

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TRABZON BÖLGESİ İÇME SUYU ARITMA TESİSİ ÇAMURLARININ
ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ

Kemal AYDIN

TEMMUZ 2025
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TRABZON BÖLGESİ İÇME SUYU ARITMA TESİSİ ÇAMURLARININ
ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI

Kemal AYDIN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09 / 07 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 28 / 07 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Trabzon Bölgesi İçme Suyu Arıtma Tesisi Çamurlarının Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA’ya teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Aykut AKGÜN’ne ve Sayın Prof. Dr. Zekai ANGIN’a, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Son olarak, bu zorlu süreçte desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Ayşegül AYDIN’a, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Saliha AYDIN ve babam Yusuf Kenan AYDIN’a, teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Kemal AYDIN

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Trabzon Bölgesi İçme Suyu Arıtma Tesisi Çamurlarının Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 28/07/2025

Kemal AYDIN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XVI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Trabzon İli Topografik, Jeolojik, İklim ve Meteorolojik Özellikleri.....	4
1.1.1. Topografik Özellikler.....	4
1.1.2. Jeolojik Özellikler	5
1.1.3. İklim ve Meteoroloji	7
1.2. Trabzon İçme Suyu Arıtma Tesisleri	9
1.2.1. Esiroğlu İçme Suyu Arıtma Tesisleri	10
1.2.2. Akçaabat İçme Suyu Arıtma Tesisleri	13
1.2.3. Derecik İçme Suyu Arıtma Tesisleri	14
1.3. İçme Suyu Arıtma Tesislerinin Genel Yapısı ve Atık Çamur Oluşumu	17
1.4. Killi Zeminler	25
1.4.1. Kilin Genel Yapısı ve Özelliği.....	25
1.4.2. Kil Minerolojisi ve Kimyasal Bileşimi	29
1.4.3. Kil Türleri	31
1.5. Problemlili Zeminler.....	37
1.6. Zeminlerin Stabilizasyonu.....	40
1.7. Zemin Stabilizasyonunun Amaçları	41
1.8. Zemin Stabilizasyon Türleri	42
1.8.1. Kireç ile Stabilizasyon	45
1.8.2. Çimento ile Stabilizasyon	48
1.8.3. Uçucu Kül ile Stabilizasyon.....	51
1.8.4. Bitüm ile Stabilizasyon	52

1.8.5. Yüksek Fırın Cürufu ile Stabilizasyon.....	53
1.8.6. Mermer Tozu ile Stabilizasyon.....	54
1.9. İçme Suyu Arıtma Tesisi Atık Çamuru Üzerine Yapılan Çalışmalar	55
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	65
2.1. Atık ve Kil Zemin Malzemelerinin Temini.....	65
2.2. Laboratuvar Deneyleri.....	69
2.2.1. Su muhtevası (w_n) Belirlenmesi.....	70
2.2.2. Piknometre (G_s) Deneyi	70
2.2.3. Likit limit (w_L) Deneyi (Cassagrande deneyi)	72
2.2.4. Plastik Limit (w_p) Deneyi	74
2.2.5. Rötire Limit (Yaklaşık yöntem metodu) Deneyi	74
2.2.6. Standart Proktor Deneyi.....	75
2.2.7. Serbest Basınç Deneyi	78
2.2.8. Konsolidasyon Deneyi	80
2.3. Birinci Etap Deneyler: Malzeme Deneyleri	84
2.3.1. Mineral Özellikleri.....	85
2.3.2. Kimyasal Özellikleri	86
2.3.3. Fiziksel (İndeks) Özellikleri.....	87
2.4. İkinci Etap Deneyler: Atık Oranları Etkisi Deneyleri	95
2.5. Üçüncü Etap Deneyler: Kür Deneyleri	96
2.6. Dördüncü Etap Deneyler: Donma-Çözülme Deneyleri.....	98
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	102
3.1. Kil ve Farklı Tesislere Ait Atık Çamur Malzemelerinin Karakterizasyonu	102
3.1.1. Mineral Özellikleri.....	102
3.1.2. Kimyasal Özellikleri	107
3.1.3. Mühendislik Özellikleri	108
3.2. Atık Malzemesi Karışım Oranlarının Kıvam Limitleri Üzerindeki Etkisi ve Etkili Atık Yüzdelерinin Belirlenmesi	117
3.3. Etkili Atık Yüzdesi ile Hazırlanan Karışımların Kompaksiyon Parametreleri Üzerindeki Etkisi	120
3.4. Etkili Atık Yüzdeleri ile Hazırlanan Karışımların Konsolidasyon Deney Sonuçları Üzerindeki Etkisi.....	122
3.5. Etkili Atık Yüzdeleri ile Hazırlanan Karışımların Serbest Basınç Mukavemeti Üzerindeki Etkisi.....	124
3.6. Kür Süresi ve Malzeme Kaybının Serbest Basınç Mukavemeti (q_u) Üzerindeki Etkisi.....	129

3.7. Donma-Çözülme ve Malzeme Kaybının Serbest Basınç Mukavemeti Üzerindeki Etkisi.....	139
3.8. SEM Analizlerine Göre Mikro Yapı	158
3.8.1. Kür Mazlemelerine ait SEM Görüntüleri ve XRF Analiz Sonuçları	159
3.8.2. Donma-Çözülme Deney Mazlemelerine ait SEM Görüntüleri ve XRF Analiz Sonuçları	167
4. SONUÇLAR.....	179
5. ÖNERİLER.....	182
6. KAYNAKLAR	183
ÖZGEÇMİŞ	



Doktora Tezi

ÖZET

TRABZON BÖLGESİ İÇME SUYU ARITMA TESİSİ ÇAMURLARININ ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Kemal AYDIN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA
2025, 214 Sayfa

Bu çalışmada, içme suyu arıtma tesislerinden elde edilen atık çamurların killi zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabiliirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda, Trabzon ilinin farklı bölgelerinde bulunan Esiroğlu (AÇ-1), Derecik (AÇ-2) ve Akçaabat (AÇ-3) içme suyu arıtma tesislerinden (İSATAÇ) temin edilen atık çamur numunelerinin fiziksel, mekanik, kimyasal ve mineralojik özellikleri belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, Esiroğlu İçme Suyu Arıtma Tesisine ait atık çamuru (AÇ-1), diğer atık çamurlara kıyasla zemin stabilizasyonu açısından daha uygun mühendislik özellikleri sergilemiştir. Bu doğrultuda, başlangıçta belirlenen %0, 5, 10, 20, 30 ve 50 atık oranları yerine, malzemelerin verimli kullanımı açısından, en uygun performansı gösteren %0, 10, 30 ve 50 katkı oranları seçilerek ileri düzey deneylere bu etkili atık oranları ile devam edilmiştir. Belirlenen atık oranlarında hazırlanan numunelere, 0, 7, 15, 30, 60 ve 360 günlük sürelerde kür uygulanmış; ayrıca donma-çözülme dayanımını değerlendirmek amacıyla 0, 1, 3, 5, 7 ve 11 çevrimlik deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sonrasında, numunelerin mikro yapısal değişimleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve XRF analizleri ile detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular, özellikle Esiroğlu arıtma tesisine ait atık çamurun, stabilize edilecek zeminlerin performansını iyileştirmede etkili bir katkı malzemesi olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Atık çamur, zeminlerin stabilizasyonu, kür, donma-çözülme

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF THE USABILITY OF THE DRINKING WATER TREATMENT PLANT SLUDGES OF SOIL STABILIZATION IN THE TRABZON REGION

Kemal AYDIN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Osman SİVRİKAYA
2025, 214 Pages

In this study, the usability of sludge obtained from drinking water treatment plants in the stabilization of clayey soils was investigated. In this context, the physical, mechanical, chemical, and mineralogical properties of sludge samples obtained from the Esiroğlu (AÇ-1), Derecik (AÇ-2), and Akçaabat (AÇ-3) drinking water treatment plants (İSATAÇ) located in different regions of Trabzon province were determined. As a result of the conducted studies, the sludge from the Esiroğlu Drinking Water Treatment Plant (AÇ-1) exhibited more favorable engineering properties for soil stabilization compared to the other sludge samples. Accordingly, instead of the initially determined waste ratios of 0%, 5%, 10%, 20%, 30%, and 50%, the most effective waste ratios of 0%, 10%, 30%, and 50% were selected for further advanced experiments in terms of efficient material utilization. The samples prepared at the determined additive ratios were subjected to curing for periods of 0, 7, 15, 30, 60, and 360 days; additionally, tests were conducted for 0, 1, 3, 5, 7, and 11 cycles to evaluate freeze-thaw resistance. After these procedures, the microstructural changes in the samples were examined in detail using SEM (Scanning Electron Microscopy) and XRF analyses. The findings revealed that the sludge from the Esiroğlu treatment plant, in particular, can be considered an effective additive material in improving the performance of soils to be stabilized.

Key Words: Waste sludge, stabilization of soils, curing, freeze-thaw

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Türkiye uydu haritasında çalışma alanının konumu (Trabzon)	4
Şekil 2. Karadeniz Bölgesi'nin doğu kesiminin (Doğu Pontidler) ve çalışma alanının ana tektonik birimlerini gösteren konum haritası. Doğu Pontidler'in kuzey ve güney zonlarının ayrılması Özsayar ve ark. (1981)'den alınmıştır	5
Şekil 3. Çalışma alanının (Trabzon) sadeleştirilmiş jeoloji haritası (Güven, 1998'den değiştirilmiştir).....	7
Şekil 4. 1927-2024 yılları arasındaki Trabzon'daki sıcaklıklar	8
Şekil 5. 1927-2024 yılları arasında Trabzon'daki ortalama aylık yağış	8
Şekil 6. Trabzon ili içme suyu arıtma tesisleri	9
Şekil 7. Esiroğlu içme suyu arıtma tesisi.....	11
Şekil 8. Değirmendere ve Galyan deresi birleşim yeri (a) ve Değirmendere'den tesise su girişi (b).....	11
Şekil 9. Atasu barajı	12
Şekil 10. Akçaabat- Seyrantepe içme suyu arıtma tesisi	13
Şekil 11. Akçaabat- Seyrantepe İ.S.A.T. çamur tutma tankı.....	14
Şekil 12. Yer bulduru haritası.....	15
Şekil 13. Akçaköy- Derecik içme suyu arıtma tesisi.....	15
Şekil 14. Derecik içme suyu arıtma tesisi.....	16
Şekil 15. Derecik içme suyu arıtma tesisi bölümleri (1:Hızlı karıştırıcı yapısı), (2:Yavaş karıştırıcı yapısı), (3:Çökeltme Havuzu), (4:Filtre pres binası), (5:Hızlı kum filtreleri) (6:Klor tüp ve kimya odası).....	17
Şekil 16. Negatif yüklü yüzeye pozitif yüklü iyonların ve dipollerin çekimini gösteren kil partikülü şeması	26
Şekil 17. Dipol su molekülünün şematik gösterimi.....	26
Şekil 18. Difüze çift (su) tabakasının temsili gösterimi	27
Şekil 19. Kil partikülü yapısı: (a) floküle, (b) dağınık	27
Şekil 20. Killerin özel mikroskoplardaki iki farklı görüntüsü.....	28
Şekil 21. İnce plaka veya levha şeklindeki temsili bir kil danesi (Partikül).....	28
Şekil 22. Killerde yapı (structure) (sol) ve kil dokusu (fabric) (sağ)	28
Şekil 23. Kil minerallerinin oluşum şekilleri.....	29
Şekil 24. Oktahedron tabakası (a) alüminyum oktahedron, (b) oktahedral tabaka, (c) alümina tabakasının temsili gösterimi.....	30

