10 |
| Organik zeminler | Önerilmez | Önerilmez |

Kireç ile zemin stabilizasyonunda zeminde bir takım değişimler gerçekleşmektedir. Bu değişimleri kısa dönemde ve uzun dönemde meydana gelen değişimler şeklinde ayırabiliriz. Kısa dönemde; serbest basınç değerleri, CBR değerleri, plastik limit

değerleri ve su muhtevaları artmaktadır. Likit limit ve plastisite indisi değerlerinde düşüş görülmektedir. Ayrıca proktor eğrileri de düzleşmektedir. Uzun dönemde ise; CBR değerlerinde kısa döneme göre daha fazla artışlar görülmektedir. Ayrıca mukavemet değerlerinde, şişme ve büzülmeye karşı dirençte ve dona karşı dayanımda artışlar gözlemlenmektedir (Kavak, 1996).

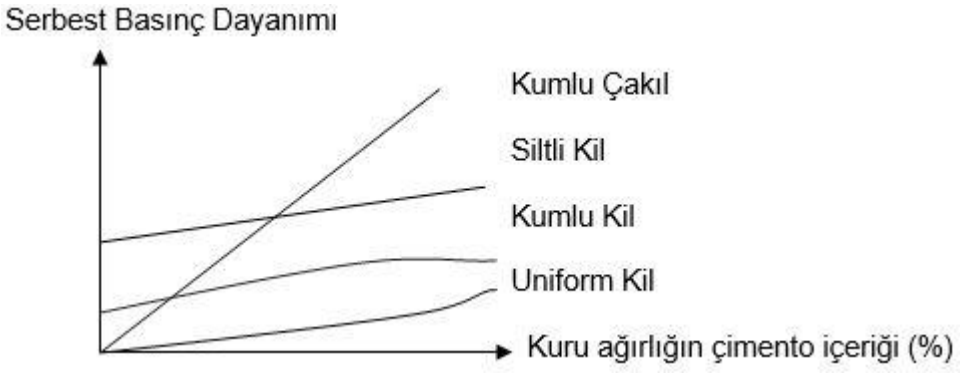
Tablo 2.9. Bu değerler optimum kireç değerleri içindir (Ingles, 1987)

| Zemin Tipi | Basınç Dayanımı ($M_{pa}$) | Elastisite Modülü ($M_{pa}$) | Geçirimlilik (m/s) | Büzülme (%) | Plastisite İndisi | Yorum |
|---|---|---|---|---|---|---|
| GW,GP,GM, GC,SW,SP | ≤ 0.3 | - | yükselir | Göz ardı edilebilir | NP | -Yalnızca plastisiteyi azaltmak için uygun |
| SM,SC<br>ML,CL,MH | 1.1<br>2.5 | <100<br><2000 | yükselir<br>yükselir | Çok az<br>5 | <5<br>10 | -Kötü-orta malzeme<br>İyi malzeme |
| CH | 3.5 | 1000 | yükselir | 10 | 20 | -İyi etki-orta iyi malzeme |
| OL,OH,Pt | ≤ 1 | 100 | - | Yüksek | 15 | -Uygun değil |

### 2.5.2.2. Çimento ile stabilizasyon

Kil ve doğal kalker taşlarının yüksek sıcaklıklarla ısıtıldıktan sonra öğütülmesiyle elde edilen bağlayıcı malzemeye çimento denilmektedir. Kohezyonlu ve organik olmayan iyi derecelendirilmiş taneli zeminler ve düşük plastisite özelliği gösteren killerin stabilizasyonunda kullanılmaktadır. Yol inşaatı veya havaalanı pistlerinde genellikle çimento kullanılarak yapılan yüzeysel zemin stabilizasyonu tercih edilmektedir. Bu stabilizasyon türünde genellikle kolay elde edilebilir olması, dayanımının yüksek olması ve diğer kimyasal karışımlardan ucuz olmasından dolayı Portland çimentosu tercih edilmektedir. Çimentonun geç priz alması ise olumsuz bir özelliğidir. Yüzeysel stabilizasyon haricinde; şevlerin stabilitesi, derin kazıların stabilizasyonu ve dolguların altında meydana gelen konsolidasyon oturmalarının hızlandırılmasında kullanılmaktadır. Zeminin cinsi, su/çimento oranı gibi temel faktörler ise çimento

kullanılmasında dikkat edilmesi gereken unsurlardır (Kılıç, 2008). Zemin türlerine göre çimento içeriğine bağlı olarak serbest basınç dayanımının değişimi Şekil 2.16'da gösterilmiştir.




Şekil 2.16. Serbest basınç mukavemeti ile çimento içeriği ilişkisi

Çimentonun hem iri daneli hem de ince daneli zeminlede kullanılabilinmesinin en temel nedeni, stabilize edilen zemin ile çimentonun kimyasal reaksiyonu neticesinde ortaya çıkan bileşiklerin zemin mukavemetini hızlı bir şekilde gerçekleştirmesidir. Geçmişte zemin türlerine göre katkı maddesi seçilirken granüler zeminler için çimento, kohezyonlu ince daneli zeminler için ise kireç yaygın olarak stabilitör olarak kullanılmaktaydı. Ancak gelişen ve ilerleyen teknoloji ve yapılan çalışmalar neticesinde çimentonun tüm zeminler için katkı maddesi olarak kullanılabiliriği ortaya konulmuştur. Çimentonun,gevşek ve akışkan olmayan tüm zeminler için stabilizasyonda kullanılması oldukça büyük avanataj olarak söylenebilmektedir.

Normal portland çimentosu kalsiyum silikat ve alüminat karışımından meydana gelmektedir. Su ile etkileşime girmesi ile çimento içerisindeki bu silikat ve alüminat bileşikleri hidratasyona uğrayarak silikathidrat, alüminat hidrat ve alüminosilikat hidrat gibi bileşikler oluşturur. Bu bileşikler başta jel şeklindedir fakat zamanla kristalleşerek zemin kütlesi içerisinde zemin danelerini bir arada tutmayı sağlayan rijit bir kenetlenme ağı oluştururlar. Bu ağ içerisinde zeminin kendisi inert dolgu olarak kalmaktadır. Çimento bileşiklerinin içerisinde bulunan CaO, bileşik killi zeminlerdeki kil bileşenleri ile etkileşime girerek çimentonun son dayanımını kazanmasına yardımcı olmaktadır (Herzog, 1967).

Zemine kazandırdığı yüksek mukavemetin yanı sıra çimento ile stabilize edilmiş zemin, geçirimliliğinin azalması, buna bağlı darabilitenin artması, şişme özelliği

gösteren yğksek plastisiteli killer için hacim stabilitesini arttırması gibi mühendislik özelliklerinde oldukça faydalı sonuçlar elde edilmektedir.

Ancak çimento ile yapılan ıslah çalışmasında bazı durumlarda zeminin yapısında rötreye sebep olabilmektedir. Bu duruma etken olarak zemin içerisindeki çimento oranının yüksek olması gösterilebilir.

Yapılan çalışmalar ile Zemin türleri ve kil çeşitlerinde, çimentonun katkı madesi olarak kullanması durumunda farklı oranlar belirlenmiştir. Rötreyi enggelemek ve en uygun çimento oranını kullanılarak etkin ıslah çalışmasını gerçekleştirmek oldukça önemli bir yere sahiptir. %10 çimento içeriğine sahip zeminlerin özelliklerinde gözlenen değişim Tablo 2.10'de özetlenmiştir.

Tablo 2.10. %10 çimento için zemin-çimento karışımları özellikler (Ingles, 1987)

| Zemin Tipi | Basınç Dayanımı ($M_{pa}$) | Elastisite Modülü ($M_{pa}$) | Geçirimlilik (m/s) | Büzülme (%) | Yorum |
|---|---|---|---|---|---|
| GW,GP,GM, GC,SW | 6.5 | 20000 | Düşer | Göz ardı edilebilir | -Az çimento kullanılırsa iyi malzeme |
| SM,SC | 2.5 | 10000 | Düşer | Çok az | -İyi malzeme |
| SP,CL,ML | 1.2 | 5000 | Düşer | az | -Orta malzeme |
| ML,CL,MH, | 0.6 | 2500 | Artar | orta | -Zayıf malzeme |
| CH,OL,OH, Pt | <0.6 | 1000 | Artar | Yüksek | -Karıştırması zor, aşırı çimentoya ihtiyaç duyar |

Çimento ile stabilizasyon daha çok kalsiyum minerali içeren zemin türleri için etkin sonucu vermektedir. İnce daneli zeminler ve plastiklik seviyesi düşük olan killerin stabilizasyonunda çimento kullanılması yüksek plastiki özellik gösteren iller ve kötü derecelenmiş granüler zeminlere göre daha uygun olmaktadır. Bu durumun sebebi ise çimentonun granüler zeminde mevcut oranınına bağlı olarak geçirimlilik seviyesini azaltmaya neden olurken, kohezyonlu ince daneli zeminlerde ise çimento oranının artması geçirimliliği de arttırmaktadır Kohezyonlu killi zeminlerde çiemntonun stabilizasyonda kullanılması geçirimliliğin, dayanım, plastisite indisi ve buna bağlı olarak kilin işlenebilirliğinin artmasını sağlamaktadır. Zemin – çimento karışımları için gerekli olan çimento miktarlrı Tablo 2.11'de verilmiştir.

Tablo 2.11. Zemin çimento karışımları için gerekli çiemento miktarı (Ingles, 1987)

| Zemin Tipi | İnce kırma taş | GW,GP,GM GC,SW | SP,SC,SM | ML,CL | MH,CH | OL,OH | Pt |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Çimento Miktarı (%) | 0.5-0.2 | 2-4 | 4-6 | 6-8 | 8-12 | 12-15 | Uygun değil |

Doğru ve ekonomik bir zemin stabilizasyonu gerçekleştirmek için stabilizatör malzemenin uygun ve yeterli miktarda karışım oluşturulması önem arz etmektedir. Stabilizasyon uygulanacak sahada zemin içerisine katılacak çimento miktarı labaruvar deneyleri ile belirlenerek kireç stabilizasyonunda uygulanan adımlar ile aynı olarak stabilizasyon işlemi gerçekleştirilir. Uygun çimento oranı ile optimum su içeriği belirlendikten sonra zemin stabilize edilecek derinlik kadar gevşetilir. Öncesinde belirlenen çimento oranı miktarınca çimento serpilerek reaksiyonbaşlaması için su ilave edilir. Sonrasında iş makinalarıyla karıştırılmaya başlanan zemin sonrasında yerleştirilerek silindir yardımı ile sıkıştırılır.

Ağırlıkça %1'den fazla organik madde bulunduran zeminlerde gözle görülür dayanım kayıpları oluşmaktadır. Özellikle turba zeminlerde çimento stabilizasyonu uygun değildir. Zemin içerisinde sülfat varlığı da çimento–zemin iyileştirmesi işine ciddi zararlar vermektedir. Bu durumun nedeni (Sherwood, 1962) tarafından açıklanmıştır. Uygun önlem alınarak bu durumun üstesinden gelmek mümkündür. İyileştirilmiş zemin içerisinde bulunan, aşırı şişme özelliği olan ve eternijit olarak bilinen sülfoalüminat bileşikleri karışımın ayrışmasına neden olur. Bu mineral, zemin içerisinde veya çimentoda sülfat bulunması durumunda oluşur ve problem iyileştirilmiş zemin yerleştirilip sıkıştırıldıktan sonra ortaya çıkar. Sülfata dayanıklı çimento kullanımı, zemin çimento karışımı için güvenliği tam olarak sağlamayabilir. Eğer uygulama yapılacak zeminde sülfat varlığından şüpheleniyorsa dizayn aşamasında uygun önlem mutlaka alınmalıdır.

Kil ile çimento karışımının sonuçları, kireç stabilizasyonu sonuçları ile benzerlik göstermektedir. Bu uygulama ile likit limit, plastisite indisi, zeminin hacim değişikliği potansiyeli azalır ve rötre limiti ile kayma dayanımı artar (Chen, 1975).

### 2.5.2.3. Uçucu kül stabilizasyonu

Termik santrallerde öğütülmüş veya toz haldeki taş kömürünün yanmasıyla ortaya çıkan atık malzemeye uçucu kül denilmektedir. Kömürün 1100-1600 ºC arası sıcaklıkta yanması ile oluşan malzeme soğuyarak, gaz akışı ile birlikte küresel kül taneciklerine dönüşmektedir. Bu tanecikler 0,5-150 mikron boyutunda olup baca gazları ile sürüklendikleri nedeniyle uçucu kül olarak adlandırılmaktadır. Yan ürün olarak kullanılabilen bu atık malzemeler ekonomik ve çevresel etkilerden dolayı büyük problemler oluşturmaktadır. Türkiye'de yıllık uçucu kül üretimi 15 milyon ton civarındadır. Bu rakam 2003 yılında 11,84 milyon, 2004 yılında 13,34 milyon ve 2006 yılında ise 16,01 ton olmuştur. 2020 senesine kadar yıllık uçucu kül miktarının 50 milyon tonu aşması beklenmektedir. Avrupa ülkelerinin birçoğunda ve Amerika kıtasında üretilen uçucu kül miktarının %80 gibi büyük bir çoğunluğu çimento üretimi başta olmak üzere çeşitli mühendislik uygulamalarında kullanılmaktadır. Ülkemizde ise bu ürünün çok az bir miktarı değerlendirildiğinden çevre sorunları ve ekonomik problemler yaşanmaması için kullanımının yaygınlaştırılması oldukça önem arz etmektedir. İnşaat sektörü haricinde, kimya, seramik, çevre, metal sanayi,sondaj çalışmaları gibi alanlarda uçucu kül kullanımı görülmektedir (Şenol ve diğ., 2003).

Yumuşak zeminlerin stabilizasyonunda uçucu kil kullanımının olumlu sonuçlar vermesi, bu atık malzemenin Geoteknik alanında kullanımını da arttırmıştır. Uçucu kül malzemesinin yüzeysel zemin iyileştirmelerinde kullanılma prensibi çimento ve kireç ile aynı tarzdır. Laboratuvar çalışmaları ile belirlenen optimum su ve uçucu kül malzemesi homojen bir şekilde karıştırıldıktan sonra iş makineleri kullanılarak sıkıştırılmaktadır. Bazı iyileştirilme çalışmalarında ise uçucu kil, çimento ve kireç malzemelerinin üçünün karıştırılmasıyla elde edilen karışımlar kullanılmaktadır.

(Şenol ve Edil, 2004) yapmış oldukçarı çalışmalarında çok düşük taşıma gücüne sahip yumuşak ve kısmen organik malzeme muhteva eden zeminlerin yol inşaatında, C tipi uçucu kül kullanarak, zeminin taşıma gücününün artışını incelemişlerdir.

Uçucu kül (UK) zemin stabilizasyonunda önemli bir kimyasal etkiye sahiptir. Kimyasal raeksiyonlar genellikle tek yönlüdür. Reaksiyon sonucunda elde edilen ürünler fonksiyonları kaybetmeleri çok görülmez. Kil ve silt grubu stabilize edilecek zeminler arasında en sıkıntılı olanlarıdır. Bu tip zeminler su ile temas ettiklerinde

yumuşak bir duruma geçerler. Killi ve siltli zeminlerin uçucu kül ile stabilize edildiklerinde katyon değişimi ve sonrasında topaklanma işlemleri kalsiyum hidroksit sayesinde hızlı gerçekleşir. Reaksiyon kısa süre içerisinde başlar ve uçucu kül yapısındaki kireç oranına göre birkaç gün devam eder. Uçucu kül ile zemin stabilizasyonunun, likit limit, plastik limit, mukavemet değerleri, permabilite, kompaksiyon gibi mühendislik özellikler üzerinde olumlu etkisi olmuştur.

Dayanım kazanma özelliği uçucu külün puzolanik özelliğinden kaynaklanmakta ve yavaş yavaş ortaya çıkmaktadır. Bu sürenin uzamasıyla puzolanik özellik de artmaktadır. CaO miktarı yüksek olan uçucu küller ise çok daha iyi puzolanik özellik sergilemektedir.

#### 2.5.2.4. Bitüm ile stabilizasyon

Bitüm, petrolün üretimi esnasında meydana gelen, koyu renkte (siyah ile kahverengi arasında) yüksek viskoz ve hidrokarbon bir atıktır. Zemin stabilizasyonunda bitümün katkı maddesi olarak kullanılması duurmunda, bitüm zeminin içerisinde bulunan suyun meydana getirecek problemlerini azaltarak, zemin daneleri arasında bulunan bağ kuvvetlendirini güçlenmesini sağlamaktadır. Özellikle karayollarının yapımı sırasında yol temelinin oturacağı zeminin ıslahında kullanılmasının yanı sıra yien alt yapı işlerinde mecvut yer altı suyunun mevcut olduğu durumlarda yapıyı korumak için de bitüm kullanılmaktadır. İnce ve iri daneli zeminlerin ıslahında katkı malzemesi olarak kullanılabilen bitüm, iri daneli zeminlerde,boşluklu malzeminin birbirine yapışmasını sağlayarak çevresel etkenlere karşı zeminin dayanımını arttırmaktadır. Bitüm, İnce daneli zeminlerde ise zemin içerisindeki yeraltı suyu ile ince tanelerin çözünmesini veya yumuşamasına engel olmaktadır.

Zeminlerin boşluk oranları çok yüksek değerlerde olduğundan geçirimsizliği arttırmak için pratik ve tasarruflu olan kimyasal bir katkı kullanmak pek mümkün değildir. Ancak bitümlü zemin stabilizasyonunda geçirimsizlik önemli ölçüde arttırma mümkündür. Böylelikle kaplamalarda sağlam bir alt temel oluşturulmaktadır. Kireç ve çimento gibi maddelere oranla daha az tercih edilmesinin bir sebebi de pahalı malzeme olmasıdır. Fakat kumun bulunduğu zeminlerin kaplamaların temellerin ideal bir malzemedir. Hem kaplama kalınlığı azalacağından ekonomik olarak da tasarruf sağlamaktadır. Bitümlü stabilizasyonda başka maddeler içermeyen kumlu zeminlerde

daha iyi sonuç alınmaktadır. Ayrıca ufalanması kolay olan ve bitümde eşit şekilde karışan zeminlerde de bitümlü iyileştirme yöntemi başarılı olmaktadır. Bunlardan dolayı plastisite indisi 10'dan fazla olmaması, 200 no'lu elekten geçmesi en fazla %18 olması ve likit limit de 40' dan fazla olmaması gerektiği şartları getirilmiştir. Kullanılacak tahmini asfaltoranları ise ince daneli zemin içerenlerde %4-7 arasında, kumlu zeminlerde ise bu oran %2-4 arasında olmaktadır. Ayrıca en iyi sonucu da granüler zeminlerde %1 ile %3 bitüm katkısı ile elde edilmiştir (Tumluer, 2006).

Bitümün zemin içerisinde homojen olarak dağılması, karışım suyunun miktarına ve zeminin ıslaklığının homojen olup olmamasına bağlı olduğundan dolayı zeminin su muhtevası bitümle yapılan zemin iyileştirmelerinde önemli bir rol üstlenmektedir. Zeminin su muhtevası yeterli değilse veya homojen bir dağılım göstermiyorsa bitümle karıştırıldığında da yeterli stabiliteyi göstermeyecektir. Bundan dolayı gerekli su miktarı deneme yanılma metodu ile Marshall stabilitesi kriterine göre belirlenmelidir.

Bitümle stabilizasyonda; kırmataş, çakıl, kum gibi iri daneli zeminler sıcak bitüm ile karıştırılmakta ve serildikten sonra kompaksiyon uygulanmaktadır. Kullanılan bitüm içeriği arttıkça geçirimsizlik artsa da çok fazla bitüm kullanılması da sıkıştırma problemleri oluşturmakta ve stabilizasyon başarısız olmaktadır. Bitümlü karışımlarda kullanılacak malzemelerin kil ve organik maddelerden arınmış olmalıdır.

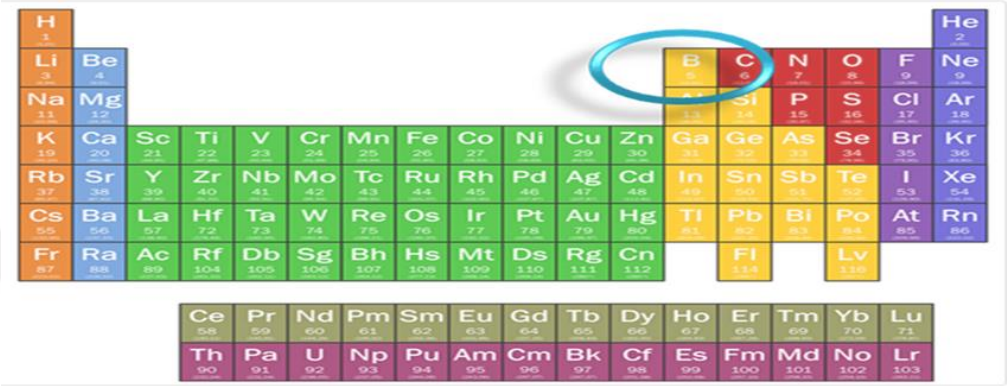
## 2.6. Bor Elementi

### 2.6.1. Bor elementi ve oluşumu

Kökeni Arapça da Buraq/Baurach ve Farsça da Burah kelimelerinden gelen ve Simgesi (B) olan Bor'un atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81, yoğunluğu 2,84 gr/cm$^3$, ergime noktası 2300 °C ve kaynama noktası 4002 °C olup, periyodik sistemin üçüncü grubunun başında yer almaktadır. Doğada bulunan bor, kütle numaraları 10 (%19,8) ve 11 (%80,2) olan iki kararlı izotopun karışımından oluşmaktadır (Eyüboğlu, 2013).

Bor, bileşiklerinde metal dışı bileşikler gibi davranmakta, ancak farklı olarak saf bor, karbon gibi davranarak elektrik iletmektedir. Kristalize bor, görünüm ve optik bakımdan elmasa benzemektedir ve hemen hemen onun kadar serttir. Bor elementinin periyodik tablodaki yeri Şekil 2.17'de gösterilmiştir.

Bor, biri amorf ve altısı kristalin polimorf olmak üzere, çeşitli allotropik formlarda bulunmaktadır. Alfa ve beta rombohedral formlar en çok çalışılmış olan kristalin polimorflarıdır. Alfa rombohedral strüktür ve 1200ºC'nin üzerinde bozulur ve 1500ºC'de beta rombohedral oluşur. Amorf form yaklaşık 1000ºC'nin üzerinde beta rombohedrale dönüşür ve her türlü saf bor ergime noktasının üzerinde ısıtılıp tekrar kristalleştirildiğinde beta rombohedral forma dönüşür (Erdoğmuş, 2006).



Şekil 2.17. Bor mineralinin periyodik cetveldeki yeri

Borun atomik yapısına ait özellikler Tablo 2.12'de özetlenmiştir.

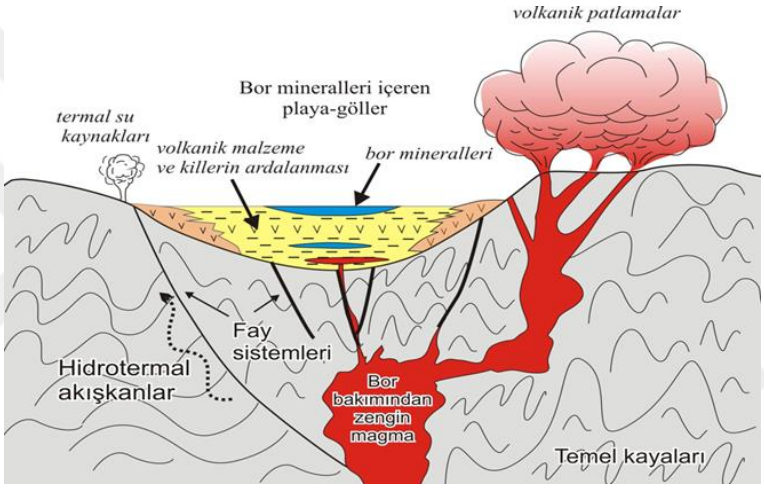
Tablo 2.12. Borun atomik yapısı

| | |
|---|---|
| Atomik Çapı | 1.17A |
| Atomik Hacmi | 4.6 $cm^3$/mol |
| Kristal yapısı | Rhombohedral |
| Elektron Konfigürasyon | $1s^2 2s^2 p^1$ |
| İyonik Çapı | 0.23A |
| Elektron Çapı | 5 |
| Nötron Sayısı | 6 |
| Proton Sayısı | 5 |
| Valans Elektronları | $2s^2 p^1$ |

Yeryüzünde toprak, kayalar içerisinde ve suda oldukça fazla bulunan bor elementi, toprak içerisinde 10-20 ppm, deniz suyunda 0,5-9,6 ppm ve tatlı sularda ise 0,01-1,5 ppm aralığında bulunmaktadır. Türkiye ve Abd'nin kurak, volkanik ve hidrotermal aktivitesinin yüksel olduğu bölgelerde çok miktarda bulunmaktadır (Woods, 1994).

Volkanik gazlar içinde bor, ortoborik asit H3BO3 ve bor trifluorin BF3 şeklinde bulunmaktadır. Bu gazlar düşük sıcaklıkta dahi uçucu özellik göstermesi sebebiyle volkanik arazi ve sıcak su kaynaklarında kısmen fazlaca bulunabilir (Doğan, 1981).

Bor, ülkemiz ve Abd'de bulunan sıcak su kaynaklarında 100 ppm ölçüsünde değer vermektedir. Bu durum bor elementinin magma kaynaklı olduğu görüşünü göstermektedir fakat çökel kayaçlarda magmatik kayaçlardan daha çok bor bulunması, borun magma kökenli olabileceği gibi magmatikler ile dokunağı olan çökellerden de türeyebiliceği vurgulanmıştır (Jeoloji Mühendisleri Odası, 2001). Bor mineralinin oluşumunu gösteren çizim Şekil 2.18'de verilmiştir.




Şekil 2.18. Bor mineralinin oluşumu

### 2.6.2. Bor elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Periyodik cetvelin 3A grubunun ilk ve en hafif üyesidir. Temel hal elektron konfigürasyonu $1s^2 2s^2 p1$,dir. Bor doğada serbest halde bulanamıyorken bor minerallerinden elde edilen elementel bor parlak siyah renkli ve sert bir kristal şeklinde olabileceği gibi, yeşilimsi sarı renkte, tatsız ve kokusuz amorf halde bir tuz şeklinde de olabilir. Bor elementinin fiziksel özellikleri Tablo 2.13'de özetlenmiştir.

Borun bütün bileşikleri kovalent yapıya sahiptir. Kristal bor, birçok kimyasal reaksiyonla ilgisiz olsa da, amorf yapıdaki bor aktiftir. Havada 100 ºC'de oksijenle 700ºC'de, hidrojenle 800ºC'de reaksiyona girmektedir okside olmakta ve sıcaklığı arttığında yeşil alev vererek yanmaktadır. Elementel olarak bor çok çeşitli bileşik yapma kapasitesine ve nötronları absorbe etme özelliğine sahiptir.

Tablo 2.13. Bor madeninin fiziksel özellikleri

| Borun Fiziksel Özellikleri | |
|---|---|
| Atomik Kütlesi | 10.811 |
| Kaynama Noktası | 4.275K - 4.002°C – 7.236 °F |
| Termal Genleşme Katsayısı | 0.0000083 cm/cm/°C(0°C) |
| Kondüktivite | Elektriksel:1.0E-12 106/cm Termal:0.274 W/cmK |
| Yoğunluk | 2.34 g/cc @ 300K |
| Görünüş | Sarı- Kahverengi ametal kristal |
| Elastik Modülü | Bulk: 320/Gpa |
| Atomizasyon Entalpisi | 573.2 kJ/ mole @ 25°C |
| Füzyon Entalpisi | 22.18 kJ/mole |
| Buharlaşma Entalpisi | 480 Kj/mole |
| Sertlik | Mohs: 9.3 Vickers:49000 MN $m^{-2}$ |
| Buharlaşma Isısı | 489.7 kJ/mol |
| Ergime Noktası | 2.573 K – 2.300 °C – 4.172 °F |
| Molar Hacmi | 4.68 $cm^3$/mole |
| Fiziksel Durumu | (20°C & 1 atm): Katı |
| Spesifik Isısı | 1.02 J/ gK |
| Buhar Basıncı | 0.348 Pa@2.300°C |

8B, 10B, 11B, 12B ve 13B izotoplarından oluşan Bor elementinin en kararlı izotopları 10B ve 11B'dir. Söz konusu izotopların doğada bulunma oranları sırası ile %19,1, %20,3, %79,7-%80,9'dur. 10B izotopunun termal nötron tutma özelliği çok yüksek olduğundan dolayı nükleer malzeme ve nükleer enerji santrallerinde kullanılmaktadır.

Tablo 2.14. Bor madeninin kimyasal özellikleri

| Borun Kimyasal Özellikleri | |
|---|---|
| Elektrokimyasal Değer | 0.1344 g/amp-hr |
| Elektronegatif (pauling) | 2.04 |
| Füzyon Isısı | 50.2 kJ/mol |
| İyonizasyon Potansiyeli | Birinci: 8.298 - İkinci:25154 Üçüncü:37.93 |
| Valans Elektron Potansiyeli(-eV) | 190 |

Morfoloji ve tane büyüklüğü bor elementinin kimyasal özelliğini belirleyen etmenlerdir. Amorf bor kolay bir şekilde hatta şiddetli bir şekilde tepkimeye girerken kristal yapıya sahip olan bor kolay reaksiyon vermemektedir. Bor elenti yüksek sıcaklıkta su ile tepkimeye girerek borik asit üretmektedir (DPT, 2001).

### 2.6.3. Bor madeninin tarihçesi

Bor madeni ve türevleri eski çağlarda keşfedilmiş olup günümüze kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Bor madenin tarihi günümüzden 4000 bin yıl öncesine kadar dayanmaktadır. Tarihte ilk boraks kaynağı Tibet göllerinden elde edilmiştir. Daha sonra Babiller tarafından ithal edilen boraks, değerli eşyaların ergitilmesinde ve altını işlemekte kullanıldığı bilinmektedir. Ayrıca Tunç Çağı'nda Anadolu'da varlıklarını sürdüren Hititler'inde bor madeni ile altın ve gümüş işlemeciliği yaptığı bilinmektedir. Bununla beraber Antik Çağ daki en büyük medeniyetlerden olan Mısırlıların bor türevlerini, mumyalama işlemlerinde, tıpta ve metalurji uygulamalarında kullandıkları bilgisi de geçmişten günümüze kadar gelmiştir. Tarihin ilk çağlarında birçok medeniyet tarafından farklı alanlarda kullanımı yayılan bor madeni ve türevleri, Eski Yunan ve Romalılar tarafından temizlik malzemesi olarak arenalara serpilerek kullanımı tercih edilmiştir. M.S. 300 yıllarında Çin.'de bor madeninin porselenlerin sırlanmasında, cam üretiminde kullanıldığı ve M.S. 875 yılında ise ilk olarak Arap bilim adamları tarafından borun kimyevi yapısı çözülüp bor türevlerini, ilaç üretiminde kullanılmıştır. Ayrıca Arap ve Perslere ait 2000 bin yıl öncesinden günümüze kadar gelen yazıtlarda borakstan bahsedilerek, Arapların ve Perslerin ziynet eşyalarının birbirlerine yapıştırılmasında da bor madenini kullanıldığı belirtilmektedir.Yine sanskritçe yazıtlarında da tinkal,'tincanae' karşıladığı bilinmektedir.

Borun modern endüstride kullanılmaya başlanılması, 13.yy'da Marco Polo tarafından Tibet' ten Avrupa'ya getirilmesiyle başlamıştır. Daha sonra 1556 yılında Agricola'nın boraksla ilgili tuttuğu kayıtlara ulaşılmıştır. O dönemde Asya'dan sürekli olarak Avrupa'ya bor madeni ithal edilmiştir. Kullanım alanı giderek artan borun, tıp alanında ve değerli metallerin kaynak ve lehim olarak eritilmesinde kullanılması, yeni bor kaynağına ihtiyacın oluşmasına sebep olmuştur. İtalya'da bulunan Tuscani bölgesinin su kaynaklarında 1771 yılında sassolit görülmüştür.

Elementel bor 1808 yılında Fransız kimyacı Gay-Lussac ile Baron Louis Thenard ve Bağımsız olarak İngiliz kimyacı SirHumpry Davy tarafından bulunmuştur. Davy, yeni tanımladıkalrı bu elementi Boracium olarak isimlendirmiştir. Bor trioksitin potasyum ile indirgenmesi ve borik asidin elektrolizi ile elde edilen borun saflık derecesi %50 olduğu bilinmekteydi. Sonrasında İlk olarak 1830 yıllarında İtalya'da borakstan, borik asit üretilmiştir. Şili'de ilk boraks madenciliğine 1852 senesinde başlanılmıştır. Sonraki dönemlerde Amerika'da Nevada, California ve Kramer yöresindeki yataklar bulunmuş ve Abd bor üretiminde birinci sıraya yükselmiştir.

### 2.6.4. Türkiye'de bor madeninin tarihi

Ülkemizde bor madeninnin Doğu Roma İmparatorluğu döneminden itibaren bilindiği ve kullanıldığı tahmin edilmektedir. Ülkemizde ilk kez Balıkesir'in Susurluk ilçesinde bulunan Sultançayırı mahalinde bor madeni bulunmuştur. Uzun yıllar boyunca yabancı şirketler tarafından işletilmiştir.

1850'li yıllarda İstanbul Bebek'de mermercilik yapan Polonyalı bir mülteci olan Henri Groppler, ortağı Fransız mühendis Camille Desmazures'e alçıtaşından heykeller hediye etmiştir. Fransız mühendis bu taşların yüksek oranda boraks içerdiğini anlayan Fransız mühendis ve ortağı Balıkesir'in Sultançayırı mevkisinde madencilik yapmak için 1856 senesinde Sultan'dan işletme izni alarak Pandermit türü bor minerali çıkarmaya başlarlar (Yünlü, 2016).

1861 senesinde yürürlüğe giren Maaddin Nizamnamesi kararı ile Fransız bir şirkete 20 senelik işletme hakkı verilmesiyle ülkemizde bor madeni sürekli olarak işletilmeye başlanmıştır. İznik çinilerinin özel renginde bor minerallerinin bulunuyor olması ülkemizde bor kullanımının çok eski çağlara dayandığını göstermektedir. 1865 yılında Balıkesir-Susurluk-Azaziye bölgesinde Fransız "Compagnie Industrielledes Mazures" firması ve daha sonra Sultançayır bölgesinde İngiliz "The Borax Company" tarafından bor minerallerinin üretimi yapılmış, 1961 yılına kadar çalışmaları devam etmiştir. 1950'lerde özel maden şirketlerinin çalışmaları, MTA ve Etibank'ın kurulmasını takiben 1956'da da nu iki kurum arasındaki iş birliği ile işletmeye alınan kolemanit yataklarındaki üretim faaliyetleri sonucunda, Türkiye'nin bor ihracatındaki önemi artmıştır. Sputnik uzay aracının bor yakıtı kullandığı varsayımından yola çıkarak Nato, bor elementini stratejik mineraller sınıfına dahil etmesine rağmen 1963 senesinde bor

ihracatını serbest bırakmıştır. Böylelikle stratejik önem kaybolmuştur. 1950 Bigadiç, 1952 Mustafa Kemal Paşa bölgesinde, 1956 senesinde ise MTA tarafından Emet-Kütahya bölgesinde kolemanit yataklarına rastlanılmıştır. 1958 senesinde bulunan bu yatakların işletme hakkı Etibank'a verilmiştir. 1966 senesinde Bandırma ve Kırka'da da bor çeşitleri üretilmeye başlanmış, 1977 senesinde ise tüm stratejik bor minerallerinin işletme hakkı Etibank'a verilmiştir. Günümüzde ise Eti Holding, bor ve türevleri, ham cevher, konsantre ürünler üretmektedir.

Devletleştirme politikalarıyla birlikte 30 yıllık süre içerisinde rafine bor ürünleri üretiminde ve madencilik konularında çok büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. 1978 senesinde 600 milyon ton olan bor rezervimiz, günümüzde 3 milyar tona ulaşmıştır. Eti Maden/MTA günümüzde de rezerv çalışmalarına devam etmektedir.

### 2.6.5. Dünya'da bor madenin gelişimi

Küresel çapta ham madde ihtiyacının giderek artmasına bağlı olarak bor mineralinin önemi her geçen gün katlanarak artmaktadır. Dünya genelinde önemli bor madenleri Rusya, Abd ve ülkemizde bulunmaktadır.

Dünyada bor minerali üretiminin çoğunlukla açık ocak metodu ile yapıldığı bilinmekte, Amerika, Arjantin, Şili, Çin ve Rusya'da bu üretim tarzına ait örnekler bulunmaktadır. Açık ocak metoduna kıyasla çok daha pahalı bir yöntem olan yeraltı madenciliğiTürkiye (Bigadiç), Amerika (Billie madeni, Death Valley) ve Çin (Lioning)'de yapılmaktadır. Diğer bir yöntem olan çözelti madenciliği ile Amerika Searles Lake, Kaliforniya ve Çin-Qüinghai Basin'de ticari bor üretimi yapılmaktadır (Şahin, 2008).

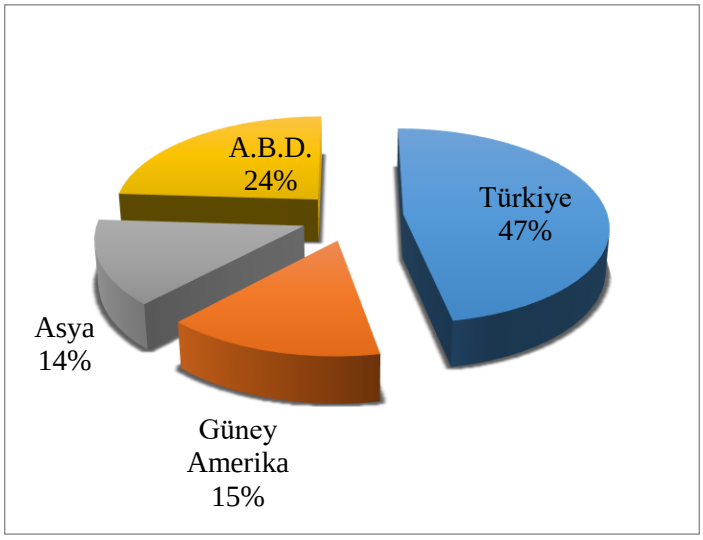
Dünyada 2017 senesinde 5,7 milyon ton $B_2O_3$ civarında üretim kapasitesi olduğu, tüketimin ise 2000 senesşnde 3,1 milyon ton, 2014 senesinde 4,3 milyon ton, 2015 senesinde 3,8 milyon ton, 2016 senesinde 3,77 milyon ton ve 2017 senesinde 3,87 milyon ton olarak gerçekleştiği bilinmektedir. Tüketimde %47 ile cam sektörü başı çekerken, %16 ile tarım sektörü ikinci sırada, %15 ile seramik sektörü ise üçüncü sıradadır. Kalan %20'lik pay diğer sektörler arasında dağılmaktadır. Günümüzde bilinen bor rezervi 1,2 milyar tondur ve bu miktarın %72,8'i ülkemizde bulunmaktadır.

Dünyadaki en önemli üreticiler Eti Maden İşletmeleri ve Amerika menşeli Rio Tinto firmasıdır. Dünya bor rezervleri Tablo 2.15'de gösterilmiştir

Tablo 2.15. Dünya bor rezervlerinin dağılımı (Etimaden)

| Ülke | Toplam rezerv (Bin ton $B_2O_3$) | Toplam rezerv (%$B_2O_3$ ) |
|---|---|---|
| Türkiye | 948 712 | 73.4 |
| Rusya | 100 000 | 7.7 |
| A.B.D. | 80 000 | 6.2 |
| Şili | 41 000 | 3.2 |
| Çin | 36 000 | 2.8 |
| Peru | 22 000 | 1.7 |
| Sırbistan | 21 000 | 1.6 |
| Bolivya | 19 000 | 1.5 |
| Kazakistan | 15 000 | 1.2 |
| Arjantin | 9 000 | 0.7 |
| TOPLAM | 1 310 300 | 100 |

2012 senesinde fiili bor üretimi 4 milyon ton civarında gerçekleşmiş olup, bölgesel dağılım incelendiğinde Türkiye ön plana çıkmaktadır. Üretimin bölgelere göre dağılımını gösteren grafik Şekil 2.19.'da verilmiştir.