Şekil 25. Tetrahedron tabakası (a) Silis tetrahedron (b) Tetrahedral tabaka (c) Silika tabakasının temsili gösterimi	31
Şekil 26. Farklı kil minerallerinin oluşum şekilleri	31
Şekil 27. Kaolinitin şematik taslağı (sol), şematik görünümü (sağ).....	33
Şekil 28. Montmorillonit kil mineralinin yapısı ve şematik gösterimi.....	34
Şekil 29. İllit türü minerallerin şematik görünümü	36
Şekil 30. Zemin gradasyon üçgeni (Tunç, 2001)	45
Şekil 31. Pozzolanik reaksiyonlar sonucu oluşan karmaşık zemin-kireç çimentolamasının şematik gösterimi	47
Şekil 32. Kireç içeriğinin çeşitli zeminlerdeki etkisi.....	48
Şekil 33. Serbest basınç deneyinden sonra numunelerin görünüşü.....	50
Şekil 34. Çimento stabilizasyon mukavemeti ile çimento içeriği ilişkisi.....	51
Şekil 35. İçme suyu arıtma çamuru atığı üzerine yapılan çalışmalar	64
Şekil 36. Karadeniz Teknik Üniversitesi geoteknik laboratuvarı.....	66
Şekil 37. Piyasadan temin edilen Kaolen ve Bentonit.....	66
Şekil 38. Tesislerden alınan içme suyu arıtma tesisi atık çamurları.....	67
Şekil 39. Atık çamurların deneye hazırlanması.....	67
Şekil 40. Arıtma atık çamurlarının etüvden sonrası parçalanması ve hacim kaybı.....	68
Şekil 41. Etüv sonrası atık çamuru içerisindeki yabancı malzemelerin ayıklanması.....	68
Şekil 42. Malzemelerin öğütülmesi işlemleri	69
Şekil 43. Öğütülmüş kil ve atık çamur numuneleri	69
Şekil 44. Casagrande deney aleti ve oyuk açma bıçağı ölçüleri.....	73
Şekil 45. Casagrande logaritmik deney grafiği	74
Şekil 46. Yaklaşık yöntem ile rötre limit tayini.....	75
Şekil 47. Standart proktor deney ekipmanları ve standartları	76
Şekil 48. Standart proktor deney grafiği.....	77
Şekil 49. Serbest basınç deney aleti.....	79
Şekil 50. Konsolidasyon halkası, poroz taşı, konsolidasyon hücresi	80
Şekil 51. Konsolidasyon deney numunesi hazırlaması	81
Şekil 52. Konsolidasyon deney aleti	81
Şekil 53. Casagrande deney malzemeleri	88
Şekil 54. Plastik limit deneyi silindir çubuklar.....	89
Şekil 55. Piknometre deneyi aşamaları.....	89
Şekil 56. Standart proktor deney aleti	90
Şekil 57. Zeminin kalıba yerleştirilmesi ve tartılması	91

Şekil 58. Zeminin kalıptan çıkarılması ve su muhtevası tespiti	91
Şekil 59. Serbest basınç deney numune kalıbı ve parçaları.....	92
Şekil 60. Yarı silindirik çelik tüp seti ile hazırlanan numune örnekleri	93
Şekil 61. Malzemenin kriko ile kalıptan çıkarılışı (a), Numunenin serbest basınç deney aletine yerleştirilmesi (b)	93
Şekil 62. Yükleme sonrası numunedeki kırılma durumu	94
Şekil 63. Malzemelerin etüve konması.....	94
Şekil 64. Konsolidasyon halkasına numunelerin yerleştirilmesi.....	95
Şekil 65. Konsolidasyon deney aleti	95
Şekil 66. Atık çamur malzemesi ve kür numuneleri	96
Şekil 67. Küre bırakılan deney numuneleri	97
Şekil 68. Serbest basıncı deneyi ve sonrasında malzemelerin etüve konulması	97
Şekil 69. Türkiye için hazırlanmış eş donma-çözülme haritası.....	98
Şekil 70. İklimlendirme kabini	99
Şekil 71. İklimlendirme kabinine konacak numuneler.....	99
Şekil 72. Malzemelerin iklimlendirme kabinine yerleştirilmesi	100
Şekil 73. Serbest basınç deney aleti.....	101
Şekil 74. Kaolen XRD analiz sonuçları.....	102
Şekil 75. Bentonit XRD analiz sonuçları.....	103
Şekil 76. Esiroğlu XRD analiz sonuçları.....	103
Şekil 77. Akçaabat XRD analiz sonuçları	103
Şekil 78. Derecik XRD analiz sonuçları.....	104
Şekil 79. Lazer kırınım metodu ile malzemelere ait dane dağılımları.....	109
Şekil 80. Plastisite kartı	110
Şekil 81. Kil ve farklı atık çamur malzeme. ait standart proktor deney sonuçları	111
Şekil 82. CL zeminine ait konsolidasyon deney sonuçları	112
Şekil 83. CH zeminine ait konsolidasyon deney sonuçları	112
Şekil 84. AÇ-1 malzemesine ait konsolidasyon deney sonuçları	112
Şekil 85. AÇ-2 malzemesine ait konsolidasyon deney sonuçları	113
Şekil 86. AÇ-3 malzemesine ait konsolidasyon deney sonuçları	113
Şekil 87. Atık ve kil malzemelerine ait serbest basınç deney sonuçları.....	116
Şekil 88. Farklı oranlardaki AÇ-1 atığının CH (a) ve CL (b) zemin türleri üzerindeki etkisi	118
Şekil 89. CL zemini kompaksiyon parametrelerinin atık oranlarına bağlı değişim.	120

Şekil 90. CH zemini kompaksiyon parametrelerinin atık oranlarına bağlı değişimleri	121
Şekil 91. CL ve CH zeminlerinin Atık oranı - γ_{kmax} değişimleri	121
Şekil 92. CL ve CH zeminlerinin Atık oranı- w_{opt} değişimleri	121
Şekil 93. CL zeminine ilave edilen katkı oranlarının anlık q_u üzerindeki etkisi	126
Şekil 94. CH zeminlerine ilave edilen katkı oranlarının anlık q_u üzerindeki etkisi.....	127
Şekil 95. CL ve CH zeminlerine ilave edilen katkı oranlarının anlık q_u üzerindeki etkisi	127
Şekil 96. CL ve CH zeminlerine ilave edilen katkı oranlarının E_u üzerindeki etkisi	128
Şekil 97. CL zemininin etkili katkı oranlarında kür sürelerine bağlı q_u üzerindeki değişimleri	130
Şekil 98. CL zemininin etkili katkı oranlarında kür sürelerine bağlı q_u üzerindeki değişimleri	131
Şekil 99. CL zemininin etkili katkı oranlarında kür sürelerine bağlı E_u üzerindeki değişimleri	132
Şekil 100. CL zemininin etkili katkı oranlarında kür sürelerine bağlı E_u üzerindeki değişimleri	133
Şekil 101. CL zemininin kür sonrası serbest basınç deneyi sırasındaki malzeme kayıp yüzdesi	134
Şekil 102. CH malzemesinin etkili katkı oranlarında kür sürelerine bağlı “ q_u ” üzerindeki değişimleri	135
Şekil 103. CH zemininin etkili katkı oranlarında kür sürelerine bağlı E_u üzerindeki değişimleri	137
Şekil 104. CH zemininin kür sonrası serbest basınç deneyi sırasındaki malzeme kayıp yüzdesi	138
Şekil 105. Don kabarması özellikleri: (a) dikey numune kesitinde görülen ağsı buz yapısı ve (b) son buz merceğinin tabanındaki yatay numune kesitinde görülen donmuş saçak içindeki donma kaynaklı çatlaklar (Xia, 2006). Numune çapı = 10 cm.....	140
Şekil 106. CL zemininin etkili katkı oranlarında çevrim sürelerine bağlı q_u değeri üzerindeki değişimleri	141
Şekil 107. Deney öncesi ve sonrası CL zemini D-Ç numuneleri	144
Şekil 108. CL zemininin etkili katkı oranlarında çevrim sürelerine bağlı E_u üzerindeki değişimleri	146
Şekil 109. Etkili katkı oranlarında hazırlanan CL zemininin D-Ç sonucu çevrim sürelerine bağlı ağırlık kayıpları.....	147
Şekil 110. Etkili katkı oranlarında hazırlanan CL zemininin D-Ç sonucu su muhtevalarındaki değişim	148
Şekil 111. D-Ç kabininden alınan CL zemininin serbest basınç deneyi sırasındaki malzeme kaybı.....	150

Şekil 112. CH zemininin etkili katkı oranlarında çevrim sürelerine bağlı q_u değeri üzerindeki değişimleri	151
Şekil 113. CH zemini D-Ç numuneleri deney öncesi ve sonrası.....	154
Şekil 114. CH zemininin etkili katkı oranlarında çevrim sürelerine bağlı E_u üzerindeki değişimleri	155
Şekil 115. Etkili katkı oranlarında hazırlanan CH zeminin D-Ç sonucu çevrim sürelerine bağlı ağırlık kayıpları.....	155
Şekil 116. Etkili katkı oranlarında hazırlanan CH zemininin D-Ç sonucu su muhtevalarındaki değişim	156
Şekil 117. D-Ç kabininden alınan CH zemininin serbest basınç deneyi sırasındaki malzeme kaybı.....	157
Şekil 118. CL+%0E kür malzeme. anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	159
Şekil 119. CL+%0E kür malzemesinin 360 gün SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	160
Şekil 120. CL+%50E kür malzemesinin anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	160
Şekil 121. CL+%50E kür malzemesinin 360 gün SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	161
Şekil 122. CH+%0E kür malzemesinin anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	162
Şekil 123. CH+%0E kür malzemesinin 15 gün SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	163
Şekil 124. CH+%0E kür malzemesinin 30 gün SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	163
Şekil 125. CH+%0E kür malzemesinin 360 gün SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	164
Şekil 126. CH+%50E malzemesinin anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	164
Şekil 127. CH+%50E kür malzemesinin 15 gün SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	165
Şekil 128. CH+%50E malzemesinin 30 gün SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	165
Şekil 129. CH+%50E kür malzemesinin 360 gün SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	166
Şekil 130. CL+0E zemininin D-Ç deneyi anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	167
Şekil 131. CL+%0E zemininin D-Ç deneyi 7.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	167
Şekil 132. CL+%0E zemininin D-Ç deneyi 11.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	168