Şekil 2.19. Dünya bor üretiminin bölgelere göre dağılımı (B2O3 bazda,%(Etimaden)

### 2.6.6. Türkiye'de bor madeninin gelişimi

Emet ve Bigadiç kolemanit yatakları ve Kırka'da bulunan Tinkal yatakları ülkemizde bulunan ve dünyada zengin borat kaynaklar arasında gösterilen bölgelerdir. Bu oluşumlar tinkal, kolemanit ve üleksit minerallerinden oluşmuştur. Bor minerallerinden bazıları doğrudan, bazıları ise tesislerde işlenerek sanayide kullanılmaktadır (Topçu ve diğ., 2005).

Ülkemizde rezerv olarak en fazla bulunan bor mineralleri tinkal ($Na_2O.2B_2O_3.10H_2O$) ve kolemanit ($2CaO.3B_2O_3.5H_2O$)'tir. Türkiye'de Kırka'da Tinkal yatakları, Emet, Kestelek ve Bigadiç'de ise kolemanit yatakları bulunmaktadır. Ülkemizdeki minerallerin rezerv miktarları Tablo 2.16'da verilmektedir (Eti Maden).

Tablo 2.16. Eti maden rezerv miktarları (Eti Maden, 2014)

| Cevher | Miktar (ton) |
|---|---|
| Emet (Kolemanit) | 1 818 264 009 |
| Kırka (Tinkal) | 838 152 732 |
| Bigadiç (Kolemanit-Üleksit) | 636 287 478 |
| Kestelek (Kolemanit) | 5 420 009 |
| TOPLAM | 3 298 124 228 |

### 2.6.7. Bor madeni ve mineral çeşitleri

Bor elementi B10 ve B11 olarak isimlendirilen iki farklı izotoptan meydana gelmektedir. Ülkemizde B10 izotop oranı yüksek olan bor cevherleri bulunmakta olup, bu izotop çok yüksek termal nötron tutma özelliği göstermekte ve bu özelliğiyle nükleer malzemeler ve nükleer Enerji santrallerinde kullanılmaktadır. Bor elementş metaller ile ametaller arasında yarı iletken bir özellik göstermektedir. Bor mineralleri içerisinde bor oksit bulunduran doğal bileşikler olmalarıyla birlikte değerleri de bor oksit içeriği ile ölçülmektedir. Yüksek oranda bor oksit içerenler daha değerli kabul edilmektedir.

Tinkal, kolemanit, kernit, pandermit, üleksit, borasit, szaybelit ve hidroborasit ticari öneme sahip başlıca bor minerallerindendir. Aşağıda Tablo 2.17'de bu minerallerin kimyasal formülleri ve $B_2O_3$ içerikleri verilmektedir.

Bor tabiatta hiçbir zaman serbest halde bulunmamaktadır. Kimyasal formülü $B_2O_3$ olan bor oksit'in Na, Ca, Mg gibi metal elementlerle yaptığı bileşiklere borat adı verilir.

Tablo 2.17. Ticari öneme sahip Boratlar (Boren)

| Mineral | Bileşim | % ($B_2O_3$) | Bulunduğu yer |
|---|---|---|---|
| Tinkal (Boraks) | $Na_2B_4O_7.10H_2O$ | 36.6 | Kırka, Emet, Bigadiç, A.B.D |
| Kernit( Razorit) | $Na_2B_4O_7.4H_2O$ | 51.0 | Kırka, A.B.D, Arjantin |
| Üleksit | $NaCaB_5O_9.8H_2O$ | 43.0 | Bigadiç, Kırka, Emet, Arjantin |
| Propertit | $NaCaB_5O_9.5H_2O$ | 49.6 | Kestelek, Emet, Arjantin |
| Kolemanit | $Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$ | 50.8 | Emet, Bigadiç, A.B.D. |
| Pandermit (Priset) | $Ca_4B_{10}O_{19}.7H_2O$ | 49.8 | Sultançayır, Bigadiç |
| Borasit | $Mg_3B_7O_{13}Cl$ | 62.2 | Almanya |
| Szaybelit | $MgBO_2(OH)$ | 41.4 | Bağımsız Devletler Topluluğu |
| Hidroborasit | $CaMgBO_{11}.6H_2O$ | 50.5 | Emet |

Tinkal (Boraks): Su, oksijen, sodyum ve bor minerallerinin etkileşimi ile meydana maddeye boraks denmektedir. Genellikle renksiz ve saydam olarak doğada kristal şeklinde bulunur. İçerisinde bulunan minerallere bağlı olarak rengi pembe, sarımsı, gri renklerde de bulunabilir. Sertliği 2- 2,5 mohs'tur, özgül ağırlığı 1,7 gr/cm3 'tür. Tinkal suyunu kaybederek kolaylıkla tinkalkonite dönüşebilir (DPT, 2001).

Kernit (Razorit): Saydam beyaz, renksiz uzunlamasına bireysel iğne şeklinde küme kristaller halinde bulunur. Sertliği 3, özgül ağırlığı 1,95 gr/cm3 ve B2O3 içeriği %51'dir. Soğuk suda az çözünür. Kırka'da Na-borat kütlesinin alt kısımlarındadır. Dünyada ise Arjantin ve ABD'de bulunmaktadır (DPT, 2001).

Üleksit: Kimyasal formülü $Na_2O.2CaO.5B_2O_3.16H_2O$ olan üleksit, sodyum, su ve hidroksit oktahedranın zincirlerini içeren temel bir yapıya sahip yapısal olarak

kompleks bir mineraldir. Masif, karnabahar, lifsel, koni, rozet, pamuk yumağı ve çubuk görünümüyle doğada yer almaktadır. Saf olanı gri veya beyaz renk tonlarında bulunabilir. Saf olanı, beyaz rengin tonlarındadır. İpek parlaklığında olanları da vardır. Mohs sertlik, sınıflandırmasına göre sertliği 2,5 özgül ağırlığı 1,95-2 gr/cm3'tür.Genelde kolemanit, hidroboraksit ve propetit ile birlikte bulunur. $B_2O_3$ içeriği %43'tür. Ülkemizde Kırka, Bigadiç ve Emet yörelerinde, dünyada ise Arjantin'de bulunmaktadır (DPT, 2001).

Hidroborasit: Magnezyum boratlar grubunda yer alan mineral yapısına bakıldığında, merkezden ışınsal ve iğne şeklindeki kristallerin rastgele yönlenmiş ve birbirini kesen kümeler halinde bulunur. Lifsi bir dokuya sahiptir. B2O3 içeriği %50,5'tir. Beyaz renkte, bazen içerisindeki safsızlıklara bağlı olarak sarı ve kırmızımsı renklerde (arsenik içeriğine göre)kolemanit, üleksit, propertit, tunalit ile birlikte bulunur. hidroboasit, en çok Emet, Doğanlar, İğdeköy yörelerinde ve Kestelek'te oluşmuştur (DPT, 2001).

Propertit: Sodyum – Kalsiyum Boratlar grubunda yer alan propertit doğada kirli beyaz, açık sarımsı renklerde olup ışınsal ve lifsi şekilli kristaller şeklinde bulunur. Kristal boyutları 5 mm ile 5 cm arasında değişir. B2O3 içeriği %49,6'dır. Ülkemizde Kestelek yataklarında üleksit ikincil mineral olarak gözlenir. Ancak Emet'te tekdüze tabakalı birincil olarak ve Doğanlar, İğdeköy bölgesinde kalın tabakalı olarak oluşmuştur (DPT, 2001).

Pandermit'in kimyasal formülü $4CaO.5B_2O_3.7H_2O$'dur. Batı Anadolu'da Susurluk ilçesi yakınlarında Sultan çayırı mevkiinde bulunmaktadırBeyaz renkte ve yekpare olarak bulunup kireçtaşına benzemektedir. $B_2O_3$ içeriği %49,8'dir.

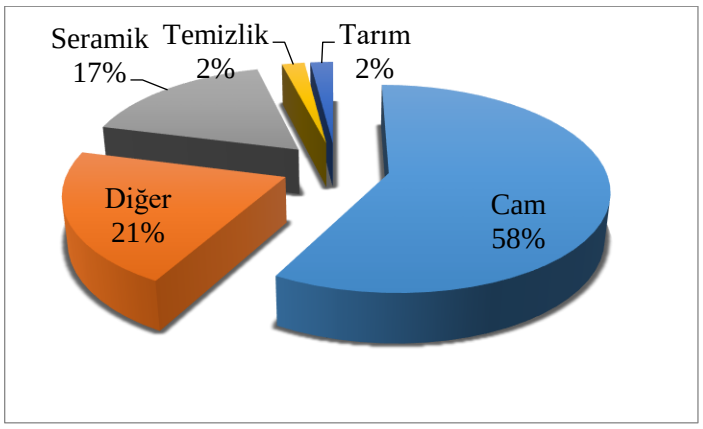
Kolemanit: Monoklinik sistemde kristallenir. Sertliği 4-4,5, özgül ağrılığı 2,42 gr/$cm^3$ ve $B_2O_3$ içeriği %50,8'dir. Suda yavaş, HCI asitte hızlı çözünür. Bor bileşikleri içinde em yaygın olanıdır. Türkiye'de Emet, Bigadiç ve Kestelek yataklarında, dünyada ABD'de bulunmaktadır (DPT, 2001).

### 2.6.8. Bor madeninin kullanım alanları

Bor elementinin, çeşitli elementler ile farklı özellikler gösteren bileşikler oluşturduğundan dolayı endüstride birden çok bor bileşiği kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bundan dolayı sanayide üretimin vazgeçilmez hammaddelerinden birisidir.

Sodyum bazlı tinkal, kalsiyum bazlı kolemanit ve sodyum+kalsiyum bazlı üleksit ülkemizde en çok bulunan bor mineralleridir. Bu mineraller, fiziksel işlemler ile zenginleştirildikten sonra rafine edilerek çeşitli bor ürünlerine dönüştürülmektedir.

Rafine bor ürünlerinde, yüksek teknoloji gerektiren metotlar kullanılması ile ticari olarak üretilen ve değişik alanlarda kullanılan yaklaşık 175 civarında bulunan, bor sektöründe nihai ürün sınıfında yer alan "Borun Özel Bileşikleri" mevcuttur. Bu özel bor bileşikleri farklı alanlarda, belirli amaçlara hizmet vermektedir. İleri teknoloji malzemesi olarak bor, bor alaşımları, bor tuzları ve bor kompleksleri kullanılır, ayrıca bu maddelerden yararlanılarak, başka maddelere katılması halinde onlara da ileri teknoloji malzemesi özelliği kazandırırlar. Bu ürünlerden günümüzde en çok bilinen ve kullanılanlar; Susuz Borik Asit(Bor Oksit), Sodyum Bor Hidrür ($NaBH_4$), Potasyum Bor Hidrür ($KBH_4$), Metal Borürler, Disodyum Oktaborat Tetrahidrat, Boranlar, Bor Triklorür, Metalik (Elementel) Bor, Ferrobor, Bor Karbür, Bor Nitrür, Çinko Borat ve Bor Fiberleri olarak adlandırabiliriz (Güyagüler, 2001). Bor mineralinin ticari kullanım alanları Şekil 2.20'de verilmiştir.




Şekil 2.20. Bor mineralinin ticari kullanım alanları (Etimaden)

Tablo 2.18'de bor madeninin kullanım alanları özetlenmiştir.

Tablo 2.18. Bor madeninin kullanım alanları (DPT)

| **Ürünler** | **Kullanım alanları** |
|---|---|
| Amorf ve Kristal Bor | Askeri Piroteknik, Nükleer Silahlar ve Nükleer Güç Reaktörlerinde Muhafaza, Metallerde Alaşım Elemanı ve Deoksidan, Bakır ve Alaşımlarda Gaz Giderici, Alüminyum Dökümlerinde Tane Rafinasyonu, Yarı İletkenlerde vb. |
| Bor Esterleri | PolimerizasyonReaskiyonları için Katalit, Polimer Stabilizörleri, Yangın Geciktiriciler |
| Bor Flamentleri | Havacılık ve Spor Malzemeleri için Kompozitler |
| Bor Halidleri | İlaç Sanayi, Katalistler, Elektronik Parçalar, Bor Flamentleri ve Fiber Optikler |
| Bor Karbid | Kesme Ekipman Bileyicileri, Endüstriyel Yataklar, Çok Yüksek Korozyon ve Oksitlenme direnci Gerektiren Ekipmanlar |
| Bor Karbür | Askeri Araçlarda Zırh Plakaları, Uzay Mekiklerinde Dış Yüzey Koruyucu, Tesviye Aksamları, Yüzey Parlatıcılar, Yüksek Aşınma Direnci ve Esnemezlik Gerektiren Diğer Alanlar |
| Borazon | Yüksek Hızlı Kesiciler |
| Borik Asit | Antiseptikler, Göz Damlaları, Bor Alaşımları, Nükler, Yangın Geciktirici, Naylon, Fotoğrafçılık, Tekstil, Dericilik, Gübre, Nikel Kaplama, Kimyasal Katalist, Cam, Cam Elyafı, Emaye, Sır vb. |
| Fluoborik Asit | Kaplama Solüsyonları, Fluoborat Tuzlar, Sodyum Bor Hidrürler |
| Kalsiyum Bor Cevheri (Kolemanit) | Tekstil Kalite Cam Elyafı, Bor Alaşımları, Cüruf Yapıcı, Nükleer Atık Muhafazası |
| Özel Sodyum Boratlar | Fotoğrafçılık Kimyasalları, Yapıştırıcılar, Tekstil, "Finishing" Bileşikleri, Deterjan ve Temizlik Malzemeleri, Yangın Geciktiriciler, Gübreler ve Zirai Araçlar |
| Sodyum Bor Cevheri (Üleksit ve Probertit) | Yalıtım Cam Elyafı, Borosilikat Cam |
| Sodyum Bor Hidrürler | Özel Kimyasalları Saflaştırma, Kâğıt Hamurunu Beyazlaştırma, Metal Yüzeylerin Temizlenmesi |
| Sodyum Metaborat | Yapıştırıcı, Deterjan, Zirai İlaçlama, Fotoğrafçılık, Tekstil |
| Sodyum Pentaborat | Yangın Geciktirici, Gübre |
| Sodyum Perborat | Deterjan ve Beyazlatıcı, Tekstil |
| Sodyum Tetraborat (Boraks-Tinkal) | Lehim ve Kaynak İşlemlerinde, Metal Yüzeylerin Temizlenmesi, Seramikler, Sırlama, Yüksek Mukavemetli Camlar |
| Susuz Boraks | Gübre, Cam, Cam Elyafı, Metalurjik Cüruf Yapıcı, Emaye, Sır, Yangın Geciktirici |
| Trimetil Borat | Kaplama Solüsyonları, Fluoborat Tuzlar, Sodyum Bor Hidrürler |

İnşaat Alanında Kullanım Bor ürünleri inşaat sektöründe de yaygın olarak kullanılmaktadır.

- Malzemenin yıpranmasını ve çürümesini önleme,
- Suya ve kimyasallara karşı direnç,
- Alev geciktirici,
- Isı ve ses izolasyonu,
- Dayanıklılık özelliği sağlamaktadır

Çimento üretiminde klinker üretimi sırasında $B_2O_3$ katkısı pişirilme sıcaklığını düşürdüğü ve bundan dolayı enerji tasarrufu sağladığı, ayrıca $B_2O_3$ prizlenme süresini de uzattığı için bor inşaat sektöründe çimento katkısı olarak kullanılmaktadır. Bor özellikle ahşap binalarda ısı ve ses izolasyonu amacı ile kullanılmaktadır.

Kolemanit en yaygın bor minerali olarak bilinmekte olup, %8 oranında çimento üretiminde kullanılmaktadır. Böylelikle klinker pişirme sıcaklığı düşmekte, çimentonun özellikleri iyileşmektedir. Borlu çimento; mukavemet, su ve gaz geçirgenliği, hidratasyon ısısı gibi parametreler açısından portland çimentosuna göre daha iyi özellikler sergilemektedir. Kütle betonlarında hidratasyon ısısının düşük olması soğutma ihtiyacını önemli ölçüde azaltmaktadır.

Hidratasyon ısısının düşük olması özellikle kütle betonlarında soğutma ihtiyacını önemli oranda azaltmaktadır.

Kolemanit kullanımı çimento üretimi esnasında açığa çıkan karbondioksit miktarını da %25-30 oranında azaltmaktadır. Borlu çimento üretimi ile ayrıca inşaat sektöründe önemlir bir değere sahip olması beklenmektedir.

# 3. MATERYAL, YÖNTEM VE HESAPLAMALAR

## 3.1. Deneysel Çalışmalar

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalar ile killi zeminlerin, katkı maddesi ile iyileştirilmesi araştırılmıştır. Tez çalışmasının ilk bölümlerinde genel zemin özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir, daha sonra stabilizasyonun amacı ve katkılı stabilizasyon yönteminden bahsedilmiştir. Kullanılacak zemin türü ve katkı maddesi ile ilgili genel bilgiler eklenmiştir. Tezin bu bölümünde ise kullanılan malzeme ve materyaller ile laboratuvarda uygulanan deneyler doğrultusunda zeminin mühendislik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan çalışmalar yer almaktadır.

Laboratuvarda gerçekleştirlen deneysel çalışmalarda bentonit ve kaolin kili olmak üzere iki farklı malzeme üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Laboratuvarda kullanılan ana malzeme olarak, Eczacıbaşı Esan Endüstriyel Maddeler San. Tic. A.Ş. Fabrikalarında öğütülüp paketlenerek hazırlanan "Bentonit ve Kaolin Kili" kullanılmıştır.

Bentonit ve Kaolin killerinin stabilizasyonunda kullanılmak üzere katkı maddesi olarak, Eti Maden Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü'nden temin edilen kolemanit ile laboratuvarda zemin deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Zeminlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan deneyler, referans alınan standart ile bu bölümde yer almaktadır. Kullanılan malzeme ve metotlar ile hazırlanan karışımların katkı maddesi oranları belirlenerek, katkı maddesi oranlarına göre deneysel numunulerin hazırlanması ve adlandırılması bu bölüm içerisinde verilmiştir.

### 3.1.1. Deney numunelerinin hazırlanması ve isimlendirilmesi

Deneysel çalışmalarda bentonit ve kaolin killerinin mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla katkı maddesi olarak kullanılan kolemanitin iyileştirmeye

etkisini gözlemlemek için uygulacak katkı oranları araştırılmıştır. Sonrasında belirlenen zemin – katkı karışım yüzdeleri ile zemin mekaniği deneyleri ile katkı maddesinin iyileştirmeye etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda yapılan deneysel çalışmalar 2 kısıma ayrılmıştır. İlk aşamada yüksek plastisite özelliğine sahip bentonit kili ile kolemanit karışımları deneylere tabii tutulmuştur. İkinci aşamada ise düşük plastisite özelliği gösteren kaolin kili ile kolemanit minerali belirlenen oranlarda karıştırılmış ve laboratuvarda deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Farklı iki malzeme ile katkı kullanılarak hazırlanan numunelere deneysel çalışmalara kolaylık sağlaması açısından hazırlanan karışım numuneleri adlandırılmıştır.

Buna göre, Tablo 3.1'de Bentonit ve Tablo 3.2'de kaolin killerine kolemanit yüzdelerine göre hazırlanacak karışım ve adlandırılmaları gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Bentonit ve kolemanit karışım isimlendirmeleri

| Bentonit | Kolemanit | Karışım Numunesinin Adlandırılması |
|---|---|---|
| %100 | %0 | BK0 |
| %98 | %2 | BK2 |
| %96 | %4 | BK4 |
| %94 | %6 | BK6 |
| %92 | %8 | BK8 |
| %90 | %10 | BK10 |

Tablo 3.2. Kaolin ve kolemanit karışım isimlendirmeleri

| Kaolin | Kolemanit | Karışım Numunesinin Adlandırılması |
|---|---|---|
| %100 | %0 | KK0 |
| %98 | %2 | KK2 |
| %96 | %4 | KK4 |
| %94 | %6 | KK6 |
| %92 | %8 | KK8 |
| %90 | %10 | KK10 |

Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin temin edilişleri ve ayrıntılı bilgileri 3.2.1 ve 3.2.2 nolu alt başlıklarda verilmektedir. İki farklı kil grubundan seçilen killer, ayrıntıları 3.2.3'de sunulan katkı malzemeleri ile değişik oranlarda karıştırılmışlardır.

Deneysel çalışmalarda mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amacı ile kullanılan, bentonit ve kaolin killeri, öğütülmüş ve toz halde olduğu için etüvde 104°C'de 24 saat boyunca kurutulmuş ve doğrudan deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Yine katkı maddesi olarak kullanılan kolemanit ise öğütülmüş ve toz halde bor işletme tesisisinden temin edildiği için herhangi bir işlem görmeden, ortamın nem durumu göz önünde bulundurularak, etüvde 24 saat kurutulduktan sonra katkı maddesi olarak kullanılmıştır.

Etüvde 105°C'de 24 saat kurutulan bentonit, kaolin ve kolemanit, etüvden çıkarıldıktan hemen sonra plasitisiteden kaynaklı ufak topaklar halinde gelmiştir. Oluşan bu topaklar herhangi bir ağır darbe olmaksızın el ile ufalanarak dağıtılmıştır. Daha önce belirlenen yüzdelere göre ağırlığınca katkı malzemesi kullanılarak homojen karışımlar oluşturulmuştur.

Öncelikli olarak deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere seçilen bentonit ve kaolin killerini sınıflandırma amacı ile bir takım deneyler uygulanmıştır. Uygulanan deneyler sonrasında elde edilen veriler analiz edilerek USCS VE AASHTO zemin sınıflandırma sisteminden yararlanarak bentonit ve kaolin killerine ait sınıflar belirlenmektedir. Bentonit ve kaolin killerini iyileştirmek için ağırlıkça %2, %4, %6 %8 ve %10 oranlarında her bir kil için kolemanit minerali ayrı ayrı eklenmiş ve homojen karışımlar elde edilmiştir. 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. Sınıflandırma amacı ile yapılan deneylerinin akabinde karışımlara standart (ASTM 698) olmak üzere kompaksiyon deneyleri uygulanarak, her iki malzeme için optimum su içeriği ve buna bağlı olarak optimum kuru birim hacim ağırlıkları tespit edilmektedir. Taşıma gücü sonuçlarını görebilmek için karışımlar üzerinde ASTM D2166 standardına uygun olarak serbest basınç deneyleri yapılmaktadır. Serbest

basınç deneyi farklı karışım oranları üzerinde 0, 1, 7 ve 28 günlük kür sürelerinde bekletildikten sonra deney numuneleri için ayrı ayrı uygulanmaktadır.

### 3.1.2. Deneysel çalışmaların şeması




Şekil 3.1. Deneysel çalışmaların şeması

### 3.1.3. Deneylerde referans alınan standartlar

Tez çalışması kapsamında yapılan laboratuvar deneyleri için belirlenen standartlara uygun şekilde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda deneysel çalışmalarda referans alınan ASTM standartlar Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3.3. Deneylerde referans alınan standartlar

| Yapılan Deneyin Adı | Referans Alınan Standart ASTM |
|---|---|
| Atterberg Limitlerinin Belirlenmesi | ASTM D 4318-00 |
| Standart Kompaksiyon Deneyi | ASTM D 698-00a |
| Serbest Basınç Deneyi | ASTM D 2166-00 |

## 3.2. Materyaller

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda, düşük ve yüksek plasitisteli killerin iyileştirilmesi incelenmiştir. Bu sebeple ana malzeme olarak çalışmalarda kullanılmak üzere, düşük plasitiste kil özelliğini gösteren 'kaolin' ve yüksek plasitiste özelliğine sahip kil gruplarını temsilen ise ' bentonit' kili ile çalışılmıştır.Deneysel çalışmalarda iyileştirlmeye tabi tutulacak bentonit ve kaolin killerine stabilizatör olarak seçiilen katkı maddesi olarak bor minerallerinin en yaygın bilineni olan 'kolemanit' kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar esnasında ana malzeme ve katkı maddesinin, homojen olarak karıştırılması ve numunelerin hazırlanması için 'saf su' kullanılmıştır.

### 3.2.1. Bentonit kili ve özellikleri

İlk olarak Wyoming'de (USA) Ford-Benton civarında bulunan bentonit, adını bulunduğu yerden almıştır. Montmorillonit ise Fransa'nın Montmorillon bölgesinde bulunduğu için bu adı almıştır. Kimyasal formülü, "$Al_2O_34SiO_2H_2O$" olan bentonit, alüminyum ve magnezyumca zengin volkanik kül, tüf ve lavların kimyasal ayrışması ile veya bozulmasıyla oluşmuş çok küçük kristallere sahip kil minerallerinden (başlıca montmorillonit) oluşan ve ağırlıklı olarak kolloidal silis yapıda, yumuşak, gözenekli ve kolayca şekil verilebilen bir kayadır. Rengi beyaz, gri, yeşil, sarı, pembe, mor ve kırmızı olabilir. İyonlaşma kapasitesi oldukça yüksektir (Seyhan, 1972).

Bentonit içeriğinde bulunan montmorillonit özelliğine bağlı olarak su ile etkileşime girdiğinde az veya çok miktarlarda şişmektedirler. Saf bentonitler 10-20 kata kadar şişme özelliği gösterirken çok ender bulunan türleri 25-30 kata kadar şişebilmektedirler. Su ile etkileşime girince şişme özelliği 600 $^oC$'den sonra kaybolmaktadır. Bu bentonitin kuru durumdaki yoğunluğu 2,7-2,8 g/cm$^3$ iken toz haline getirildiğinde yoğunluğu 1,6-1,8 g/cm$^{3'}$e kadar azalmaktadır. Suya karşı duyarlı olmaları, hacimce genleşmeleri, sürekli bazik konsantrasyon oluşturmaları gibi özellikleri bentonitlerin ayırt edici özelliklerindendir. Bentonit, inşaat mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle yüksek plastisiteli kil grubunu temsil etmesi açısından deneysel çalışmalarda da tercih edilen bir kildir (Bilgen, 2004).

Dünya genelinde bentonit rezervi toplamda 1870 milyon ton dolaylarında olmakla birlikte, en önemli rezervler A.B.D, B.DT, Japonya, Yunanistan, Kıbrıs, İtalya,

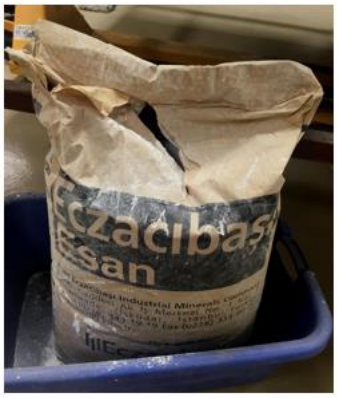
Almanya, İngiltere, İspanya, Bulgaristan'da bulunmaktadır. Bu rezervlerden konum olarak önemlileri Milos Adası (Yunanistan), Kıbrıs ve Sardunya Adası (İtalya)'dır.

Ülkemizde bentonit, magmatik kayalar, volkanik ana katkılı çökel ve salt çökel birimlerin içinde bulunmakla birlikte; mercek, cep, kütle ara seviyeler ve kırıklar boyunca düzensiz şekillerde yataklanma biçimleri göstermektedir. Ülkemizin toplam potansiyel bentonit rezervi 281 milyon tondur. Edirne, Ankara, Eskişehir, Kütahya, Balıkesir, Çankırı, Konya, Tokat ve Ordu ülkemizin en önemli bentonit yataklarıdır (MTA, 1989).

Bu tez çalışmasında kullanılmak üzere yüksek plastisiteli kil grubunu temsilen, Eczacıbaşı Esan Endüstriyel Maddeler San. Tic. A.Ş. Fabrikalarında öğütülüp paketlenerek hazırlanan "Bentonit Kili" kullanılmıştır. Bentonit, montmorillonit kil gurubuna ait, likit limit değeri %500'e kadar çıkabilen yüksek su tutma kapasitesine sahip bir kildir.

Laboratuvar çalışmalarında ana malzeme olarak kullanılan,alümina silikat bentonit, yapısındaki Ca miktarına bağlı olarak sahip olduğu su tutma özelliği ile yüksek plasitisite değerine de sahip olmaktadır. Bentonit, saf halde 10-20 kat şişme kapasitesi gösteren, yapısındaki minerallere göre ise 25-30 kat dahi şişebilen suya karşı gösterdikleri duyarlılıkları ve kolayca çözülebilen, hacimsel genleşmeleri gibi özellikleri sahip olduğundan inşaat mühendisliğinde deneysel çalışmalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Eczacıbaşı Esan Endüstriyel Maddeler San. Tic. A.Ş. tarafından temin edilen Bentonit (Şekil 3.2), ortamın nem durumu göz önünde bulunduralarak deneysel çalışmalara geçilmeden önce etüvde 24 saat kalacak şekilde 104°C'de bekletilmiştir. Ortamın neminden kaynaklanabilecek su miktarını önlemek için yapılan kurutma işleminden sonra malzemede oluşan ufak topaklanmalar el ile ufalanarak homojen karışımları oluşturabilecek ince dane boyutuna getirilmiştir. Laboratuvar çalışmalarında kullanılmak üzere gerekli ufalama işlemine tabii tutulan saf bentonit kilinin, tane biçimi ve dağılımı ile geoteknik özelliklerini saptanmak için kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç dayanım deneyleri yapılmıştır.






Şekil 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere temin edilen bentonit kili

Şekil 3.2'de verilen bentonit kilinin mühendislik özellikleri Tablo 3.4'de özetlenmiştir.

Tablo 3.4. Bentonit kilinin mühendislik özellikleri

| Mühendislik parametreleri | |
|---|---|
| Renk | Beyaz |
| Likit Limit (%) | 136,93 |
| Plastik Limit (%) | 61,14 |
| Plastisite İndisi (%) | 75,79 |

Bentonit kilinin kompaksiyon parametreleri Tablo 3.5'de özetlenmiştir.

Tablo 3.5. Bentonit kilinin kompaksiyon parametreleri

| Kompaksiyon parametreleri | |
|---|---|
| Optimum Su İçeriği, $w_{opt}$ (%) | 42,779 |
| Maksimum Kuru Yoğunluk, $\gamma_{d,maks}$ | 8,81 |

Bentonit dayanım özellikleri Tablo 3.6'da özetlenmiştir.

Tablo 3.6. Bentonit kilinin dayanım parametreleri

| Dayanım parametreleri | |
|---|---|
| Serbest Basınç Değeri (kPa) | Numune 1 :143,74 |
| | Numune 2 :122,02 |
| | Numune 3 :145,56 |
| | Numune 4 :128,79 |
| | Numune 5 :136,15 |
| | Numune 6 :137,47 |

### 3.2.2. Kaolin kili ve özellikleri

Kaolinit ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) minerali hidro-silikat bileşimli bir mineral olmasının yanı sıra kaolinin de hammaddesini oluşturan en önemli mineraldir. Kil sınıflandırmalarında eş boyutlu olan ve bir yönde uzamıl olanlar kaolinit grubu olarak sınıflandırılmaktadır. Oluşum itibariyle, feldspat içeren granitik veya volkanik kayaçların feldspatlarının altere olarak kaolinit mineraline dönüşmesi sonucu kaolinler oluşmaktadır. Ana kayaç içindeki alkali ve toprak alkali iyonların, çözünür tuzlar şeklinde ortamdan uzaklaşması sonucu $Al_2O_3$ içerikli sulu silikatça zenginleşen kayaç kaoliniti oluşturur (MTA, 1989).

Fiziki olarak toprağa benzeyen, beyazımsı-yeşilimsi veya sarımsı renkte bulunan kolemanitin erime sıcaklığı 1760 ºC'dir. Çökelmiş kaolinitler bünyelerinde başka mineraller de barındırdıklarından dolayı önemli yataklardan sayılmamaktadır. Magmatik/ volkanik kayaların mevcut olduğu yerlerde oluşan ve burada varlığını koruyan kaolin yatakları gerçek yataklar olarak sayılmaktadır. Kaolinin bileşimindeki silikanın ($SiO_2$), %46,54; alüminyum oksidin ($Al_2O_3$), %39,50; suyun ($H_2O$) ise %13,96 nispetinde olması idealdir. Esas yapıcı eleman olan alüminyum silikatın azalması ile birlikte bileşime demir, kükürt veya potasyum karışmakta, potasyumun varlığı ise ortamda alunitin varlığını işaret etmektedir. Bu durum ısınma işleminde ateş kaybına neden olduğu için istenmemektedir. Kükürt de ateş kaybını arttırmaktan öte demirle birlikte bulunduğunda seramiğin rengini bozmakta ve başka türlü istenmeyen kimyasal değişmelere yol açmaktadır.

Dünyada en büyük kaolin yataklarını ABD, İngiltere ve Rusya gibi ülkeler oluştururken, ülkemizde bulunan kaolin yataklarının hemen hemen tamamı hidrotermal kökenlidir. Balıkesir/Sındırgı yatakları ilk zamanlarda volkanik asıllı sedimanterler olmalarına rağmen sonraki dönemlerde hidrotermal alterasyona uğramışlardır.

İnşaat mühendisliğinde, killer çoğunlukla mühendislik yapılarında, yapı malzemesi olarak kullanılmakradır. Ancak yapının oturacağı temel itibariyle killi zeminlerin varlığı birçok problemi teşkil etmektedir. Killer, farklı türleri sebebiyle Yüzyıllarıdr geniş kullanım alanına sahiptirler. Kaolin killeri, kerpiç, tuğla, seramik, fayans, porselen gibi malzeme alanlarında kullanırken kara yollarında, toprak baraj

çekirdeklerinde ve drenaj kanallarında kullanılmaktadır. ayrıca petrol endüstrisinde, ziraat işlerinde toprağı ıslah etmede kağıt endüstrsinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalarda, iyileştirmeye tabii olacak ve zemin deneyleri gerçekleştirilecek diğer bir ana malzeme olarak düşük plastisiteli kil grubunu temsilen Kaolin kili kullanılmıştır. Eczacıbaşı Esan Endüstriyel Maddeler San. Tic. A.Ş. Fabrikalarında öğütülüp paketlenerek temin edilen kaolin kili, elekten geçirilmeden ortamın nem koşulları göz önünde bulundurularak etüvde 24 saat boyunca 104°C'de kurumaya bırakılmıştır. Bentonit kilinde olduğu gibi kaolin kilinde de kurutma işlemine bağlı olarak meydana gelen ufak topaklanmalar herhangi bir kuvvet uygulamadan el ile ufalanarak homojen karışım oluşturabilecek ince dane boyutuna getirilmiştir.

Saf kaolinin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için laboratuvarda zemin deneyleri gerçekleştirilmiştir. Düşük plastisiteye sahip kaolin için atterberg limit değerleri belirlenmiştir. Sonrasında standart kompaksiyon deneyi ile optimum su muhtevası ve maximum kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Herhangi bir katkı maddesi ile karışım oluşturmadan önce saf haldeki kaolin kili saf su ile yoğurulmuştur.

Saf kaolin kili için dayanım parametrelerini belirlemek için serbest basınç deneyine tabii tutulacak numuneler hazırlanmıştır ve deneysel çalışmalar tamamlanmıştır. Kaolin kilinin mühendislik özellikleri Tablo 3.7'de kompaksiyon parametreleri Tablo 3.8'de, dayanım özellikleri ise Tablo 3.9.'da verilmiştir.

Tablo 3.7. Kaolin kilinin mühendislik özellikleri

| Mühendislik parametreleri | |
|---|---|
| Renk | Koyu Krem |
| Likit Limit (%) | 30,76 |
| Plastik Limit (%) | 19,98 |
| Plastisite İndisi (%) | 10,78 |

Tablo 3.8.Kaolin kilinin kompaksiyon parametreleri

| Kompaksiyon parametreleri | |
|---|---|
| Optimum Su İçeriği, $w_{opt}$ (%) | 20,578 |
| Maksimum Kuru Yoğunluk, $\gamma_{d,maks}$ | 15,447 |

Tablo 3.9. Kaolin kilinin dayanım özellikleri

| Dayanım Parametreleri | |
|---|---|
| Serbest Basınç Değeri (kPa) | Numune 1 :162,49 |
| | Numune 2 :195,57 |
| | Numune 3 :206,74 |
| | Numune 4 :220,15 |

### 3.2.3. Kolemanit minerali

Yerküredeki en önemli bor minerallerinden birisi olan kolemanit diğer boratlar gibi, çöl boraks yataklarında ve eski göl yataklarında tersiyer killerde bulunan karmaşık bir mineraldir. Monoklinik sistemde kristallenen ve ikincil bir mineral olan kolemanit, beyaz-gri ve yeşilimsi-gri gibi renklerde bulunmaktadır. Su ile çok ağır tepkime veren kolemanit, asit ile karşılaştığında çok çabuk bir şekilde eriyebilmektedir. Isıtılması halinde ise çatırdayarak pudra haline gelmektedir. Mineral boraks, koşul nedeniyle suyun buharlaşmasına bağlı bölgelerde doğrudan çökelir. Dağlık alanların içinden akan yeraltı suyu boraks çökeltilerinin boraks ile reaksiyona girdiği ve üleksit gibi diğer mineralleri oluşturduğu düşünülmektedir. Kolemanitin temel yapısı, birbirine kenetlenen $BO_2(OH)$ üçgenlerinin ve $BO_3(OH)$ tetrahedronların kalsiyum, su molekülleri ve zincirlerin arasında serpiştirilmiş ekstra hidroksitler içeren sonsuz zincirleri içerir. Kimyasal bileşeni %27,28 CaO, %50,81 B2O3, %21,91 H2O 'durSertliği 4-4,5, özgül ağrılığı 2,42 gr/cm3 ve B2O3 içeriği %50,8'dir. Ülkemizde Emet, Bigadiç ve Kestelek yataklarında, dünyada ABD'de bulunmaktadır (DPT, 2001). Kolemanit mineralinin içerik, birim ve değer tablosu Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10. Kolemanit mineralinin içerik, birim ve değer tablosu (Etimaden, 2019)

| İçerik | Birim | Değer |
|---|---|---|
| $B_2O_3$ | % | 40+/-0.50 |
| CaO | % | 27+/-1 |
| $SiO_2$ | % | 4-6.5 |
| $SO_4$ | % | 0.60 max |
| As | Ppm | 35 max |
| $Al_2O_3$ | % | 0.40 max |
| $Fe_2O_3$ | % | 0.08 max |
| MgO | % | 3 max |
| SrO | % | 1.50 max |
| $Na_2O$ | % | 0.50 max |

Diğer minerallerden ayırıcı özelliği kristal formu, mükemmel dilinimi, diğer boratlardan daha sert olması, üfleç alevinde çatırdar, kıvrılır, sinterleşir ve erir (Eti Maden İşletmeleri, 2016). Tablo 3.11'de kolemanit mineralinin özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.11. Kolemanit mineralinin özellikleri

| Kolemanit mineralinin özellikleri | |
|---|---|
| Kimyasal Bileşimi | $Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$ |
| Sertlik | 4.5 Mohs |
| Özgül Ağırlık | 2.42 gr/$cm^3$ |
| Renk ve Şeffaflık | Beyaz- yarı şeffaf |
| Parlaklık | Camsı |
| Erime Noktası | 930 °C |
| Nem | %1 max |
| Kızdırma Kaybı | %25 max |
| Dökme Yoğunluğu | 1,00 ton/$m^3$ max |

Teorik olarak %50,8 oranında $B_2O_3$ içeren kristal bir yapıya sahip olan kolemanit, bir kalsiyum borat mineralidir. Bu mineral borik asit üretiminde hammadde olarak kullanılmasının yanısıra ısıya dayanıklı cam imalatında ve temizlik maddesi olarak da kullanılmaktadır.

Ayırıcı özellikleri: Kristal formu, mükemmel dilinimi, diğer boratlardan daha sert olması, yüksek ısı da, kıvrılan, sinterleşen ve eriyen bir yapıya sahip olmasıdır. Sıcak HCl' de çözünür. Çözelti soğuyunca borik asit ayrılır. Ayrışınca kalsite dönüşür. Ülkemizde en çok görülen bor mineralidir. Türkiye'de Emet, Bigadiç ve Kestelek de bulunmakta, dünyada ise Amerika Birleşik Devletlerinde bulunan fazla sayıda bu minerale ait yataklar vardır (DPT, 2001).

Mineral bakımından oldukça zengin bir bor çeşidi olan kolemanit, birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Cam ve seramik sektöründe ise içerisine katıldığı malzemelerin kullanım ömrünü uzatarak malzemenin dayanıklılığını maksimum seviyeye çıkarmaktadır.

Bor bileşikleri arasından en yaygın kullanım alanına sahip kolemanit, tez çalışması kapsamında, zemin iyileştirmesinde katkı maddesi olarak seçilmiştir.

Özel bir dokuya sahip olan kolemanit, killerin arasındaki cevher boşluklarında bulunan iri, parlak, saydam kristaller halinde bulunan, radyoaktif bir elementtir. Kolemanit, yapısında organik madde içeriği bulunmadığı ve genel itibari ile dokusal ve minerolojik özelliklerine bakıldığında saf bir mineral olarak nitelendirilmektedir. (Velioğlu ve Şimşek, 2003).

Bu tez çalışması kapsamında, laboratuvar çalışmalarında katkı maddesi olarak kullanılan kolemanit ETİ Maden Bor İşletmeleri A.Ş. tarafından, Eti Maden Bigadiç Bor İşletme tesisinden, deneysel çalışmalarda kullanılmak için mikronize halde, Şekil 3.3'de görülen 20 kg'lık paketler temin edilmiştir.



Şekil 3.3. Kolemanit minerali

Kolemanit mineralinin ağır metal içeriği Tablo 3.12.'de verilmiştir.

Tablo 3.12. Kolemanit mineralinin ağır metal içeriği (Etimaden, 2019)

| Bileşen | Derişim (mg/kg) |
|---|---|
| As | 35 max |
| Cd | <0,005 |
| Pb | <0,010 |
| Cr | <0,005 |
| Hg | <0,010 |

### 3.3. Yöntem

Laboratuvar çalışmalarında deneysel akış şemasında verilen laboratuvar deneyleri uygulanmıştır. Bentonit ve kaolinkilleri, katkısız olarak ve ağırlıkça %2, %4, %6, %8 ve %10 kolemanit ilave edilerek, hazırlanan katkılı karışımlar ile, kıvam limitleri deneylerine, kompaksiyon deneylerine ve taşıma gücü deneylerine tabi tutulmuştur. Bentonit kili ve kolemanit ilaveli karışım numuneleri üzerinde gerçekleştirlen deneyler Tablo 3.13'de özetlenmiştir.

Tablo 3.13. Bentonit kili ve kolemanit ilaveli karışım numuneleri üzerinde gerçekleştirlen deneyler

| | Likit limit | Plastik limit | 24 saat kür LL | 24 saat kür PL | Kompaksiyon deneyi | Serbest basınç deneyi |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Saf Bentonit | √ | √ | √ | √ | √ | Anlık |
| %2 | √ | √ | √ | √ | √ | 28 Günlük |
| %4 | √ | √ | √ | √ | √ | 28 Günlük |
| %6 | √ | √ | √ | √ | √ | 28 Günlük |
| %8 | √ | √ | √ | √ | √ | Anlık, 1,7, 28 Günlük |
| %10 | √ | √ | √ | √ | √ | 28 Günlük |
| Toplam | | | | | | 54 Numune kırımı |

Kaolin kili ve kolemanit ilaveli karışım numuneleri üzerinde gerçekleştirlen deneyler Tablo 3.14'de özetlenmiştir.

Tablo 3.14. Kaolin kili ve kolemanit ilaveli karışım numuneleri üzerinde gerçekleştirlen deneyler

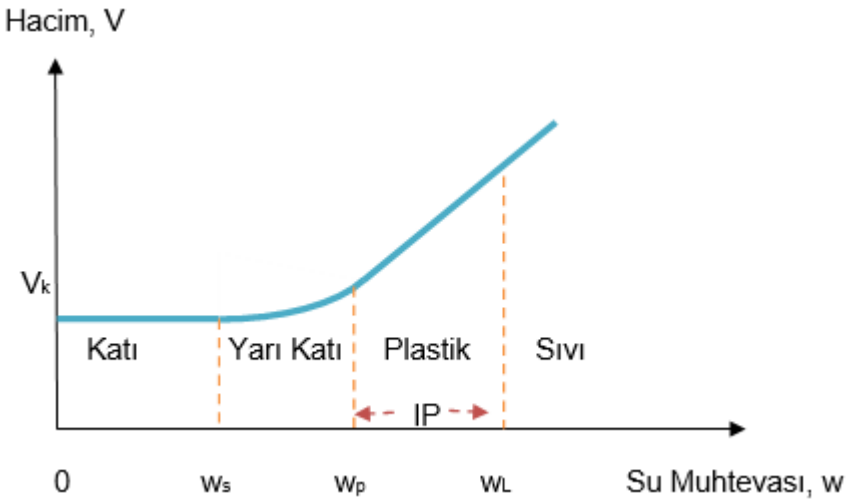
| | Likit Limit | Plastik Limit | 24 Saat Kür LL | 24 Saat Kür PL | Kompaksiyon Deneyi | Serbest Basınç Deneyi |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Saf Kaolin | √ | √ | √ | √ | √ | Anlık |
| %2 | √ | √ | √ | √ | √ | 28 Günlük |
| %4 | √ | √ | √ | √ | √ | 28 Günlük |
| %6 | √ | √ | √ | √ | √ | 28 Günlük |
| %8 | √ | √ | √ | √ | √ | 28 Günlük |
| %10 | √ | √ | √ | √ | √ | 28 Günlük |
| Toplam | | | | | | 24 numune kırımı |

### 3.3.1. Kıvam (atterberg) limitlerinin belirlenmesi

Zeminler, içerisinde barındırdığı su yüzdesine bağlı olarak farklı davranışlar göstermektedir. İnşaat mühendisliğinde, geoteknik çalışmalar sırasında zeminin tanımlanması oldukça önemli bir yere sahiptir. Yapılan birçok çalışma sonrasında 1911 yılında Atterberg tarafından zeminin kıvam limitleri deneysel olarak saptanmıştır. Zemin içerisinde bulunan sınır su içeriklerini, atterberg sınırları olarak isimlendirilmiştir ve her bir sınır değeri farklı bir zemin davranışı ortaya koymuştur. Zeminin daneleri ve bu daneler arasındaki su içeriğinin yüzdesine göre zeminin katı, yarı, katı, plastik ve likit olarak zemin davranışları tanımlanmıştır. Kohezyonlu zeminlerde kıvam limitleri grafiği Şekil 3.4.'de verilmiştir.

Zeminlerin kıvamı, danecikler arasındaki adezyon kuvvetini yük karşısında kayma direnci stabilitesini ve hangi su içeriğinde hangi katılığa sahip olacağını belirleyen en temel özelliktir. Ayrıca birbirinden farklı zeminler aynı su içeriğinde farklı kıvamlılık gösterirken, katı halden sıva hale dönüşürken de birbirinden farklı suya ihtiyaç duymaktadırlar. Bu nedenle zeminlerin hangi su içeriğinde hangi kıvamda olacağını

tespit etmek ve özellikle plastik ve likit kıvamlarındaki su içeriğinin bilinmesi önemlidir (Holtz ve Kovacs, 1981).




Şekil 3.4. Kohezyonlu zeminler kıvam limitleri ilişkisi

Atterberg killerin suyla karıştırıldığında göstereceği davranışların en az iki parametre ile gösterilmesi gerekeceğini; viskoz akmanın üst limiti, viskoz akmanın alt limiti (likit limit ), çamurun metale yapışma özelliğinin yitirmesi (yapışma limiti), kilin plastisite özeliğini yitirdiği limit (plastik limit), su kaybının hacim azalmasıyla doğru orantısının kaybı (rötre limiti) limitleriyle açıklamıştır (Atterberg, 1911).

### 3.3.1.1. Likit limit deneyi

Likit limit, zeminin kendi ağırlığı altında, plastik durumundan akıcı duruma geçtiği su muhtevası değeridir. Likit limit değeri, Casagrande veya düşen koni yöntemi olmak üzere 2 farklı yöntem ile elde edilmektedir. Likit limit diğer bir anlatım ile standart (ASTM) Casagrande aleti içerisine sıvanan zeminde, standart bir boyutta açılan oyuğun, 25 vuruş sonrasında, açılan oyukta 1 cm kapanmanın gerçekleştiği andaki su içeriğinin yüzdesidir olarak tanımlanmaktadır.

Laboratuvar çalışmaları kapsamında ilk olarak kıvam limitlerinin belirlenmesi ile deneysel çalışmalara başlanmıştır. Deney sonuçlarının doğru bir şekilde elde edilmesinde kullanılan deney aletlerinin kalibrasyonun yapılmış olması oldukça önemlidir. Deneye başlamadan önce Casagrande aletinin, temiz, kuru ve zemin numunesinin yerleştireleceği pirinç kabın serbestçe, herhangi bir takılma olmadan standartlara uygun düşebilmesine dikkat edilmiştir. 400 mikronluk elekten geçebilen

ana malzemeden (bentonit ve kaolin) 200 gr ağırlığında numune alınmıştır. Numune karıştırma kabına konulan malzeme damıtık su ile spatula yardımı ile homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Daha sonra homojen olarak karıştırılan numuneden alınır, Casagrande aletinin pirinç tasına bir miktar yerleştir,len numune, tasın temas ettiği blok yüzeyine paralel şekilde düzlenmiştir ve tabanı 2 mm olan yamuk biçimli oluk açma bıçağı ile menteşenin ortasından geçen çap boyunca numune iki bölünmüştür. Böylelikle numunenin ortasında V görünümlü bir oyuk meydana gelmiştir. Casagrande aletinde bukunan krank kolu saniyede 2 devirlik hızla çevrilmeye başlandığı andan, ikiye bölünmüş numunenin 1 cm birleşinceye kadar kol çevirilmeye devam edilmiştir. Pirinç tas içersindeki numunenin oyuk ile açılan kısmı 1 cm kapandığı andaki vuruş sayısı belirlenmiştir. Pirinç tas içersinden 10 g ağırlığında numune örneği alınarak su muhtevası belirlemek amacıyla 24 saat süre ile 108°C'de etüvde bekletilmiştir. Bu şekilde 25 vuruşa denk gelen su muhtevası değeri likit limit olarak alınmış olup, farklı su muhtevası değerlerinde 5 kez aynı işlemler tekrarlanmıştır. Elde edilen su muhtevasına karşılık gelen vuruş sayısı grafik üzerine gösterilerek, yatay ve düşey eksen boyunca ölçülmüştür. En az 5 noktaya denk gelen doğru çizilerek elde edilen akış doğrusunda 25 vuruşa denk gelen su muhtevası değeri likit limit olarak belirlenmiştir. Casagrande aleti ve deney numunesinin yerleştirilmiş hali Şekil 3.5.'de; numunelerin etüvde kurutulmuş halleri ve tartım aşaması ise Şekil 3.6'da gösterilmektedir



Şekil 3.5. Casagrande aleti ile likit limit deneyinin gerçekleştirilmesi

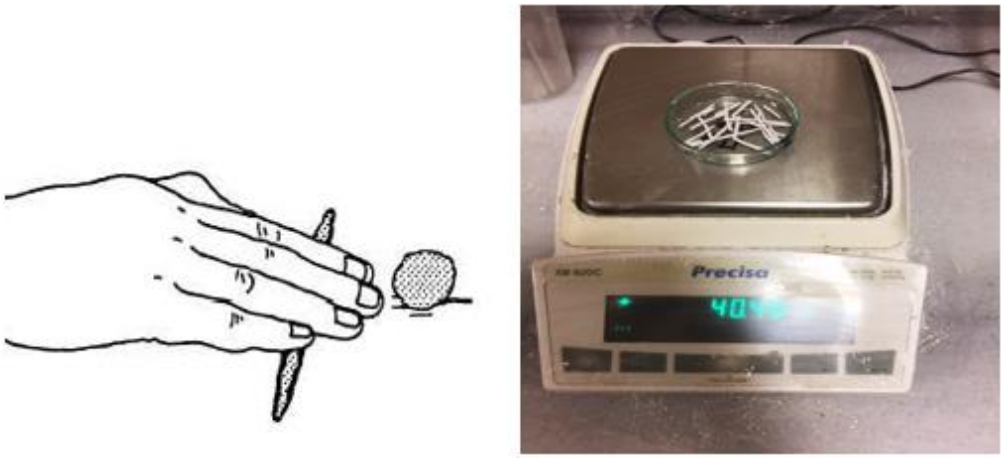



Şekil 3.6. Likit limit deneyi sonrası numunelerin tartılması ve etüvde kurutulması

### 3.3.1.2. Plastik limit deneyi

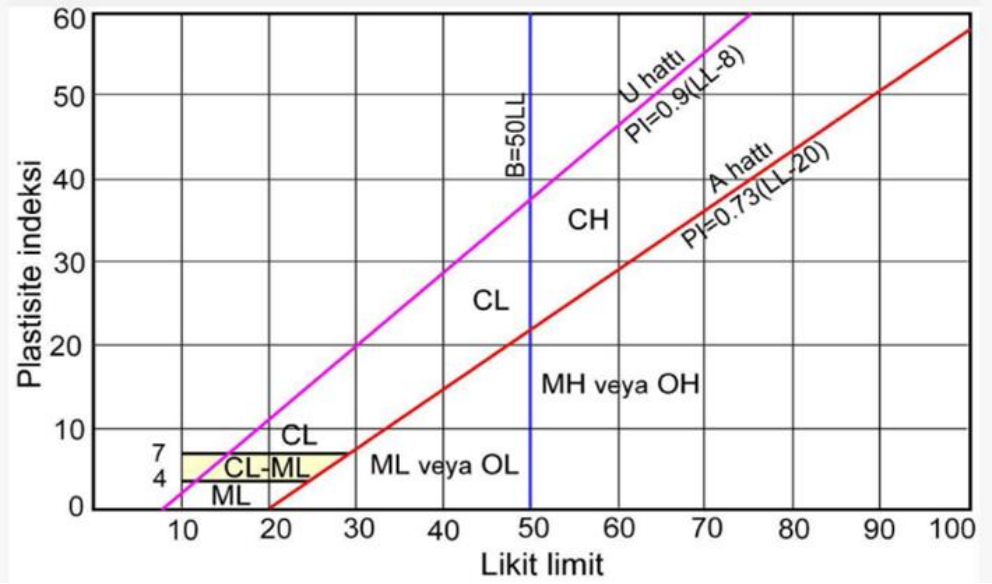
Plastik limit, zeminin henüz plastik kıvamda iken bulunduğu en düşük su muhtevası değeridir. Diğer bir ifade ile plastik limit, zeminin herhangi bir kırılmaya maruz kalmadan 3 mm çapında silindirik çubuklar şeklinde cam bir blok üzerinde yuvarlandığında çubuk yüzeylerinde ilk oluşan çatlakların olduğu andaki su içeriğidir.

Plastik likit deneyi için 400 mikronluk elekten geçebilen ana malzemeden 20-30 g civarında numune alınmıştır. Numune homojen bir duruma gelene kadar saf su ile plastik kıvamda olana karıştırılıp yoğurulmuştur. Plastik kıvama gelen numuneden bir miktar alınarak cam blok üzerinde el aynası altında yuvarlanmıştır. Çapın yaklaşık 3 mm olduğu esnada numunede çatlamalar ve dağılmalar meydana gelinceye kadar yuvarlama işlemi devam ettirilmiştir. Numunenin çapnın 3 mm'ye düştüğü ancak çatlama veya kopmaların gözlemlenmediği durumlarda numune ekrar yoğurulmuştur. Plastik limit deneyinde numunenin çapı yaklaşık 3 mm olduğunda çatlaklar veya kopmaların başladığı ilk andaki su içeriği plastik limit değerini göstemektedir. Numuneda gerçekleşen çatlayan veya kopan parçalar toplanarak bir kaba yerleştirilir ve bu işlem 3 kez tekrarlanmıştır. Alınan numune parçaları etüvde 24 saat 108 °C'de kurultulmaya bırakılmıştır. Bu sayede bulunan su içeriklerinin ortalaması alınarak plastik likit değeri elde belirlenmiştir. Plastik limit deneyi yapılışı ve kurutulmuş numuneler Şekil 3.7'de verilmiştir.




Şekil 3.7. Plastik limit deneyi ile hazırlanan numunelerin tartılması

Likit limit ve plastik limit değeri arasındaki fark plastiste indisini (PI) vermektedir. Bu sayede şişen zeminlerin sınıflandırılması plastisite indisi değeri ile ilişkilendirilir. Herbir karışım numunesi için plastisite indisi değerleri bulunmuştur. Elde edilen değerler deneysel çalışmaların bulguları ve irdelenmesi bölümünde detaylı olarak verilmiştir. Şekil 3.8.'de UCSC sınıflandırma sisteminde kullanılan grafik verilmiştir.




Şekil 3.8. UCSC sınıflandırma sistemi

Deneysel çalışmalarda kaolin ve bentonit killerinin düşük ve yüksek plastisite olmak üzere farklı plastisite özelliklerine sahip oldukları için, likit limit ve plastik deneyler 2 farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle deneye başlamadan önce alınan numuneler homojen olarak karışrırıldıktan sonra numune üzeri kapatılarak 24 saat kür odasında bekletilmiştir.

24 saatin sonunda numune kür odasından çıkartılmış ve 10 dakika boyunca karıştırılmaya devam edilmiştir. İkinci olarak ise herhangi bir kür süresine tabii tutulmadan direkt olarak homojen olarak karıştırılan numuneler üzerinde likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Bu sayede 0 günlük ve 1 günlük kür süresinin likit limit, plastik limit değerleri arasındaki farklılıkların oluşması gözlemlenmiştir. Bu sayede kür süresinin zeminin plastisite özelliğine etki saptanmıştır.

Atterberg limitleri, saf bentonit ve saf kaolin ile 24 saat kür süresine tabii tutularak ve anlık olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Daha sonra %2, %4, %6, %8 ve %10 kolemanit katkısı ilave edilerek hazırlanan karışım numuneleri için 24 saat kür ve anlık olmak üzere kıvam limiti deneyleri yapılmıştır. Herbir numune için plastisite değerleri saptanmıştır.

### 3.3.2. Kompaksiyon deneyi

Zeminlerin sabit, hareketli ve dinamik yükler altında meydana gelecek oturmaları ve zeminin geçirimliliğini azaltarak su almasını önlemek ve taşıma gücünü arttırmak amacıyla, tabakalar halinde serilerek mekanik araçlar vasıtası ile su ve dane hacmi sabit iken havanın dışarı atılarak sıkıştırılması olayına kompaksiyon denilmektedir (TS 1900-1, 2006).

Zemin iyileştirme yöntemleri arasında oldukça yaygın kullanımı olan kompaksiyonun amacı, zemin içerisinde minimum seviyede hava boşluğunu sağlayarak maksimum yoğunluğu elde etmektir. Zeminlerin kompaksiyon derecesi, içerisindeki su miktarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir ve zeminin kompaksiyon derecesi belirli bir sıkıştırma enerjisi altında sahip olabileceği maksimum yoğunluğunun sıkıştırma sonunda elde edilen yoğunluğuna oranı ile belirlenir.

Kompaksiyon deneyi ile elde edilen maksimum kuru birim ağırlıktaki su içeriğine optimum su içeriği adı verilmektedir. Eğer zemin, deney yoluyla bulunan optimum su içeriği ile maksimum kuru birim ağırlığına kadar sıkıştırılırsa stabilitesi de maksimum olmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında saf bentonitin ve saf kaolinin optimum su muhtevası ve maximum kuru birim hacim ağırlıkları standart proctor aleti kullanılarak bulunmuştur.

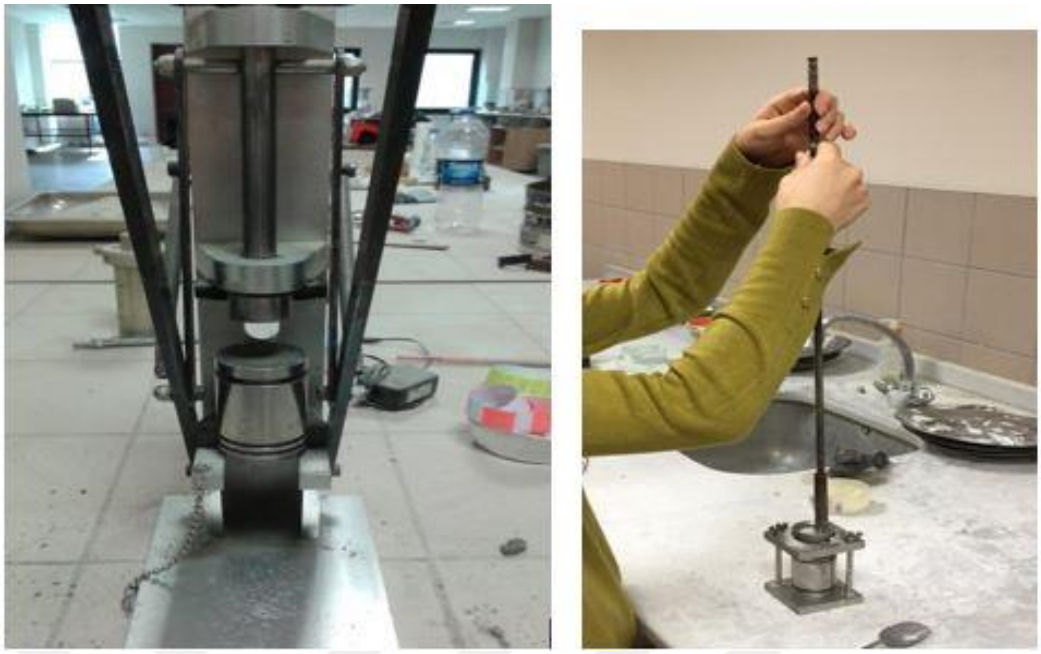
Bentonit ve kaolin killerine katkı olarak %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit ilave edilmesi ile bulunan, optimum su muhtevası ve maximum kuru birim hacim ağırlıkları minyatür proctor aleti ile gerçekleştirilen kompaksiyon deneyi ile saptanmıştır. Kompaksiyon deneyi için numune hazırlanışı ve kalıba yerleştirilmesi işlemi Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Killer üzerinde kompaksiyon deneyinin uygulanması

Şekil 3.10'da minyatür proktor aleti ile numunenin kalıba yerleştirilmesi işlemi gösterilmiştir.

Öncelikle saf zeminin kompaksiyon deney uygulamalarında standart proktor aleti kullanılmıştır fakat kolemanit katkılı zeminlerin deneyleri minyatür proktor aleti ile gerçekleştirilmiştir. Minyatür proktor aleti ve standart proktor aleti ile gerçekleştirilen deneyler arasında kullanılan su durumu göz önünde bulunduralarak belirli bir standart oluşturması amacıyla, saf bentonit ve kaolin için de minyatür proctor aleti ile su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlıkları bulunmuştur.



Şekil 3.10. Minyatür proctor aleti ile kompaksiyon deneyinin gerçekleştirilmesi

Etüvde 24 saat boyunca 104°C'de kurutulan bentonit ve kaolin killeri oda koşullarında bekletildikten sonra, zemin ağırlığınca belirlenen oranda saf su ile karıştırılmıştır. Saf su ile yoğurulan numune çapı 33,75 mm, yüksekliği 77,95 mm olan kompaksiyon kalıbında eşit kalınlıklarda 3 tabaka halinde yerleştirilmiştir. Kompaksiyon deneyi sırasında, her tabaka için 36 cm yüksekllikten bırakılan, 162 gram ağırlığındaki tokmak ile 24 vuruş darbesiyle sıkıştırılmıştır. Uygulanan sıkıştırma işleminden sonra kalıbın yakası çıkarılmıştır ve numune yüzeyi çelik bir spatula yardımı ile düzeltilmiştir. Kap ile billikte yaş numunenin ağırlığı tartılarak değerler kaydedilmiştir. Bu sayede kap içindeki numunenin yaş ağırlığı, kabın hacmine oranlanarak, yaş birim hacim ağırlığı değerleri elde edilmiştir.

Sıkıştırma işlemi farklı su oranlarında gerçekleştirlmeye devam edilmiştir. Numune ağırlığının belirli oranlarında eklenen saf su yüzdesi, numunen ağırlığının azalma gösterdiği noktaya kadar arttırılmıştır. Yapılan herbir kompaksiyon deneyi için su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Elde edilen değerler ile kompaksiyon eğrisi oluşturulmuştur. Bu sayede saf bentonit ve saf kaolin killeri ile kolemanit %2, %4, %6, %8 ve %10 kolemanit katkılı bentonit ve kaolin için optimum su muhtevası ve maximum kuru birim hacim ağırlık değerleri saptanmıştır.

Bentonit ve kaolin killeri için gerçekleştirilen saf halde ve kolemanit katkılı karışım numuneleri üzerinde kompaksiyon deney uygulamaları kapsamında her bir karışım için 1000 g numune hazırlanmıştır. Bentonit kili için ilk olarak %15 saf su eklenerek sıkıştırma işlemine başlanmış sonrasında her tekrarda saf su miktarı %10 artırılarak en az 5 farklı su içeriğinde deney tamamlanmıştır. Kaolin kili için ise, kompaksiyon deney seti için başlangıçta %5 oranında damıtık su eklenmiştir ve herbir deneyde su miktarı %10 artıralarak en az 5 farklı su içeriği elde edilmiştir.

### 3.3.3. Serbest basınç deneyi

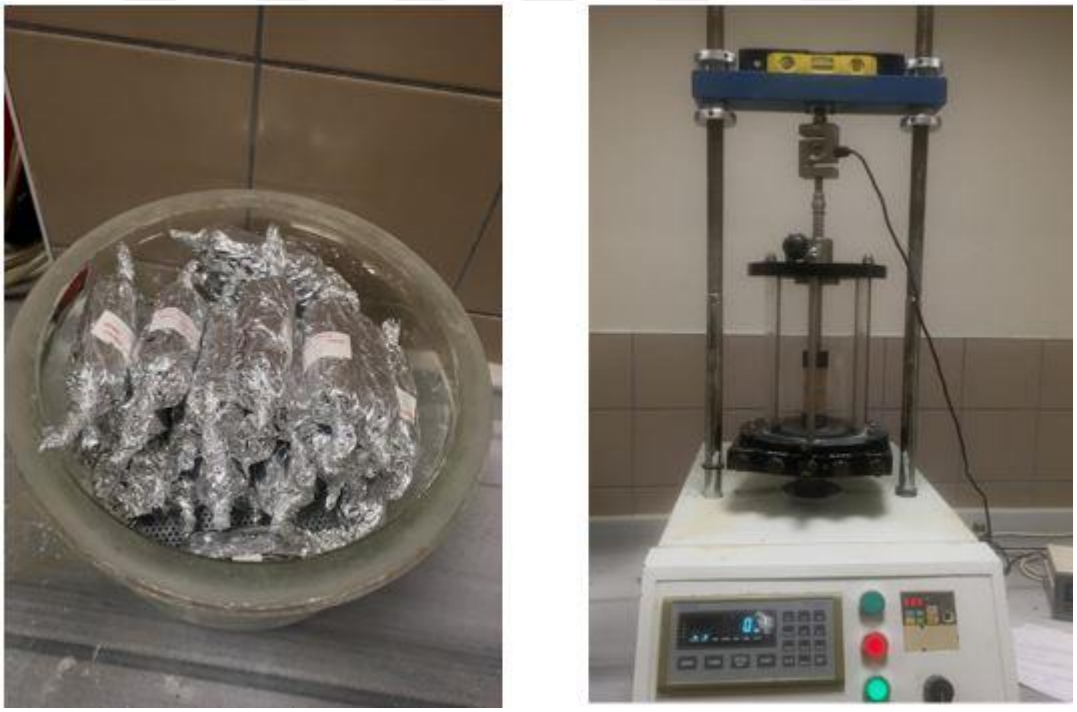
Serbest basınç deneyi, herhangi bir arazide yüklemeye maruz kalan zemin gerilmelerine karşı gösterdiği deformasyonları belirlemektir. Öncelikle laboratuvar ortamında kompaksiyon deneyi sonucunda elde edilen optiumum su muhtevası ile deney numuneleri hazırlanmaktadır. Hazırlanan numuneler üzerinde serbest basınç deneyi uygulanarak, dayanım değerleri elde edilmektedir.

Serbest basınç deneyi, yanal desteğe gereksinim duyulmadan kendisini tutabilen zeminlerde uygulanabilmekte, bu nedenle kum zeminlerde uygulanması mümkün olmamaktadır (Coduto, 2006).

Serbest basınç deneyinde silindir şeklinde hazırlanan numuneler üzerinde yalnızca eksenel yönde yükleme yapılmakta, eksenel yük arttıkça numune boyunda meydana gelen kısalma ölçülmekte ve meydana gelen gerilme deformasyon eğrileri elde edilmektedir. Elde edilen en büyük eksenel basınç gerilme değeri zeminin serbest basınç dayanımını ifade etmektedir. Numunede meydana gelen kayma düzleminin, alt ve üst yükleme başlıkları ile kesişmesini engellemek için, boy uzunluğunun çapa oranının iki veya ikiden büyük olarak seçilmesi önerilmektedir (Tumluer, 2006).

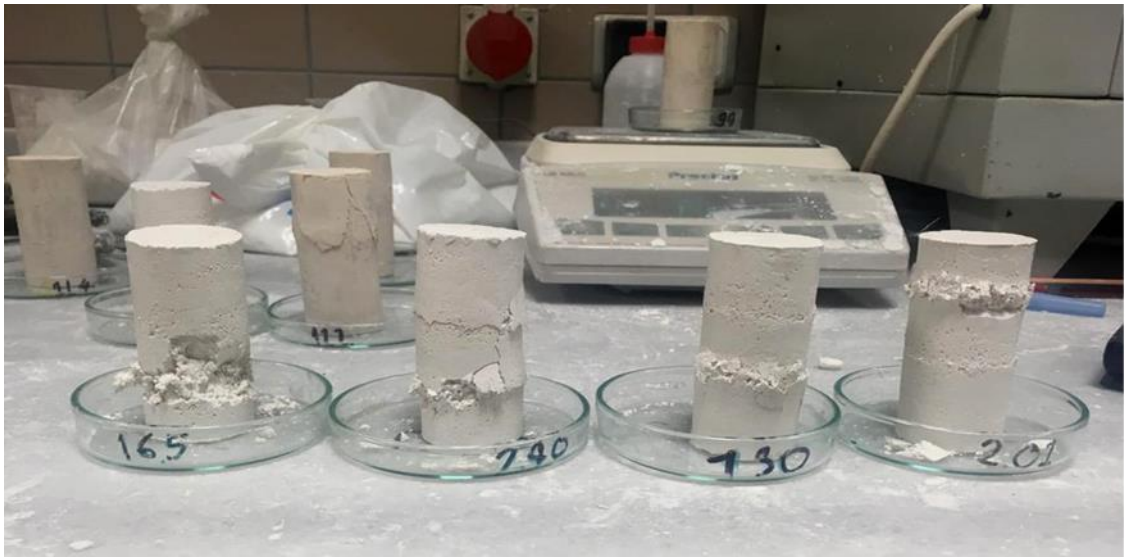
Bu tez çalışması kapsamında, saf bentonit ve saf kaolin killerine, belirli oranlarda kolemanit ikame edilmesi ile elde edilen numunelerin farklı dayanım değerleri gözlemlenmiştir. Serbest basınç deneyleri ASTM D 2166'ya uygun olarak 0,5 mm/dk yükleme hızıyla gerçekleştirilmiştir. Kompaksiyon deneyi ile saf bentonit, saf kaolin ve %2, %4, %6, %8 ve %10 kolemanit katkılı bentonit ve kaolin karışım oranlarının optimum su muhtevası ve maximum kuru birim hacim ağırlık değerleri saptanmıştır. Serbest basınç deneyi için hazırlanan numunelerin su muhtevası ve kuru birim hacim

ağırlık değerlerinin değişmemesine dikkat edilmiştir. Kompaksiyon sonucunda belirlenen su içeriğine ve kuru birim hacim ağırlığına göre hazırlanan numuneler bekleme süresi boyunca su kaybına uğramamasına için şeffaf strech ve alüminyum folyo ile hava almayacak şekilde kaplanmıştır. Minyatür proctor aleti ile ortalama olarak 33 mm çapında 76 mm boyunda silindirik numuneler hazırlanmıştır. Bu şekilde hazırlanan numunelerin dış ortam ile teması kesmek amacıyla şeffaf plastik strech sarılmakta ve alüminyum folya ile dış yüzeyi tamamen kaplanmaktadır. Herbir karışım oranı için ayrı ayrı bulunan optimum su muhtevaları ve maximum kuru birim hacim ağırlıklarına göre her bir karışım oranı için 6'şar adet numune hazırlanmıştır. Serbest basınç deneyi için her bir karışım oranında hazırlanan numunelerden 6'şar adet anlık kırım gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kalan numuneler 1 günlük, 7 günlük ve 28 günlük kırım gerçekleştirmek üzere, ısı ve nem ölçümü yapılan kür odasındaki desikatörlerde kür süresine tabii tutulmuştur (Şekil 3.11). Hazırlanan karışım numuneleri kür sürelerine göre serbest basınç deneyi ile numune kırımları gerçekleştirilmiştir.



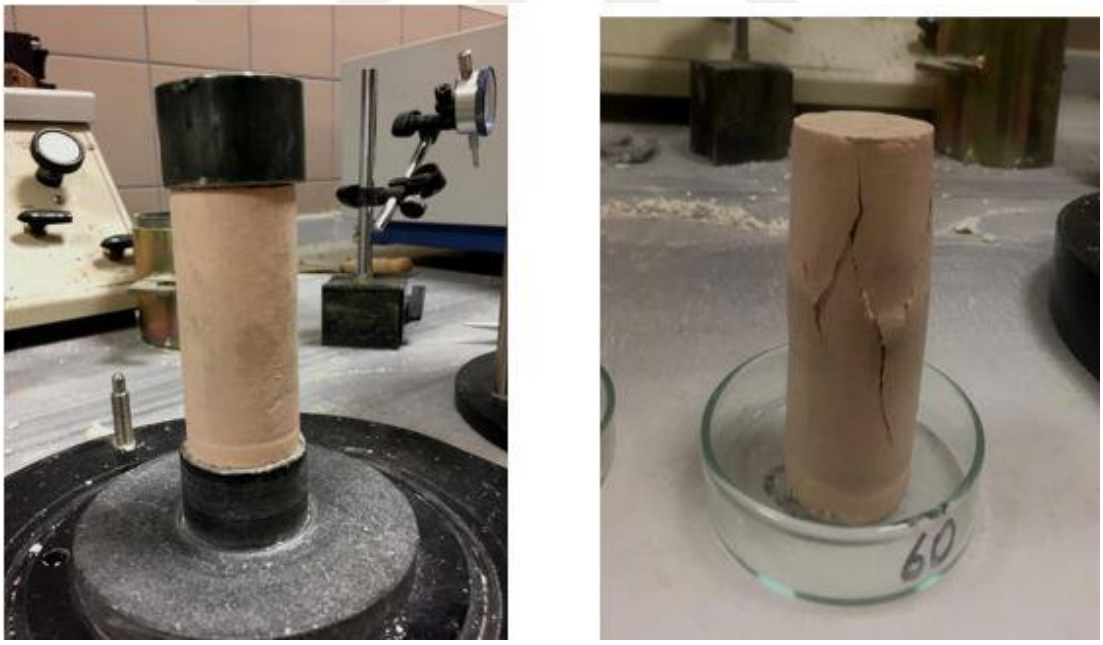
Şekil 3.11. Desikatörde bekletilen numuneler ile serbest basınç deneyinin gerçekleştirilmesi

Serbest basınç deneyi sonucunda deformasyona uğramış numuneler Şekil 3.12'de verilmiştir.




Şekil 3.12. Serbest basınç deneyinde deformasyona uğrayan bentonit kili numuneleri

Serbest basınç deneyi sonucunda deformasyona uğramış kaolin kili numuneler Şekil 3.13'de verilmiştir.




Şekil 3.13. Serbest basınç deneyi öncesi kaolin kili ve deney sırasında deformasyona uğrayan kaolin kili numuneleri

Bentonit ve kaolin killeri için ayrı ayrı hazırlanan karışım numuneleri için, serbest basınç dayanım deneyi ile 0,5 mm/ dk yükleme hızıyla kırım gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında ölçlen belirli aralıklarda zeminin yaptığı boy kısalmasına karşılık gelen üzerindeki eksenel kuvvetler okunmuştur. Kırım esnasında meydana gelen boy kısalmasının, numunenin hazırlandığı ilk boya oranı olan birim boy kısalmaları

hesaplanmıştır. Her okuma değeri alınırken, numunenin hacminin sabit kaldığı kabul edilmiş ve o anki numune kesit alanı hesaplanmıştır. Eksenel yük ile yüklenen numune, artık yük alamayacağı seviyeye kadar yüklenmiş ve bu esnada okunan en yüksek eksenel kuvvet değeri numunenin o andaki kesit alanına bölünerek gerilmeye dönüştürülmüştür. Bu sayede elde edilen birim boy kısalmasına denk gelen eksenel gerilme eğrileri çizilmiştir. Eksenel gerilmenin maximum olduğu değer numunenin serbest basınç dayanım değeri olarak alınmıştır.

# 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Zeminler, bulundukları ortamın çevre koşullarına, jeolojik yapısı ve oluşum evrelerine bağlı olarak, zemin taneciklerinin su ve hava ile farklı oranlarda birleşmesiyle oluşan, homojen olmayan malzemelerdir. Zemin enkesitinde yer alan tabakaların geoteknik özellikleri irdelendiğinde, herbir enkesitin farklı mühendislik özelliklerine sahip olduğu görülebilmektedir. Bu nedenle zemin parametrelerinin belirlenebilmesi için zemin numunelerine arazi ve laboratuvar deneyleri uygulanmaktadır. Laboratuvarda gerçekleştirelecek deneyler, arazi koşulları göz önünde bulundurularak uygun deney ortamı sağlanarak gerçekleştirilmelidir. Laboratuvar deneyleri, zeminin elastik ve elastik olmayan davranışlarının irdelenmesi, boşluk oranı,birim hacim ağırlığı, gerilme ve deformasyon gibi mühendislik özelliklerinin belirlenmesine imkan sağlamaktadır. Fakat zemin numuneleri üzerinde yapılan laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar, deneye tabii tutulan zemin numunelerinin özellikleri ile sınırlı kalmaktadır. Araziden alınan numuneler, laboratuvar ortamına getirildiklerinde örselenmenin etkisinde kalan zemin parametre değerlerini tam olarak yansıtamayabilir. Ayrıca zemin kesitinde yer alan tabakaların belirli kısımlarından numune alınmabşlmesi sebebiyle,yapılacak laboratuvar deneyleri için zeminin mühendislik özelliklerini belirlenmesinde çok sayıda numune alınarak deneylere tabii tutulmasına gerek duyulmaktadır.

Geoteknik mühendisliği açısından zeminlerin, yük altında gösterdikleri davranışlar, yapı – zemin ilişkisi bakımından oldukça önemlidir. Bu nedenle zemin numunelerinin, deformasyon, taşıma gücü, şişme-kabarma gibi hacimsel özellikleri ile birlikte su içeriklerinin belirlenebilmesi için zeminlere bir takım deneylerin tabii tutulması zorunlu kılmaktadır.

Laboratuvar çalışmalarında, doğal ortamından alınan zemin numuneleri ve temsili olarak seçilen zeminler üzerinde, gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri esnasında, deney numunelerinin segregasyona uğraması göz önünde bulundurularak tekrarlı ve çok sayıda numune hazırlanarak deneylerin gerçekleştirlmesi gerekmektedir. Ayrıca

arazi ortamı ile laboratuvar ortamının zeminin mühendislik özelliklerinin aynı olmaması sebebiyle, laboratuvar ortamında gerçekleştirlecek deneylerde kullanılacak deney aletleri uygun kalibre edilerek, titizlikle deneyler gerçekleştirilmelidir ve deney sonbuçları karşılaştırımalı olarak irdelenerek deneysel çalışmalar tamamlanmalıdır.

Bu çalışma kapsamında, yüksek plastisite özelliği gösteren bentonit kili ve düşük plastisite özelliğine sahip kaolin kili üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Zemin türleri arasında en problemli zemin olarak görülen killer üzerinde gerçekleştirlen bu çalışma ile farklı katkı oranlarında seçilen kolemanit minerali ile mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır ve deney sonuçları irdelenmiştir. Farklı plastisite özelliği gösteren iki farklı kil üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri ile kolemanit mineralinin stabilizasyon için kullanılabirliği, taşıma gücü ve su muhtevasındaki değişimlere etkisi gözlemlenmiştir. Sonrasında uygun katkı oranın belirlenmesiyle, kolemanit katkılı bentonit ve katkılı kaolin killerinin zemin özellikleri irdelenerek taşıma gücü değerleri hesaplanmıştır. Bu sayede kolemanitin yüksek ve düşük plastiiste özelliği gösteren killerin mühendislik parametreleri üzerinde gösterdiği etki kıyaslanmıştır.