Şekil 133. CL+%10E zemininin D-Ç deneyi anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	168
Şekil 134. CL+10E zemininin D-Ç deneyi 7.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	169
Şekil 135. CL+%10E zemininin D-Ç deneyi 11.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	170
Şekil 136. CL+%50E zemininin D-Ç deneyi anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	171
Şekil 137. CL+%50E zemininin D-Ç deneyi 7.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	171
Şekil 138. CL+%50E zemininin D-Ç deneyi 11.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	172
Şekil 139. CH+%0E zemininin D-Ç deneyi anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	173
Şekil 140. CH+%0E zemininin D-Ç deneyi 3.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	173
Şekil 141. CH+%0E zemininin D-Ç deneyi 5.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	174
Şekil 142. CH+%0E zemininin D-Ç deneyi 7.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	174
Şekil 143. CH+%0E zemininin D-Ç deneyi 11.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	175
Şekil 144. CH+%50E zemininin D-Ç deneyi anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	175
Şekil 145. CH+%50E zemininin D-Ç deneyi 3.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	176
Şekil 146. CH+%50E zemininin D-Ç deneyi 5.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	176
Şekil 147. CH+%50E zemininin D-Ç deneyi 7.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	177
Şekil 148. CH+%50E zemininin D-Ç deneyi 11.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları	177

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Trabzon'daki içme suyu arıtma tesislerinin türleri	10
Tablo 2. Grim R. E'ye göre killerin sınıflandırılması	32
Tablo 3. Degens'e göre killerin sınıflandırılması.....	32
Tablo 4. Bazı kil minerallerinin genel özellikleri.....	35
Tablo 5. Kil minerallerinin iklim ve ana kaya koşullarına göre oluşumu	37
Tablo 6. Stabilizör seçimi için rehber.....	43
Tablo 7. Değişik zemin sınıflarına göre çimento ihtiyacı	50
Tablo 8. Standart proktor için kullanılması gereken kalıp ve eleklerin seçim kuralları	76
Tablo 9. Kil zeminlerine ve atık çamurlarına ait XRD analiz sonuçları	104
Tablo 10. Kil malzemeler ve atık çamurlarına ait XRF analiz sonuçları	107
Tablo 11. Kil malzeme. ve atık çamurlarına ait kıvam limitleri ve zemin sınıfları.....	110
Tablo 12. CL, CH ve atık çamur malzemelerin mühendislik özellikleri.....	116
Tablo 13. AÇ-1 atığının CL ve CH kıvam limitleri üzerindeki değişimi.....	118
Tablo 14. Etkili atık yüzdelerinin kıvam limitleri üzerindeki etkisi	119
Tablo 15. Etkili atık yüzdelerinin kompaksiyon parametreleri üzerindeki etkisi.....	122
Tablo 16. Etkili atık yüzdelerinin konsolidasyon deneyi sonuçları üzerindeki etkisi	122
Tablo 17. Yarıklı silindirik çelik tüp setine girmesi gereken malzeme miktarları	125
Tablo 18. Etkili atık oranlarıyla hazırlanan CL ve CH zeminlerin özellikleri	129
Tablo 19. Etkili atık oranları ile stabilize edilen CL ve CH zeminlerinin küre sürelerine bağlı q_u değişimleri	130
Tablo 20. Etkili atık oranları ile stabilize edilen CL ve CH zeminlerinin küre sürelerine bağlı E_u değişimleri.....	130
Tablo 21. Farklı çevrim sayılarının q_u üzerindeki etkisi	141
Tablo 22. Küre tabi CL zeminine ait XRF analizlerinin toplu sonuçları	161
Tablo 23. Küre tabi CH zeminine ait XRF analizlerinin toplu sonuçları	166
Tablo 24. Donma-çözülme sonrası CL zeminine ait XRF analizlerinin toplu sonuçları	172
Tablo 25. Donma-çözülme sonrası CH zeminine ait XRF analizlerinin toplu sonuçları	178

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AÇ	: Arıtma çamuru
CH	: Yüksek plastisiteli kil
Cc	: Sıkışma indisi
CL	: Düşük plastisiteli kil
Cr	: Yeniden sıkışma indisi
D-Ç	: Donma-Çözülme
DSİ	: Devlet Su İşleri
E	: Elastisite modülü
EEA	: Avrupa Çevre Ajansı
İ.S.A.T.	: İçme Suyu Arıtma Tesisleri
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
PUB	: Singapur Ulusal Su Ajansı
SEM	: Scanning Electron Microscopy
TİÇDR	: Trabzon İli Çevre Durum Raporu
TİSKİ	: Trabzon Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi
UNICEF	: Birleşmiş Milletler Uluslararası Çocuk Acil Durum Fonu
USCS	: Unified Soil Classification System
WHO	: World Health Organization
XRF	: X- Ray Floresans
XRD	: X- Ray Diffraction

1. GENEL BİLGİLER

İnşaat kelimesi; genellikle binalar, yollar, köprüler veya büyük altyapı projelerini çağrıştırır. Ancak bu yapıların tümü, temel olarak zemin veya kayaç üzerine inşa edilmektedir. Bir yapının ne kadar sağlam, güvenli ve uzun ömürlü olacağı, büyük ölçüde üzerinde bulunduğu ortamın özelliklerine ve bu zemine uygun mühendislik çözümlerine bağlıdır. Bu noktada zemin, sadece bir "yüzey" değil, inşaat mühendisliğinin temel taşı olarak görülmelidir. İnşaat mühendisliği zemini bir başlangıç noktası olarak görür. Dolayısı ile yapıların güvenliği, dayanıklılığı ve uzun ömürlü olması için sağlam bir zemin en temel gerekliliktir.

Günümüzde hızla artan nüfus ve kentleşme ile birlikte, yapı inşasına uygun zemin alanları giderek azalmaktadır. Bu durum, tercih edilmeyen elverişsiz ve problemlili zeminlere yapı inşa etme zorunluluğunu doğurmuştur. Elverişsiz zeminler; taşıma kapasitesi düşük, sıkışmaya, şişmeye veya sıvılaşmaya eğilimli olabilmektedir. Bu nedenle, bu tür zeminler üzerine güvenli ve uzun ömürlü yapılar inşa etmek, yalnızca mühendislik çözümleri ile mümkün hale gelebilmektedir.

Bu noktada zemin stabilizasyonu devreye girmektedir. Zemin stabilizasyonu; problemlili zeminlerin taşıma kapasitesini artırmak, deformasyon riskini azaltmak, yapının dayanıklılığını sağlamak, geçirimli kilde sıvılaşmayı ve şişmeyi azaltmak amacıyla kimyasal, mekanik veya fiziksel yöntemlerin uygulandığı bir süreçtir. Bu süreçte atık malzemelerin kullanımı, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Geleneksel stabilizasyon malzemeleri (çimento, kireç vb.) yerine atık malzemelerin kullanılması, hem maliyetleri düşürmekte hem de atık yönetimi sorunlarına yenilikçi çözümler sağlamaktadır.

Su, dünya yüzeyinin %78'ini kaplar ancak %1'den azı tatlı sudur (Jassim et al., 2016). Ayrıca su, hayatın her alanında vazgeçilmez bir kaynaktır ve tüm ekosistemlerin, insanların ve diğer canlıların sürdürülebilir yaşamlarını devam ettirebilmesi için suyun korunması gerekmektedir. Ancak dünya genelinde 750 milyon insan (yaklaşık 9 kişiden 1'i) güvenli suya erişemiyor (WHO/UNICEF, 2014). Sanayileşme, hızlı nüfus artışı, yanlış tarım uygulamaları ve şehirleşme suyun kirlenmesine ve su kaynaklarının tükenmesine neden olmaktadır. Bu nedenle su kaynaklarının korunması, sağlık, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik bir öneme sahiptir. Suyun tasarruflu kullanımı, kirliliğin

önlenmesi ve su kaynaklarının etkin yönetimi, hem bireysel hem de toplumsal bir sorumluluk olmalıdır.

Dünya genelinde yılda ortalama 4.600 milyar m³ su kullanılmaktadır. Bu miktarın yaklaşık %70'i tarımsal faaliyetlerde, %20'si sanayi sektöründe, %10'u ise evsel tüketimde değerlendirilmektedir. Türkiye'de ise yıllık kullanılabilir su miktarı yaklaşık 112 milyar m³'tür. Bu suyun %72'si tarımda, %18'i hane halkı tüketiminde, %10'u ise sanayi sektöründe kullanılmaktadır (DSİ, 2020).

Devlet Su İşleri'nin verilerine göre, Türkiye'de kişi başına düşen yıllık kullanılabilir su miktarı 2000 yılında 1.652 m³ iken, 2009'da 1.544 m³'e, 2020 yılında ise 1.346 m³'e gerilemiştir. 2030 yılına kadar sulanabilir tarım arazilerinin %75 oranında, evsel su kullanımının %260 ve sanayi sektöründe kullanılan suyun %500 oranında artması beklenmektedir. Bunun sonucunda, kişi başına düşen yıllık kullanılabilir su miktarının 1.120 m³'e kadar düşeceği öngörülmektedir (DSİ, 2020).

Su kaynaklarının korunması, sadece suyun temiz tutulmasıyla değil, aynı zamanda suyun yönetimiyle de ilgilidir. Su kaynaklarının korunması ancak bireylerin ve devletlerin doğru su kullanımı konusunda sorumluluk taşıması ile mümkündür. Su tasarrufu, atık suyun geri dönüştürülmesi, suyun etkin bir şekilde yönetilmesi bu süreçlerin önemli bileşenleridir. Örneğin dünya genelinde bu konudaki gelişmelere baktığımızda özellikle;

- Singapur (NEWater Projesi): Atık suyun içme suyu olarak geri kazanılması konusunda öncü bir projedir. NEWater şu anda Singapur'un su talebinin %40'ını karşılamaktadır ve bunu 2060 yılına kadar %55'e çıkarmayı planlamaktadır (PUB, 2020).
- Kaliforniya (Orange County Groundwater Replenishment System): Dünyanın en büyük dolaylı içme suyu geri kazanımı sistemlerinden biridir. İleri arıtma teknolojileriyle arıtılan su yeraltı rezervuarlarına geri pompalanır (OCWD, 2021).
- Avrupa (Almanya ve İspanya): İçme suyu arıtma tesisleri, suyun endüstriyel ve tarımsal geri kullanımında büyük rol oynar. Özellikle su kıtlığı yaşayan bölgelerde projeler hızla genişletilmektedir (EEA, 2018).

Türkiye'de içme suyu arıtma tesisleri, suyun yeniden kullanımı konusunda henüz yeterince yaygın olmamakla birlikte bazı önemli adımlar atılmıştır. Örneğin; İstanbul (Ömerli, Terkos, Elmalı, Kağıthane, Büyükçekmece, Sarıyer, İkitelli, Beykoz, Çatalca, Şile İçme Suyu Arıtma Tesisi), Ankara (İvedik, Temelli, Çubuk) ve Trabzon (Akpınar, Aykut, Cumapazarı, Çamburnu, Çal, Derecik Akçaköy, Esiroğlu, Karakaya, Şalpazarı, Tonya Merkez, Vakfıkebir Büyük Liman, Yomra, Yavuzköy)

İçme Suyu Arıtma Tesisleri ve İstanbul (*Ambarlı, Ataköy, Terkos, Çanta, Silivri, Büyükçekmece*) İleri Biyolojik Atık Su Arıtma Tesisleri, İzmir (*Çiğli, Güneybatı, Foça, Seferhisar, Urla*) Atık Su Arıtma Tesisleri ve Bursa (*Doğu, Batı, Kuzey*) Atık Su Arıtma Tesisleri bunlardan bazılarıdır. Türkiye genelinde, özellikle büyükşehirlerde ve nüfus yoğunluğunun yüksek olduğu bölgelerde, benzer birçok içme suyu ve atıksu arıtma tesisleri şehirlerin su ihtiyaçlarını karşılamak üzere faaliyet göstermektedir.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın yoğun çalışmaları sonucunda, ülkemizde 2018 yılında yüzde 1,2 olan arıtılmış atık suların yeniden kullanım oranı, 2022 yılı için %4,2'ye, 2024 yılında ise %5'e çıkarılmıştır. 2030 yılına kadar ise arıtılmış atık suların yeniden kullanım oranının %15'e yükseltmesi hedeflenmektedir (T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022).

Ayrıca "Gri Su Kullanımı Projeleri" ile de yeni bina projelerinde gri su arıtma ve yeniden kullanım sistemleri teşvik edilmektedir. Gri su, evlerden veya işletmelerden gelen ve genellikle düşük seviyede kirlenmiş olan atık suyu ifade eder. Bu su; banyo, lavabo, duş ve çamaşır makinesi gibi kaynaklardan gelir. Ancak tuvaletlerden gelen ve ağır kirleticiler içeren "Siyah Su" ile karıştırılmamalıdır. Bu kapsamda, çeşitli illerde pilot projeler ve uygulamalar yapılarak hem çevreye hem de ekonomiye önemli katkılar sağlanabilmektedir (Üstün ve Tırpancı, 2015).

İçme ve Atıksu Arıtma Tesisleri; çevre kirliliğini önleme, su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı ve halk sağlığını koruma konularında elbette ki vazgeçilmezdir. Ancak bilinmelidir ki bu tesisler atıksuları kullanılabilir sağlık düzeye getirirken birtakım atık malzemeleri de beraberinde meydana getirmektedir. Atık çamur olarak adlandırılan bu atık malzemelerin bertarafı, yalnızca çevre koruma ve halk sağlığı için değil, aynı zamanda doğal kaynakların etkin yönetimi ve sürdürülebilir kalkınma için de hayati öneme sahiptir (Yüksekdağ vd., 2020).

Bu konuda içme suyu arıtma tesislerinden elde edilen atık çamurunu değerlendirmenin en önemli yöntemlerinden biri de zemin stabilizasyonunda atık malzeme olarak kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır (Hamood vd, 2017; Güner ve Bağrıaçık, 2021). Bu yenilikçi ve çevre dostu yöntem ile atıkların değerlendirilmesi, hem atık yönetimi sorunlarını çözmeye hem de ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik anlamında kazançlar sağlamaya yardımcı olur. Bunun yanında bu malzemenin zemin stabilizasyonundaki önemi şu şekilde açıklanabilir:

- Arıtma çamuru; mevcut bir atık ürün olduğundan, geleneksel stabilizasyon malzemelerine göre daha düşük maliyetlidir.

- Bu çamurun zemin stabilizasyonunda kullanılması, arıtma tesislerinin atık yönetimi sorunlarını hafifletir ve bu atıkların çevreye zarar vermesini önler.

- Atık çamurunun yeniden kullanımı, doğal stabilizasyon malzemelerine olan ihtiyacı azaltır ve sürdürülebilir bir çevre yönetimine katkıda bulunur.

Dolayısı ile içme suyu arıtma tesisi atık çamurunun zemin stabilizasyonunda kullanımı, hem teknik faydalar sunmakta hem de çevresel sürdürülebilirlik için önemli bir adım olmaktadır. Bu tür uygulamalar, hem inşaat mühendisliği hem de çevre mühendisliği açısından yenilikçi ve sorumlu bir yaklaşımdır.

1.1. Trabzon İli Topografik, Jeolojik, İklim ve Meteorolojik Özellikleri

1.1.1. Topografik Özellikler

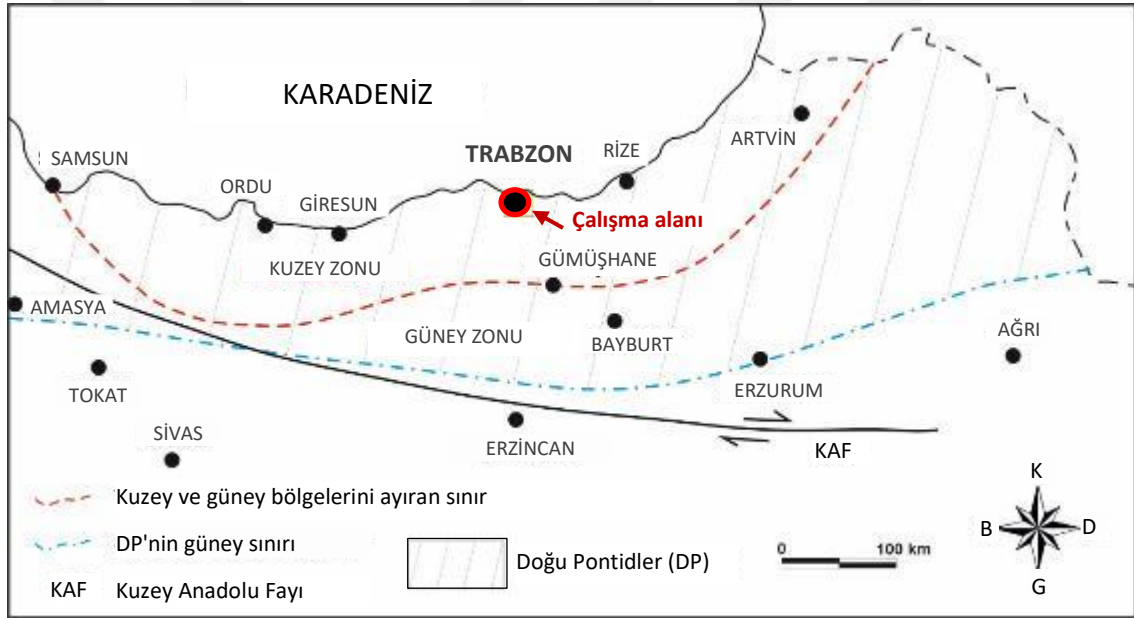
Yüzölçümü 4.664 km² olan Trabzon, Karadeniz Bölgesi'nin doğusunda yer alan önemli bir yerleşim alanıdır (Şekil 1). Bu alanın yaklaşık %30'u dağlık, %10'luk küçük bir kısmı ise düzlük iken, kalan %60'lık kısım ise güneye doğru %25-30 eğimle artan değişken topografik alanlara sahiptir (TİÇDR, 2021). Toplam 18 ilçesi bulunan Trabzon'da kıyı şeridi hariç iç kesimlerde dağlar, tepeler ve platolar geniş alanlar kaplamaktadır. Doğuda İkizdere Deresi ile batıda Harşit Deresi arasında kıyıya paralel uzanan dağlardan oluşan Trabzon, yaklaşık 300 km uzunluğundaki çoklu arazi platformunun kuzey kesiminde yer almaktadır. Bu platformun güney kesimi, Doğu Karadeniz Dağları'nın ana bölümünü oluşturan Zigana ve Soğanlı Dağları ile sınırlanmaktadır.



Şekil 1. Türkiye uydu haritasında çalışma alanının konumu (Trabzon)

1.1.2. Jeolojik Özellikler

Coğrafi olarak Karadeniz Bölgesi'nin doğu kesiminde yer alan çalışma alanı (Şekil 2), jeotektonik olarak Doğu Pontidler'in orta kesiminde yer almaktadır (Ketin, 1966). Jeolojik ve litolojik özelliklere göre Doğu Pontidler (Doğu Karadeniz dağları), "Kuzey Zonu" ve "Güney Zonu" olarak ikiye ayrılmaktadır. Doğu Pontidler'in kuzey zonunda yer alan Trabzon ili sınırları içindeki çalışma alanının jeolojisi, Geç Kretase dönemine kadar güney zonuna benzer litolojik özellikler göstermektedir. Geç Kretase'den sonra güney zonunda tortul kayaçlar yaygınken, kuzey zonunda magmatik kayaçlar (plütonik ve volkanik) baskın litolojiler haline gelmektedir (Özsayar vd., 1981; Bektaş vd., 1999).



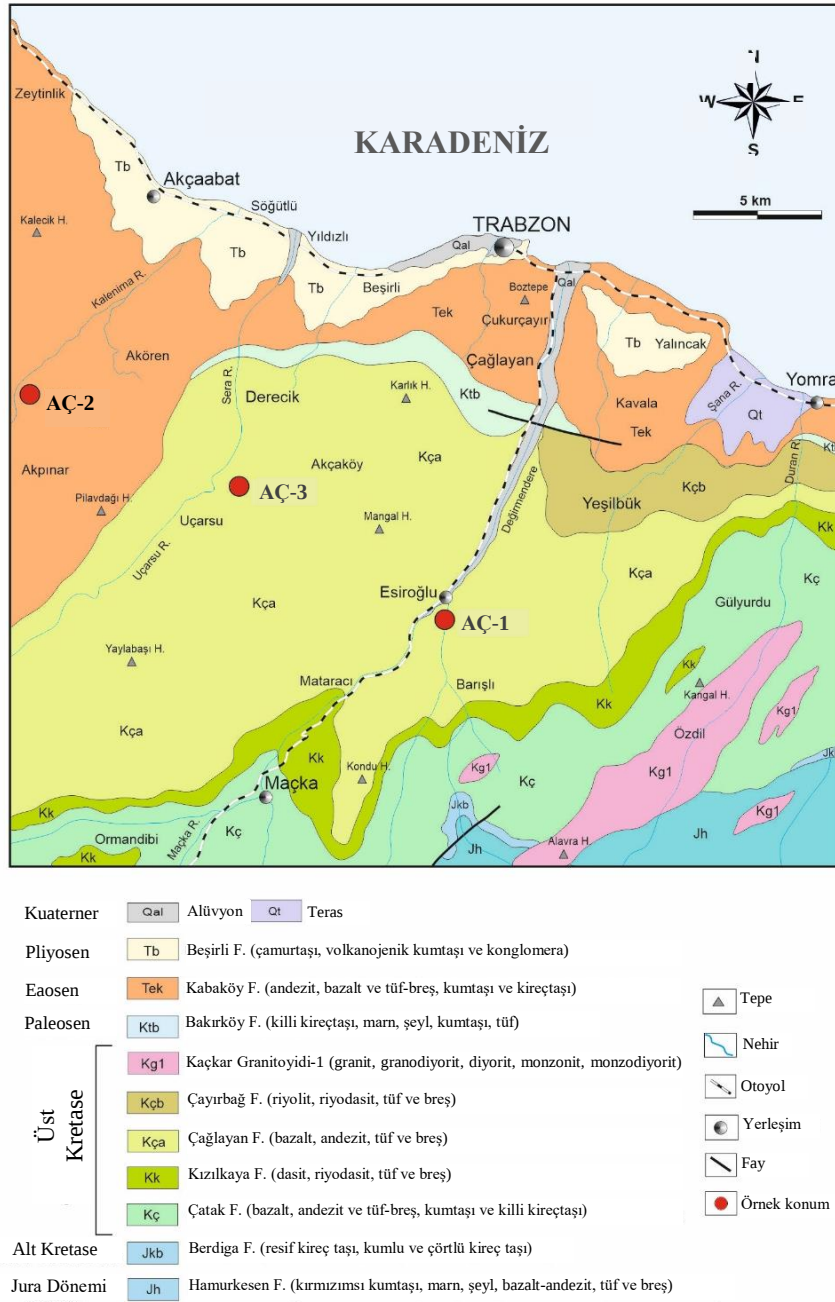
Şekil 2. Karadeniz Bölgesi'nin doğu kesiminin (Doğu Pontidler) ve çalışma alanının ana tektonik birimlerini gösteren konum haritası. Doğu Pontidler'in kuzey ve güney zonlarının ayrılması Özsayar ve ark. (1981)'den alınmıştır