Bu bölümde, saf haldeki bentonit ve kaolin killeri ile katkı maddesi kullınarak elde edilen karışım numuneleri üzerinde gerçekleştirilen laboratuvar deney sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlar dahilinde veriler analiz edilerek değerlendirmeler yapılmıştır.

### 4.1. Atterberg (Kıvam) Limitleri Bulguları ve İrdelenmesi

Zemin numunelerinin tanecikleri ile su arasındaki ilişkiyi ve su içeriklerine göre zeminin tanımlamasını yapmak amacıyla bentonit ve kaolin killeri için atterberg limit değerleri bulunmuştur.

Bentonit ve kaolin killeri için öncelikle saf halde iken likit limit değeri elde edilmiştir. Daha sonra kil miktarlarının kuru ağırlıklarınca %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit minerali ilave edilip karışım numuneleri hazırlanmıştır. Farklı oranlarda hazırlanan bentonit+ kolemanit ve kaolin+ kolemanit karışım numunelerinin atterberg deneyleri gerçekleştirlerek, atterberg limit değerleri belirlenmiştir.

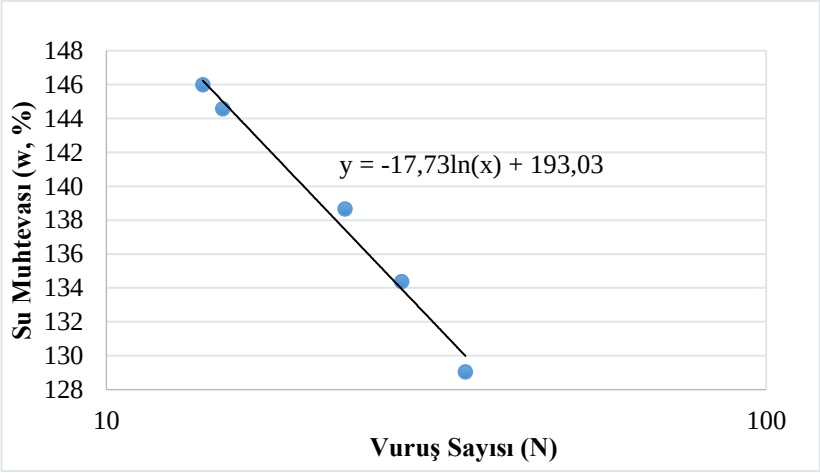
Bu çalışma kapsamında saf bentonit ve kaolin killeri ile %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit ilaveli karışım numuneleri üzerinde, belirli bir su içeriği ile kür süresine tabii tutulmasının likit limit ve plastik limit değerlerine etkisini gözlemlemek amacıyla hazırlanan karışım numuneleri için 0 günlük ve 1 günlük olmak üzere atterberg limit deneyleri yapılmıştır.

Saf bentonit ile %2, %4, %6, %8 ve %10oranlarında kolemanit katkılı bentonit kili için minimum 6 değer ile çalışılan, 12 adet 0 günlük, 12 adet 1 günlük olmak üzere 24 adet likit limit deneyi gerçekleştirilmiştir. Aynı şekilde saf bentonit ve karışım oranları ile hazırlanan bentonit kolemanit karışımlarının plastik limit değerlerinin belirlenmesi amacıyla minimum 3 değer ile çalışılan 6 adet 0 günlük, 6 adet ise1 günlük olmak üzere toplamda 12 adet plastik limit değeri elde edilmiştir.

Saf kaolin ve %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit kaolin karışımları için de aynı şekilde 0 ve 1 günlük olmak üzere 24 adet likit limit değeri ve 0 ve 1 günlük plastik limit değerlerini belirlemek amacıyla 12 adet plastik limit değeri elde edilmiştir. Bu sayede atterberg limitlerini elde etmek amacıyla karışım numuneleri üzerinde, 48 adet likit limit deneyi, 24 adet ise plastik limit deneyi yapılarak 72 adet numune ile atterberg limit değerleri bulunmuştur. Elde edilen değerler saf haldeki killer ile herbir karışım oranı için karışılaşırılmalı olarak gösterilmiştir. Bu sayede 0 günlük ve 1 günlük kür süreleri ile, kolemanit yüzdelerinin yüksek ve düşük plastisiteözelliğine sahip killer üzerindeki atterberg limit değerine etkisi saptanmıştır.

Saf bentonit ve saf kaolin killeri ile birlikte kolemanit katkılı numunelere uygulanan likit limit deney sonunda, logaritmik ölçekli vuruş sayısı- su muhtevası grafiği çizilerek grafikten 25 vuruşa karşılık gelmekte olan su içeriği belirlenerek likit limit değeri elde edilmiştir. Vuruş sayısı – Su muhtevası grafiği Şekil 4.1'deki gibidir.

Saf bentonit ve saf kaolin killeri ile kolemanit katkılı numunelerin kıvam limitleri değerlerini elde etmek amacıyla, yaş haldeki zeminin yoğrulma esnasında zemin yüzeyinde ortaya çıkan çatlakların belirlediği su içeriği olarak tanımlanan plastik limit değeri bulunmuştur. Hazırlanan homojen numunelerin yarı katı halden plastik bir hale geçtiği andaki su muhtevası değerleri plastik limit değeri olarak belirlenmiştir ve bu sayede atterberg limit değerleri elde edilmiştir. Saf bentonit ve saf kaolin için plastik limit değerlerinin bulunması Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

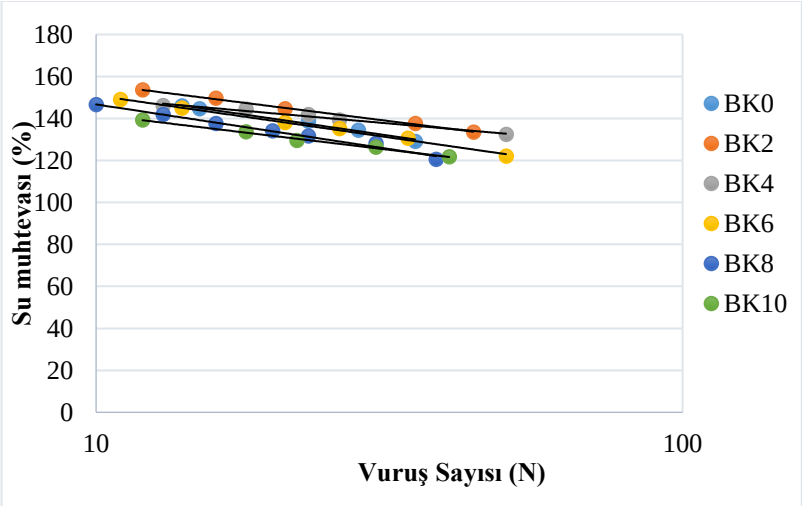



Şekil 4.1. Likit limit değerinin logaritmik gösterimi

Tablo 4.1. Saf bentonit kili plastik limit değeri

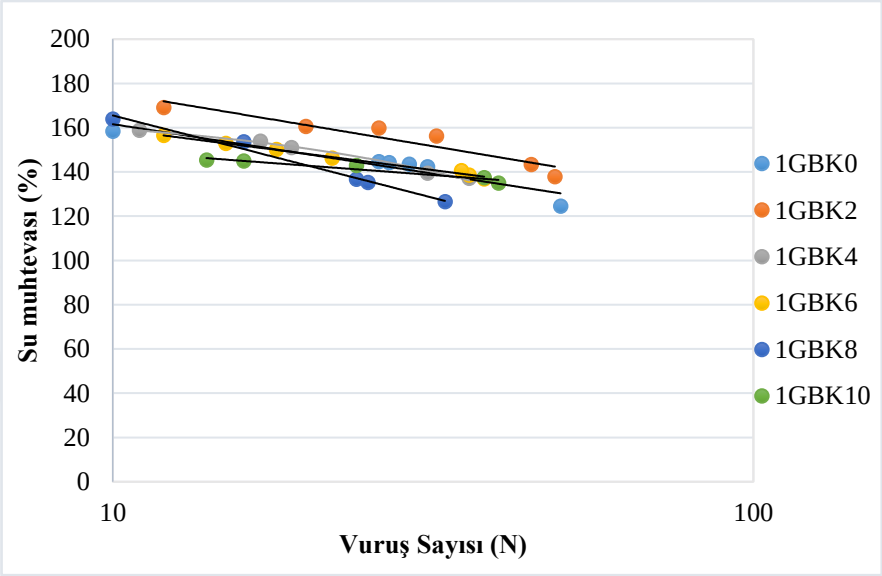
| Kap No | $W_{kap}$ | $W_{yaş+kap}$ | $W_{kuru+kap}$ | $W_{kuru}$ | $W_{yaş}$ | $W_w$ | $W_p$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 13 | 34,92 | 40,23 | 38,18 | 3,26 | 5,31 | 2,05 | 62,88 |
| 126 | 35,02 | 40,47 | 38,44 | 3,42 | 5,45 | 2,03 | 59,36 |
| 98 | 35,40 | 40,09 | 38,31 | 2,91 | 4,69 | 1,78 | 61,17 |
| | | | | | | $W_P$ | 61,14 |

Likit limit zemin numunelerinin sıvı halden plastik hale geçtiği, plastik limit ise zemin numunelerinin plastik halde iken yarı katı hale geçtiği sınır değerlerdir. Atterberg limitleri ile elde edilen zeminin plastik durumunun geçerli olduğu su içeriği, plastisite indisi bulunmuştur. Saf bentonit ile bentonit kolemanit karışım numunelerinin anlık likit limit değerleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir.




Şekil 4.2. Saf bentonit ile bentonit kolemanit karışım numunelerinin anlık likit limit değerleri

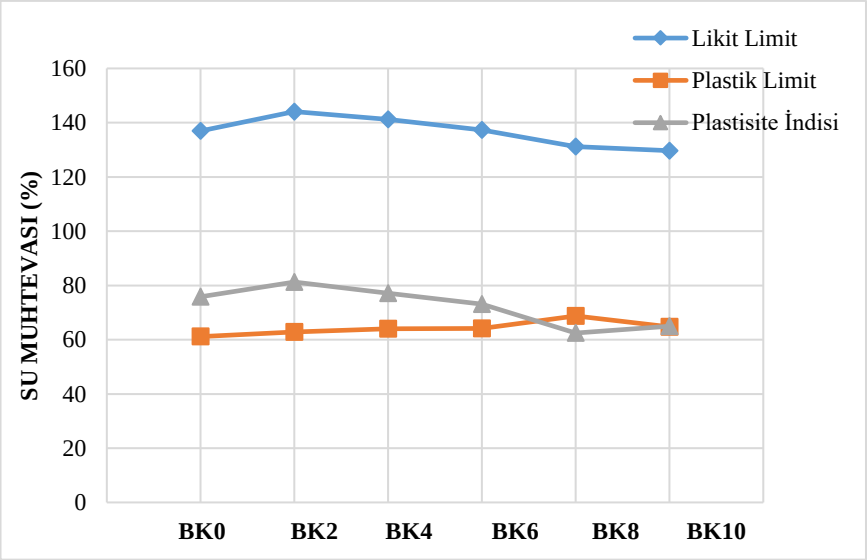
Şekilde görüldüğü gibi saf bentonit kiline %2, %4 ve %6 oranlarında kolemanit ilave edilmesiyle likit limit değerinin arttığı, %8 değerinden sonra %8 ve %10 kolemanit katkılı bentonit kilinin likit limit değerinin azaldığı görülmektedir. Saf bentonit ile bentonit kolemanit karışım numunelerinin 1 günlük likit limit değerleri Şekil 4.3'de gösterilmiştir.




Şekil 4.3. Saf bentonit ile bentonit kolemanit karışım numunelerinin 1 günlük likit limit değerleri

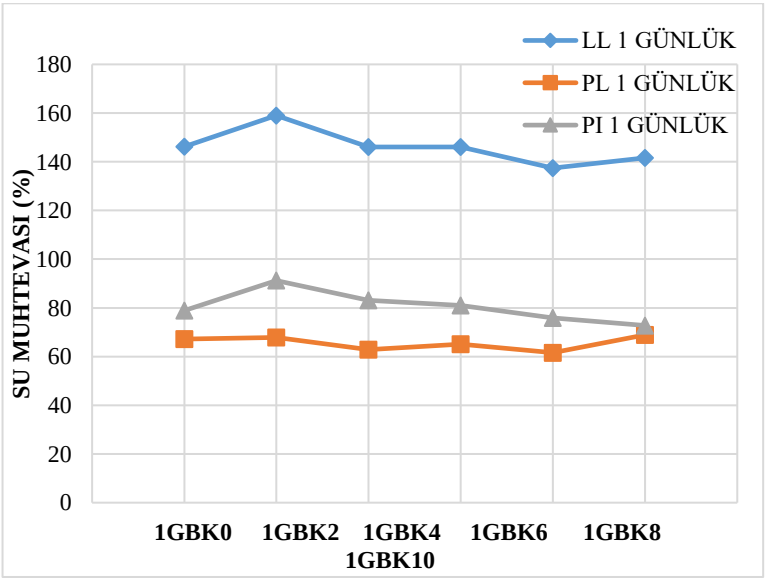
Saf bentonit kili ile kolemanit katkılı karışım oranları ile hazırlanan numuneler 1 günlük kür sürelerine bırakıldığında likit limit değerlerinin tüm oranlarda arttığı görülmektedir. 1 günlük kür süresinde kalan numuneler bentonit kilinin sus tutma özelliğinden dolaı kür süresi boyunca daha fazla suyu içersine almaktadır. Şekilde görüldüğü üzere 1 günlük kür süresinde bekletilen karışım numunelerinin likit limit değeri %2, %4 ve %6 kolemanit katkılı numunelerde artış göstermiştir. Anlık olarak gerçekleştirlen likit limit deneyi verilerinde olduğu gibi 1 günlük bekletilen karışım numunelerinde de %8 ve %10 bentonit+ kolemanit numunelerinin likit limit değerinin azaldığı görülmektedir. Saf bentonit ile bentonit kolemanit karışım numunelerine ait anlık likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri Şekil 4.4.'de gösterilmiştir.

Şekilde görüldüğü üzere saf bentonit kiline yukarıda tabloda verilen oranlarda kolemanit ilave edilmesiyle numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri saptanmıştır.




Şekil 4.4. Saf bentonit ile bentonit kolemanit karışım numunelerine ait anlık likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri

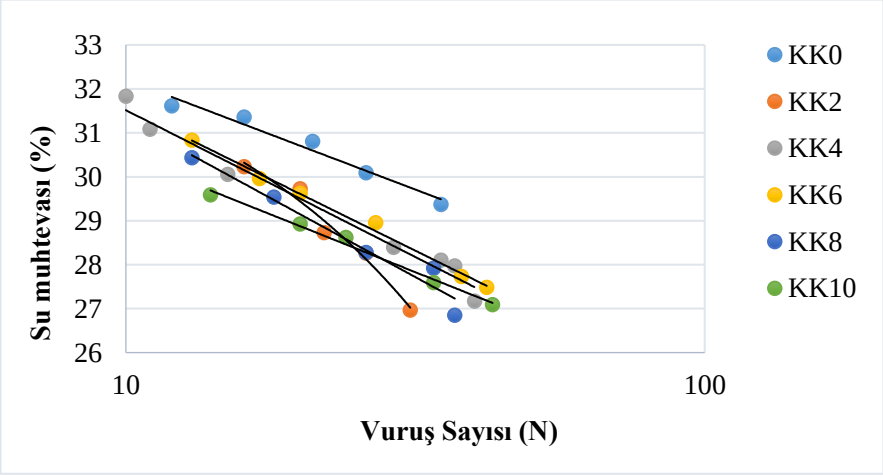
Bentonit kiline, %2, %4 ve %6 oranlarında kolemanit ilave edilmesiyle likit limit değeri artarmaya başlarken, plastik limit değeri ise %2 ve %4 karışım oranlarında arttığı görülmektedir. %6 kolemanit ilaveli numunelerde likit limit değeri artmaya devam ederken plastik limit değerinin azalmaya başladığı ve plastik limit değerinin %8 ve %10 oranlarında da azalmaya devam ettiği görülmektedir. Saf bentonit ile bentonit kolemanit karışım numunelerine 1 günlük likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri Şekil 4.5.'de verilmiştir.




Şekil 4.5. Saf bentonit ile bentonit kolemanit karışım numunelerine 1 günlük likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri

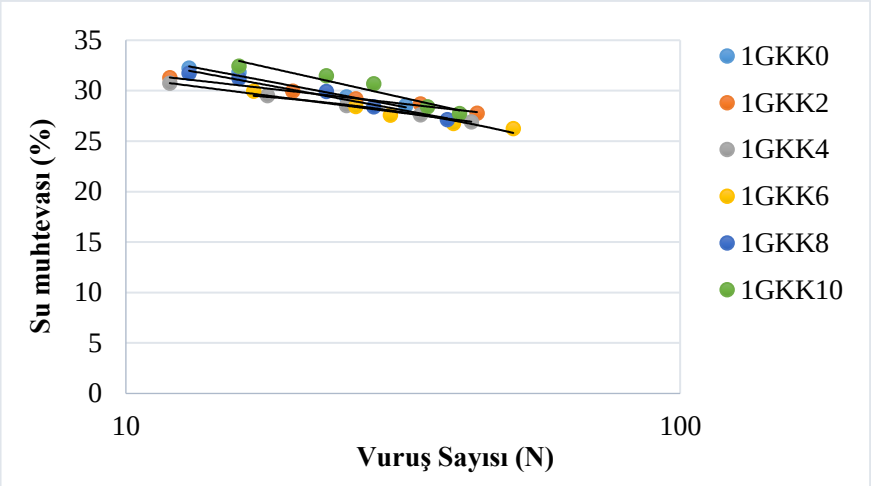
Şekilde görüldüğü üzere 1 günlük beklenen numuneler üzerinde elde edilen kıvam limitleri değerleri verilmiştir. Anlık gerçekleştirlen likit limit değerlerinde olduğu gibi 1 günlük bekletilen numuneler üzerinde gerçekleştirlen numuneler için elde edilen likit limit değerlerinin %2,54 ve %6 oranlarında arttığı, %8 ve %10 oranlarında azalmaya başladığı görülmektedir. Ancak 1 günlük bekletilen karışım numunelerinin plastik limit değerinin, anlık olarak elde edilen plastik limit verilerinden farklı olarak %2, %4 ve %6 oranlarına kadar artmaya başladığı, 58 ve %10 oranlarında kolemanit ilaveli numunelerin plastik limit değerinin azaldığı görülmektedir.

Likit limit ve plastik limit değerine bağlı olarak, anlık olarak elde edilen deney verilerinden yola çıkılarak bentonit kiline %2, %4 kolemanit ilave edilmesiyle plastisite indisi değerinin azaldığı görülmektedir. bentonit kiline %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit ilave edilmesiyle plasti limit değerinin azaldığı ve plastik limit değerinin minimum olduğu oranın %8 olduğu görülmektedir. Bentonit kilinde meydana kıvam limitleri değerlerindeki değişim, bentonit kilinin %6,%8 ve %10 oranlarında kolemanit ilave edilmesiyle plastik halden sert hale geçtiği bu nedenle mukavemet değerinin artması öngürülmektedir. Saf kaolin ile kaolin kolemanit karışım numunelerinin anlık likit limit değerleri Şekil 4.6'da verilmiştir.



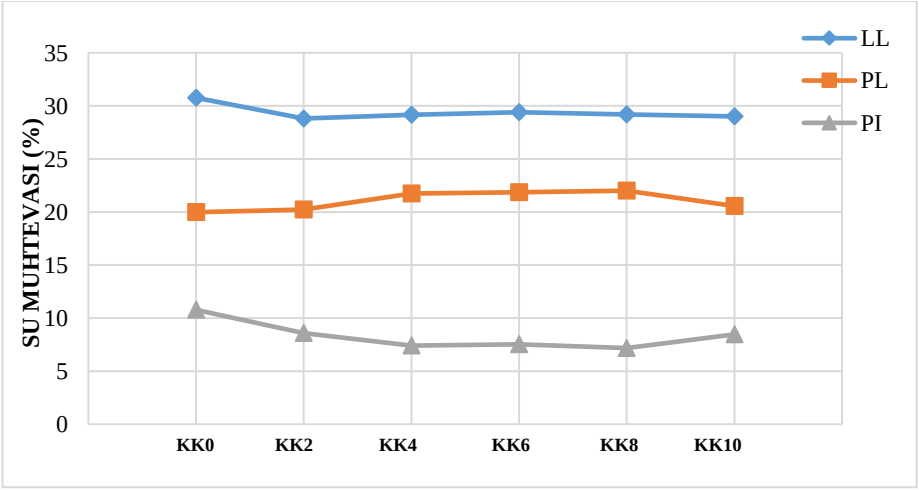

Şekil 4.6. Saf kaolin ile kaolin kolemanit karışım numunelerinin anlık likit limit değerleri

Şekilde görüldüğü üzere kaolin kiline, %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit ilave edilmesiyle likit limit değerinin çok az miktarda azaldığı görülmektedir.




Şekil 4.7. Saf kaolin ile kaolin kolemanit karışım numunelerinin 1 günlük likit limit değerleri

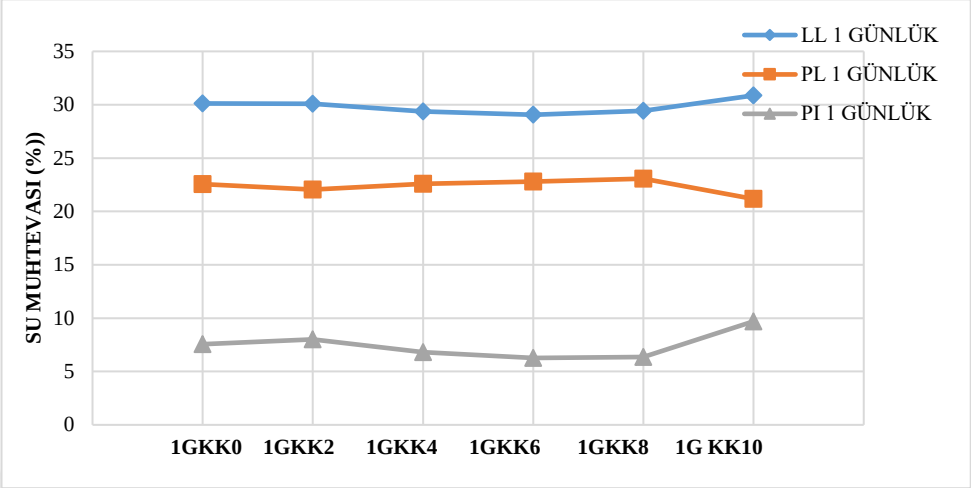
Bir günlük kür süresine tabi tutulan kaolin kiline, %2,%4, %6 ve %8 oranlarında kolemanit lave edilmesiyle likit limit değerinin anlık kaolin kili likit limit değerlerinde görüldüğü gibi çok az seviyede azaldığı görülmektedir. Kaolin kiline ağırlığınca %10 kolemanit ilave edilmesiyle likit limit değerinin az miktarda arttığı görülmektedir. Saf kaolin ile kaolin kolemanit karışım numunelerine anlık likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri Şekil 4.8.'de verilmektedir.




Şekil 4.8. Saf kaolin ile kaolin kolemanit karışım numunelerine anlık likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri

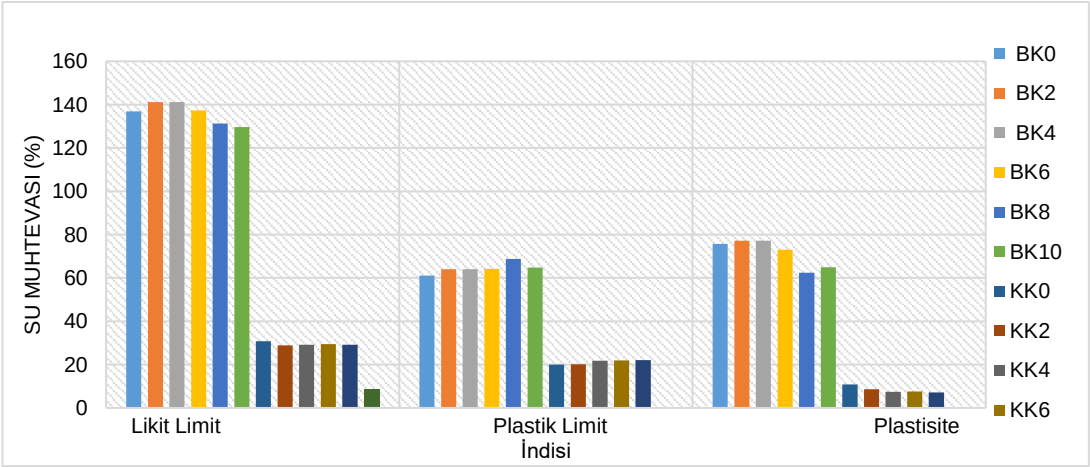
Şekil 4.9'da görüldüğü üzere kaolin kiline %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit ilave edilmesiyle saf kaolin kiline göre likit limit, plastisite indisi değerlerinin azaldığı ve plastik limit değerinin arttığı görülmektedir. Bu sebeple kaolin kiline farklı karışım oranlarda kolemanit minerali ilave edilmesi ile ufak değerlerde

değişen kıvam limit değerlerine bakılarak, kaolinin kiline kolemanit ilavesiyle mukavemet özelliklerini az miktarda da olsa arttıracağı düşünülmektedir.




Şekil 4.9. Saf kaolin ile kaolin kolemanit karışım numunelerine 1 günlük likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri

1 günlük kür süresine tabi tutulan kaolin kili ve farklı karışım oranlardaki numunelere bakıldığında, kaolin kiline %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit eklenmesi kaolinin plastik limit değerini arttırdığı %2 oranında ise plastik limit değerinin arttığı görülmektedir. Likit limit ve plastik limit değerlerinden faydalanılarak, şekilde görüldüğü üzere, kaolin kiline %2, %4, %6 ve %10 oranlarında kolemanit ilave edilmesiyle plastisite indisinin azaldığı, %2 ve %10 oranlarında ise plastisite indisi değerinin arttığı görülmektedir. Bentonit ve kaolin killerinin kolemanit ilaveli anlık kıvam limitleri değerleri Şekil 4.10'da verilmiştir.

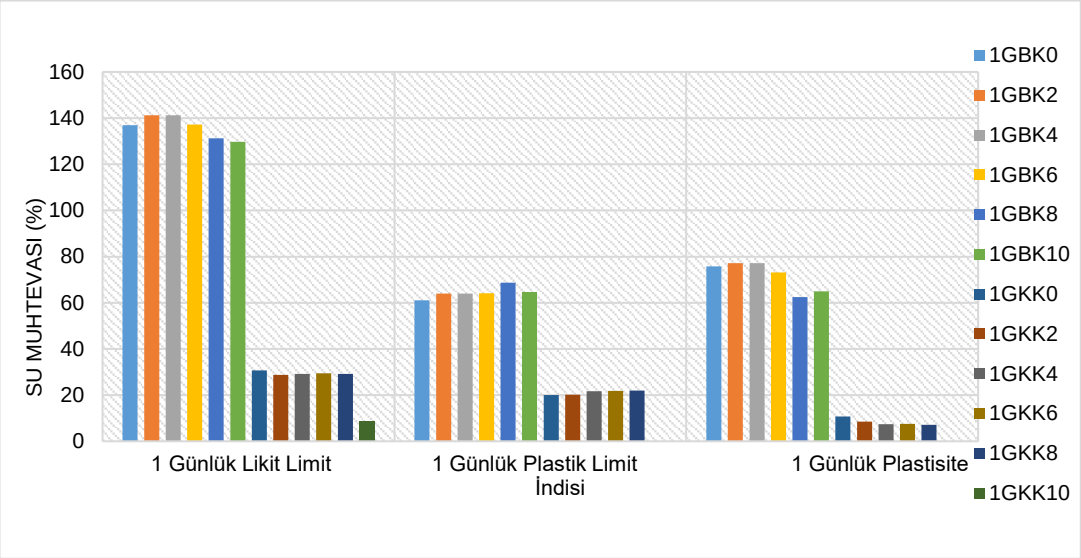



Şekil 4.10. Bentonit ve kaolin killerinin kolemanit ilaveli anlık kıvam limitleri değerleri

Şekilde görüldüğü üzere bentonit ve kaolin killerine belirli oranlarda kolemanit ilave edilmesiyle likit limit, plastik limit ve plastiiste indisi değerlerinde değişimler gözlemlenmektedir. Fakat kıvam limitlerindeki değer değişimleri bentonit ve kaolin killeri için farklı yüzdelerde gerçekleşmiştir.

Yüksek plastiiste özelliğine sahip bentonit kilinin %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit ilave edilmesiyle kıvam limitlerindeki değişim, kaolin kiline %2, %4, %6, %8 ve %10 kolemanit ilave edilmesiyle gözlenen kıvam limit değerlerinden oldukça fazladır.

Kaolin kilinin düşük plastisite özelliği göstermesi, bentonit kiline oranla kıvam limit değerlerindeki değişim yüzdesinin az olmasına sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Bentonit ve kaolin killerinin kolemanit ilaveli 1 günlük kıvam limitleri değerleri Şekil 4.11.'de verilmiştir.




Şekil 4.11. Bentonit ve Kaolin killerinin kolemanit ilaveli 1 günlük kıvam limitleri değerleri

Şekilde görüldüğü gibi bentonit kiline ve kailin kiline belirli oranlarda kolemanit ilavesiyle elde edilen numunelerin 1 günlük kür süresine tabi tutulmasıyla kıvam limit değerlerindeki değişim verilmiştir. Bentonit kili ve %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit ilave edilmesiyle elde edilen kıvam limitleri değerleri, kaoilin kiline %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolamanit ilave edilmesiy ile elde edilen kıvam limitleri değerinden oldukça fazla olduğu görülmektedir. 1 günlük kür süresine tabi tutulan karışım numuneleri bentonit kili için farklı oranlarda kıvam limit

değerlerinde fark edilir değişim olduğu gözlenirken, kaoilin kili ile hazırlanan karışım numunelerinin 1 günlük kür süresine bırakılmasıyla elde edilen kıvam limit değerlerinde ise anlık gerçekleştirilen deney sonuçlarına kıyasla büyük bir fark olmadığı gözlemlenmiştir.

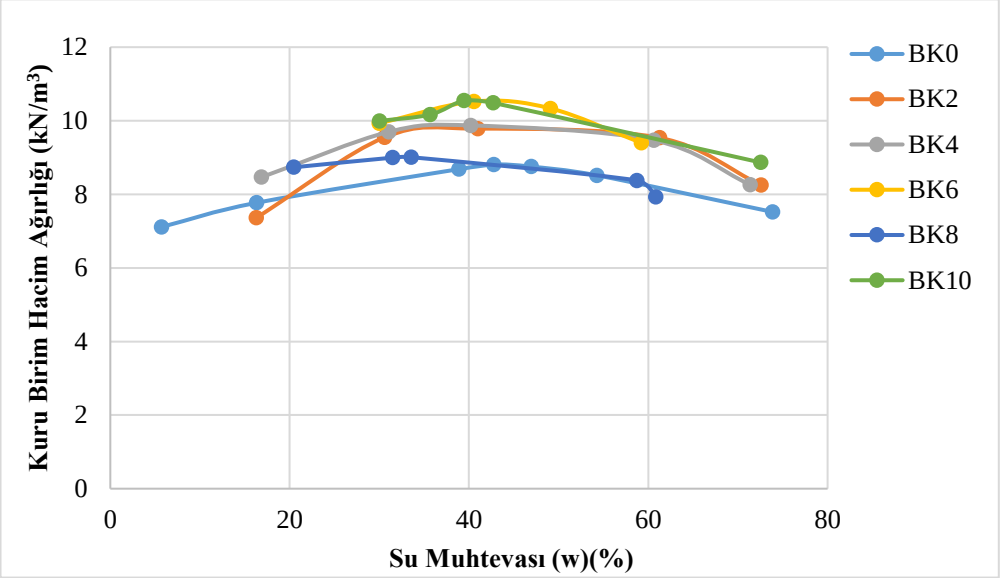
### 4.2. Kompaksiyon Deneyi Bulguları ve İrdelenmesi

Proctor deneyi olarak da bilinen kompaksiyon deneyi, maksimum sıkıştırmanın gerçekleştirldiği su içeriğini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmektedir. İlk olarak standart kompaksiyon deney aleti kullanılarak saf haldeki bentonit ve kaolin killerinin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri bulunmuştur. Kompaksiyon deneyi için yaklaşık 3 kg numune alınarak, belirli oranlarda su eklenmesiyle homojen karışımlar oluşturulduktan sonra, her tabakada 25 vuruş olacak şekilde 3 tabakada deneyler minimum 5 kere tekrarlanmıştır.

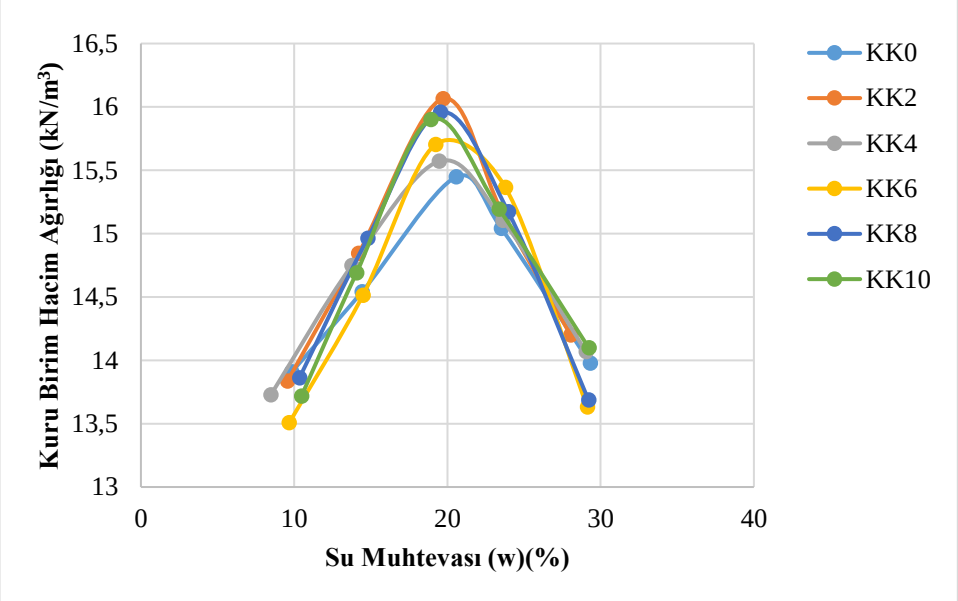
Saf bentonit ve saf kaolin ile birlikte %2,%4,%6, %8 ve %10 oranlarında hazırlanan kolemanit katkılı numuneler için minyatür proctor aleti ile sıkıştırılıp optimum su muhtevası ve optimum su muhtevası değerine karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri bulunmuştur. Minyatür proctor aleti ile yapılan sıkıştırma işlemlerinde gerekli hesaplar yapılarak herbir tabakada 24 vuruş olmak üzere 3 tabaka halinde sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı su oranları ile minimum minimum 5 kez sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir bu sayede zemin numunelerine ait su muhtevası- kuru birim hacim ağırlık değerleri ile kompaksiyon eğrisi grafiği çizilmiştir. Saf bentonit ve bentonit kolemanit ilaveli karışım numunelerinin kompaksiyon deney sonuçları Şekil 4.12'de verilmiştir.

Şekil 4.13.'de görüldüğü gibi bentonit kiline farklı oranlarda kolemanit ilave edilmesiyle optimum su içeriği değeri (%) ve kuru birim hacim ağırlık ($kN/m^3$) değerleri saptanmıştır. Kompaksiyon eğrisi incelendiğinde, bentonit kiline %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit ilave edilmesiyle saf bentonite göre kuru birim hacim ağırlıklarında artma, optimum su içeriklerinde ise azalma olduğu görülmektedir. Bentonit kiline kolemanit ilave edilmesiyle, kolemanitin bentonit içerisindeki suyu içine almayıp optimum su içeriğini azalttığı ve buna bağlı olarak maksimum kuru birim hacim ağırlık değerini arttığı görülmektedir. Bentonit kiline %8 oranında

kolemanit eklenmesi ile elde edilen %33,559 su içeriği değeri ile diğer oranlara kıyasla optimum su içeriğinin en çok azaldığı değer olduğu görülmektedir.




Şekil 4.12. Saf bentonit ve bentonit kolemanit ilaveli karışım numunelerinin kompaksiyon deney sonuçları

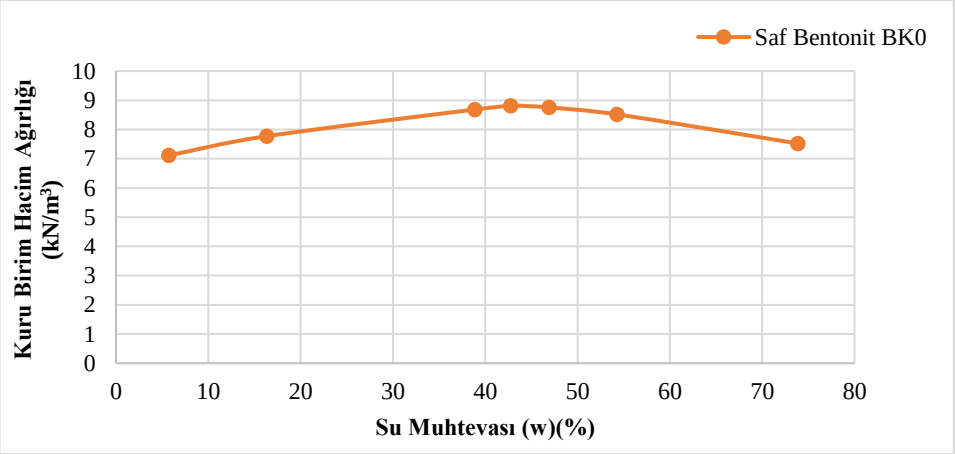



Şekil 4.13. Saf kaolin ve kaolin kolemanit ilaveli karışım numunelerinin kompaksiyon deney sonuçları

Kaolin kiline ait kompaksiyon eğrisinde görüldüğü gibi kailin kiline farklı oranlarda kolemanit ilave edilmesiyle optimum su içeriği değeri (%) ve kuru birim hacim ağırlık (kN/m$^3$) değerleri saptanmıştır. Kompaksiyon eğrisi incelendiğinde, kaolin kiline %2,

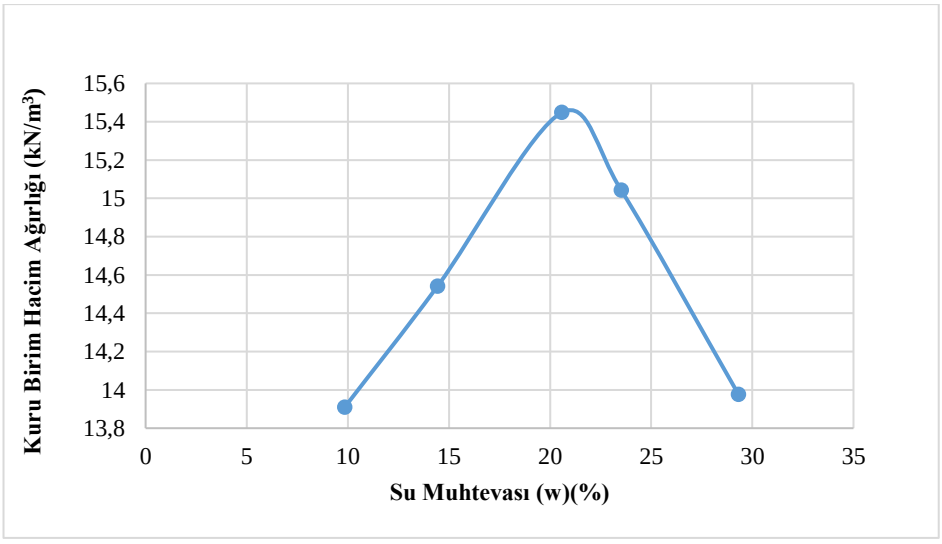
%4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit ilave edilmesiyle saf kaolin kiline kıyasla maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında artma, optimum su içeriklerinde ise azalma olduğu görülmektedir.