Sınırlı alanlarda yüzeylenen Paleozoik metamorfik ve granitik kayaçlar bölgenin en eski temel kayaçlarını oluşturur (Okay ve Tüysüz, 1999). Bölgedeki temel birimleri uyumsuz olarak örten Liyas (Alt Jura) volkano-tortul kayaçları (Hamurkesen Formasyonu; Açar, 1977), genellikle Üst Jura-Alt Kretase platform karbonatları (Berdiga Formasyonu; Pelin, 1977) tarafından örtülüdür (Şekil 3). Bu karbonatların üzerinde, subdüksiyonla ilişkili süreçlerle oluşmuş kalın bir Üst Kretase volkano-tortul ardışıklığı uyumlu bir şekilde yer alır (Aydın vd., 2020; Oğuz-Saka vd., 2023). Bu ardışıklık, bazalt ve bazaltik andezitlerle (Çatak

Formasyonu) ara tabakalı Turoniyen-Santoniyen yaşı tortul kayaçlarla (kumtaşı, silttaşı ve kiltası) başlar (Güven, 1993 ve 1998; Kurt vd., 2006; Aydın vd., 2020).

Bölgede volkanik masif sülfat mineralizasyonlarına ev sahipliği yapan Santoniyen yaşı dasit, riyodasit, tuf ve breşler (Kızılkaya Formasyonu) Çatak Formasyonu'nun uyumlu bir şekilde üzerinde yer alır (Şekil 3) ve bu birimi, bazaltik andezit, tuf ve breşlerin tortul kayaçlarla ara tabaka oluşturduğu Geç Santoniyen-Erken Kampaniyen yaşı Çağlayan Formasyonu ve yine riyolit, riyodasit tuf ve breşlerden oluşan Kampaniyen yaşı Çayırbağ Formasyonu takip eder (Güven, 1993 ve 1998; Oğuz-Saka vd., 2023).

Bu birimler; killi kireçtaşı, marn, şeyl, kumtaşı ve tuf aralanmasından oluşan kalsitürbiditik tortul kayaçlarla (Kireçhane Formasyonu) örtülüdür (Güven, 1993 ve 1998). Üst Kretase yaşı granitik sokulumlar (Kaçkar Granitoidleri) zaman zaman Jura ve Kretase birimlerinin içine sokulmuştur (örn. Karlı vd., 2010; Aydın, 2014). Üst Kretase formasyonları sırasıyla, Orta Eosen-Miyosen yaşı Kabaköy (kumtaşı ve kireçtaşı ara katmanlı bazalt, andezit, tuf ve breş) ve Pliyosen yaşı Beşirli (çamurtaşı, kumtaşı ve konglomera) formasyonları tarafından uyumsuz olarak örtülür (Güven, 1993 ve 1998; Aydın vd., 2008). Kuaterner yaşı taraça ve tüm bu birimleri uyumsuz olarak örten alüvyonlar bölgenin en genç litolojilerini oluşturur (Şekil 3).



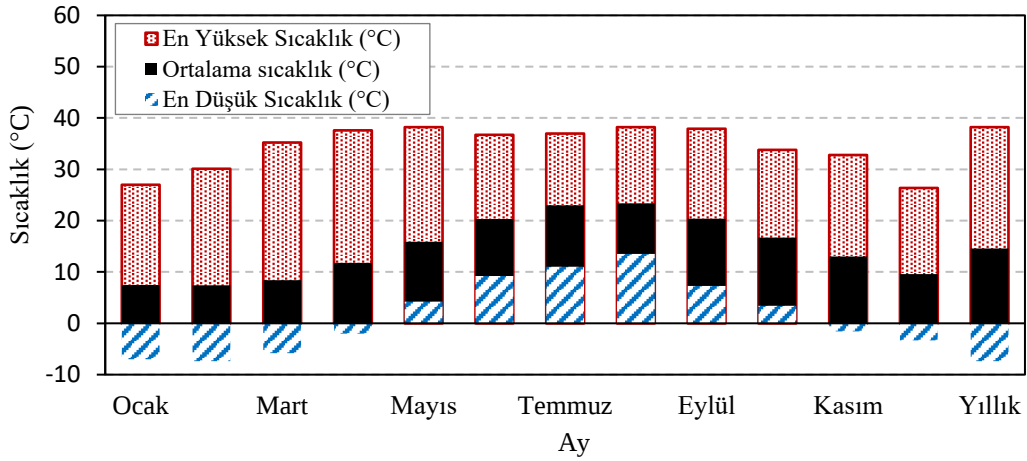
Şekil 3. Çalışma alanının (Trabzon) sadeleştirilmiş jeoloji haritası (Güven, 1998'den değiştirilmiştir)

1.1.3. İklim ve Meteoroloji

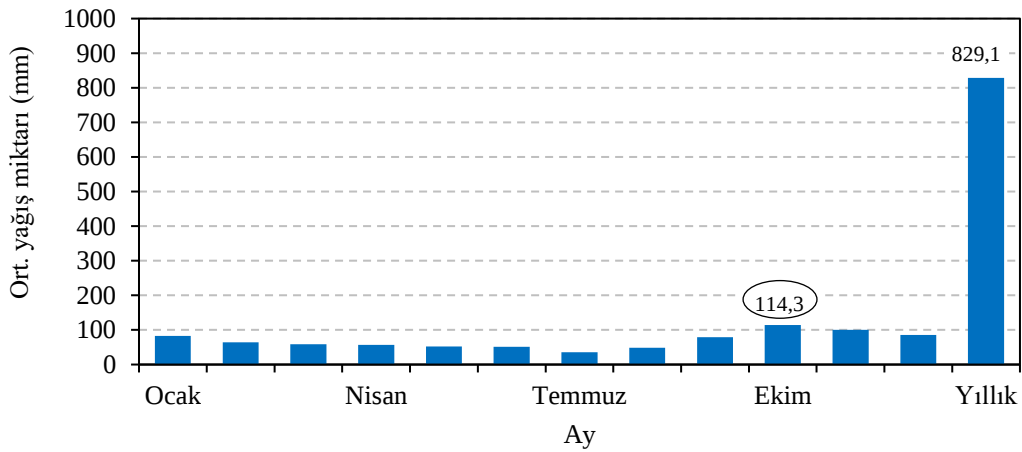
Deniz etkisinde olan Trabzon'da ılıman iklim tipi hakim olduğundan yazlar genellikle orta sıcaklıkta, kışlar ise ılık ve yağışlı geçer. Bölgenin kuzeybatı yönündeki çöküntülere açık olması iklim elemanlarının sürekli değişmesine neden olur. Trabzon'un konumu gereği kış mevsimi Türkiye'nin diğer yerlerinden ayrı bir özellik gösterir. Kafkas Dağları Trabzon'u

güneyden çevreler ve kuzeybatının soğuk rüzgârlarına kapatır. Ayrıca Sibirya'nın soğuk havasının ve Kuzeydoğu Anadolu platolarındaki hava soğumasının bölgeye girmesini engeller. Aylık ortalama yağış miktarlarına bakıldığında Ağustos ve Kasım aylarının kurak geçtiği görülmektedir (TİÇDR, 2021).

1927-2024 yılları arasında Trabzon'da yapılan sıcaklık ölçümlerinden elde edilen veriler Şekil 4'te verilmiştir. Verilere göre ortalama sıcaklığın en yüksek olduğu aylar Temmuz ve Ağustos, en düşük olduğu aylar ise Ocak ve Şubat aylarıdır. Yıl boyunca ölçülen ortalama sıcaklık 14,8 °C, en yüksek sıcaklık 38,2 °C ve en düşük sıcaklık -7,4 °C'dir (MGM, 2023). Trabzon'da yıl boyunca hakim rüzgar yönü Güney' dir, ancak aylara göre değişmektedir. Trabzon'da en fazla yağış Ekim ayında düşmektedir (Şekil 5). Ortalama karlı gün sayısının en yüksek olduğu ay Ocak olarak belirlenmiştir (MGM, 2023).



Şekil 4. 1927-2024 yılları arasındaki Trabzon'daki sıcaklıklar (MGM, 2024)



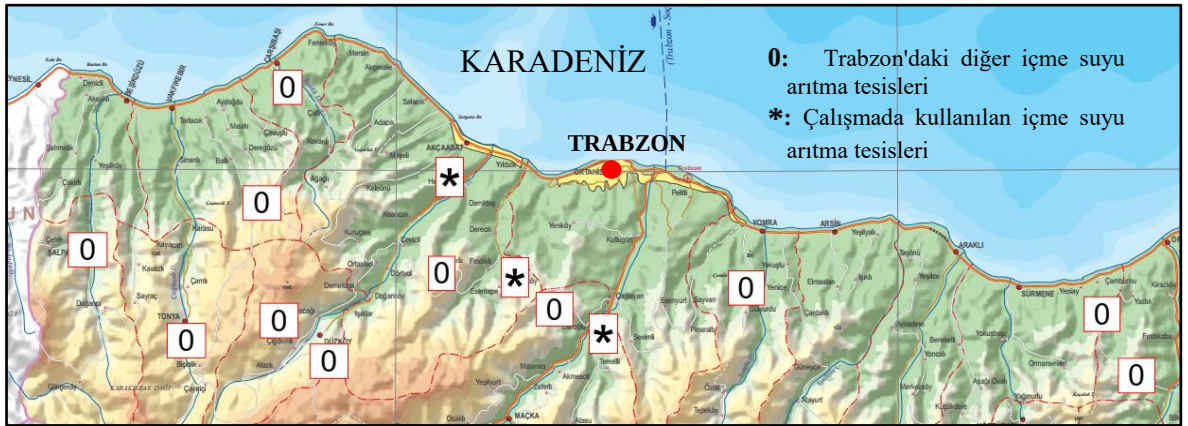
Şekil 5. 1927-2024 yılları arasında Trabzon'daki ortalama aylık yağış (MGM, 2024)

1.2. Trabzon İçme Suyu Arıtma Tesisleri

Trabzon; Türkiye'nin Karadeniz Bölgesi'nde, kuzeyde Karadeniz, güneyde Doğu Karadeniz Dağları ile çevrili, kıyından dağlara doğru yükselen engebeli bir arazi yapısına sahiptir. Yüzölçümü 4.685 km² olan şehir, doğuda Rize, batıda Giresun, güneyde ise Gümüşhane illeriyle komşudur. Dağların kıyıya paralel uzanışı ve yoğun yağış rejimi, bölgenin zengin ormanlık alanlara ve çeşitli ekosistemlere sahip olmasını sağlamıştır. Karadeniz ikliminin etkisiyle yazları ılıman, kışları serin olan Trabzon, yıllık yağış miktarı 750-2.000 mm arasında değişmekte olup bölgedeki akarsular, yeraltı su kaynakları ve göletler, hem tarımsal sulama hem de içme suyu temini açısından büyük önem taşımaktadır (MGM, 2025).