Kaolin kiline ait kompaksiyon eğrisi incelendiğinde, optimum su içeriğinin %20,578, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin ise 15,447 (kN/m$^3$) olduğu görülmektedir. Kaolin kiline %2, %4, %6, %8 ve %10 kolemanit ilave edilmesiyle su içeriğinin başlangıç değerine göre azalma yüzdesi bentonit kiline oranla oldukça küçük olduğu görülmektedir. Şekil 4.14.'de saf bentonit kilinin kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir.



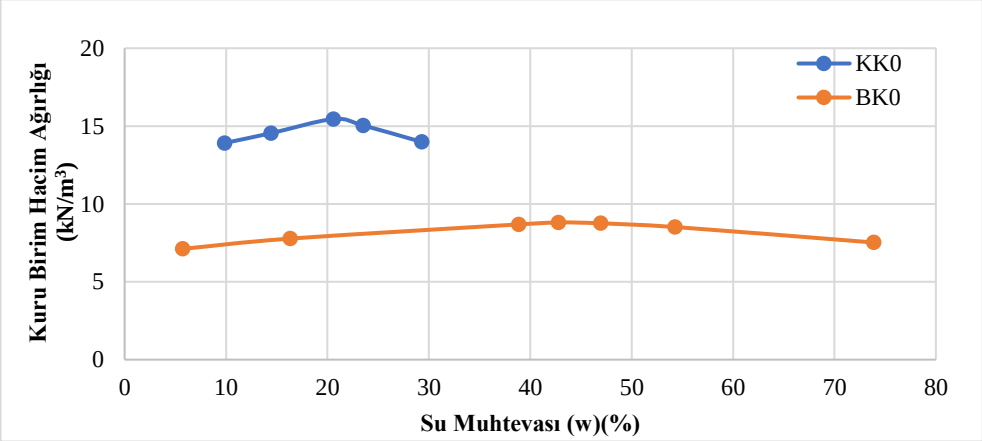

Şekil 4.14. Saf bentonit kilinin kompaksiyon eğrisi

Şekil 4.15.'de kaolin kilinin kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir.



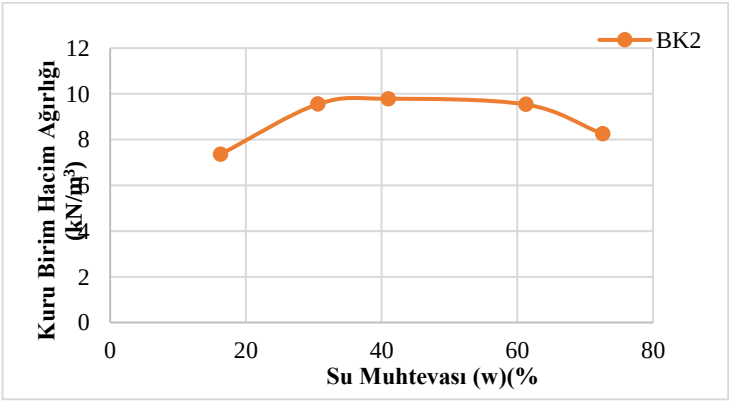

Şekil 4.15. Kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi

Şekil 4.16.'da saf bentonit ve kaolin killerinin birleştirilmiş kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir.



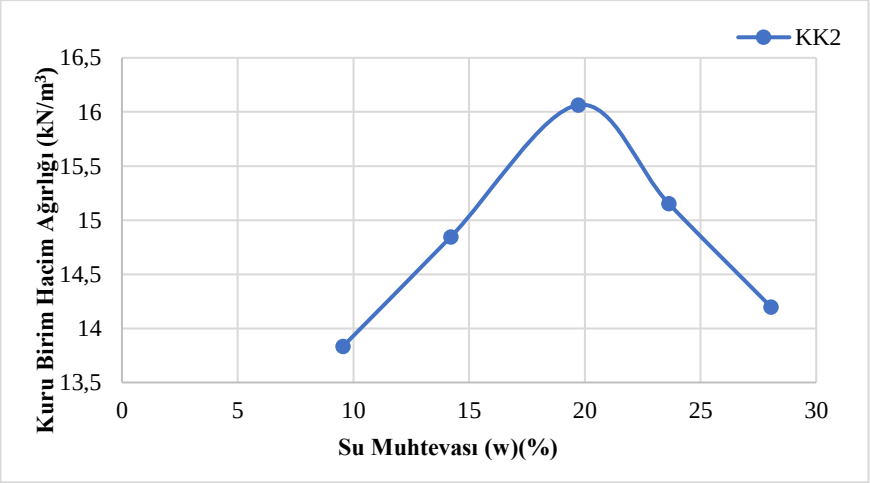

Şekil 4.16. Saf bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi

Bentonit ve kaolin killerine ait kompaksiyon eğrisi şekilde görüldüğü gibidir. Bentonit kilinin kompaksiyon eğrisi değerleri irdelendiğinde, optimum su muhtevası değerinin %42,779 ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin ise 8,81 (kN/m3) olduğu görülmektedir. Kaolin kilinin kompaksiyon eğrisi grafiğine bakıldığında ise optimum su muhtevası değerinin %20,578 olduğu ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin 15,447 (kN/m3) olarak saptandığı görülmektedir. Bnetonit ve kaolin kiline ait kompaksiyon eğrisine bakıldığında bentonit kilinin su içeriğinin kaolin kiline kyasla oldukça fazla bir değerde olduğu görülmektedir. Bentonit kilinin optimum su muhtevası (%) değerinin kaolin kiline kıyasla fazla olmasının yanı sıra, maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m3) değerinin ise az olduğu görülmektedir. Şekil 4.17.'de %2 kolemanit ilaveli bentonit kilinin kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir.



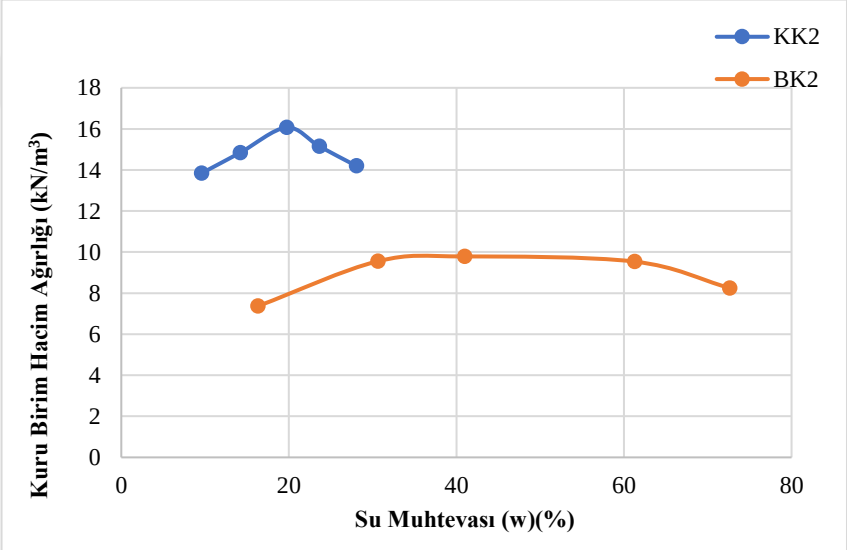

Şekil 4.17. %2 kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi

Şekil 4.18.'de %2 kolemanit ilaveli kaolin kilinin kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir.




Şekil 4.18. %2 kolemanit ilaveli kaolin kilinin kompaksiyon eğrisi

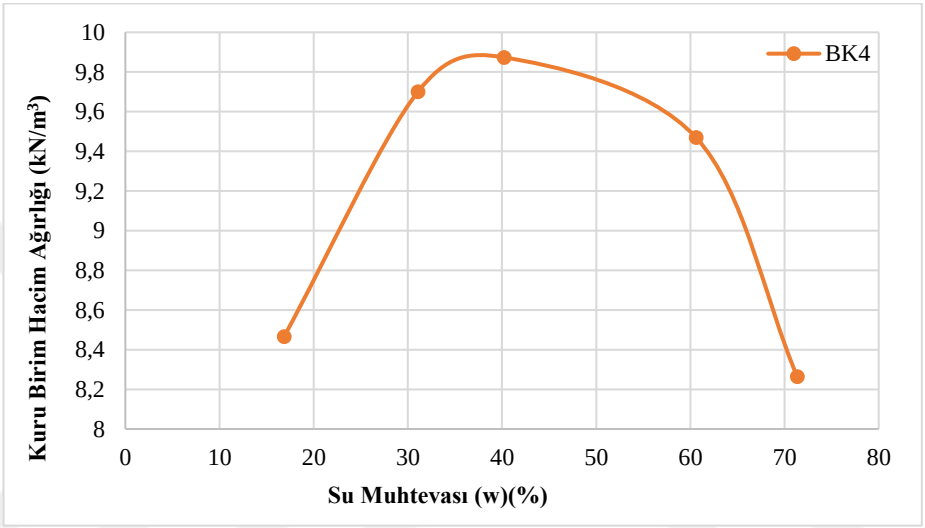
Şekil 4.19.'da %2 kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir.




Şekil 4.19. %2 kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi

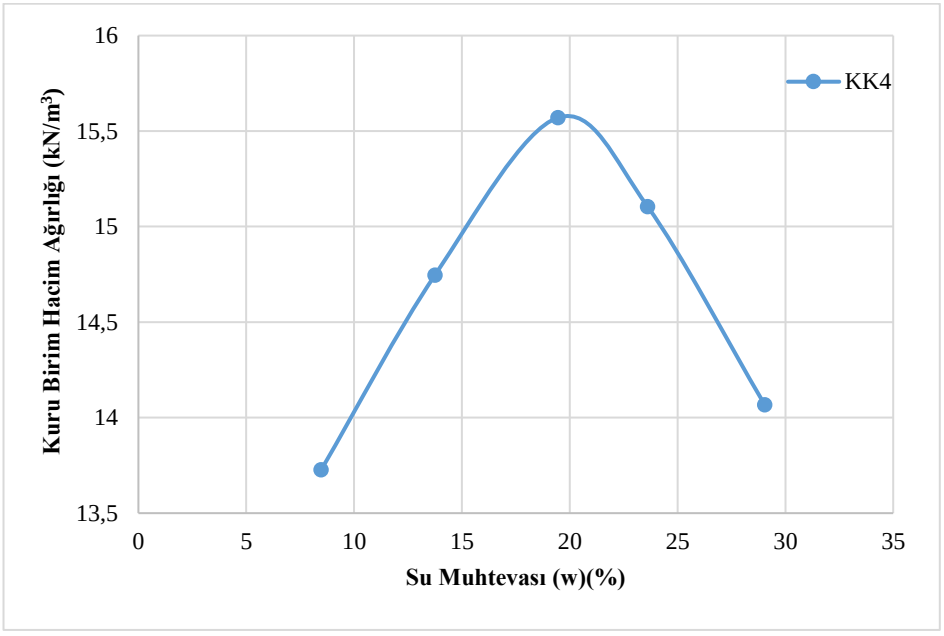
Bentonit ve kaolin killerine %2 kolemanit ilave edilmesiyle elde edilen komapaksiyon eğrisi şekildeki gibidir. her iki kilin kompaksiyon eğrisi değerlerine bakıldığında %2 kolemant ilave edilmesiyle optimum içeriği (%) değerlerinin azaldığı, maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının (kN/m$^3$) ise arttığı görülmektedir. Bentonit ve kaoilin killerine %2 kolemanit ilave edilerek hazırlanan numuneler üzerinde elde edilen değerlere bakıldığında, bentonit kiline ait su muhtevası değerinin %2 kolemanit ilave

edilmesiyle %40,972 olduğu ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının ise 9,786 (kN/m$^3$) olduğu görülmektedir. Kaolin kiline %2 oranında kolemanit ilave edilmesiyle, optimum su muhtevasının %19,712 ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin ise 16,064 (kN/m$^3$) olduğu görülmektedir. Bu sayede %2 kolemanit katkısının her iki kilin su içeriği değerinin saf haldeki değerlerine kıyasla azalttığı, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin ise arttırdığı görülmektedir. Şekil 4.20.'de %2 kolemanit ilaveli bentonit kilinin kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir.



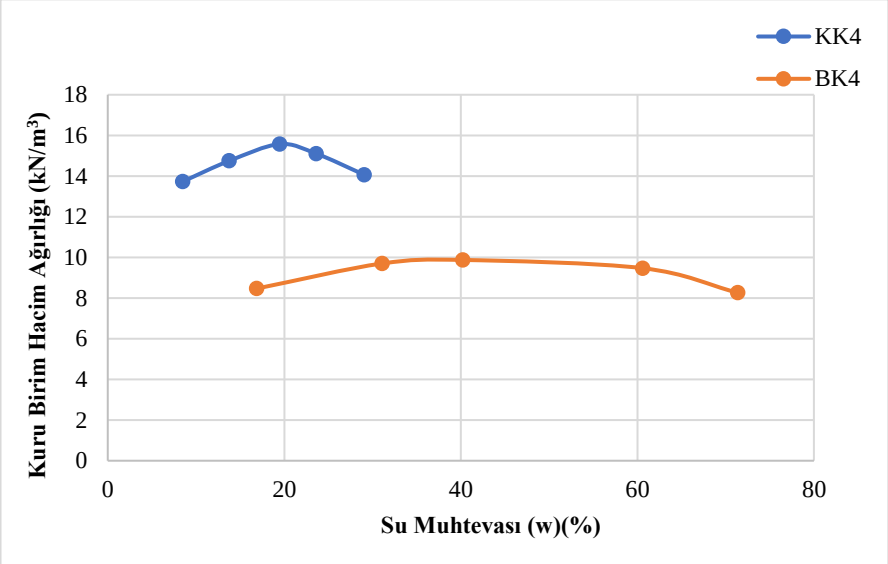

Şekil 4.20. %4 kolemanit ilaveli bentonit kilinin kompaksiyon eğrisi

Şekil 4.21.'de %4 kolemanit ilaveli kaolin kilinin kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir.



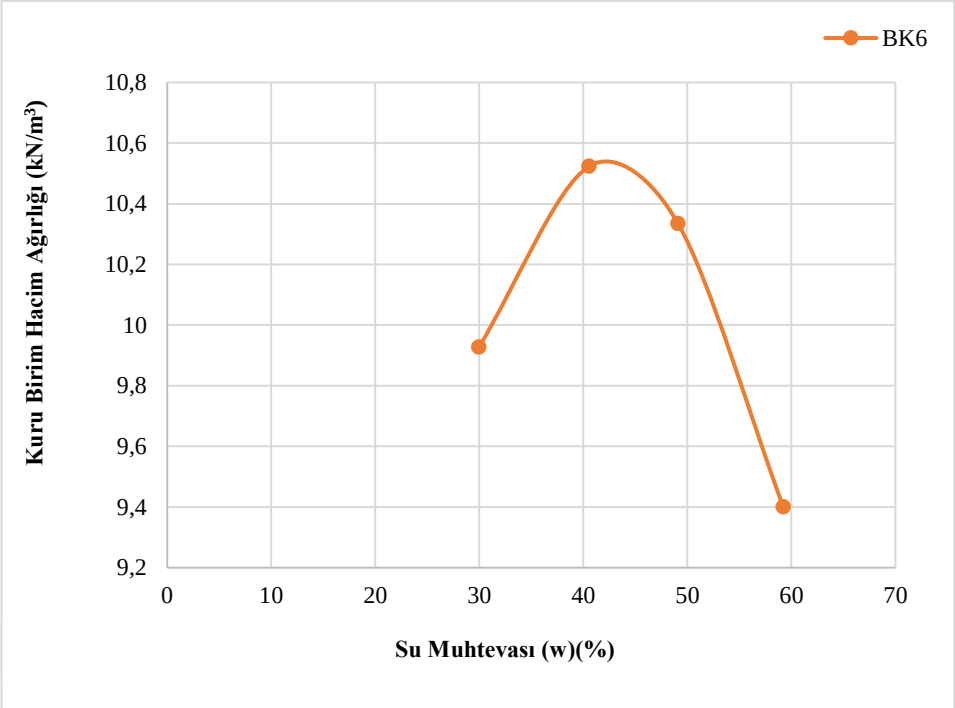

Şekil 4.21. %4 kolemanit ilaveli kaolin kilinin kompaksiyon eğrisi

Şekil 4.22.'de %4 kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir.

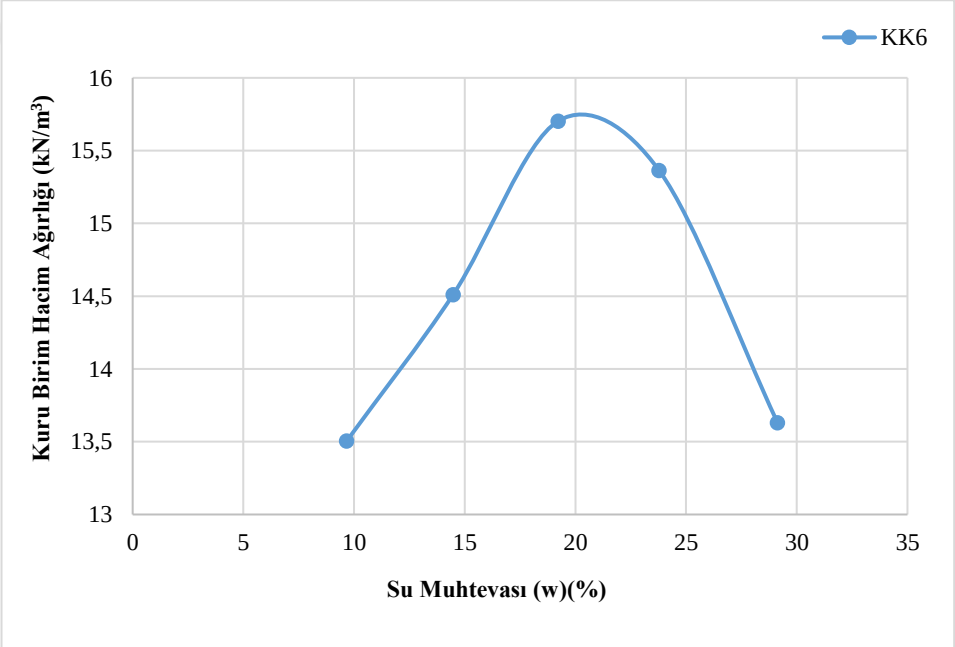



Şekil 4.22. %4 kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi

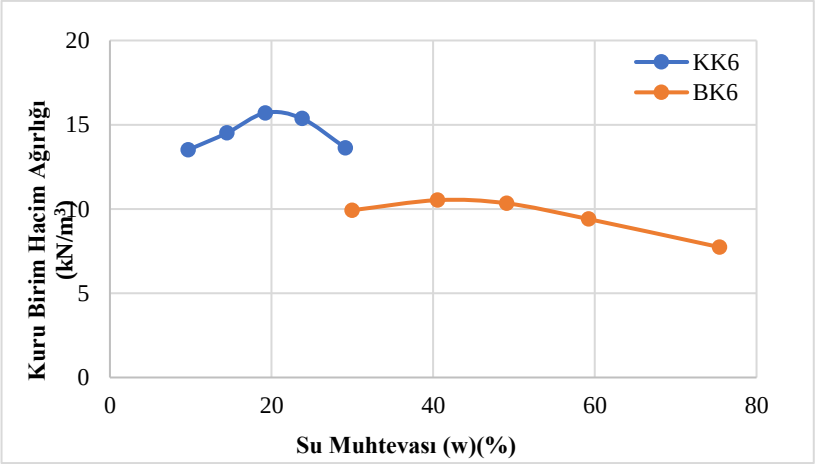
Şekilde görüldüğü üzere bentonit ve kaolin killerine ait kompaksiyon eğrisi değerlerine bakıldığında %4 kolemant ilave edilmesiyle optimum içeriği (%) değerlerinin azaldığı, maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının (kN/m3) ise arttığı saptanmaktadır. Bentonit ve kaoilin killerine %4 kolemanit ilave edilerek hazırlanan numuneler üzerinde elde edilen değerlere bakıldığında, bentonit kiline ait su muhtevası değerinin %4 kolemanit ilave edilmesiyle %40,207 ve maksimum kuru birim hacim ağırlığının ise 9,873 (kN/m3) olduğu görülmektedir. Kaolin kiline %4oranında kolemanit ilave edilmesiyle, optimum su muhtevasının %19,460 ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin ise 15,570 (kN/m3) olduğu görülmektedir. Bu sayede %4kolemanit katkısnın her iki kilin su içeriği değerinin saf haldeki değerlerine kıyasla azalttığı, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin ise arttırdığı görülmektedir. Şekil 4.23.'de %6 kolemanit ilaveli bentonit kilinin kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 4.24.'de %6 kolemanit ilaveli kaolin kilinin kompaksiyon eğrisi, Şekil 4.25.'de ise %6 kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir.




Şekil 4.23. %6 kolemanit ilaveli bentonit kilinin kompaksiyon eğrisi

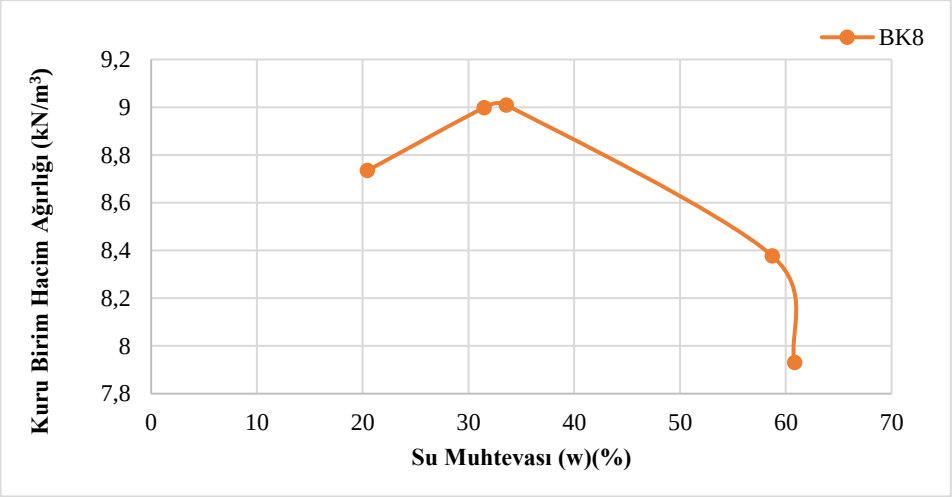



Şekil 4.24. %6 kolemanit ilaveli kaolin kilinin kompaksiyon eğrisi



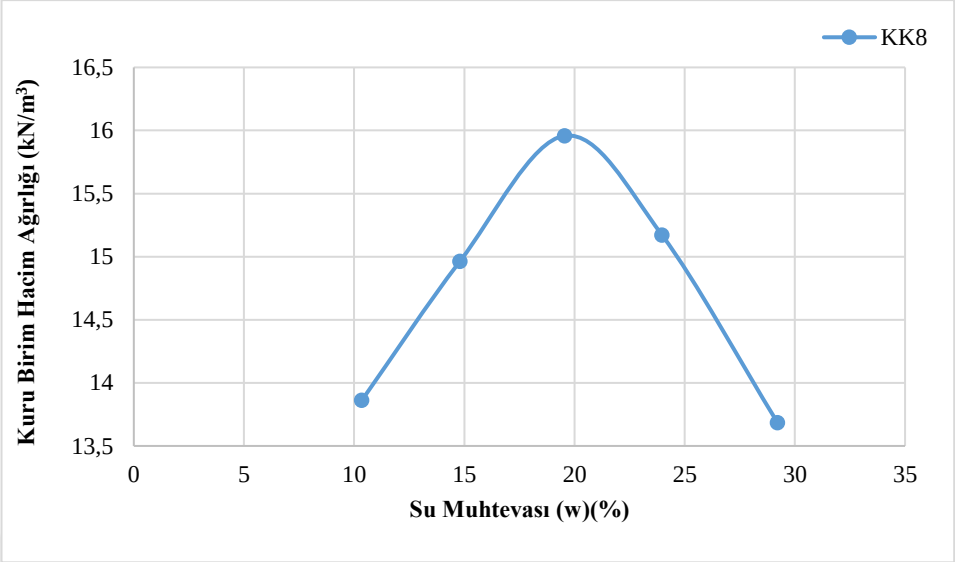

Şekil 4.25. %6 kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi

Bentonit ve kaolin killerine %6 kolemanit katkısı ilave edildiğinde elde edilen değerler şekilde görüldüğü gibidir. Bentonit kiline %6 kolemanit katkısı ilave edildiğinde optimum su içeriği değerinin %40,538 olduğu ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin 10,523 (kN/m$^3$) olduğu görülmektedir. Kaolin kiline %6 kolemanit katkısı ilave edildiğinde optimum su içeriği değerinin %19,224 olduğu ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin 15,703 (kN/m$^3$) olduğu kompaksiyon eğrisi grafiğine bakılarak saptanmıştır. Kompaksiyon eğrisi değerleri irdelendiğinde, bentonit ve kaolin killerine ait kompaksiyon eğrisi değerlerinin %6 kolemant ilave edilmesiyle optimum içeriği (%) değerlerinin azaldığı, maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının (kN/m$^3$) ise arttığı saptanmaktadır. Şekil 4.26.'da %8 kolemanit ilaveli bentonit kilinin kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir.



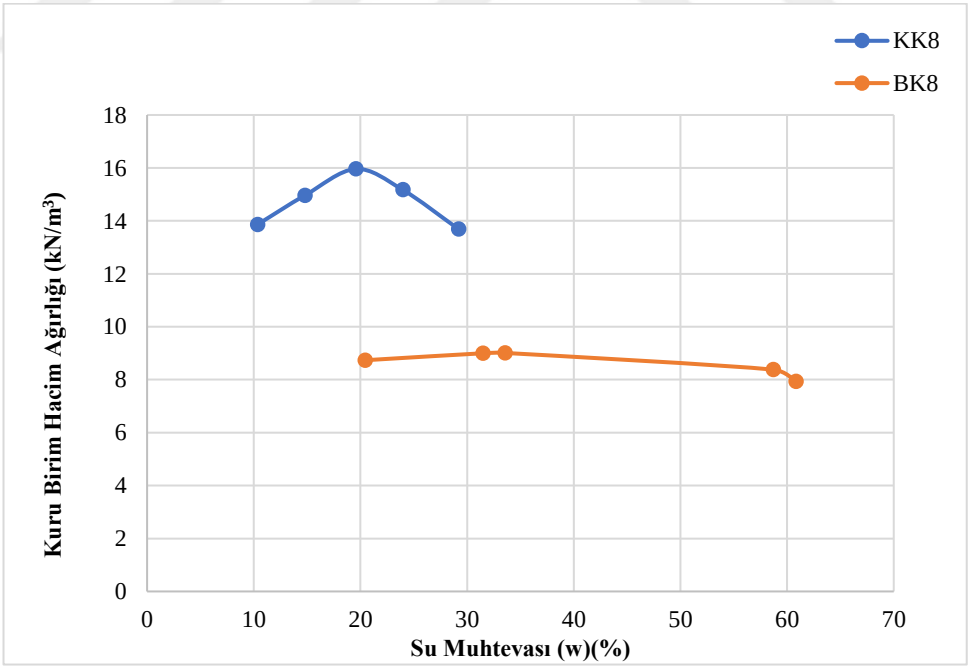

Şekil 4.26. %8 kolemanit ilaveli bentonit kilinin kompaksiyon eğrisi

Şekil 4.24.'de %8 kolemanit ilaveli kaolin kilinin kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir.




Şekil 4.27. %8 kolemanit ilaveli kaolin kilinin kompaksiyon eğrisi

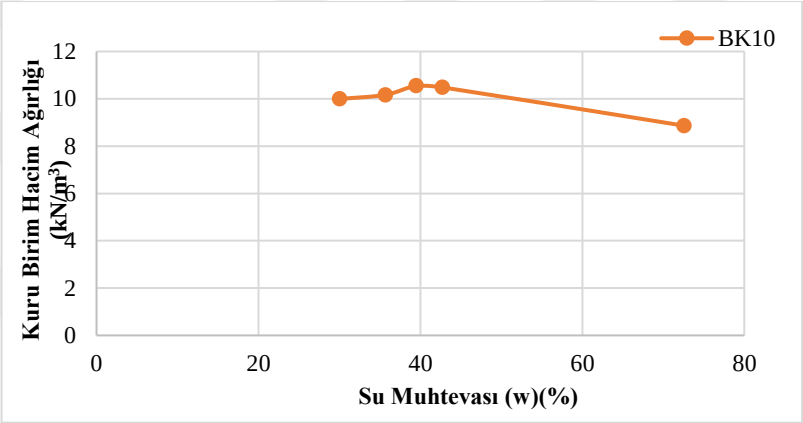
Şekil 4.28.'de %8 kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir.




Şekil 4.28. %8 kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi

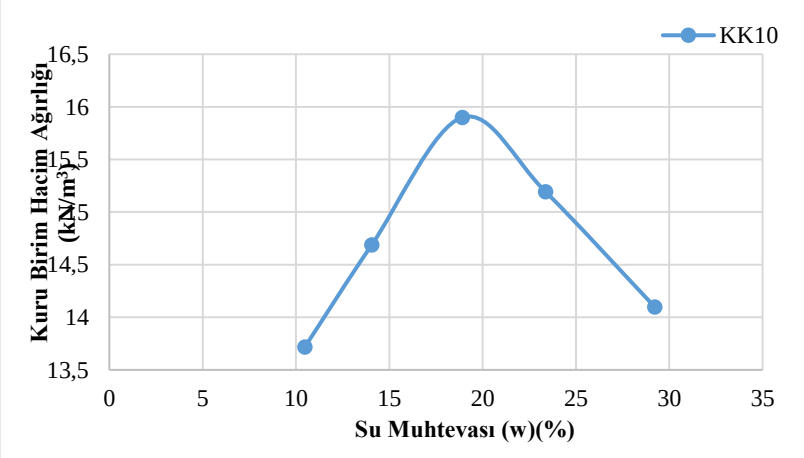
Bentonit ve kaolin killerine %8 kolemanit katkısı ilave edildiğinde elde edilen değerler şekilde görüldüğü gibidir. Bentonit kiline %8 kolemanit katkısı eklendiğinde optimum

su içeriği değerinin %33,559 olduğu ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin 9 (kN/m$^3$) olduğu görülmektedir. Bu değerlere bakıldığında %8 kolemanit katkısının bentonit kilinin optimum su muhtevasını oldukça düşürdüğü görülmektedir. Kaolin kiline %8 kolemanit katkısı ilave edildiğinde optimum su içeriği değerinin %19,554 olduğu ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin 15,958 (kN/m$^3$) olduğu kompaksiyon eğrisi grafiğine bakılarak saptanmıştır. Kompaksiyon eğrisi değerleri irdelendiğinde, bentonit ve kaolin killerine ait kompaksiyon eğrisi değerlerinin %8 kolemant ilave edilmesiyle optimum içeriği (%) değerlerinin azaldığı, maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının (kN/m$^3$) ise arttığı saptanmaktadır Şekil 4.29.'da %10 kolemanit ilaveli bentonit kilinin kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir.



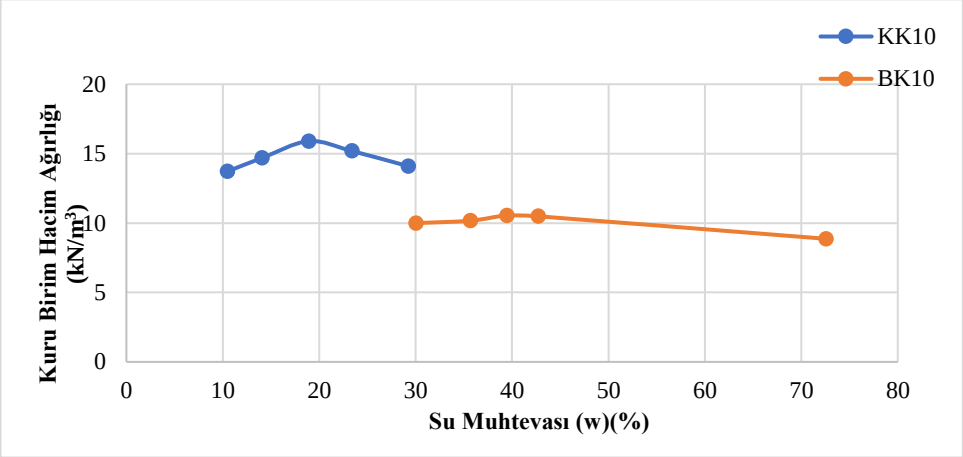

Şekil 4.29. %10 kolemanit ilaveli bentonit kilinin kompaksiyon eğrisi

Şekil 4.30.'de %10 kolemanit ilaveli kaolin kilinin kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir.



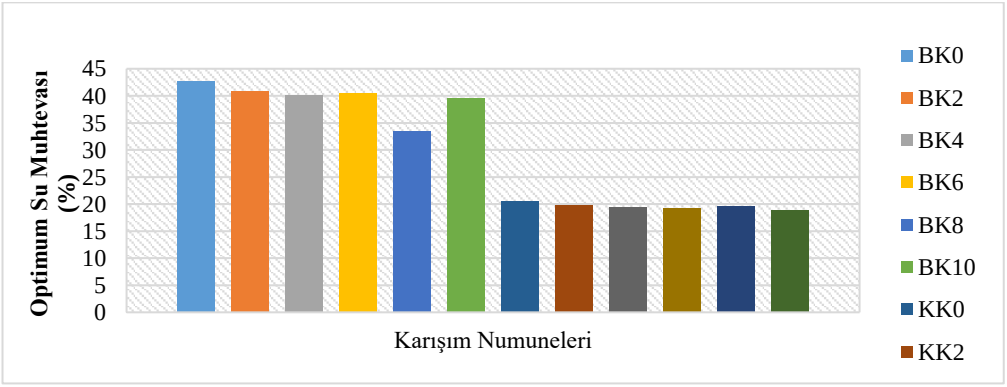

Şekil 4.30. %10 kolemanit ilaveli kaolin kilinin kompaksiyon eğrisi

Şekil 4.31.'de %10 kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi gösterilmiştir.



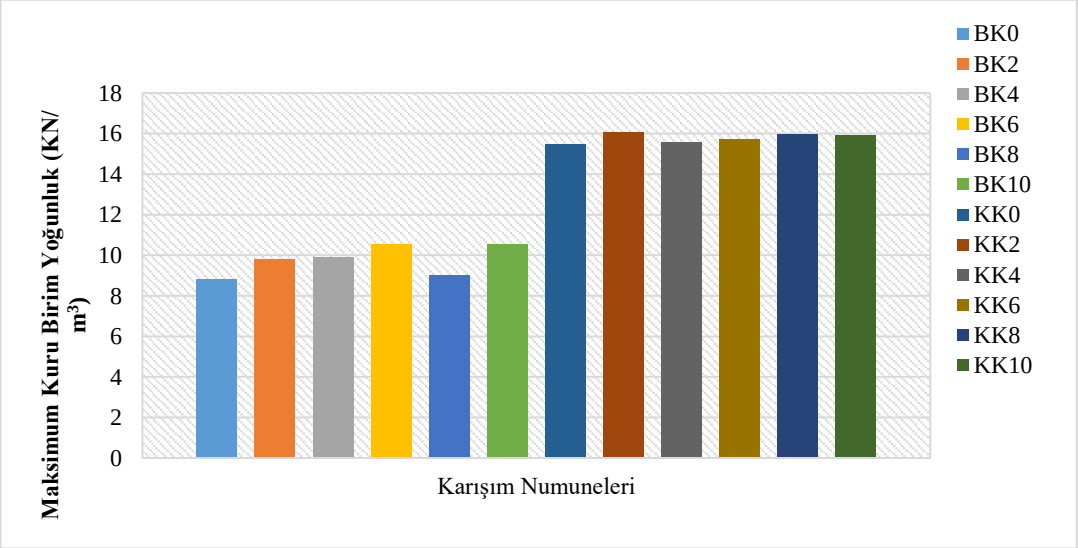

Şekil 4.31. %10 kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin kompaksiyon eğrisi

Şekilde görüldüğü gibi bentonit ve kaolin kiline ait kompaksiyon eğrisi grafiği verilmiştir. Bentonit kiline %10 kolemanit katkısı ilave edildiğinde optimum su içeriği değerinin %39,544 olduğu ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin 10,549 (kN/m$^3$) olduğu görülmektedir. Kaolin kiline %10 kolemanit katkısı ilave edildiğinde optimum su içeriği değerinin %18,91 olduğu ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin 15,899 (kN/m$^3$) olduğu kompaksiyon eğrisi grafiğine bakılarak saptanmıştır. Kompaksiyon eğrisi değerleri irdelendiğinde, bentonit ve kaolin killerine ait kompaksiyon eğrisi değerlerinin %10 kolemant ilave edilmesiyle optimum içeriği (%) değerlerinin azaldığı, maksimum kuru birim hacim ağırlıklarının (kN/m$^3$) ise arttığı saptanmaktadır.




Şekil 4.32. Saf bentonit ve kaolin killeri ile kolemanit ilaveli karışım numunelerinin optiumum su muhtevası (%) değerleri

Şekil 4.32'de bentonit ve kaolin killerine ait optimum su muhtevası (%) değerleri ile, %2, %4, %6, %8 e %10 oranlarında kolemanit katkısı eklendiğinde optimum su muhtevası (%) değerleri verilmiştir. Bentonit kiline farklı oranlarında kolemanit ilave edilmesiyle optimum su içeriğinin her oranda azaldığı görülmektedir. Ancak bu grafikteki değerlere bakıldığında bentonit kiline %8 oranında kolemanit katkı maddesi olarak eklendiğinde en fazla su içeriğindeki azalmanın bu oranda gözlemlendiği görülmektedir. Kaolin kiline belirlenen oranlarda kolemanit katkısı ilave edildiğinde her bir oranda optimum su muhtevası değerinin azaldığı görülmektedir. Kaolin kili için optimum su muhtevası değerine bakıldığında en fazla azalmanın, kolemanit katkı oranının %10 olduğu görülmektedir. Bentonit ve kaolin killeri ile belirlenen oranlarda kolemanit ilave edilmesiyle elde edilen değerlere bakıldığında, katkı maddesi eklenmesiyle optimum su muhtevasındaki değişim yüzdeleri bentonit kilinde kaolin kiline kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir.




Şekil 4.33. Saf bentonit ve kaolin killeri ile kolemanit ilaveli karışım numunelerinin maksimum kuru birim hacim ağırlık(Kn/$m^3$) değerleri

Şekil 4.23.'de bentonit ve kaolin killerine ait maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m3) değerleri ile, %2, %4, %6, %8 e %10 oranlarında kolemanit katkısı eklendiğinde kuru birim hacim ağırlık (kN/m3) değerleri verilmiştir. Bentonit kiline farklı oranlarında kolemanit ilave edilmesiyle maksiumum kuru birim hacim ağırlık değerinin her oranda arttığı görülmektedir. Bentonit ve kaolin killeri ile belirlenen oranlarda kolemanit ilave edilmesiyle elde edilen değerlere bakıldığında, katkı maddesi eklenmesiyle optimum su muhtevasındaki değişim yüzdeleri bentonit ve

kaolin killeri için hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Bentonit kili ile hazırlanan numunelerin optimum su muhtevası değerlerinin kaolin kili ile hazırlanan numunelere kıyasla daha fazla arttığı bu sayede maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinin kaolin kili ile hazırlanan numunelerde bentonit kili ile kıyaslandığında daha az değerler elde edildiği görülmektedir.

### 4.3. Serbest Basınç Deneyi Bulguları ve İrdelenmesi

Serbest basınç deneyi ile kompaksiyon deneyi sonrası elde edilen optimum su muhtevası değerleri ile numunelerin hazırlanarak kırılmadan önceki maksimum mukavemet değerleri bulunarak, zeminin dayanım parametreleri belirlenebilmektedir. Taşıma gücü değerlerinin bulunması amacıyla hazırlanan numuneler, belrilenen kür süresine tabi tutulduktan sonra serbest basınç deneyi ile mukavemet değerleri bulunmaktadır. Lüteratüre bakıldığında zemin stabilizasyonunda saf malzemeye belirli oranlarda katkı malzemesi eklendiğinde stabilizasyonun etkin olup olmadığını görebilmek için laboratuvarda hazırlanan numunelere serbest basınç deneyi uygulanamaktadır.

Serbest basınç deneyi için numuneler, her bir numunenin optimum su muhtevasına göre ayrı ayrı hazırlanmaktadır. Sah haldeki bentonit ve kaolin killeri için anlık serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bentonit ve kaolin killerine %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit ilave edilmesiyle hazırlanan karışım numuneleri ise 28 günlük kür sürelerine tabi tutulduktan serbest basınç dayanım deneyi uygulanmıştır. Bentonit kiline %8 oranında kolemanit eklenmesiyle oldukça yüksek kıvam limitleri ve su muhtevası değişimi gözlemlendiği için %8 kolemanit katkılı bentonit kili için anlık, günlük, 7 günlük ve 28 günlük serbest basınç dayanım deneyi uygulanarak mukavemet değerleri elde edilmiştir.

Bentonit Kili ve kaolin kili için hazırlanan numuneler serbest basınç dayanımı deney aletine yerleştirilir. Numune yerleştirildikten sonra deney hızı ve deformasyon ölçüm aleti ayarlandıktan sonra serbest basınç deneyi uygulaması başlatılır. Deformasyonda yüklenen kuvvet değeri kayda alınmıştır. Numune kırılıncaya kadar deformasyon okuması yapılarak kaydedilir ve numune kırılmaya başladıktan sonra maksimum mukavemete ulaşıldığında deneye son verilmektedir. Daha sonra numuneden bir kaba alınıp etüvde kururtulmaya bırakılmıştır. Serbest basınç deneyi sırasında elde dilen

veriler gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra serbest basınç grafikleri oluşturulmuştur. Bu işlemler bentonit kili için 6, kaolin kili için 4'er kez tekrarlanmıştır. Anlık gerçekleştirilen saf bentonit kiline ait serbest basınç dayanım deneyi verileri Tablo 4.2'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Anlık gerçekleştirilen saf bentonit kiline ait serbest basınç dayanım deneyi verileri

| *ÖRNEĞİN TANIMI:* | | ANLIK Bentonit Kili Wopt: 42,779 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Boy Kısalması mm** | **Yük Okuması (kg)** | **Boy kısalması ε (%)** | **Düzeltilmiş Alan ($cm^2$)** | **Kalibrasyon (kN)** | **Gerilme (kPa)** |
| 0,0 | | 0,000 | 8,60 | 0,000 | 0,00 |
| 0,1 | 4,30 | 0,135 | 8,62 | 0,042 | 48,94 |
| 0,2 | 5,00 | 0,270 | 8,63 | 0,049 | 56,83 |
| 0,3 | 5,70 | 0,405 | 8,64 | 0,056 | 64,70 |
| 0,4 | 6,50 | 0,541 | 8,65 | 0,064 | 73,68 |
| 0,5 | 7,00 | 0,676 | 8,66 | 0,069 | 79,24 |
| 0,6 | 7,80 | 0,811 | 8,68 | 0,076 | 88,17 |
| 0,7 | 8,30 | 0,946 | 8,69 | 0,081 | 93,70 |
| 0,8 | 8,90 | 1,081 | 8,70 | 0,087 | 100,33 |
| 0,9 | 9,20 | 1,216 | 8,71 | 0,090 | 103,57 |
| 1,0 | 9,70 | 1,351 | 8,72 | 0,095 | 109,05 |
| 1,1 | 10,10 | 1,486 | 8,73 | 0,099 | 113,39 |
| 1,2 | 10,50 | 1,622 | 8,75 | 0,103 | 117,72 |
| 1,3 | 10,80 | 1,757 | 8,76 | 0,106 | 120,92 |
| 1,4 | 11,10 | 1,892 | 8,77 | 0,109 | 124,11 |
| 1,5 | 11,50 | 2,027 | 8,78 | 0,113 | 128,40 |
| 1,6 | 11,80 | 2,162 | 8,80 | 0,116 | 131,57 |
| 1,7 | 12,10 | 2,297 | 8,81 | 0,119 | 134,73 |
| 1,8 | 12,30 | 2,432 | 8,82 | 0,121 | 136,77 |
| 1,9 | 12,50 | 2,568 | 8,83 | 0,123 | 138,80 |
| 2,0 | 12,80 | 2,703 | 8,84 | 0,126 | 141,93 |
| 2,1 | 12,90 | 2,838 | 8,86 | 0,127 | 142,84 |
| 2,2 | 13,00 | 2,973 | 8,87 | 0,127 | 143,75 |
| 2,3 | 13,10 | 3,108 | 8,88 | 0,128 | 144,66 |
| 2,4 | 13,20 | 3,243 | 8,89 | 0,129 | 145,56 |
| 2,5 | 13,00 | 3,378 | 8,91 | 0,127 | 143,15 |
| 2,6 | 13,10 | 3,514 | 8,92 | 0,128 | 144,05 |
| 2,7 | 13,10 | 3,649 | 8,93 | 0,128 | 143,85 |
| 2,8 | 12,00 | 3,784 | 8,94 | 0,118 | 131,58 |
| 2,9 | | 3,919 | 8,96 | 0,000 | 0,00 |

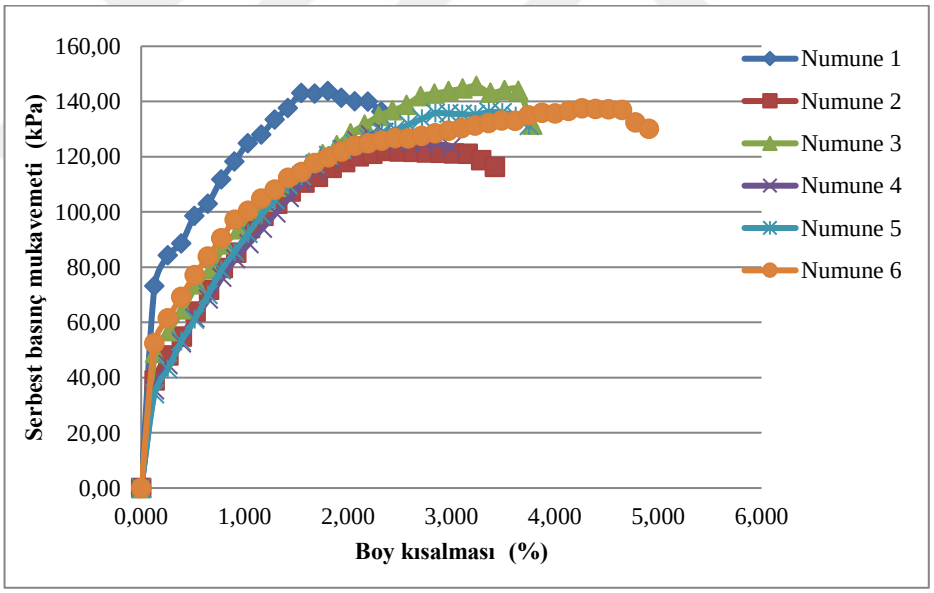
Tabloda görüldüğü gibi bentonit ve kaolin kili olmak üzere, %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit katkısı ile hazırlanan numuneler için serbest basınç deney verileri elde edilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak herbir numuneye ait serbest basınç dayanımı (kPa)- Boy kısalması (%) grafikleri çizilmiştir. Bentonit kili için her oranda 6 kez tüm uygulamalar tekrarlanırken kaolin kili için 4 kez tüm numuneler için

serbest basınç dayanım tablosuna aktarılan veriler analiz edilerek serbest basınç dayanımı (kPa)- Boy kısalması (%) grafikleri çizilmiştir.

### 4.3.1. Bentonit kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları

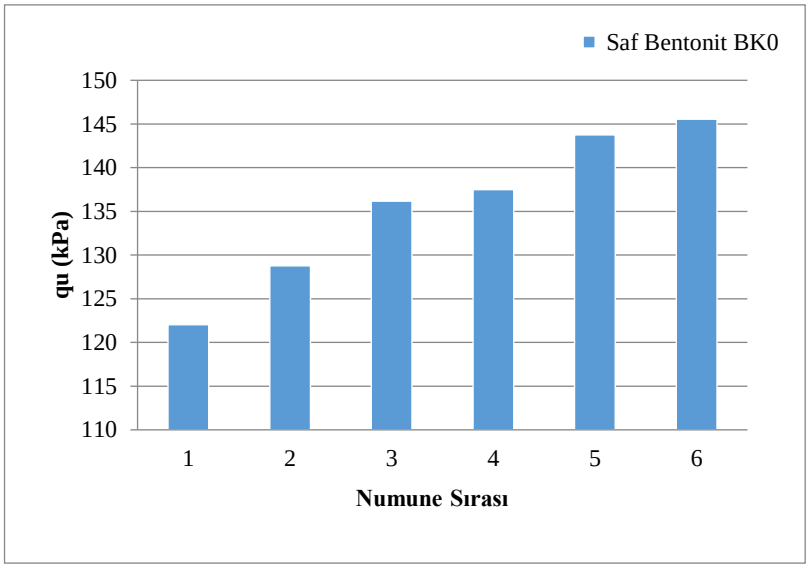
#### 4.3.1.1. Saf bentonit kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları

Serbest basınç dayanım deneyine öncelikle katkı maddesi eklenmeden saf halde bulunan bentonit kili için deney numuneleri hazırlanmıştır. Deney numuneleri bentonitin ağırlıkça %42,779 su içeriğinde hazırlanmıştır. Herhangi bir su kaybına veya deformasyona uğramaması için hazırlanan numuneler hassas bir şekilde serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Serbest basınç deneyi sonrası elde edilen veriler ile bentonit kiline ait gerilme (kPa) - boy kısalması(%) davranışını ve mukavemet değerini saptamak amaçlanmıştır. Saf bentonit kiline ait serbest basınç mukavemeti - % boy kısalması grafiği Şekil 4.34.'de verilmiştir.




Şekil 4.34. Saf bentonit kiline ait serbest basınç dayanım grafiği

Saf bentonit kiline ait 6 adet numunenin mukavemet değerleri Şekil 4.35.'de grafik halinde verilmiştir.




Şekil 4.35. Saf bentonit kiline ait 6 adet numunenin mukavemet değerleri

%42,779 su içeriğinde homojen bir şekilde yoğurularak hazırlanan 6 adet deney numunesi üzerinde gerçekleştirelen basınç testi sonrası bentonit kiline ait mukavemet değerleri bulunmuştur. Deney sırasında hazırlanan numunelerin segregasyona uğrayarak mukavemet değerini düşürebileceği öngürülerek herbir katkı oranı ve saf malzeme için 6 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Herbir numuneye ait mukavemet değerleri verilmiştir. Serbest basınç deneyi sonrası elde edilen verilere bakıldığında saf bentonitin minimum mukavemet değerinin 122,02 (kPa), maksimum değerinin ise 145,56 (kPa) olduğu görülmektedir.

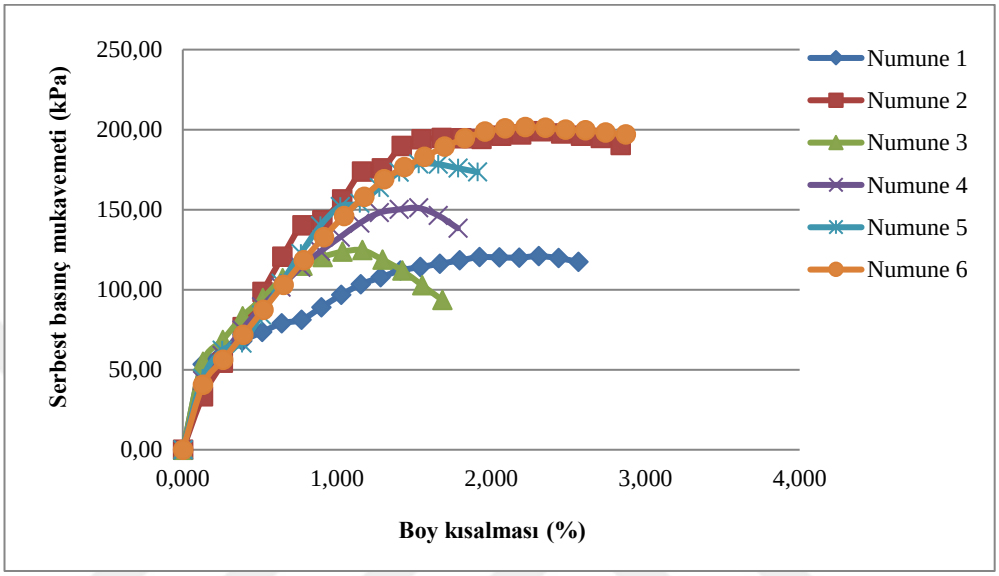
#### 4.3.1.2. %8 Kolemanit bentonit kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları

Bentonit kiline öncelikle kıvam limitleri ve kompaksiyon deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen veriler analiz edilerek, bentonit kiline %8 oranında kolemanit katkısı ilave edilmesi diğer oranlara kıyasla plastisite değerinin en çok azaladığı oran olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bentonit kiline %8 kolemanit katkısı eklendiğinde komapksiyon eğrisi verileri analiz edilerek su muhtevası bulunmuştur. Bulunan su muhtevası değeri saf haldeki bentonit kilinin diğer oranlara kıyasla %8 kolemanit katkısı ile en fazla azalmanın görüldüğü değer olarak saptanmıştır.

Kolemanit katkılı serbest basınç deneyinde bentonit kiline %33,559 oranında su ve %8 oranında kolemanit katkısı ilave edilerek homojen karışım elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım numuneleri anlık olmak üzere, 1 günlük 7 günlük

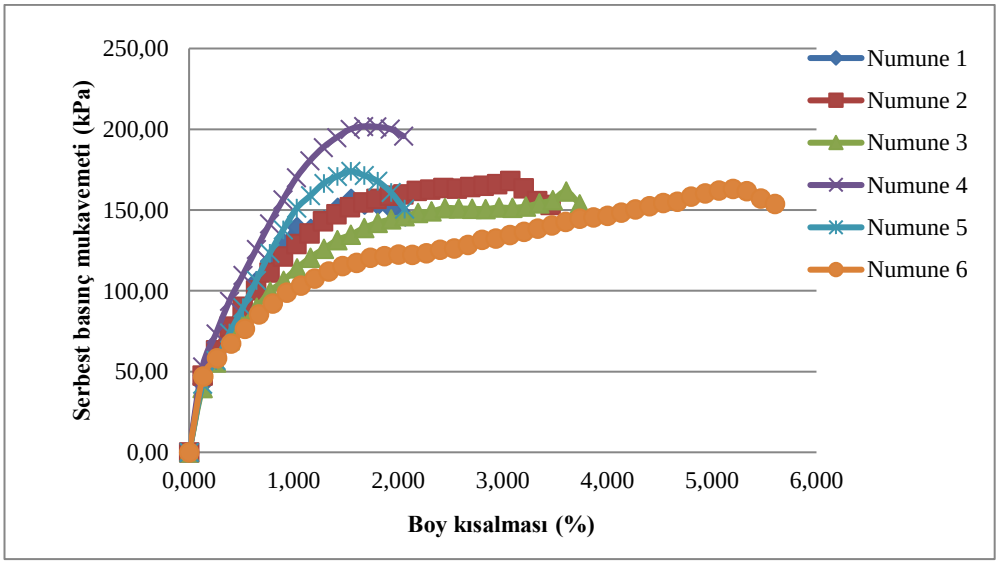
ve 28 günlük kür sürelerine tabi tutularak serbest basınç dayanım deneyi gerçekleştirişmiştir. Bu sayede %8 kolemanit katkılı bentonit kilinin kür sürelerine göre gerilme- boy kısalması grafikleri elde edilmiştir.

Şekil 4.36'da anlık gerilme – boy kısalması grafiği verilmiştir.



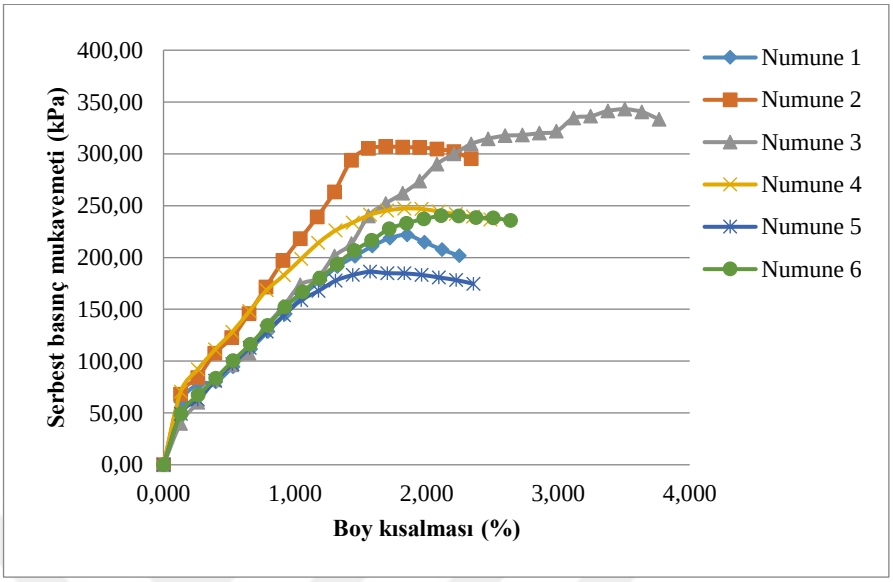

Şekil 4.36. %8 kolemanit ilaveli bentonit kilinin anlık serbest basınç dayanım grafiği

Şekil 4.37'de bir günlük gerilme – boy kısalması grafiği verilmiştir.



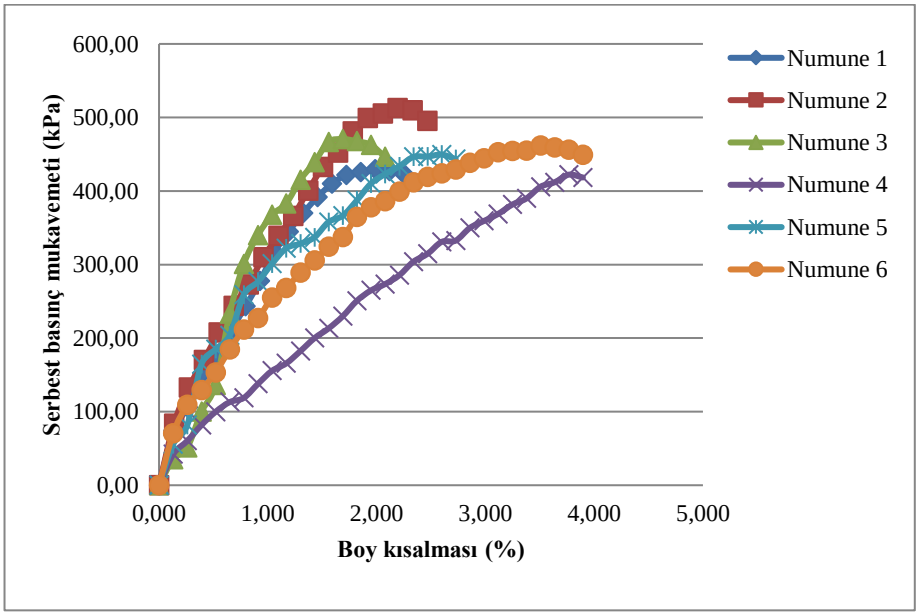

Şekil 4.37. %8 kolemanit ilaveli bentonit kilinin 1 günlük serbest basınç dayanım grafiği

Şekil 4.38'de %8 kolemanit ilaveli bentonit kilinin 1 haftalık serbest basınç dayanım grafiği verilmiştir.



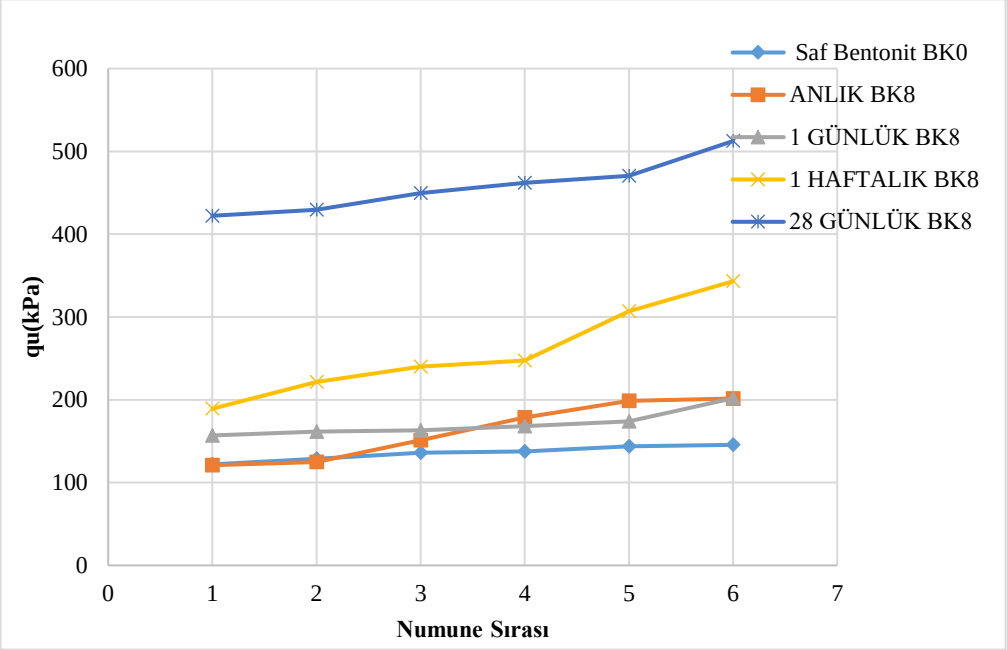

Şekil 4.38. %8 kolemanit ilaveli bentonit kilinin 1 haftalık serbest basınç dayanım grafiği

Şekil 4.39'da %8 kolemanit ilaveli bentonit kiline ait 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği verilmiştir.




Şekil 4.39. %8 kolemanit ilaveli bentonit kiline ait 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği

Kür sürelerine göre saf bentonit ve %8 kolemanit ilaveli 6 adet karışım numunelerine numunenin kür sürelerine göre mukavemet değerleri Şekil 4.40.'da gösterilmiştir.



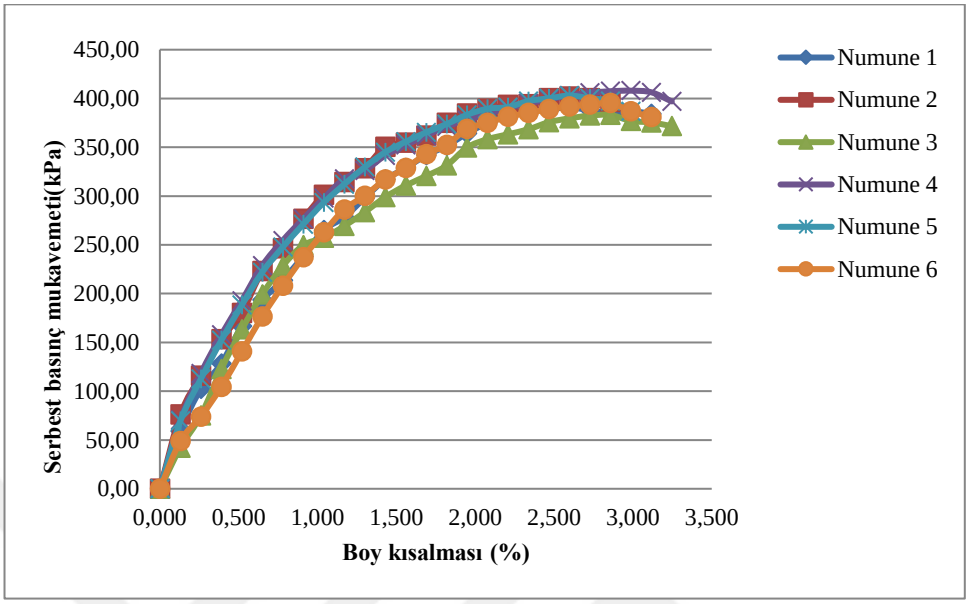

Şekil 4.40. Kür sürelerine göre saf bentonit ve %8 kolemanit ilaveli 6 adet karışım numunelerine numunenin kür sürelerine göre mukavemet değerleri

%8 kolemanit katkılı bentonite ait serbest basınç deney sonuçlarına göre %33,559 su muhtevasındaki kolemanit katkılı bentonitin, optimum su muhtevasındaki saf haldeki bentonite kıyasla 28 günlük kür süresinin sonunda serbest basınç mukavemet değerlerinde oldukça fazla artış olduğu gözlemlenmektedir. %8 kolemanit katkılı bentonitin kür süresine bağlı olarak kür süresi arttıkça mukavemet değerinin de artığı saptanmıştır. Elde edilen verilere göre bentonit kiline %8 kolemanit katkısı ilave edimesiyle dayanımın arttığını göstermektedir. Boy kısalmalarında ise 28 günlük numunelerde daha az deforme olduğu gözlemlenmiştir.

#### 4.3.1.3. %2 kolemanit katkılı bentonit kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları

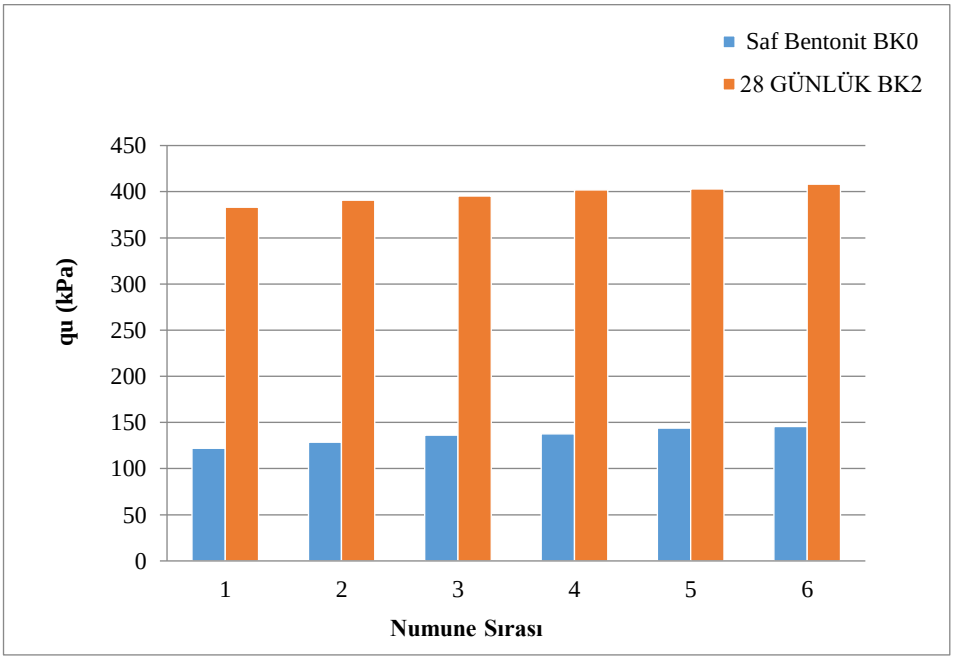
Bentonit kiline %2 kolemanit katkısı eklenerek uygulanan serbest basınç deneyi için öncelikle bentonit kiline %40,972 oranında su ve %2 oranında ise kolemanit katkısı ilave edilerek homojen karışım oluncaya karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım numunelerinin su içeriklerini kaybetmeden ve herhangi bir deformasyona uğramadan serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede Şekil 4.41'de verilen %2

kolemanit katkılı bentonit kiline ait gerilme (kPa)- boy kısalması (%) grafiği elde edilmiştir.




Şekil 4.41. %2 kolemanit ilaveli bentonit kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği

Saf bentonit ve %2 kolemanit katkılı bentonite ait 6 adet numunenin mukavemet değerleri Şekil 4.42'de verilmiştir.

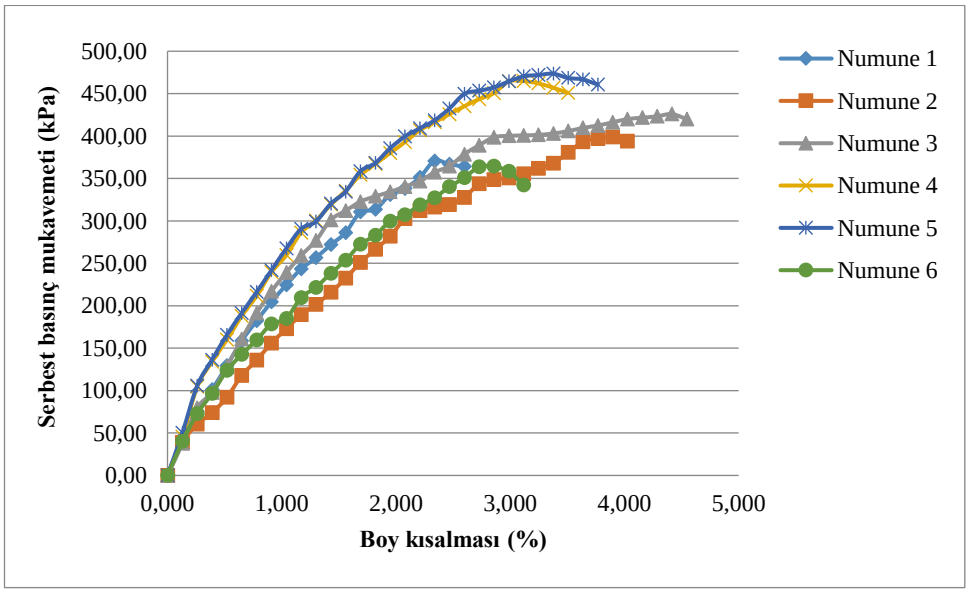



Şekil 4.42. Saf bentonit ve %2 kolemanit katkılı bentonite ait 6 adet numunenin mukavemet değerleri

%2 kolemanit katkılı bentonite ait serbest basınç deney sonuçlarına göre %40,972 su muhtevasındaki kolemanit katkılı bentonitin, optimum su muhtevasındaki saf haldeki bentonite kıyasla 28 günlük kür süresinin sonunda serbest basınç mukavemet değerlerinde artış olduğu gözlemlenmektedir. %2 kolemanit katkılı bentonitin mimum mukavemet değerinin 390,74 (kPa) maksimum mukavemet değerinin ise 407,97 (kPa) olduğu görülmektedir. Elde edilen verilere göre bentonit kiline %2 kolemanit katkısı ilave edimesiyle dayanım değerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

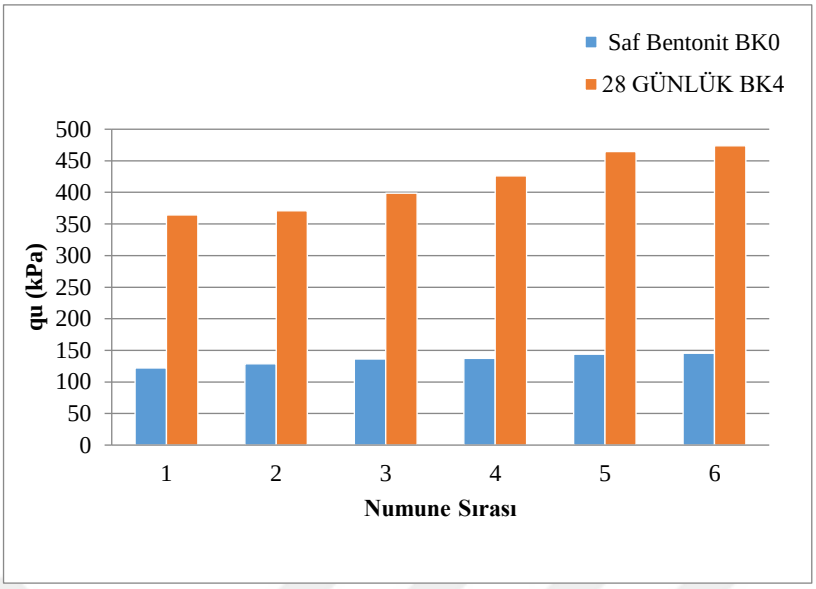
#### 4.3.1.4. %4 kolemanit katkılı bentonit kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları

Bentonit kiline %2 kolemanit katkısı eklenerek uygulanan serbest basınç deneyi için öncelikle bentonit kiline %40,972 oranında su ve %2 oranında ise kolemanit katkısı ilave edilerek homojen karışım oluncaya karıştırılmıştır. Herhangi bir su kaybına veya deformasyona uğramaması için hazırlanan numuneler hassas bir şekilde serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Serbest basınç deneyi sonrası elde edilen veriler ile Şekil 4.43'de verilen bentonit kiline ait gerilme (kPa) - boy kısalması(%) davranışını ve mukavemet değerini saptamak amaçlanmıştır.




Şekil 4.43. %4 kolemanit ilaveli bentonit kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği

Şekil 4.44.'de saf bentonit ve %4 kolemanit katkılı bentonite ait 6 adet numunenin mukavemet değerleri verilmiştir.

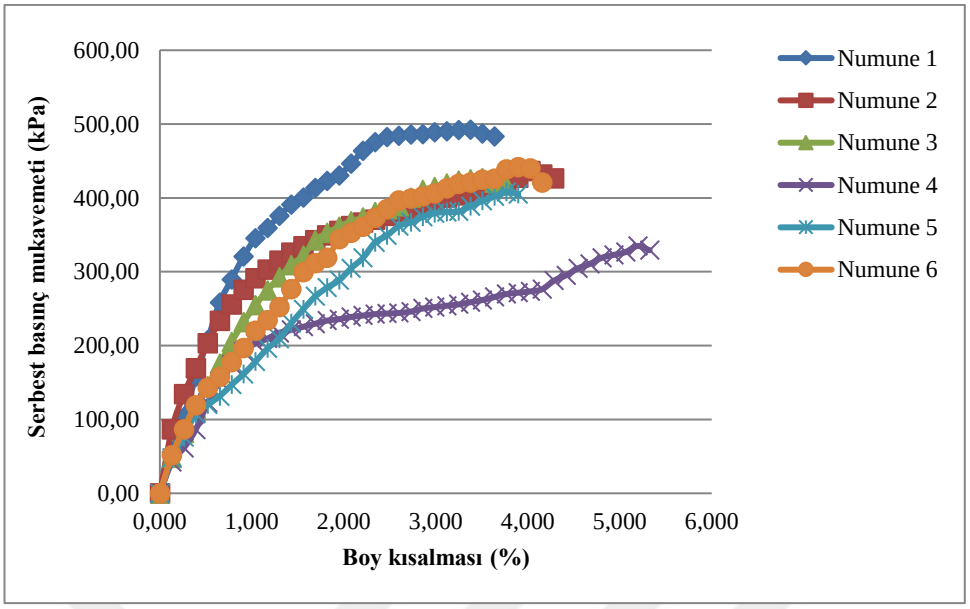



Şekil 4.44. Saf bentonit ve %4 kolemanit katkılı bentonite ait 6 adet numunenin mukavemet değerleri

%40,207 su içeriğinde homojen bir şekilde yoğurularak hazırlanan 6 adet deney numunesi üzerinde gerçekleştirelen basınç testi sonrası bentonit kiline ait mukavemet değerleri bulunmuştur. Deney sırasında hazırlanan numunelerin segregasyona uğrayarak mukavemet değerini düşürebileceği öngürülerek herbir katkı oranı ve saf malzeme için 6 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Herbir numuneye ait mukavemet değerleri verilmiştir. Serbest basınç deneyi sonrası elde edilen verilere bakıldığında saf bentonitin minimum mukavemet değerinin 364,23 (kPa), maksimum değerinin ise 464,84 (kPa) olduğu görülmektedir. Elde edilen mukavemet değerlerine bakıldığında bentonit kiline %4 kolemanit katkısı ilave edildiğinde, 28 günlük kür süresi sonrası kilin dayanımının oldukça fazla arttığı görülmektedir.

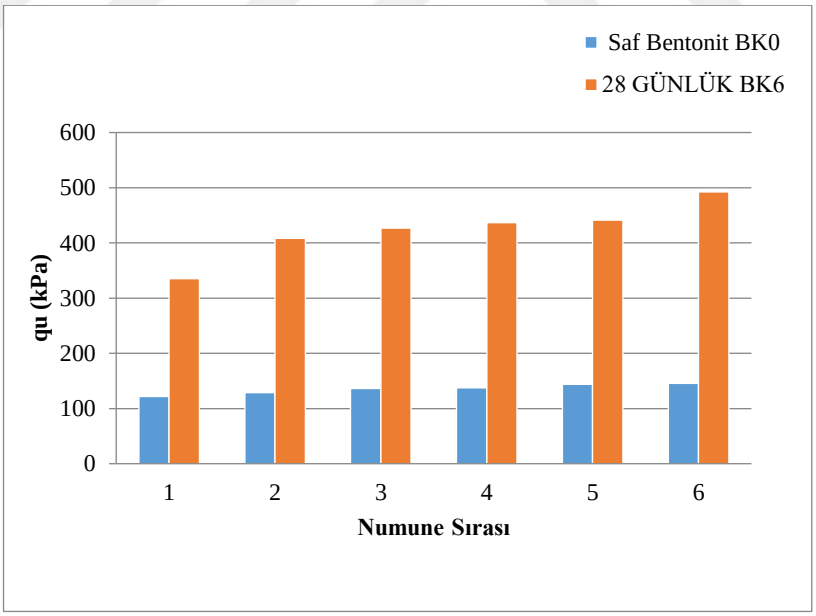
#### 4.3.1.5. %6 kolemanit katkılı bentonit kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları

Bentonit kiline %6 kolemanit katkısı eklenerek uygulanan serbest basınç deneyi için öncelikle bentonit kiline %40,538 oranında su ve %6 oranında ise kolemanit katkısı ilave edilerek homojen karışım oluncaya karıştırılmıştır. Herhangi bir su kaybına veya deformasyona uğramaması için hazırlanan numuneler hassas bir şekilde serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Serbest basınç deneyi sonrası elde edilen veriler ile Şekil 4.45'de verilen bentonit kiline ait gerilme (kPa) - boy kısalması(%) davranışını ve mukavemet değerini saptamak amaçlanmıştır.




Şekil 4.45. %6 kolemanit ilaveli bentonit kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği

Şekil 4.46.'da saf bentonit ve %6 kolemanit katkılı bentonite ait 6 adet numunenin mukavemet değerleri verilmiştir.



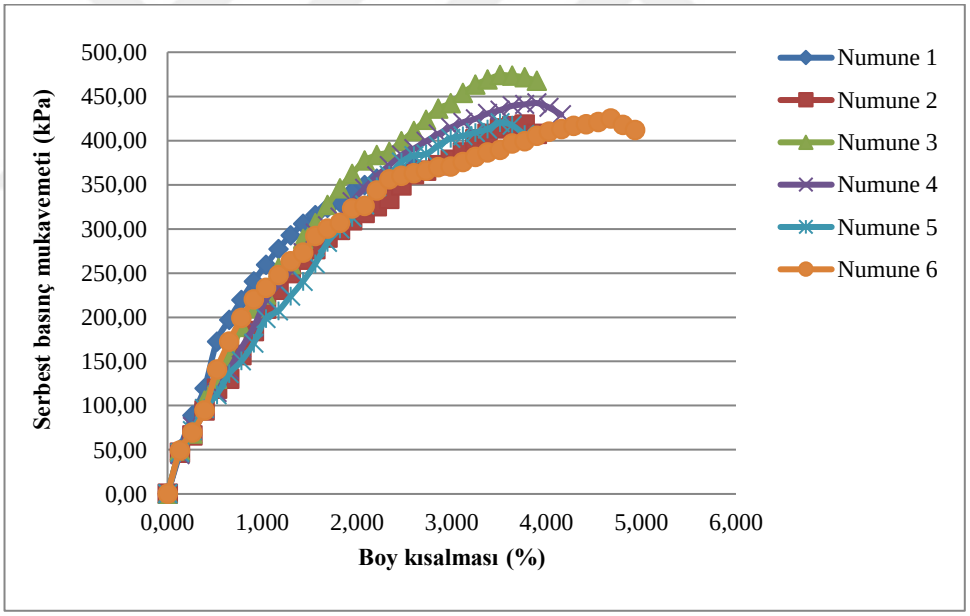

Şekil 4.46. Saf bentonit ve %6 kolemanit katkılı bentonite ait 6 adet numunenin mukavemet değerleri

%6 kolemanit katkılı bentonite ait serbest basınç deney sonuçlarına göre %40,538 su muhtevasındaki kolemanit katkılı bentonitin, optimum su muhtevasındaki saf haldeki bentonite kıyasla 28 günlük kür süresinin sonunda serbest basınç mukavemet değerlerinde artış olduğu gözlemlenmektedir. %6 kolemanit katkılı bentonitin mimum

mukavemet değerinin 334,94 (kPa) maksimum mukavemet değerinin ise 492,23 (kPa) olduğu görülmektedir. Elde edilen verilere göre bentonit kiline %6 kolemanit katkısı ilave edimesiyle dayanım değerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

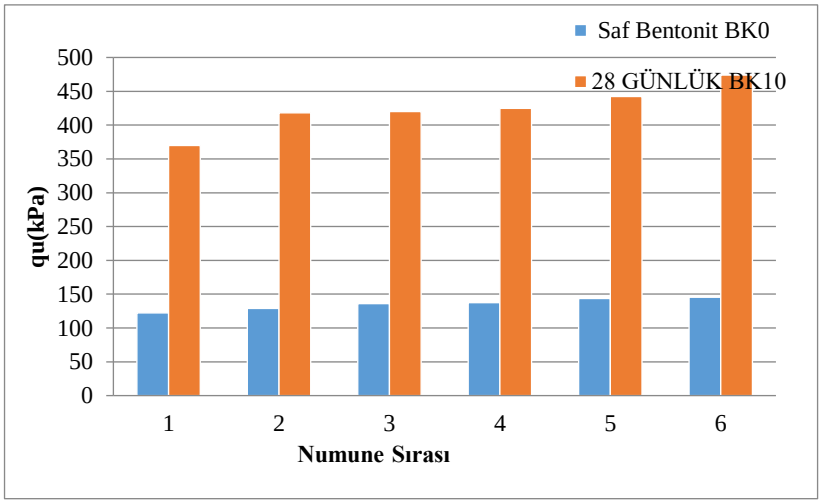
#### 4.3.1.6. %10 kolemanit katkılı bentonit kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları

Bentonit kiline %10 kolemanit katkısı eklenerek uygulanan serbest basınç deneyi için öncelikle bentonit kiline %39,544 oranında su ve %10 oranında ise kolemanit katkısı ilave edilerek homojen karışım oluncaya karıştırılmıştır. Herhangi bir su kaybına veya deformasyona uğramaması için hazırlanan numuneler hassas bir şekilde serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Serbest basınç deneyi sonrası elde edilen veriler ile Şekil 4.47.'de verilen bentonit kiline ait gerilme (kPa) - boy kısalması(%) davranışını ve mukavemet değerini saptamak amaçlanmıştır.