Trabzon'un bu zengin su kaynakları, içme suyu arıtma tesislerinin (İ.S.A.T.) kurulmasına elverişli bir altyapı sağlamaktadır. Bölgede, Trabzon Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi (TİSKİ) tarafından işletilen modern içme suyu arıtma tesisleri bulunmaktadır. Bu tesisler, şehrin artan nüfusuna temiz ve sağlıklı içme suyu sağlamak amacıyla ileri teknolojilerle donatılmıştır. Bu tesisler, yalnızca halk sağlığını korumakla kalmayıp, suyun etkin yönetimi sayesinde çevresel sürdürülebilirliğe de katkıda bulunmaktadır. Bu tez kapsamında malzeme temin edilen içme suyu arıtma tesisleri hakkında bilgiler aşağıda verilmiştir.

Trabzon'da Akçaabat, Akpınar, Aykut, Cumapazarı, Çamburnu, Çal, Derecik-Akçaköy, Esiroğlu, Karakaya, Şalpazarı, Tonya-Merkez, Vakfıkebir-Büyük Liman, Yomra ve Yavuzköy İçme Suyu Arıtma Tesisleri olmak üzere toplam 14 adet içme suyu arıtma tesisi bulunmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. Trabzon ili içme suyu arıtma tesisleri

Bu tesislerde “Basınçlı Tip”, “Geleneksel” ve “Yarı Geleneksel/Yarı Basınçlı Tip” arıtma olmak üzere üç farklı arıtma sistemi kullanılmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. Trabzon'daki içme suyu arıtma tesislerinin türleri

Basınçlı Tip	Geleneksel	Yarı Geleneksel (Yarı-Basınçlı Tip)
o Akpınar	* Akçaabat	o Cumapazarı
o Aykut	* Derecik-Akçaköy	o Karakaya
o Çamburnu	* Esiroğlu (Atasu)	o Şalpazarı
o Çal	o Vakfikebir	o Yavuzköy
o Tonya Merkez		
o Yomra		

Paket arıtma sistemleri, arıtma elemanlarının fazlalığı ve kurulum yerinin uzaklığı gibi sorunlara çözüm olarak uzaktan kontrol edilebilen (SCADA) ve insan müdahalesine ihtiyaç duymayan sistemlerdir. Bu nedenle bu sistemlerle tesislerden atık çamur almak oldukça zordur. Ancak geleneksel arıtma tesislerinde atık çamur belirli noktalarda biriktiğinden çamur alınması mümkündür. Bu nedenle bu tezde kullanılacak çamur örnekleri Şekil 6'da “*” işareti ile gösterilen geleneksel arıtma tesislerinden (Akçaabat, Derecik-Akçaköy ve Esiroğlu) alınmıştır.

1.2.1. Esiroğlu İçme Suyu Arıtma Tesisi

Esiroğlu içme suyu arıtma tesisi Doğu Karadeniz havzasında Trabzon İli Maçka sınırları içerisinde bulunmaktadır. 1992 yılından itibaren işletime alınan tesis, şehre yaklaşık 17 km uzaklıkta Galyan deresi üzerinde bulunan Atasu Barajı'ndan beslenmektedir. Konveksiyonel (geleneksel) tipi arıtma sistemine sahip olan tesis, 1900 lt/sn maksimum tasarım debisi ve yıllık yaklaşık 53.000.000 m³ su üretimiyle bugün Ortahisar, Akçaabat, Maçka ve Yomra ilçelerine hizmet vermektedir (TİSKİ, 2023a).

Arıtma tesisinin su ihtiyacı 1992-2001 yılları arasında Değirmendere üzerinde açılmış olan keson ve derin kuyulardan terfili sistemlerle sağlanmıştır. 2001 yılından sonra birtakım laboratuvar çalışmaları yapılmış ve Değirmendere ile Galyan deresi arasında yalnızca bakteriyolojik olarak bir farkın olduğu, fiziksel veya kimyasal bir farkın olmadığı görülmüştür (Hacısalıhoğlu, 2008). Gerek kentteki nüfus artışı gerek ise mevcut kuyu kapasitelerinin giderek azalması nedeniyle su yetersizliği faktörleri sonucu Değirmendere

ile arasında kayda değer bir farklılık bulunmayan Galyan deresi de tesise dahil edilmiştir (Şekil 7-8).



Şekil 7. Esiroğlu içme suyu arıtma tesisi

Biri Değirmendere diğeri Galyan deresi olmak üzere tesise ham su iki ayrı isale hattından gelerek harmanlanıp arıtma tesisine girmektedir. Arıtma işleminden sonra fiziksel, kimyasal ve bakteriyolojik analizleri yapıp, içilebilir nitelik ve kalitede olduğu tespit ve rapor edilerek halkın tüketimine verilmektedir. Tesisin bulunduğu bölgede zengin su kaynakları ve havzalar bulunduğundan dolayı tesiste üretilen su kalitesi diğer şehirlerdeki şebeke sularından daha yüksektir.



Şekil 8. Değirmendere ve Galyan deresi birleşim yeri (a) ve Değirmendere'den tesise su girişi (b)

Ayrıca Değirmendere'nin akış debisinin fazla ve akış bölgesinin girinti çıkıntılı taş ve kayalara sahip olması suyun havayla temasını artırmaktadır. Bu sayede havalanan suda

çözünmüş oksijen miktarı artarak suyun temizlenmesine ve mevcut kirliliklerin seyreltilmesine katkı sağlamaktadır. Dolayısı ile su kaynakları ve havzalar iyi korunarak, iyi korunmuş havzadan elde edilecek suyun da daha kaliteli ve ucuz olması sağlanabilecektir. Değirmendere beslendiği yayla, tepe ve dağlık alanlardan inen küçük dere ve ırmak suları ile ortalama günde 300.000 m³ su kapasitesine sahiptir. 11.000 kişilik nüfusa sahip Maçka ilçe merkezine rastladığı ve yol boyunca kömür depoları, taş ocakları, tamir atölyeleri gibi bulunan bazı iş yerlerinin atıkları, kanalizasyon suları direkt olarak dereye deşarj edildiğinden bir miktar kirlenmeye maruz kalmaktadır. Yine de beslendiği alanlar genellikle küçük yerleşim bölgesi ve yeşil alanlar olması nedeniyle beklenenden daha az kirlenmeye maruz kalmaktadır.

Atasu Barajı; Trabzon ilinin içme, kullanma ve endüstri suyu ihtiyacının temini ile aynı zamanda enerji üretilmesi için 27.03.2012 tarihinde tasarlanmış bir projedir (Şekil 9). Maçka ilçesi sınırları içinde Trabzon şehrine 17 km mesafede Galyan deresi üzerindedir. Temelden 118 m yüksekliğinde, ön yüzü beton kaplamalı olarak inşa edilen 4,65 milyon m³ gövde hacimli barajın depolama kapasitesi 35,75 milyon m³' dür.



Şekil 9. Atasu barajı

Trabzon iline yılda 91,25 milyon m³ içme, kullanma ve endüstri suyu; ayrıca 5 Mwh kurulu gücü ile yılda 27,14 Gwh enerji üretimini sağlamaktadır. Barajda 28.12.2010 tarihi itibarı ile su tutulmuş olup; depolanan su, kontrollü bir şekilde 15.04.2011 tarihinden itibaren Trabzon iline ve mevcut arıtma tesisine ileilmeye başlanmıştır (TİSKİ, 2012).

Arıtma Tesisi ana hatlarıyla aşağıdaki kısımlardan oluşur:

- 1- Tesis girişi ve bypass sistemi,
- 2- Kimyasal dozlaması (Alüminyum Sülfat),

- 3- Sülfürik asit dozlaması (H_2SO_4),
- 4- Pıhtılaştırmayı hızlandırıcı dozlama (Polielektrolit),
- 5- Durultma,
- 6- Filtrasyon,
- 7- Kireç dozlaması,
- 8- Klor,
- 9- Numune alma sistemi
- 10- Servis suyu sistemi,
- 11- Bakım Ünitesi

1.2.2. Akçaabat İçme Suyu Arıtma Tesisi

Akçaabat içme suyu arıtma tesisi, Trabzon'un Akçaabat ilçesinde yaklaşık 14 mahalleye hizmet vermektedir (Şekil 10-11). Tesis, Işıklar Deresi'nden sağlanan suyu konvansiyonel arıtma yöntemleriyle işleyerek, maksimum 200 lt/sn debiyle çalışmakta ve yıllık yaklaşık 5.250.000 m³ su üretmektedir (TİSKİ, 2023b).



Şekil 10. Akçaabat- Seyrantepe içme suyu arıtma tesisi

Tesis, toplamda 7 bölümden oluşmaktadır. Bunlar; Işıklar Deresi'nden alınan suyun, ham su hattı aracılığıyla tesise taşındığı ve içerisindeki büyük parçacıkların, katı atıkların ve kum gibi kaba maddelerin tutulduğu, “Ham Su Girişi ve Ön İşleme Ünitesi”, sudan ince partiküllerin ayrılması için kimyasal maddenin (koagülant) eklendiği Koagülasyon

(Pıhtılaştırma) ve ince partiküllerin, topaklar halinde birleştirilerek çöktürme ünitesinde ayrılmaya hazır hale getirilmesi işlemi olan Flokülasyon (Topaklaştırma) adımlarının uygulandığı “Kimyasal Dozajlama Ünitesi”, arıtma işlemi sırasında oluşan topakların (floklar), yerçekimi etkisiyle havuzlarda çökelti olarak suyun, askıdaki katı maddelerden büyük ölçüde arındırıldığı “Çöktürme Ünitesi”, suyun ince partiküllerden ve kalan bulanıklıklardan arındırılması için kum veya aktif karbon filtrelerinden geçirilerek berraklığının artırıldığı “Filtrasyon Ünitesi”, arıtılan suya, mikroorganizmaları yok etmek, hijyen sağlamak ve suyun güvenli bir şekilde içme suyu standartlarına uygun hale gelmesini sağlamak için klorun eklendiği “Dezenfeksiyon Ünitesi”, arıtılan suyun daha sonra şebeke sistemi aracılığıyla Akçaabat ve çevresindeki mahallelere dağıtılmasını sağlayan “Depolama ve Dağıtım Ünitesi”, arıtma işlemi sırasında oluşan atık çamurların işlenerek çamurun bertaraf edilmesi veya geri dönüşüm için uygun hale getirilmesinin sağlandığı “Çamur Yönetimi Ünitesi” dir. Akçaabat içme suyu arıtma tesisi, yukarıdaki birimler sayesinde ham suyu içme suyu standartlarına uygun hale getirerek bölgedeki su ihtiyacını karşılamaktadır.