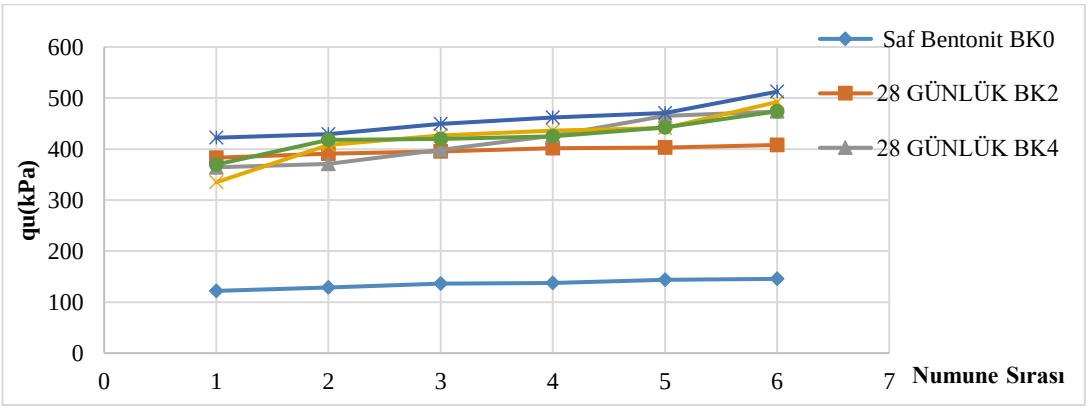

Şekil 4.47. %10 kolemanit ilaveli bentonit kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği

Saf bentonit ve %10 kolemanit katkılı bentonite ait 6 adet numunenin mukavemet değerleri Şekil 4.48.'de verilmiştir.




Şekil 4.48. Saf bentonit ve %10 kolemanit katkılı bentonite ait 6 adet numunenin mukavemet değerleri

%39,544 su içeriğinde homojen bir şekilde yoğurularak hazırlanan 6 adet deney numunesi üzerinde gerçekleştirelen basınç testi sonrası bentonit kiline ait mukavemet değerleri bulunmuştur. Deney sırasında hazırlanan numunelerin segregasyona uğrayarak mukavemet değerini düşürebileceği öngürülerek herbir katkı oranı ve saf malzeme için 6 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Herbir numuneye ait mukavemet değerleri verilmiştir. Serbest basınç deneyi sonrası elde edilen verilere bakıldığında %10 kolemanit katkılı bentonit kilinin minimum mukavemet değerinin 369,65 (kPa), maksimum değerinin ise 473,97 (kPa) olduğu görülmektedir. Elde edilen mukavemet değerlerine bakıldığında bentonit kiline %10 kolemanit katkısı ilave edildiğinde, 28 günlük kür süresi sonrası kilin dayanımının oldukça fazla arttığı görülmektedir. 28 günlük kür süresine göre saf bentonit ve kolemanit ilaveli karışım numunelerine ait mukavemet değerleri Şekil 4.49'da sunulmuştur.




Şekil 4.49. 28 günlük kür süresine göre saf bentonit ve kolemanit ilaveli karışım numunelerine ait mukavemet değerleri

Bentonit kiline %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit ilave edilerek her bir oran için optimum su içeriklerinde deney numuneleri homojen olarak karıştırılığ hazırlanmıştır. Daha çnce kıvam limitleri deneyine ve kompaksiyon deneyine tabii tutulan karışım numunelerinden %8 kolemanit ilaveli bentonit kilinin plastisite indisinin ve optimum su içeriğinin diğer oranlara kıyasla minimum değerde olduğu görülmektedir. Bu nedenle %8 kolemanit katkılı bentonit anlık, 1 günlük, 7 günlük ver 28 günlük kür sürelerine tabi tutularak serbest basınç dayanım deneyi uygulanmıştır. Saf bentonit ve %2, %4, %6, %8 ve %10 katkılı kolemanit katkılı 6 ‘şar adet hazırlanan karışım numunelerine ait mukavemet değerleri belirlenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere bentonit kiline kolemanit katkısı eklenmesiyle dayanım değerinin arttığı görülmektedir. %8 kolemanit katkılı bentonit kili muakavemet değerleri kıyaslandığında, 28 günlük kür süresinde bırakılan numunelerin mukavemet değerlerindeki artışın diğer oranlara kıyasla en fazla arttığı gözlemlenmektedir.

## 4.4. Kaolin Kili Serbest Basınç Dayanım Deneyi Bulguları

### 4.4.1. Saf kaolin kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları

Serbest basınç dayanım deneyine ikincil olarak katkı maddesi eklenmeden saf halde bulunan kaolin kili için deney numuneleri hazırlanmıştır. Düşük plastisiteli kaolin kili deney numuneleri için ağırlıkça %20,578 su içeriği 4 adet numune hazırlanmıştır.

Herhangi bir su kaybına veya deformasyona uğramaması için hazırlanan numuneler hassas bir şekilde serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Serbest basınç deneyi sonrası elde edilen veriler ile kaolin kiline ait gerilme (kPa) - boy kısalması(%) davranışını ve mukavemet değerini saptamak amaçlanmıştır. Anlık gerçekleştirlen saf kaolin kiline ait serbest basınç dayanım deneyi verileri Tablo 4.4.’de verilmiştir.

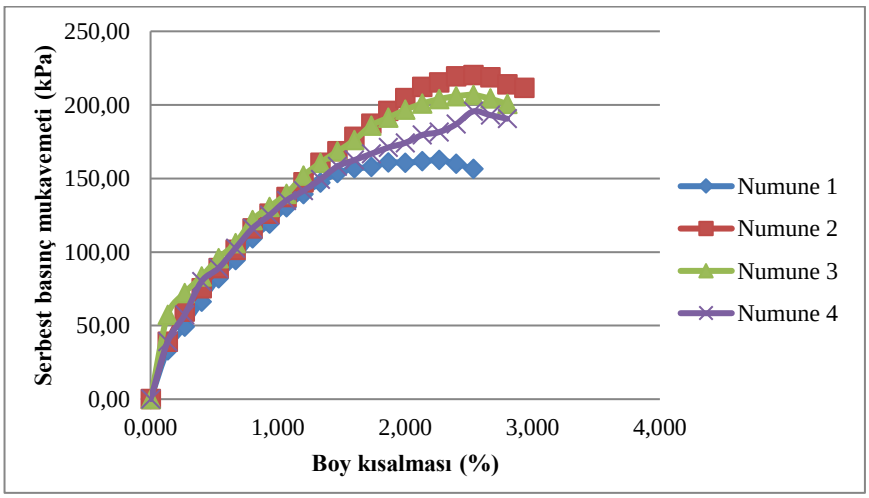
%20,578 su içeriğinde homojen bir şekilde yoğurularak hazırlanan 4 adet deney numunesi üzerinde gerçekleştirelen basınç testi sonrası kaolin kiline ait mukavemet değerleri bulunmuştur. Deney sırasında hazırlanan numunelerin segregasyona uğrayarak mukavemet değerini düşürebileceği öngürülerek herbir katkı oranı ve saf malzeme için 4 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Herbir numuneye ait mukavemet değerleri verilmiştir. Serbest basınç deneyi sonrası elde edilen verilere bakıldığında saf

bentonitin minimum mukavemet değerinin 162,49 (kPa), maksimum değerinin ise 220,15 (kPa) olduğu görülmektedir.

Tablo 4.3. Anlık gerçekleştirlen saf kaolin kiline ait serbest basınç dayanım deneyi verileri

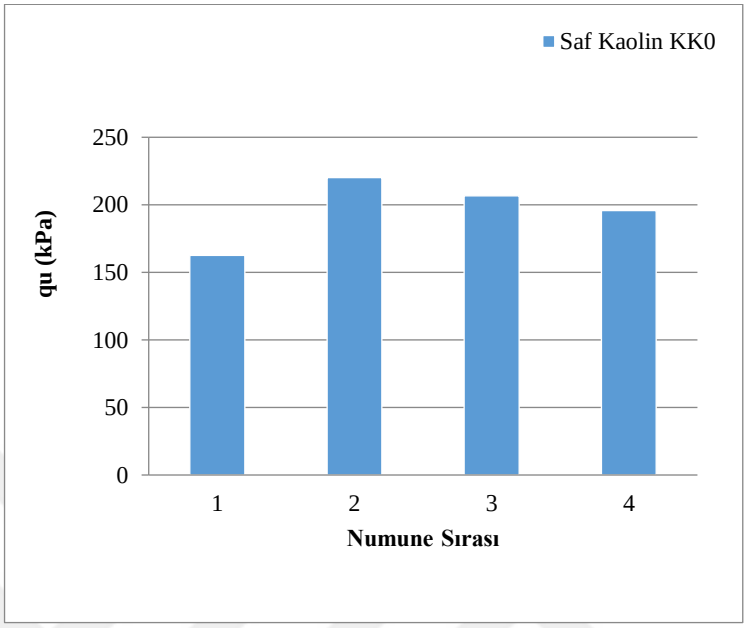
| *ÖRNEĞİN TANIMI:* | | ANLIK Kaolin Wopt:20,578 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Boy Kısalması mm** | **Yük Okuması (kg)** | **Boy kısalması ε (%)** | **Düzeltilmiş Alan ($cm^2$)** | **Kalibrasyon (kN)** | **Gerilme (kPa)** |
| 0,0 | | 0,000 | 8,55 | 0,000 | 0,00 |
| 0,1 | 5,00 | 0,133 | 8,56 | 0,049 | 57,25 |
| 0,2 | 6,30 | 0,267 | 8,58 | 0,062 | 72,04 |
| 0,3 | 7,30 | 0,400 | 8,59 | 0,072 | 83,37 |
| 0,4 | 8,40 | 0,533 | 8,60 | 0,082 | 95,80 |
| 0,5 | 9,30 | 0,667 | 8,61 | 0,091 | 105,92 |
| 0,6 | 10,70 | 0,800 | 8,62 | 0,105 | 121,70 |
| 0,7 | 11,50 | 0,933 | 8,63 | 0,113 | 130,63 |
| 0,8 | 12,30 | 1,067 | 8,65 | 0,121 | 139,52 |
| 0,9 | 13,40 | 1,200 | 8,66 | 0,131 | 151,80 |
| 1,0 | 14,20 | 1,333 | 8,67 | 0,139 | 160,64 |
| 1,1 | 14,90 | 1,467 | 8,68 | 0,146 | 168,33 |
| 1,2 | 15,60 | 1,600 | 8,69 | 0,153 | 176,00 |
| 1,3 | 16,50 | 1,733 | 8,70 | 0,162 | 185,91 |
| 1,4 | 17,00 | 1,867 | 8,72 | 0,167 | 191,28 |
| 1,5 | 17,50 | 2,000 | 8,73 | 0,172 | 196,64 |
| 1,6 | 17,90 | 2,133 | 8,74 | 0,176 | 200,86 |
| 1,7 | 18,20 | 2,267 | 8,75 | 0,178 | 203,95 |
| 1,8 | 18,40 | 2,400 | 8,76 | 0,180 | 205,91 |
| 1,9 | 18,50 | 2,533 | 8,78 | 0,181 | 206,74 |
| 2,0 | 18,30 | 2,667 | 8,79 | 0,179 | 204,23 |
| 2,1 | 18,00 | 2,800 | 8,80 | 0,177 | 200,60 |
| 2,2 | | 2,933 | 8,81 | 0,000 | 0,00 |

Saf kaolin kiline ait serbest basınç dayanım grafiği Şekil 4.50'de verilmiştir.




Şekil 4.50. Saf kaolin kiline ait serbest basınç dayanım grafiği

Saf kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri ise Şekil 4.51.'de verilmiştir.

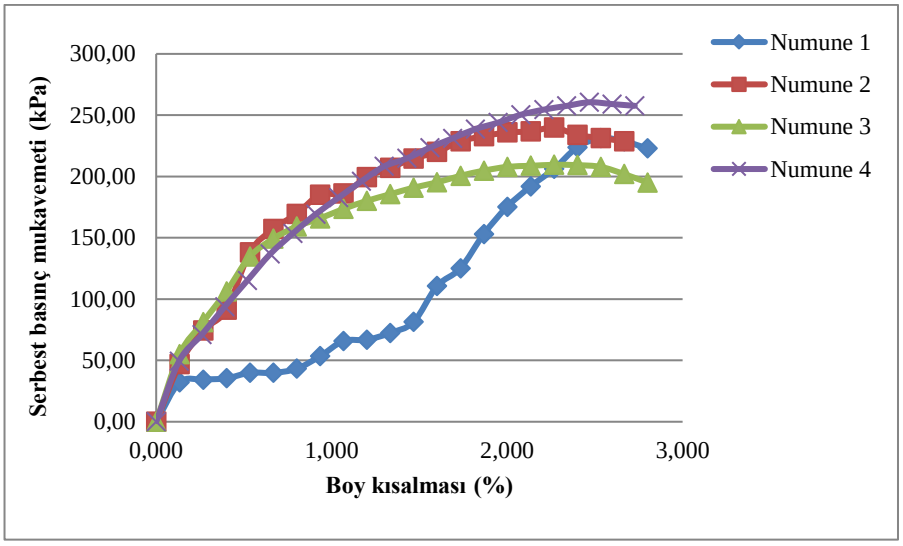



Şekil 4.51. Saf kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri

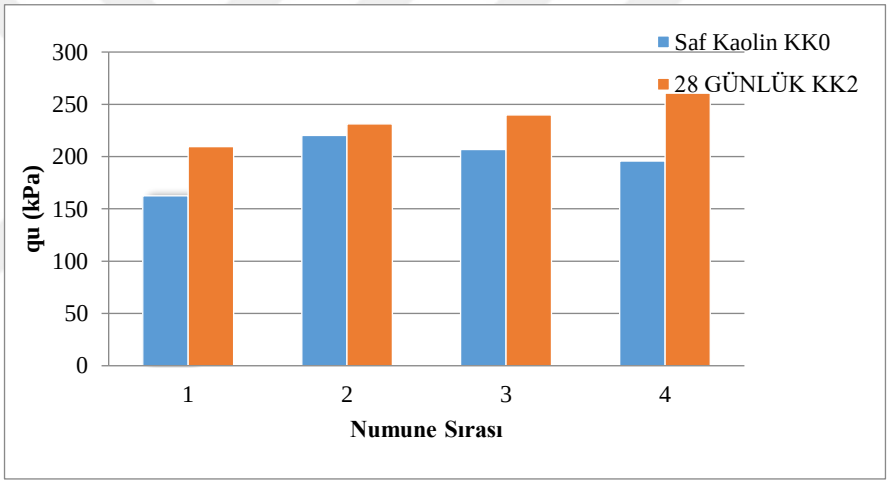
#### 4.4.1.1. %2 kolemanit katkılı kaolin kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları

Kaoin kiline, %2 kolemanit katkısı eklenerek uygulanan serbest basınç deneyi için öncelikle %19,712 oranında su eklenerek homojen karışım oluncaya karıştırılmıştır. Su muhtevasında herhangi bir değişim olmaması ve deformasyona uğramaması için hazırlanan numuneler hassas bir şekilde serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur.
Serbest basınç deneyi sonrası elde edilen veriler ile Şekil 4.52'de verilen bentonit kiline ait gerilme (kPa) - boy kısalması(%) davranışını ve mukavemet değerini saptamak amaçlanmıştır. Kaolin ve %2 kolemanit katkılı kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri Şekil 4.53.'de verilmiştir.

%2 kolemanit katkılı kaolin ait serbest basınç deney sonuçlarına göre %19,712 su muhtevasındaki kolemanit katkılı kaolin kilinin, optimum su muhtevasındaki saf haldeki kaolin kıyasla 28 günlük kür süresinin sonunda serbest basınç mukavemet değerlerinde artış olduğu gözlemlenmektedir. %2 kolemanit katkılı bentonitin mimum mukavemet değerinin 209,55 (kPa) maksimum mukavemet değerinin ise 260,56 (kPa) olduğu görülmektedir. Elde edilen verilere göre kaolin kiline %2 kolemanit katkısı ilave edimesiyle dayanım değerinin az miktarda da olsa arttığı görülmektedir.



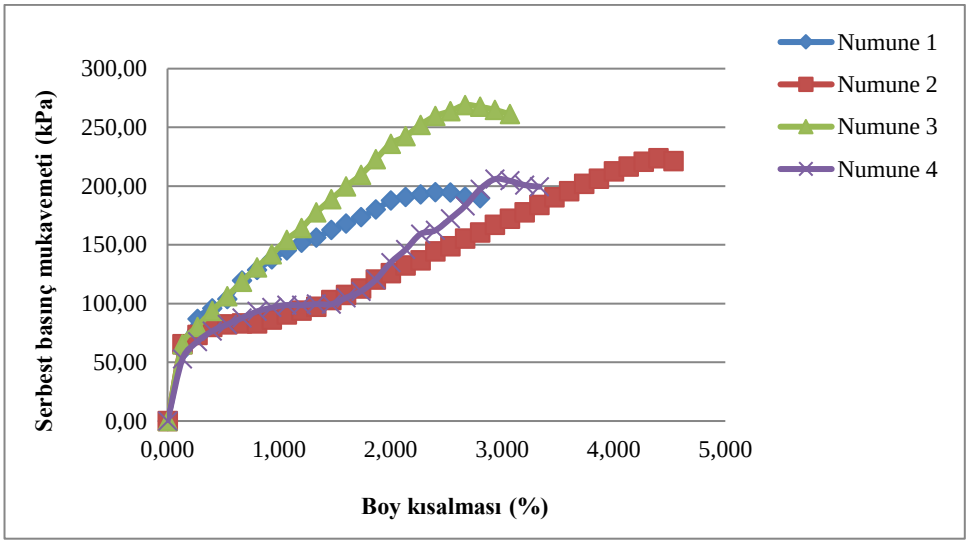

Şekil 4.52. %2 kolemanit ilaveli kaolin kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği




Şekil 4.53. Kaolin ve %2 kolemanit katkılı kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri

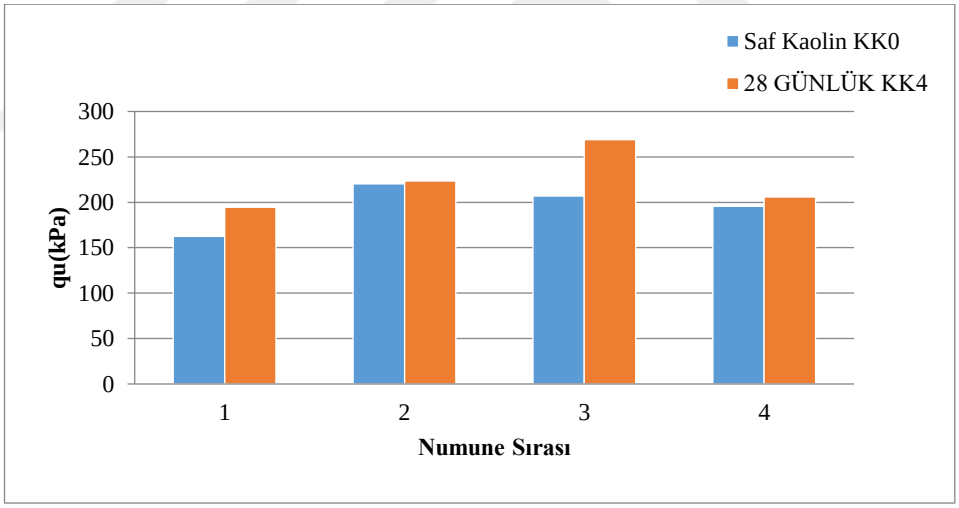
### 4.4.1.2. %4 kolemanit katkılı kaolin kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları

Düşük plastisiteli kaolin kiline %4 kolemanit katkısı eklenerek uygulanan serbest basınç deneyi için öncelikle %19,460 oranında su ve %4 oranında ise kolemanit katkısı ilave edilerek homojen karışım oluncaya karıştırılmıştır. Herhangi bir su kaybına ve deformasyona uğramaması için hazırlanan numuneler hassas bir şekilde serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Serbest basınç deneyi sonrası elde edilen veriler ile Şekil 4.54.'de verilen bentonit kiline ait gerilme (kPa) - boy kısalması(%) davranışını ve mukavemet değerini saptamak amaçlanmıştır.




Şekil 4.54. %4 kolemanit ilaveli kolemanit kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği

Şekil 4.55.'de saf kaolin ve %4 kolemanit katkılı kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri verilmiştir.



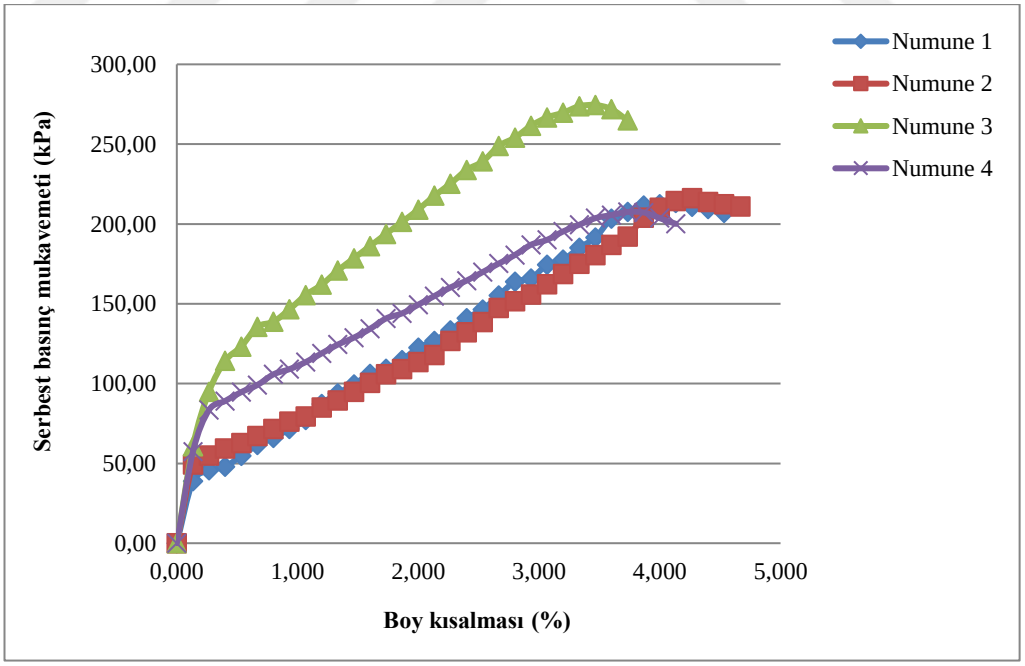

Şekil 4.55. Saf kaolin ve %4 kolemanit katkılı kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri

%4 kolemanit katkılı kaolin ait serbest basınç deney sonuçlarına göre %19,460 su muhtevasındaki kolemanit katkılı kaolin kilinin, optimum su muhtevasındaki saf haldeki kaolin kıyasla 28 günlük kür süresinin sonunda serbest basınç mukavemet değerlerinde artış olduğu gözlemlenmektedir. %4 kolemanit katkılı bentonitin mimum mukavemet değerinin 194,72 (kPa) maksimum mukavemet değerinin ise 268,96 (kPa) olduğu görülmektedir. Elde edilen verilere göre kaolin kiline %2 kolemanit katkısı ilave edimesiyle dayanım değerinin az miktarda da olsa arttığı görülmektedir.

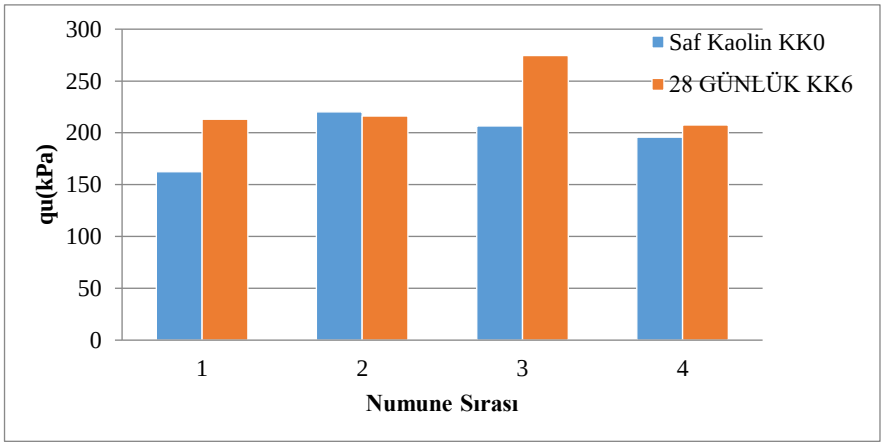
#### 4.4.1.3. %6 kolemanit katkılı kaolin kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları

Düşük plastisiteli kaolin kiline %6 kolemanit katkısı eklenerek uygulanan serbest basınç deneyi için öncelikle %19,224 oranında su ilave edilerek homojen karışım oluncaya karıştırılmıştır. su muhetvasında herhangi bir değişim olmaması ve deformasyona uğramaması için hazırlanan numuneler hassas bir şekilde serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Serbest basınç deneyi sonrası elde edilen veriler ile Şekil 4.56.'da verilen bentonit kiline ait gerilme (kPa) - boy kısalması(%) davranışını ve mukavemet değerini saptamak amaçlanmıştır. Ayrıca Şekil 4.57.'de saf kaolin ve %6 kolemanit katkılı kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri verilmiştir.

%6 kolemanit katkılı kaolin ait serbest basınç deney sonuçlarına göre %19,224 su muhtevasındaki kolemanit katkılı kaolin kilinin, optimum su muhtevasındaki saf haldeki kaolin kıyasla 28 günlük kür süresinin sonunda serbest basınç mukavemet değerlerinde artış olduğu gözlemlenmektedir. %6 kolemanit katkılı bentonitin mimum mukavemet değerinin 207,49 (kPa) maksimum mukavemet değerinin ise 274,49 (kPa) olduğu görülmektedir.




Şekil 4.56. %6 kolemanit ilaveli kaolin kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği

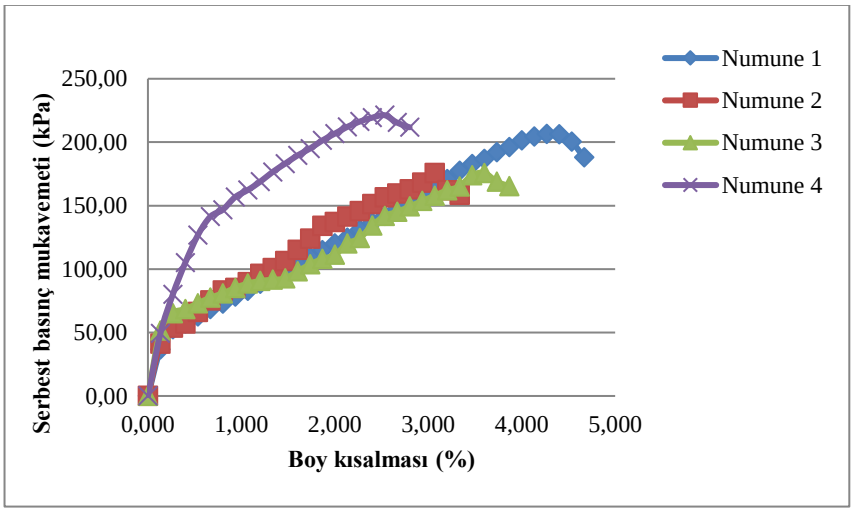



Şekil 4.57. Saf kaolin ve %6 kolemanit katkılı kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri

Elde edilen verilere göre kaolin kiline %6 kolemanit katkısı ilave edimesiyle dayanım değerinin diğer oranlara göre en çok arttığı görülmektedir.

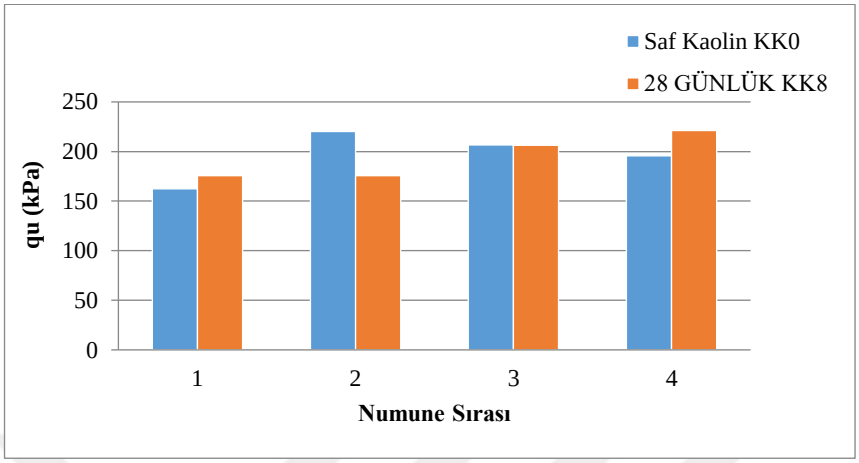
#### 4.4.1.4. %8 kolemanit katkılı kaolin kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları

Kaolin kiline %8 kolemanit katkısı eklenerek uygulanan serbest basınç deneyi için öncelikle %19,554 oranında su ilave edilerek homojen karışım oluncaya karıştırılmıştır. Elde edilen karışım numunesinin su içeriğinde herhangi bir değişim olmaması ve deformasyona uğramaması için hazırlanan numuneler hassas bir şekilde serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Serbest basınç deneyi sonrası elde edilen veriler ile Şekil 4.58.'de verilen bentonit kiline ait gerilme (kPa) - boy kısalması(%) davranışını ve mukavemet değerini saptamak amaçlanmıştır.




Şekil 4.58. %8 kolemanit ilaveli bentonit kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği

Şekil 4.59.'da saf kaolin ve %8 kolemanit katkılı kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri verilmektedir.



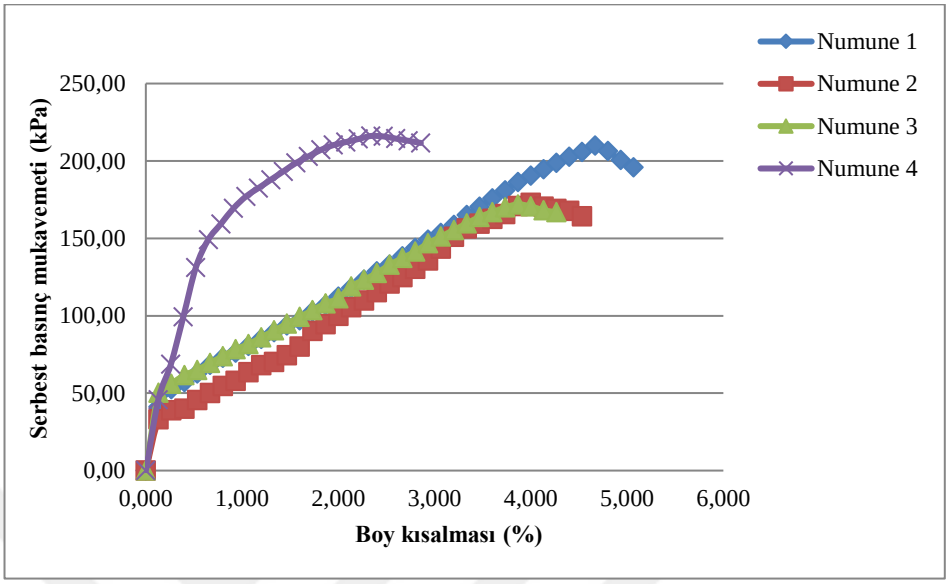

Şekil 4.59. Saf kaolin ve %8 kolemanit katkılı kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri

%19,554 su içeriğinde homojen bir şekilde yoğurularak hazırlanan 4 adet deney numunesi üzerinde gerçekleştirelen basınç testi sonrası kaolin kiline ait mukavemet değerleri bulunmuştur. Deney sırasında hazırlanan numunelerin segregasyona uğrayarak mukavemet değerini düşürebileceği öngürülerek herbir katkı oranı ve saf malzeme için 4 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Serbest basınç deneyi sonrası elde edilen verilere bakıldığında %8 kolemanit katkılı kaolin kilinin minimum mukavemet değerinin 175,60 (kPa), maksimum değerinin ise 221,27 (kPa) olduğu görülmektedir. Elde edilen mukavemet değerlerine bakıldığında kaolin kiline %8 kolemanit katkısı ilave edildiğinde, 28 günlük kür süresi sonrası kilin dayanımının hemen hemen hiç değişmediği görülmektedir.

#### 4.4.1.5. %10 kolemanit katkılı kaolin kili serbest basınç dayanım deneyi bulguları

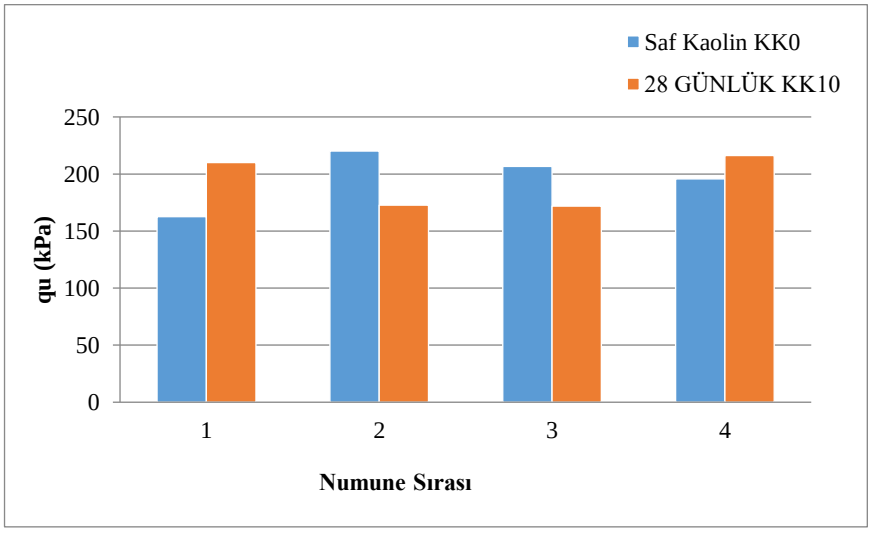
Kaolin kiline %10 kolemanit katkısı eklenerek uygulanan serbest basınç deneyi için öncelikle %18,91 oranında su ilave edilerek homojen karışım oluncaya karıştırılmıştır. Elde edilen karışım numunesinin su içeriğinde herhangi bir değişim olmaması ve deformasyona uğramaması için hazırlanan numuneler hassas bir şekilde serbest basınç deneyine tabi tutulmuştur. Serbest basınç deneyi sonrası elde edilen veriler ile Şekil

4.60.'da bentonit kiline ait gerilme (kPa) - boy kısalması(%) davranışını ve mukavemet değerini saptamak amaçlanmıştır.




Şekil 4.60. %10 kolemanit ilaveli bentonit kilinin 28 günlük serbest basınç dayanım grafiği

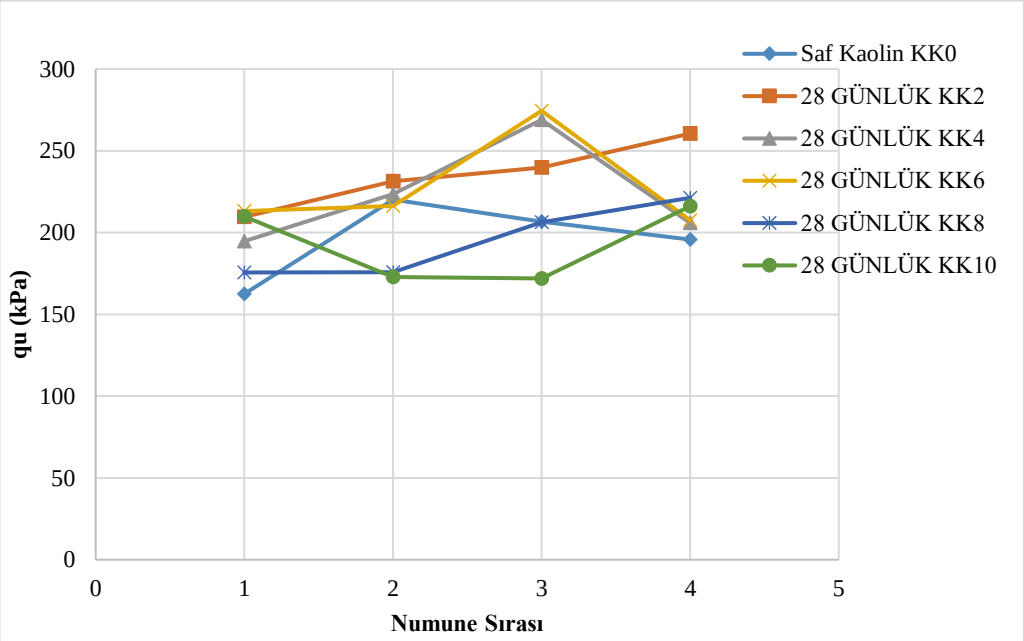
Şekil 4.61'de saf kaolin ve %10 kolemanit katkılı kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri verilmiştir.