Şekil 11. Akçaabat- Seyrantepe İ.S.A.T. çamur tutma tankı

1.2.3. Derecik İçme Suyu Arıtma Tesisi

Akçaköy-Derecik içme suyu arıtma tesisi, Trabzon ili, Akçaabat ilçesi, Derecik beldesi Yolbaşı köyü tüzel kişiliği adına kayıtlıdır. 120 ada, 54 parsel içerisinde yaklaşık olarak 8053 m² alan içerisinde bulunmaktadır (Şekil 12-13). Tesis, Doğu Karadeniz’in zengin su kaynaklarından biri olan Uçarsu Deresi’nden temin edilmektedir. Dereden tesise gelen su “İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik”e uygun bir şekilde arıtılarak

kullanılabilir içme suyu haline dönüştürülmektedir. Konvansiyonel arıtma yapmak üzere inşa edilmiş bu tesis, hali hazırda Trabzon İli Akçaabat ilçesinde yaklaşık 11 mahalleye hizmet vermektedir (TİSKİ, 2023c).



Şekil 12. Yer bulduru haritası



Şekil 13. Akçaköy- Derecik içme suyu arıtma tesisi

Akçaköy-Derecik İçmesuyu Arıtma Tesisi inşası Osman Yener Kızılet + A.S.M Arıtma Sistemleri Makine İmalat ve İnşaat Sanayi Ticaret Limited Şirketi iş ortaklığı ile İller Bankası A.Ş Altyapı Uygulama Dairesi Başkanlığınca ihale edilmiştir. Sözleşme 29.11.2011 tarihinde imzalanmış ve izleyen 15 gün içerisinde de işe başlanmıştır.

Sözleşme gereği iş bitim süresi 500 (beşyüz) gün olarak belirtilmişse de tesisi yapım işi süre uzatımları nedeniyle 27.06.2013 tarihinde bitirilmiştir. Yıllık yaklaşık 1.500.000 m³ içme suyu üretilen Akçaköy-Derecik içme suyu arıtma tesisinin maksimum tasarım debisi 95 lt/sn dir. Tesise giriş kısmında bizi bir adet havalandırma yapısı karşılamaktadır. Havalandırma tipleri genelde;

- 1) Cazibeyle çalışanlar (kaskat) (Şekil 14-15),
- 2) Püskürtücüler,
- 3) Basınçlı hava ile havalandırma (difüzörler) olmak üzere 3 tiptir.

Akçaköy-Derecik içme suyu arıtma tesisinde Kaskat tipi yani suyun cazibe ile akışı esnasında havalanmasına olanak sağlayan havalandırma tipi kullanılmaktadır.



Şekil 14. Derecik içme suyu arıtma tesisi

Tesiste havalandırma yapısı dışında “Hızlı Karıştırıcı Yapısı”, “Yavaş Karıştırıcı Yapısı”, “Çökeltme Havuzu”, “Hızlı Kum Filtreleri”, Filtre Suyu Tutma Havuzu”, “Çamur Yoğunlaştırma Havuzu”, “Filtre Pres Binası”, “Klor Tüp ve Kimya Odası” bulunmaktadır.



Şekil 15. Derecik içme suyu arıtma tesisi bölümleri (1:Hızlı karıştırıcı yapısı), (2:Yavaş karıştırıcı yapısı), (3:Çökeltme Havuzu), (4:Filtre pres binası), (5:Hızlı kum filtreleri) (6:Klor tüp ve kimya odası)

1.3. İçme Suyu Arıtma Tesislerinin Genel Yapısı ve Atık Çamur Oluşumu

İçme suyu arıtma tesisleri hakkında yapılacak bilgilendirme, Türkiye'deki ilgili mevzuatlara, özellikle “İçme Suyu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği”ne uygun olarak gerçekleştirilmelidir. Bu tebliğ, içme suyu temininde kullanılan suyun, insan sağlığını tehdit etmeyecek şekilde arıtılması için gerekli teknik esasları belirler. Arıtma tesislerinde uygulanacak yöntemler, kullanılan suyun özellikleri, istenen su kalitesi ve tesisin kapasitesi gibi faktörlere göre belirlenir. Tebliğe göre, içme suyu arıtma sürecinde kullanılan fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler, proseslerin etkinliği ve sürdürülebilirliği göz önünde bulundurularak seçilmeli, ayrıca arıtma sırasında yapılan işlemler ve kullanılan ekipmanların düzenli bakım ve kontrolü sağlanmalıdır. İçme suyu arıtma tesisleri birçok ünitelerden oluşmaktadır. Bu üniteler ve görevleri şunlardır;

Giriş Yapısı: Kaynaktan içme suyu arıtma tesisine iletilen suyun tesise girmeden önce kontrol edilmesi, ölçülmesi ve dağıtılması için yapılan bu yapı, ham suyun fazla basıncının düşürülmesi, suyun akışının düzenlenmesi ve tesisin devre dışı bırakılması durumlarında suyun kesilmesi amacıyla kullanılır. Basınçla gelen su, zaman zaman kum, kil, çakıl ve balık

gibi partiküller tesisin giriş yapısının tabanında birikerek zamanla bir kirlilik oluşturur. Birikmiş bu materyallerin temizlenmesi amacıyla düzenli aralıklarla dışarı atılır ve bu işlemler sırasında ünite baypas edilir, böylece su girişinin kesilmeden devam etmesi sağlanır. Ayrıca nehirler gibi içme suyu kaynaklarından gelen kum ve çakıl gibi katı maddelerin tesise girmesini önlemek amacıyla, tesisin girişine veya su alma yapısına kaba/ince ızgaralar, kum tutucular ve/veya dengeleme havuzları yerleştirilir. Boru hatlarındaki yabancı maddeleri filtrelemek için ise vana odasında kirlilik tutucu cihazlar bulunur.

Ayrıca tesiste kullanılacak kimyasalların dozajı, tesis içindeki su kayıplarının hesaplanması ve üretilecek su miktarının belirlenmesi için tesisin ekipmanlarıyla uyumlu debimetreler kullanılarak giriş ve çıkış debilerinin ölçülmesi gereklidir (ÇŞİDB., 2013).

Baypas hatları: Arıtma tesisine suyun girmesinden önce, şebekeye verilebilmesi için gerekli olan bakiye dezenfektan miktarını sağlayacak şekilde bir baypas hattı kurulur. Bu hattın hemen ardından, suya uygun dozda dezenfektan eklenir. Ayrıca, diğer arıtma ünitelerindeki suyun gerektiğinde baypas edilmesine olanak tanıyacak uygun hatlar da düzenlenir. Bakiye dezenfektan miktarının doğru bir şekilde hesaplanabilmesi ve gelen debinin ölçülmesi amacıyla, tesisin genel baypas hattı debimetre sonrasına yerleştirilir (ÇŞİDB., 2013).

Havalandırma yapısı: İçme suyu arıtma tesislerinde, ham suyun oksijenlendirilmesi amacıyla havalandırma üniteleri inşa edilmektedir. Bu üniteler, sudaki kokuya neden olan maddelerin ve uçucu bileşiklerin uzaklaştırılmasının yanı sıra, demir ve manganın oksitlenerek çökmesini sağlamaktadır. İçme suyu arıtımında kullanılan havalandırıcılar genellikle üç gruba ayrılır: cazibe ile çalışan sistemler, püskürtme tipi havalandırıcılar ve basınçlı hava ile havalandırma sistemleri. En yaygın tercih edilen havalandırıcılar ise cazibe ile çalışan kaskat (basamaklı) tip havalandırma sistemleridir. Bu üniteler açık alanlarda konumlandırıldığında, özellikle güneş ışığına maruz kalmaları durumunda, zamanla yosunlanma görülebilir. Ayrıca, demirin oksitlenmesi sonucu kızılımsı, manganın oksitlenmesi ile siyah renkli bir tabaka oluşabilir. Tesisin giriş vana odasında, havalandırma ünitesinin veya tesisin tamamının baypas edilmesi mümkündür. Tesis genel bakımdayken ya da düzenli aralıklarla baypas edilerek kaskat yüzeyleri fırçalanarak temizlenir ve ünitenin tabanında biriken kum veya çakıl gibi maddeler uzaklaştırılır (ÇŞİDB., 2013).

Ön Dezenfeksiyon: Suların dezenfeksiyonu genellikle klor, kloramin, ozon ve klordioksit gibi kimyasal maddelerin kullanılması ya da ultraviyole ışınları ile gerçekleştirilmektedir. İçme suyu arıtımında en sık başvuru olan dezenfeksiyon yöntemleri

arasında klorlama ve ozonlama ön plana çıkmaktadır. Tesislerde genellikle havalandırma ünitesinin ardından yer alan klorlama veya ozonlama üniteleri, demir ve manganın oksitlenmesi, sudaki tat ve koku sorunlarının giderilmesi, patojen organizmaların etkisiz hale getirilmesi ve alg oluşumunun önlenmesi gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Gerek duyulması halinde, ham suda bulunan patojenlerin etkisiz hale getirilmesi, alg oluşumunun önlenmesi, demir ve manganın oksitlenmesi, tat ve koku kontrolünün sağlanması ile renk gideriminin gerçekleştirilmesi amacıyla klorlama ünitesine ek olarak bir ozonlama ünitesi tesis edilmektedir. Ham suda siyanobakteri varlığı tespit edildiğinde ön klorlama genellikle tercih edilmez, çünkü siyanobakteriler klor ile reaksiyona girerek toksik ve zararlı yan ürünler, özellikle siyanotoksinler oluşturabilir. Bu durum, içme suyunun kalitesini ve insan sağlığını olumsuz etkileyebilir. Ayrıca klorlama, siyanobakterilerin hücre zarlarını parçalayarak hücre içindeki toksinlerin suya salınmasına neden olabilir, bu da toksin konsantrasyonunun artmasına yol açar (Newcombe vd., 2021; US EPA., 2016).

Bu nedenle, siyanobakteri varlığında öncelikli olarak havalandırma, koagülasyon-flokülasyon, sedimentasyon ve filtrasyon gibi fiziksel veya kimyasal arıtma yöntemleri uygulanarak siyanobakteri hücrelerinin uzaklaştırılması hedeflenir. Daha sonra, uygun dezenfeksiyon işlemleri gerçekleştirilir. Bu yaklaşımla toksin oluşumu minimize edilir ve su güvenliği sağlanır (ÇŞİDB., 2013).

Dozaj Pompaları: İçme suyu arıtma süreçlerinde kullanılan kimyasal maddeler, proje kapsamında belirlenen noktalarda ham suya dozaj pompaları aracılığıyla eklenir. Dozaj sistemleri, kullanılan kimyasal maddelerin türüne uygun olarak seçilerek tasarlanır. Dozaj pompaları, tesisin giriş suyu veya işlem birimlerinin debisine göre ayarlanabilir ve ölçülebilir özellikte olmalıdır. Bu sistemler, ham suyun özelliklerindeki değişimlere uyum sağlayabilecek şekilde otomasyonla entegre, debi kontrollü olarak tasarlanır. Zaman içinde ham suyun özelliklerinde olası değişiklikler göz önünde bulundurularak, gelecekte ek dozaj pompalarının kurulumu için tesiste yer ayrılır. İlk kullanım yıllarında ise dozaj pompaları, düşük kimyasal dozajlarını karşılayacak kapasite ve sayıda seçilir. Dozaj pompaları ve bu pompaların bağlı olduğu tesisat, kullanılacak kimyasallara karşı dayanıklı malzemelerden üretilir (ÇŞİDB., 2013).