Şekil 4.61. Saf kaolin ve %10 kolemanit katkılı kaolin kiline ait 4 adet numunenin mukavemet değerleri

%18,91 su içeriğinde homojen bir şekilde yoğurularak hazırlanan 4 adet deney numunesi üzerinde gerçekleştirelen basınç testi sonrası kaolin kiline ait mukavemet değerleri bulunmuştur. Deney sırasında hazırlanan numunelerin segregasyona

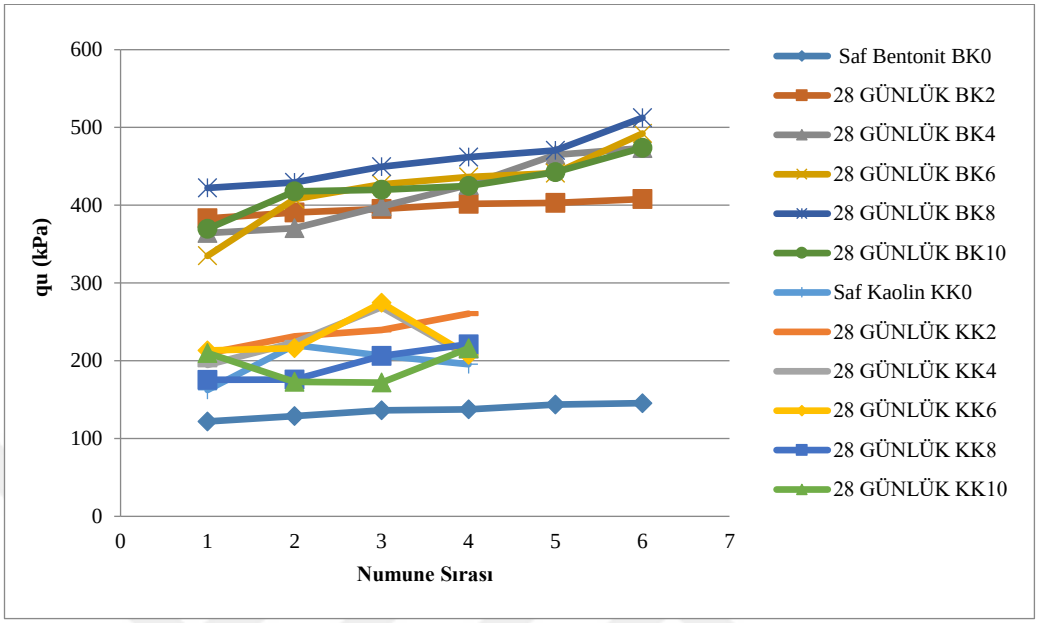
uğrayarak mukavemet değerini düşürebileceği öngürülerek herbir katkı oranı ve saf malzeme için 4 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Serbest basınç deneyi sonrası elde edilen verilere bakıldığında %8 kolemanit katkılı kaolin kilinin minimum mukavemet değerinin 171,95 (kPa), maksimum değerinin ise 216,12 (kPa) olduğu görülmektedir. Elde edilen mukavemet değerlerine bakıldığında kaolin kiline %8 kolemanit katkısının 28 günlük kür süresi sonrası kilin mukavemet değerini değiştirmediği görülmektedir. Şekil 4.62.'de 28 günlük kür süresine göre saf kaolin ve kolemanit ilaveli karışım numunelerine ait mukavemet değerleri gösterilmektedir.




Şekil 4.62. 28 günlük kür süresine göre saf kaolin ve kolemanit ilaveli karışım numunelerine ait mukavemet değerleri

Kaolin kiline %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit ilave edilerek her bir oran için optimum su içeriklerinde deney numuneleri homojen olarak karıştırılıp hazırlanmıştır. Saf bentonit ve %2, %4, %6, %8 ve %10 katkılı kolemanit katkılı 4 'şar adet hazırlanan karışım numuneleri 28 günlük kür sürelerine tabi tutularak dayanım değerleri belirlenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere kaolin kiline kolemanit katkısı eklenmesiyle diğer oranlara kıyasla en fazla %6 kolemant katkısı değerinde arttığı gözlemlenmektedir. Ancak düşük plastisite özelliğine sahip kaolin kiline kolemanit katkısı ilave edilmesiyle dayanım değerlerindeki artış çok fazla olmamıştır. Bu bilgilere dayanılarak kaolin kiline kolemanit ilavesini mukavemet değerine etkisi

oldukça az olduğu görülmektedir. Şekil 4.63.'de 28 günlük kür süresine göre kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin mukavemet değerleri verilmiştir.




Şekil 4.63. 28 günlük kür süresine göre kolemanit ilaveli bentonit ve kaolin killerinin mukavemet değerleri

Yüksek plastisite özelliğin sahip bentonit kili ve düşük plastisite özelliğindeki kaolin killeri ile %2,%4,%6,%8 ve%10 kolemanit katkılı numunelee ait mukavemet değerleri verilmiştir. 28 günlük kür süresine tabii tutulan deney numuneleri serbest basınç dayanım testinden sonra elde ediler veriler doğrultusunda mukavemet değerleri bulunmuştur. Saf bentonit ve saf haldeki kaolin killerine kolemanit katkısının dayanıma olan etkisi gözlemlenmiştir. Bentonit kiline belirlenen oranlarda kolemanit katkı maddesi olarak kullanıldığında, mukavemet değerinde oldukça yüksek artış sağlandığı görülmektedir. Ancak Düşük plastisiteli kaolin kiline belirlenen oranlarda kolemanit ilave edilmesiyle elde edilen dayanım değerlerine bakıldığında, bentonit kiline kıyasla dayanım değerlerinin çok az değiştiği görülmektedir. Kaolin kili için %2,%4, %6 kolemanit katkısı oranlarda az da olsa mukavemet artışı gözlenirken %8 ve %10 kolemanit katkısı eklendiğindeki mukavemet değerinin saf haldeki kaolin kilinin mukavemet değeriyle hemen hemen aynı olduğu görülmüştür.

# 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Zeminlerin mühendislik parametleri incelendiğinde, düşük direnç ve yüksek deformasyon özelliği gösteren zayıf zeminlerin, en düşük maliyetle en etkin iyileştirme yöntemi seçilerek zeminlerin taşıma gücü değerlerinin artması beklenmektedir. Bu kapsamda, farklı plastisite öelliği gösteren iki farklı kil grubuna ait zemin numuneleri üzerinde gerçekleştirlen laboratuvar denyeleri ile mühendislik parametreleri belirlenmiştir. Yüksek plastisite özelliği gösteren bentonit ile düşük plastisite özelliğine sahip kaolin killeri, %2, %4,%6, %8 ve %10 oranlarında ağırlıklarınca kolemanit minerali stabilizatör olarak kullılarak mühendislik parametrelerindeki değişimler incelenmiştir. Bu sayede farklı plastisitee özelliğine sahip kil gruplarında zemin stabilizasyonunda kolemanit mineralinin kullanımının, stablizasyonda etkili performans gösterip gösteremeyeceği irdelenmiştir. Laboratuvarda gerçekleştirlen zemin deneyleri sonrasında elde edilen bulgular analiz edilerek aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Yapılan deneysel çalışmalarda öncelikle bentonit ve kaolin killerine ait likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerleri bulunmuştur. Daha sonra %2, %4,%6, %8 ve %10 oranlarında ağırlıklarınca kolemanit ilaveli karışım numunelerinin kıvam limitleri değerleri bulunmuştur. Bentonit kiline %2, %4 ve %6 oranlarında kolemanit ilave edilmesi ile likit limit değerinin arttığı ancak %8 ve %10 kolemanit katkılı bentonit kilinde likit limit değerinin azaldığı görülmektedir. Bentonit kiline ait plastik limit değerlerine bakıldığında, kolemanit minerali eklenmesiyle plastik limit değerinin, herbir karışım oranına ait numunelerde arttığı görülmektedir.
- Bentonit kiline belirlenen oranlarda kolemanit minerali ilave edilmesiyle elde edilen plastisite indisi değerlerine bakıldığında %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit katkılı bentonit kilinin plastisite indisinin azaldığı görülmektedir. Herbir orana ait plastsite indisi değerlerine bakıldığında %8 kolemanit katkılı bentonit kilinin plastisite indisi değerinin en düşük değer olduğu saptanmaktadır. Zemin plastisite indisinin azalmasıyla birlikte plastik halde katı hale geçerek mukavemeti artmaktadır.

- Bentonit kiline %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit minerali eklenerek 24 saat kür süresine bırakılan numunelerin kıvam limit değerlerine bakıldığında, %2 kolemanit katkısı ilave edilmesiyle likit limit değerinin arttığı diğer oranlarda likit limit değerinin az da olsa azalmaya bailadığı görülmektedir.
- Bentonit kiline ait numunelerin 24 saat kür süresine bırakılmasıyla %10 kolemanit katkılı numunelerin plastik likit değerinin arttığı diğer tüm oranlarda plastik limit değerinin azaldığı görülmektedir. Bentonit kili ile %2,%4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit katkılı numunelerin, 24 saat kür süresine tabi tutulmasıyla elde edilen plastisite indisi değerlerine bakıldığında, %8 ve %10 oranlarında kolemanit katkılı numunelerin plastisite indisi değerlerinin azaldığı görülmektedir.
- Bentonit kiline belirli oranlarda kolemanit ileva edilmesi ile hazırlanan karışım numunelerinin saat kür süresine tabii tutulması ile elde edilen sonuçlar kıyaslandığında, 24 saat kür süresine tabi tutulan numunelerin bentonit yüksek su tutma özelliğinden dolayı likit limit değerinin arttığı görülmektedir.
- Düşük plastisite özelliği gösteren kaolin kiline %2 %4, %6, %8 ve %10 kolemanit minerali katkı maddesi olarak kullanılmasıyla elde edilen kıvam limitleri incelendiğinde, likit limit değerinin çok az miktarda azaldığı görülmektedir.
- Kaolin kiline ait plastik limit değerlerine bakıldığında %2 %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit ilave edilmesiyle plastik limit değerlerinin azaldığı görülmektedir. Kaolin kiline ait plastisite indisi değerleri irdelendiğinde herbir oranda plastisite indisi değerinin azaldığı görülmektedir. Fakat kaolin kilindeki kıvam limit değerlerindeki değişim oldukça az miktarda olduğu görülmektedir.
- Kaolin kiline %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit minerali eklenerek 24 saat kür süresine bırakılan numunelerin kıvam limit değerlerine bakıldığında, %10 oranında kolemanit katkısı ilave edilmesiyle likit limit değerinin arttığı diğer oranlarda likit limit değerinin az da olsa azaldığı görülmektedir.
- 24 saat kür süresine tabii tutulan kaolin kili ile hazırlanan numunelee bakıldığında plastik limit değerinin %8 oranında kolemanit ilave edilmesiyle arttığı, diğer tüm oranlarda plastik limit değerinin neredeyse değişmediği görülmektedir. 24 saat kür süresinde bekletilen kaolin kiline %8 oranında kolemanit ilave edilmesiyle hazırlanan numunelerin en düşük plastisite indisi değerini gösterdiği görülmektedir. Ancak bu değişimler oldukça az miktarda olduğu saptanmaktadır.

- Kaolin kilin 24 saat kür süresine tabi tutulmasıyla elde edilen kıvam limitlerine bakıldığında, kür süresinin kıvam limitlerine etkisinin neredeyse hiç olmadığı görülmektedir. Kaolin kiline ait kıvam limitleri değerlerinin kür süresine bağlı olarak değişmemesinin, kaolin kilinin düşük plastisite özelliği göstermesiyle, kür süresine bağlı olarak su tutma kapasitesinin az olduğu öngörülmektedir.
- Bentonit ve kaolin kiline ait kıvam limit değerlerine bakıldığında, bentonit kiline kolemanit mineralinin ilave edilmesiyle birlikte kıvam limit değerlerinde oldukça etkin bir değişim görülürken, kaolin kiline kolemanit minerali ilave edilmesiyle kıvam limit değerlerindeki değişimin oldukça az olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak bentonit kilinin, kaolin kiline göre yüksek su tutma özelliğine sahip olduğu ve bentonit kilinin yüksek plastisite özelliği gösterdiğini saptanmaktadır. Bentonit kilinin plastisite indisinin azalmasıyla birlikte plastik halde katı hale geçerek mukavemet değerinin kaolin kiline göre daha çok arttığı öngörülmektedir.
- Bentonit kiline kolemanit minerali eklenmesiyle, maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında artma ve optimum su içeriklerinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Bentonit kiline % oranında kolemanit minerali ilave edilmesiyle, en düşük optimum su muhtevası %8 oranında kolemanit minerali eklenen karışım numunelerinde görülmektedir. Bentonit kiline %2, %4, %6, %8 ve %10 oranında kolemanit minerali ilave edilmesiyle maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde artma olduğu saptanmaktadır. Bu sayede kuru birim hacim ağırlık değerinin saf bentonite kıyasla katkılı numunelerde artmasıyla, kolemanit mineralinin katkı maddesi olarak kullanılmasının, taşıma gücü değerinin artmasına, porozitenin ve permeabilitenin azalmasına katkı sağlayacağı öngörülmektedir.
- Kaolin kiline kolemanit minerali eklenmesiyle, maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında artma ve optimum su içeriklerinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Ancak saf kaolin kiline kıyasla kolemanit ilave numunelerin optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarındaki değişimler oldukça az miktarda olduğu görülmektedir.
- Bentonit kili ile hazırlanan numunelerin kür sürelerine bakıldığında saf bentonitin kür süresine ve katkı oranına bağlı olarak dayanım kazandığı görülmüştür. %2, %4, %6,%8 ve %10 kolemanit katkılı numuneler 28 günlük küresi sonrası dayanım değerlerine bakıldığında, en yüksek değeri en düşük plastisite indisine sahip %8 kolemanit katkısı ile sağlandığı görülmektedir.

- Yüksek plastisiteli kil olan bentonit için kolemanit katkısı belirli bir orana kadar dayanımı arttırdığı gibi belirli orandan sonra dayanıma etkisi sabit şekilde devam etmektedir. Bu çalışmada katkı maddesi olarak seçilen kolemanit %8 oranında bentonit kiline ilave edilmesiyle, en iyi dayanım değerlerini gösterdiği saptanmaktadır . Plastisite, sıkışma ve dayanım açısından optimum sonuç %8 kolemanit katkılı bentonit kili için elde edilmiştir.
- Kaolin kiline %2, %4, %6,%8 ve %10 oranlarında kolemanit minerali eklenmesiyle elde edilen sonuçalara bakıldığında, 28 günlük kür süresine tabi tutulan karışım numunelerinin dayanım değerlerinin arttığı görülmektedir. Ancak dayanım değerlerindeki bu artış kaolin kilinde bentonit kiline kıyasla oldukça az miktarda gerçekleşmektedir.
- Yüksek plastisite özelliği gösteren bentonit ve düşük plastissite özelliğine sahip kaolin killerine %2, %4, %6,%8 ve %10 oranlarında kolemanit minerali eklenerek gerçekleştirilen laboratuvar deney sonuçlarına bakıldığında, bentonit kiline kolemanit mineralinin eklenmesiyle kıvam limitlerinde değişim meydana geldği görülmektedir. Ancak kaolin kiline kolemanit mineralinin ilave edilmesi kıvam limitlerine bentonit kiline kıyasla daha az etki gösterdiği görülmektedir. Bu nedenle bentonit kiline kolemanit mineralinin katkı maddesi olarak kullanılması ile plastik halden katı hale geçerek dayanımının artacağı öngörülmektedir.
- Bentonit ve kaolin killerine %2,%4, %6,%8 ve %10 oranlarında kolemanit ilave edilmesiyle hazırlanan karışım numunelerine ait kompaksiyon deney sonuçlarına bakıldığında optimum su içeriği ve kuru birim hacim ağırlıklarındaki değişim bentonit kilinde daha fazla olduğu görülmektedir. Bu değişimler göz önünde bulundurulduğunda, bentonit kiline kolemanit mineralinin katkı maddesi olarak kullanılması kaolin kiline göre sıkıştırabilirliğinin daha fazla olduğu saptanmaktadır.
- Bentonit kili ile kaolin kiline ait mukavemet değerlerine bakıldığında; %2,%4, %6,%8 ve %10 oranlarında kolemanit ilave edilen numunelerin, bentonit kilinde daha fazla mukavemet artışı sağladığı görülmektedir. Kaolin kiline kolemanit mineralinin katkı maddesi olarak eklenmesi, kaolin kilinin mukavemet değerlerini arttırmıştır ancak gözlemlenen artış değerlerine bakıldığında kaolin kiline kolemanit mineralinin ilave edilmesinin dayanıma etkisinin çok az olduğu görülmektedir.

- Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen laboratuvar deney sonuçlarına bakıldığında kolemanit mineralinin, yüksek plastisite özelliği gösteren killer üzerinde oldukça etkin bir iyileştirme sağladığı görülmektedir. Ancak düşük plastisite özelliği gösteren kaolin kiline kolemanit mineralinin stabilizasyonda katkı maddesi olarak eklenmesi, dayanım değerlerine az miktarda da olsa olumlu etki göstermesine rağmen kıvam limitlerinde çok az miktarda değişim gösterdiği saptanmaktadır.
- Kolemanit mineralinin zemin stabilizasyonunda kullanabilirliğinin ve aynı zamanda en etkin performansın görüleceği katkı oranının araştırılması ile yapılan gerçekleştirlen çalışmaların sonucu; yüksek plastisite özelliği gösteren %8 kolemanit katkılı bentonitin kıvam limitleri, kompaksiyon ve taşıma gücü değerleri göz önünde bulundurularak plastisite, sıkışma özelliği, işlevsellik ve mukavemet değerlerine etkisinin en etkili performansın bu oranda sağlandığı görülmektedir.
- Bu çalışma ile kolemanit mineralinin yüksek plastisiteli zeminlerde stabilizatör olarak kullanılabilirliği öngürülmektedir. Ülkemizde son dönemlerde ticari ve stratejik öneme sahip bor minerallerinin en çok kullanılan çeşidi olan kolemanit mineralinin yeni bir kullanım alanı olarak zemin stabilizasyonunda alternatif bir katkı malzemesi olarak kullanılmasının araştırılmasına fayda sağlayacağı ve bor madeni çeşitlerinin, killi zeminlerin stabilizasyonunda katkı maddesi olarak kullanılmasının araştırılmasına katkı sağlaması beklenmektedir.
- Ülkemizde, dünya rezervlerinin büyük bir kısmını oluşturduğu bor madeninin fazla miktarda kullanılabileceği yeni bir kullanım alanı olarak inşaat sektöründe kullanılması ile hedeflenmektedir. Bor, minerallerin yeni bir kullanım alanı olarak zemin iyileştirmesinde kullanılması hem ülke ekonomisine olan katkıyı artırması hem de çevreci bir yaklaşım sunması beklenmektedir. Bu sayede bor ürünlerinin yeni kullanım alanlarının ortaya konmasında önemli bir çalışma olacağı öngörülmektedir.

Bu tez çalışmasının, ileriki zamanlarda gerçekleştirelecek çalışmalara katkı sağlayabilmesi öngürülerek aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

- Bu tez çalışması kapsamında, yüksek plastisiteli killeri temsilen bentonit kili ile düşük plastisite kil grubunu temsilen kaolin kili ile zemin stabilizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneyler ile iyileştirme yapılacak bölgeninin koşulları göz önünde bulunularak yerinde arazi deneyleri ile

mühendislik parametreleri incelenerek kolemanitin zemin stabilizasyonuna katkısı irdelenebilir.

- Bor madeninin farklı çeşitleri kullanılarak, zemin stabilizasyonunda bor türevlerinin kullanılabilirliği araştırılabilir. Bu sayede yüksek plastisiteli ve düşük plastisiteli killerin stabilizasyonunda bor madeninin çeşitleri kullanılarak, bor çeşitlerinin içerisinde barındırdığı minerallerin farklılığının stabilizasyona etkisi gözlemlenebilir.
- Bu çalışma kapsamında, yüksek ve düşük plastisiteli killere %2,%4, %6, %8 ve %10 oranlarında kolemanit katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Aynı kolemanit oranları ile kireç, çimento gibi zemin stabilizasyonunda yaygın olarak kullanılan alternatif stabilizatör malzemeleri ilave edilerek hazırlanan çeşitli kombinasyonlarda karışım numuneleri üzerinde mühendislik deneyleri gerçekleştirilerek, zemin parametrelerindeki değişimler kıyaslanabilir.

## KAYNAKLAR


Acar C. M., Kayseri Çinko-Kurşun Üretim Tesisi (Çinkur A.Ş) Atıklarının Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2018, 77203.

Aksoy H. İ., Çetinkaya M., Polipropilen Liflerin Uçucu Kül Zemin Karışımlarında Geoteknik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013, 323917.

Aksoy S. H., Yılmaz M., Akarsu E. E., Killi Bir Zeminin Tunçbilek Uçucu Külü Kullanılarak Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Alami İ. M., Killi Zeminlerin Dayanım Özelliklerinin Iyileştirilmesi Ve Temel Alt Zemini Olarak Kullanılabilirliğinin Incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 2018, 540280.

Albayrak Kurt N. Z., Turan E., Kestelek Bor Atık Kili Katkılı Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Mukavemet Özelliklerinin Araştırılması, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2019, **9**(2), 890-899.

Alpyürür M., Zemin Iyileştirmesinde Öğütülmüş Gazbeton Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016, 439701.

Altınköprü N., Bor Endüstri Atıkları Ve Prina Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2010, 292548.

Arslan Ö., Traverten Tozu Ile Stabilize Edilmiş Bir Zeminin Mukavemet Özelliklerindeki Değişimler Ile Hidrolik Geçirgenliğinin Labaratuvar Boyutlarında Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019, 558132.

As M., Sülfatın C Sınıfı Uçucu Kül Ve Kireç Ile Stabilize Edilen Şişen Zemine Etkisinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019, 612724.

ASTM D 698, Standart Test Methods for Laboratory Compaction Characteristic of Soil Using Standart Effort, *American Society For Testing And Materials*, Pennsylvania, 2015.

Atterberg A., Über die Physikalische Bodenuntersuchungandüber die Plastizitat der Tone, *Internationale Mittelungenfur Bodenkunde*, 1911, **1**, 10-43.

Aydın U., Kolemanit Atığının Beton Dayanımına Olan Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay, 2009, 245958.

Aygörmez Y., Kolemanit atığı ve silis dumanı katkılı metakaolin tabanlı geopolimer harcın mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018, 532163.

Aytekin M., *Deneysel Zemin Mekaniği*, Teknik Yayınevi, Ankara, 2004.

Aziz A., Şişen Killerin Endüstriyel Atık Kullanılarak Iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep, 2012, 318430.

Başer O., Stabilization of Expansive Soils Using Waste Marble Dust, Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 2009, 238729.

Batman A., Öğütülmüş Kuvars Kumunun Kilin Mukavemet Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2015, 380503.

Bell F. G., Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils, *Engineering Geology*, 1996, **4**(2), 223-237.

Bideci Sallı Ö., Bor Kaplı Hafif Agregalı Betonların Fiziksel Ve Kimyasal Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 2013, 307646.

Bilge T., Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Kil Zeminlerin Stabilizasyonuna Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2011, 299344.

Bilgen G., Yüksek Fırın Curufu Ile Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2004, 155087.

Bilgen G., Kavak A., Çapar F. Ö., Düşük Plastisiteli Bir Kilde Katkı Olarak Çelikhane Curufunun Kullanılması ve Kireç ile Etkileşimi, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2012, **2**(2), 30-38.

Bozkurt Sarıalioğlu Ş., Ulubey T1 Tünel Güzergâhındaki Yol Üstyapı Tabanında Yeralan Bentonit Killerinin Çeşitli Katkı Malzemeleriyle Iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010, 268900.

Cernica J. N., *Geotechnıcal Engıneerıng Soıl Mechanıcs*, John Wiley & Sons, USA. 1995.

Chen, F.H., *Foundation on Expansive Soils*, New York: Elsevier Publications, 1975.

Civelekoğlu B., Şişebilen Killi Zeminlerin Doğal Jips Katkısı Kullanılarak Iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 2009, 245911.

Coduto D. P., *Geoteknik Mühendisliği İlkeler ve Uygulamalar*, Çeviri, Mahmutoğlu M., Kayabalı K., Gazi Kitapevi, 2006.

Çabalar F. A., Şişen Bakteriler Ve Polimerler Yardımıyla Zemin Iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep, 2002, 121733.

Çağlar C., Şişen Killi Zeminlerin Kızıl Çamur Ile Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2019, 582561.

Çakılcıoğlu İ., Yüksek Plastisiteli Killerin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2007, 216270.

Çakır M., Uçucu Kül Ve Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1999, 98397.

Çalık Ü., Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç ile Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2012.

Çetin A.Y., Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerinin Alternatif Malzemeler İle Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011, 295471.

Çetiner I. S., Stabilization Of Expansive Soils By Çayirhan Fly Ash And Desulphogypsum, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2004, 153547.

Çiçek Baytekin G., Kolemanit Konsantratör Atığı Katkılı Çimento Ile Üretilen Harçların Normal Portland Çimentosu Ile Üretilen Harçla Sıcaklık Etkisi Yönünden Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2018, 537853.

Çimen Ö., Dereli B., Bentonitin Mühendislik Özelliklerine Mikronize Kolemanitin Etkisi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 2014, **4**(2), 12-17.

Çoruh E., Hınısoğlu S., Kocakerim M., Arasan S., Borojipsin Alttemel Tabakasinda Stabilizasyon Malzemesi Olarak Kullanilmasinin Araştirilmasi, *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2013, **6**(2), 221-231.

Das B. M., *Advanced Soil Mechanics*, Third Edition. Taylor & Francis, USA, 2008.

Dayan M., Silis Dumanı Ve Sentetik Fiberlerle Modifiye Edilmiş Killerin Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, 2019, 566218.

Deewal K., Dharavath K., Kulshreshtha M., Stabilization of Red Mud By Lime, Gypsum and Investigating Its Possible Use As A Geotechnical Material in the Civil Construction, *International Journal of Advances in Engineering and Technology*, 2014, **7**(4), 1238-1244.

Demir E., Yüksek plastisiteli kil stabilizasyonunda silis dumanı ve mermer atıklarının kireçle beraber kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Bayburt Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bayburt, 2019, 576019.

Demirbaş G., Stabilization of Expansive Soils Using Bigadic Zeolite (Boron ByProduct), Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara 2009.

Demiröz A., Karaduman M., Zemin İyileştirme Metotları, *Journal of Technical Online*, 2009, **8**(3), 176-192.

Dereli B., Bor Ve Amorf Silikanin Bentonitin Mühendislik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2013, 341629.

Devlet Planlama Teşkilatı, *Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı*, Devlet Planlama Teşkilatı Yayın No: 2822, Başbaklanlık Basımevi. Ankara, 1-65, 2001.

Diallo L. M., Ünsever Y. Ş., İnşaat yıkıntı atığı ve kireçle kil zeminin stabilizasyonu üzerine deneysel bir çalışma, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, DOI: 10.5505/pajes.2019.51436.

Durgun Y. M., Pomza, Kolemanit, Barit Ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Boyalarla Kaplanan Beton Ve Donatıların Korozyon Performansı, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 2011, 284458.

Durmuş C., Bor katkılı çimentoların özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2016, 438878.

Eken M., Organik Küller Ve Inorganik Minerallerle Üretilen Betonların Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 2018, 513068.

Emre M., Konsantre bor ürünlerinin betonda katkı maddesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2016, 442776.

Elbistan K., Afşin-Elbistan Termik Santral Uçucu Külünün Standarda Uygun Hale Getirilmesi Ve Betonun Dayanıklılığına Etkisinin Incelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 180493.

Erdoğmuş E., Çimentoya Bor Katkısı, Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu İlavesiyle Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 2019, 563984.

Eren Ş., Filiz M., Beyaz Bentonit Malzemesinde Alternatif Katkı Maddesi Olarak Kullanılan Consolid Sistemi ile Geleneksel Zemin Stabilizasyon Yöntemlerinin Karşılaştırılması Softwares, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2007, **11**(2), 163-172.

Eroğlu H., Kraft Kağit Hamuru Fabrikasi Kimyasal Geri Kazanma Ünitesinde Oluşan Anorganik Atiğin (Kireç Çamuru) Orman Yolu Stabilizasyonunda Değerlendirilmesi, *Kafkas Üniversitesi Artvin Orman Fakültesi Dergisi*, 2005, **6**(1-2), 146-154.

Eskişar T., Altun S., Kalsiyum Karbür İle İyileştirilen Bir Zeminin Mühendislik Özellikleri, *7. Geoteknik Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 22-23-24 Kasım 2017.

Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, *Bor Sektörü Raporu 2013*, 2014.

Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, http://www.etimaden.gov.tr/storage/uploads/2018/05/Stratejik_plan_2015_2019.pdf, (Ziyaret Tarihi: 05.Haziran.2020)

Etminan E., Soft Soil Stabilization Using Fly Ash, Polypropylene, Copolymer and Vhp, Master Thesis, İstanbul Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, İstanbul, 2012, 323887.

Eyüboğlu S., Kolemanit Konsantratör Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2013, 352068.

Fındık A., Kolemanit konsantratör atığının beton ve harç numunelerinin bazı özelliklerine etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay, 2007, 202762.

Gehabee S., Kireç Ile Stabilize Edilmiş Bentonitin Kür Süresinin Mukavemet Üzerindeki Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015, 397856.

Geçkil T., Sarıcı S., Yıldıran S. E., Kireç Katkısı ile Kil Bir Zeminin Dayanımının İyileştirilmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi,* 2019, **34**(4), 171-179.

Gençel O., Hamile Ratlarda Oksidatif Strese neden Olan Radyasyona Karşı Kolemanitli Betonun Koruyucu Etkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2009, 234187.

Gündüz O., Şişen Zeminlerin Tinkal Atığı ile Stabilizasyonu ve Meşelik Killerine Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2008, 177253.

Güner U. N., Öğütülmüş Kalsine Bor Minerallerinin Beton Yollardaki Etkinliğinin Incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, 2019, 564028.

Herzog A., Evidence for a Skleton – Matrix Structure in Clays Stabilized with Portland Cement, *5th Australian and New Zealand Conf. Soil Mech. Foundation Engineering*, 1967.

Holtz R., Kovacs W., *Geoteknik Mühendisliğine Giriş*, Çev. Kayabalı, K. Gazi Kitabevi, 636s. Ankara, 2010.

Ingles O. G., *Soil Stabilization*, 38/1 – 38/26, Ground Engineers Reference Book, Bell, F. G. (Ed.), Butterworth and Co. Ltd, 1987.

Ingles O. G., Metcalf, J.B., *Soil Stabilization*, Butterworths, Sydney, 1972.

Işık A. M., Killerin Mukavemet Ve Donma-Çözülme Davranışlarına Reçinelerin Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2019, 583422.

İnan G., Sezer A., Ramyar K., Yılmaz R. H., Değişik Uçucu Küllerin Yüksek Plastisiteli Kilin Serbest Basinç Dayanimina Etkisi, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2005, **20**(1).

Jeoloji Mühendisleri Odası, *Haber Bülteni*, Sayı :2001/1-2, Ankara, 2001.

Japan International Cooperation Agency, *Soil Improvement Techniques*, Japan, 1994.

Johnson A., W., Sallberg, J., R., *Factor that influence field compaction of soils*, D. Brunsden and B. Prior, New York, 1960.

Kara C., Kolemanit Ikameli Beton Yolların Durabilite Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, 2019, 564164.

Kavak A., The Behavior of Lime Stabilized Clays Under Cyclic Loading, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1996, 50492.

Kılıç G., Çimento ile Zemin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008, 213300.

Kılınç, E., Mordoğan, H., ve Tanrıverdi, M., Bor Minerallerinin Önemi, Potansiyeli, Üretimi ve Ekonomisi, 4. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, İzmir, 226-234 s. Ekim, 2001.

Kızılçelik M. M., Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Kireç ile Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli 2010, 275771.

Korçak, Ö.,. Kolemanit Atıklarının Çimento Üretiminde Kullanılması ve Çimentonun Performans Özelliklerinin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2014, 395755.

Korkmaz V., Bor Endüstri Atıkları Ve Traverten Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 2017, 465249.

Koteswara R., Pranav P. R. T., Venkatesh, G., A Laboratory Study on The Efficacy of Rice Husk Ash and Potassium Chloride For The Stabilization of Expansive Soil, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2012, 4, 97-108.

Kula İ., Bor Endüstri Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2000, 104321.

Küçükali Ö., Kireç Ve Jipsin, Üst Pliyosen Yaşlı Yüksek Plastisiteli Killerin (Ankara) Şişme Ve Dayanım Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2011, 299630.

Küçükçelebi H., Ilgın Harami (Konya) Kömür Yatağı Killerinin Kristal Fiziği Yönünden İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1990, 12023.

Lambe, T. W., *The Character and Identification of Expansive Soils: A Report Completed for the Technical Studies Program of the Federal Housing Administration, Federal Housing Administration*, 1960.

Mitchell J.K., Soga K., *Fundamantals of Soil Behavior*, Third Edition. John Wiley & Sons, New York, 2005.

Motor E., Borojipsin Alttemel Tabaksında Stabilizasyon Malzemesi Olarak Kullanılmasının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2007.

Moseley M., P., Kirsch K., *Ground Improvement*, Second edition, Spon Press, 2004.

Mutman, U., Bentonit Kilinin Prina Külü ile Stabilizasyonu, *5. Geoteknik Sempozyumu*, Adana, Türkiye, 5-7 Aralık 2013.

Mushurov, M.,. Portland çimentosu harcında kullanılan bor atık ürünü ve metakaolinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2018, 518052.

Ocakbaşı P., Bazalt fiber katkısının killi zeminlerin drenajsız kayma direncine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2019, 603718.

Örtlek E., Mısır, Buğday Ve Ayçiçeği Sapı Külü Ile Barit Ve Kolemanit Katkılı Betonların Mühendislik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 2015, 392464.

Özaydın K., *Zemin Mekaniği*, (1.Baskı), Birsen Yayınevi, İstanbul, 2015

Özkan İ., Fosfojips kullanarak şişen zeminlerin stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015, 416620.

Özmal F., Bor Endüstri Atıkları, Uçucu Kül, Taban Külü Ve Alünit Mineralinin Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2005, 169218.

Öztürk K., Zemin Iyileştirmesinde Polisaj, Kireç Ve Uçucu Külün Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2011, 287312.

Özenç H., Biyopolimer katkısı ile iyileştirilen zeminlerin mekanik özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2018, 498542.

Pekdemir Y., Silis Dumanı, Kırmızı Çamur Ve Kireç Ile Muamele Edilmiş Mikronize Bir Kilin Bazı Geoteknik Özelliklerinin Incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2013, 335129.

Polat H., Kolemanit'li betonların bazı durabilite özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2012, 318189.

Pulat H. F., Taytak B., Aksoy Yükselen Y., Biyopolimer katkıların killi ve kumlu zeminlerin permeabilite ve kayma dayanımına etkisinin araştırılması, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, DOI: 10.5505/pajes.2016.01328.

Robinson R., Thagesen B., *Road Engineering for Development*, Second Edition, Spon Press, 2004.

Sarıkaya H., Bor Katkılı Özellikli Beton Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2014, 353466.

Savaş H., Toprak Dolgu Barajlarda Kullanılan Yüksek Plastisiteli Killerin Dispersibilite Özelliğinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2000, 96963.

Saygılı A., Kaolen Türü Killi Zeminlerin Dayanım Özelliklerinin Melamin Formaldehit Sıvı Polimeri Kullanarak İyileştirilmesi, *Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 2018, **4**(2), 133-139.

Selman Ş. G., Zemin Iyileştirilmesinde Cürufların Kullanılabilirliği Ve Performansının Karşılaştırmalı Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2015, 382364.

Selgü D., Kolemanit ve bentonitin Divriği mermer cevherinin peletlenmesinde bağlayıcı olarak kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1994, 35268.

Sert, H., *Mostar Köprüsü*, İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara Subesi, 2009.

Seyhan, İ., *Bentonit, Kil Ve Tuğla-Kiremit Toprakları Jeolojisi*, MTA Yayınları, Ankara, 1972.

Sherwood P. T., *The effect of Sulphates on Cement and Lime Stabilised Soils, Roads and Road Construction*, 34 – 40p.

Süt İ., Kohezyonlu Zeminlerin Kireçle İyileştirilmesinin CBR Değeri Üzerindeki Etkisinin İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006, 180411.

Şahin Ş., E., Ham ve Kalsine Kolemanit Atıklarının Tuğla Yapımında Kullanım Olanaklarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2008.

Şengül E., Yüksek Su Muhtevalı Killi Yol Taban Zemininin Kireç Stabilizasyonu Ve Hücresel Dolgu Sistemiyle İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2010, 270694.

Şenol A., Effects of Calcined Phosphogypsum on the Geotechnical Parameters of FineGrained Soils, *Cumhuriyet Science Journal*, DOI: 10.17776/csj.523979.

Şenol, A., Bın-Shafıque, M.S., Edil, T.B., Benson, C.H., Use of Class C Fly Ash For Stabilization of Soft Subgrade, *ARI The Bulletin of The Istanbul Technical University*, **53**, 89-95, Istanbul, 2003.

Şentürk İ., Zemin Iyileştirilmesinde Cürufların Kullanılabilirliği Ve Performansının Karşılaştırmalı Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2019, 571462.

Targan Ş., Kula Cürufu, Bentonit, Kül Ve Kolemanit Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2002, 129152.

Taş M., Fidan D., Yılmaz F., Uçucu Kül ve Bayburt Taşı ile Zemin Stabilizasyonu, *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2018.

Taşpolat T. L., Afyon Atık Mermer Tozları Ve Sırnak Asfaltitlerin Atık Depolama Alanları Tabakalarında Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2006, 181608.

Tülek M., Okucu A., Değirmenci N., Kimyasal Atık Alçıların Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 2014, **26**(2), 101-108.

Tavus F. İ., Effect Of Lime And Curing On Permeability Properties Of Compacted Clay, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1995, 47532.

Tonak T., Borlu Bileşiklerin Çimento Üretiminde Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1997, 58379.

Topçu İ. B., Boğa A. R., Bor Atıklı Çimento Harçlarının Dayanıklılığı, *1. Ulusal Bor Çalıştayı Bildiriler Kitabı*, Ankara, 2005.

Tumluer G., Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2006, 183645.

Tunç E., *Yol Mühendisliğinde Geoteknik Ve Uygulamaları*, 1. Baskı, Atlas Yayınevi, İstanbul, 2002.

Uğurlu A., Boraks Üretiminde Ortaya Çıkan Atık Malzemenin Çimento İçerisinde Puzolanik Malzemeler İle Birlikte Kullanılmasının Çimento Üzerindeki Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2009, 244480.

Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN), https://www.boren.gov.tr/Sayfa/bor-elementi/23, (Ziyaret Tarihi: 03.05.2020)

U.S. Army Corps. of Eng., 2003. *Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities*, Research No. 20314-1000, Department of Army, Washington

Uzuner B.A., *Temel Zemin Mekaniği*, Derya Kitabevi, Trabzon, 2012.

Ünver E., Problemli Kil Zeminlerin Uçucu Kül İle İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2015, 415462.

Velioğlu S., Şimşek, A., İnsan Sağlığı ve Beslenme Açısından Bor, *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, **4**(2), 123-130, 2003.

Vural P., Şişme ve Dispersif Karakteristikteki Kil Zeminlerin Mühendislik Özelliklerine Çimento ve Zeolitin (Doğal Puzolan) Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2012, 310371.

Yamanouchi T. M., Miura N., Matsubayashi N., Fukuda, N., Soil Improvement with Quicklime and Filter Fabric, *J. Geotech. Engineering Div.,* **108**(GT7), 953 – 965p. 1982.

Yavaşcan S., İnce Daneli Zeminlerin Endüstriyel Atık Maddeleri İle İyileştirilme Potansiyelinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 2010, 295483.

Yaltay N., Kolemanit Katkılı Çimento İle Üretilen Pomza Agregalı Hafif Betonun Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2015, 392325.

Yemenici B., Samsun-Kalın (Sivas) Demiryolu Modernizasyon Projesinde Çimento Ve Novocrete İle Zeminlerin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2019, 611463.

Yeşilbaş G., Şişen Zeminlerin Agrega Artığı, Taş Unu Ve Kireç Kullanarak Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2004, 153274.

Yeşilçiçek H., Kolemanitin Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2016, 430775.

Yılmaz K. M., Şişen Killerin Çimento Fırın Tozu Kullanılarak İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2014, 368955.

Yorulmaz A., Mermer Toz Atıkları İle Stabilize Edilmiş Kil Zemin Mukavemetinin, Donma-Çözülme Etkisi Ve Zamana Bağlı Olarak Değişiminin Cbr (California Taşıma Oranı) Deneyleri İle Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 2018, 527604.

Yünlü K., *Bor Bileşikleri, Sentez Yöntemleri, Özellikleri, Uygulamaları,* Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, İstanbul, 2016.

Zeybek, S. M., Borlu Çimentoların Üretilmesi Ve Nötron Tutma Kapasitelerinin Araştırlması, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2000, 104323.

Zorer, Y., Kolemanit Katkılı Çimento Üretiminde Öğütülebilirliğin İncelenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2005, 198238.

Winterkorn H. F., Fang H. Y., *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold Publication, London, 1975.

Woods, Ten Reasons Why TQM Doesn't Always Work, 6-7, McGraw-Hill, New York, 1994.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Bosbıyık C.**, Bentonit Kilinin Kolemanit Minerali İle Stabilizasyonu, *Uluslararası Mühendislik Fen Bilimleri ve Mimarlık Sempozyumu*, Kocaeli, 16 Nisan 2020.

## ÖZGEÇMİŞ

Cansu BOSBIYIK, 1993 ylında Tokat'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Fatsa Atatürk İlköğretim Okulu'nda, lise eğitimini ise Fatsa Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2012 yılında girdiği Sivas Cumhuriyet Üniversitesi'nden 2016 yılında İnşaat mühendisi ünvanı ile mezun oldu. Aynı yıl içerisinde Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı yüksek lisans eğitimini alarak, 2017 yılında mezun oldu. 2018 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı yüksek lisans öğrenimine, tez çalışmasıyla devam etmektedir.