Karıştırıcılar: Hızlı karıştırıcılar, suya ilave edilen kimyasal maddelerin homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla kullanılan yapılardır. Bu karışım işlemi, mekanik ekipmanlar veya hidrolik kuvvetler aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Ham suda bulunan askıda veya kolloidal haldeki partiküller, genellikle negatif elektrik yüküne sahip

olduklarından birbirini iter ve yumaklaşmayı engelleyerek çökme sürecini zorlaştırır. Bu etkiyi ortadan kaldırmak için, suya koagülantlar veya pıhtılaştırıcılar (örneğin alüminyum sülfat, demir (III) klorür, polialüminyum klorür veya demir sülfat) eklenir. Ayrıca, polielektrolit gibi yardımcı kimyasallar da pıhtılaşma sürecini desteklemek amacıyla kullanılabilir. Koagülantların içerdikleri pozitif yüklü metal iyonları, negatif yüklü partikülleri nötralize ederek yük dengesini sağlar. Bu nötralizasyon sonucu partiküller birleşir, daha büyük kümeler oluşturur ve sonrasında çökerek sudan uzaklaştırılır (ÇŞİDB., 2013). Yavaş karıştırıcılar: Hızlı karıştırma ünitesinde pıhtılaştırıcı kimyasalların suya eklenmesinin ardından, oluşan partiküllerin yumaklar haline gelmesi için kullanılan bir süreçtir. Bu işlem, partiküllerin birbirine tutunarak boyutlarının büyümesini ve çökebilir hale gelmelerini sağlar. Yavaş karıştırma işlemi, mekanik sistemler veya hidrolik yöntemler ile gerçekleştirilebilir. Günümüzde bu amaçla en sık tercih edilen sistemler, mekanik yavaş karıştırıcılardır. Ayrıca yavaş karıştırıcılarda daha iyi bir yumaklaşma olması için yapılar en az iki bölmeli olur (ÇŞİDB., 2013).

Durultucular: Durultucular, yavaş karıştırma işlemi sonrasında oluşan flokların sudan ayrılarak uzaklaştırılmasını sağlayan havuzlardır. Bu havuzların tasarımı, çamurun uzaklaştırılma yöntemi ve arazinin topografik özellikleri dikkate alınarak belirlenir. Çöktürme veya durultma işlemi, içme suyu arıtımında iki temel yöntemle uygulanmaktadır. İlk yöntem, basit çökeltme olarak adlandırılır ve bu süreç, suda bulunan çökebilir partiküllerin yerçekimi etkisiyle sudan ayrılmasını sağlar. Basit çökeltme, özellikle düşük bulanıklığa sahip sularda, herhangi bir kimyasal madde eklenmeden gerçekleştirilir. Bu yöntem, genellikle yavaş kum filtrelerinden önce uygulanarak filtrelerin yükünü azaltmayı amaçlar. İkinci yöntem, hızlı karıştırma ve yavaş karıştırma aşamalarının ardından gerçekleştirilen çöktürme işlemidir. Bu yöntemde, suya pıhtılaştırıcı kimyasallar eklenerek renk ve bulanıklığın giderilmesi hedeflenir. Ayrıca, suyun sertlik problemini çözmek için kireç ve soda gibi maddeler eklenebilir. Bu tür çöktürme, partiküllerin birleştirilip büyütülmesinin ardından daha etkili bir çökeltme sağlar ve arıtma sürecinin verimliliğini artırır. Durultucuların tasarımı, biriken çamurun uzaklaştırma yöntemi ve arazinin topografik özellikleri dikkate alınarak belirlenir (ÇŞİDB., 2013).

Durultucular, biriken çamurun otomatik olarak çamur toplama havuzuna taşınmasını sağlayan bir çamur uzaklaştırma sistemiyle tasarlanmıştır. Durultucularda oluşan çamur miktarı, ham suyun kalitesi, kullanılan dozaj miktarı ve durultucunun verimliliği ile doğrudan ilişkilidir. Çamur tahliyesi, taban eğiminden yararlanılarak cazibe yoluyla, tabanı

tamamen tarayan çamur sıyrıcılar veya vakum sistemleri aracılığıyla gerçekleştirilebilir. Mekanik ekipmanla çamur tahliyesi yapılan durultucularda, bu ekipmanların düzenli bakımının yapılması gereklidir. Çamurun çok sık aralıklarla tahliye edilmesi su kaybına, uzun aralıklarla tahliye edilmesi ise tıkanıklıklara neden olabileceği için, çamur sıyrıcıların hareket hızlarını optimum düzeyde ayarlayabilen otomatik zaman ayarlı vanalar kullanılır. Tahliye edilen çamur miktarı, çamur boşaltım aralıklarıyla birlikte işletme kayıtlarına düzenli olarak kaydedilir (ÇŞİDB., 2013).

Filtrasyon: Filtrasyon, suyun gözenekli bir malzeme üzerinden geçirilmesiyle gerçekleştirilen bir işlemdir. Tesislerde filtrasyon işlemi, hızlı kum filtreleri veya yavaş kum filtreleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu süreçte sudaki asılı ve kolloidal maddeler tutulur, bakteri ve diğer mikroorganizmaların sayısı azalır ve organik maddelerin oksidasyonu sağlanır. Filtreler, filtrasyon hızlarına göre yavaş ve hızlı filtreler; akış koşullarına göre cazibeli ve basınçlı filtreler; kullanılan filtre malzemesine göre ise tek ortamlı ve çok ortamlı filtreler olarak sınıflandırılabilir. Filtreler tesiste en çok mekanik ekipmanın kullanıldığı hassas yapılardır. Filtre geri yıkama sularının sisteme yeniden kazandırılabilmesi için filtrelenmiş temiz suyun bulunduğu filtre geri yıkama suyu depolama tankları inşa edilir. Geri yıkama suyu miktarı süzülen su miktarının %3'ünü geçmez ve bu sular doğrudan filtrasyon öncesi ünitelere verilmesi genellikle önerilmez. Ancak su kaynaklarının sınırlı olduğu durumlarda, bu sular bir süre geri yıkama suyu tankında bekletildikten sonra durulmuş üst su çöktürme ünitesine veya çöktürme öncesi ünitelerin girişine yönlendirilebilir. Tank tabanında biriken çamur ise çamur yoğunlaştırma havuzlarına taşınır (ÇŞİDB., 2013).

Son dezenfeksiyon: Tesiste arıtılmış suyun tüketime verilmeden önceki işlemi olan son dezenfeksiyon, UV ışınları, klorlama, klordioksit veya kloraminasyon yöntemlerinden biriyle gerçekleştirilebilir. Dezenfeksiyon işlemlerinde klor, en yaygın kullanılan dezenfektan olarak öne çıkmaktadır. Arıtma çıkışında klor seviyesini ölçen otomatik klor ölçüm cihazları kullanılarak arıtılmış suda 0,2-0,5 mg/L bakiye serbest klor kalacak şekilde arıtma tesisinde son klorlama yapılır (ÇŞİDB., 2013).

Sertlik giderme: Suyun sertliği, temel olarak sudaki kalsiyum (Ca^{2+}) ve magnezyum (Mg^{2+}) iyonlarının varlığından kaynaklanmaktadır. Demir, mangan, çinko ve kurşun gibi iki değerlikli metal iyonları suya sertlik katabilse de, genellikle sularda bu elementler önemli miktarlarda bulunmaz. İçme suyu için önerilen sertlik değeri 75-100 mg CaCO_3/L arasında olmalıdır. İçme suyundaki sertliğin giderilmesinde, tek kademeli veya iki kademeli kireç

(Ca(OH)₂) – soda (Na₂CO₃) metodu, sodyum hidroksit (NaOH) ile işlem, sodyum fosfat ile yumuşatma ve iyon değiştirme gibi çeşitli teknikler uygulanabilir. İlk üç yöntemde, suyun sertliğine neden olan Ca²⁺ ve Mg²⁺ iyonları, suda çözünmeyen bileşikler haline getirilerek çöktürülür. Kireç-soda yöntemiyle sertlik giderme işlemi sırasında, önemli miktarda çamur oluşur ve bu çamurların sürekli olarak uzaklaştırılması için mekanik çamur sıyrıcıların kullanılması gereklidir. Ancak, bu çamurlar hızla kuruyamadığından geniş alanlar için depolama alanı gerekebilir. Bu nedenle, tesiste biriken kireç çamurlarının kurutulup yeniden yakılarak sönmemiş kireç haline getirilmesi ve tekrar kullanılması daha verimli bir yaklaşım olacaktır. İki kademeli kireç-soda yöntemi, hem kalsiyum hem de magnezyum kaynaklı sertliklerin birlikte giderilmesi için etkili bir arıtma tekniğidir. Bu sistemin başlangıç yatırım maliyeti yüksek olmasına rağmen, işletme maliyeti diğer yöntemlere kıyasla daha düşüktür. Kalıcı sertliğin giderilmesi amaçlandığında, soda ilavesi birinci kademedeki karbonlama işlemi ile ikinci kademedeki karbonlama işlemi arasında yapılması önerilmektedir.

Sodyum hidroksit (kostik soda) ile yumuşatma işlemi, uygulama açısından kolay bir yöntem olup, bu süreçte sodyum hidroksit ile hem karbonatlı hem de karbonatsız sertlikler giderilebilir. Ayrıca, NaOH kullanıldığında oluşan çamur miktarı, kireç kullanımına kıyasla daha düşüktür. Su sıcaklığı 1-22 °C aralığında olduğu sürece, NaOH ile gerçekleştirilen reaksiyonlar üzerinde sıcaklığın belirgin bir etkisi bulunmamaktadır. Ancak, su sıcaklığı 6 °C'nin altına düştüğünde, kireç kullanımıyla gerçekleşen reaksiyon hızları önemli ölçüde azalır. İyon değiştirme yöntemi ise, sertliğe neden olan iyonların başka iyonlarla değiştirilmesi prensibine dayanır. İçme suyundan sertlik giderme işlemlerinde, yukarıda belirtilen yöntemlerle ilgili belirli hususlara özen gösterilmesi gerekmektedir. Karbonat sertliği geçici bir sertliktir kireç ilavesi ile çözülebilmektedir. Fakat kalsiyum ve magnezyumdan ileri gelen sertlik kalıcı sertliktir. Geçici ve kalıcı sertlik, suya sadece sodyum hidroksit (NaOH, kostik soda) ilavesi ile de giderilebilir (ÇŞİDB., 2013).

Karbonlama: Yumuşatılmış sular, CaCO₃ ile doymuş durumdadır ve bu nedenle pH değerleri yüksektir ve filtrasyon işleminden önce stabilize edilmeleri gerekmektedir. Suya CO₂ verilerek veya asit ilavesi yapılarak gerçekleştirilen stabilize işleminde genellikle işletme maliyetinin düşük olması bakımından CO₂ tercih edilir. Bu nedenle, bu işleme “karbonlama” adı verilmektedir. Kireçle yumuşatılmış sular, genellikle kalsiyum karbonat (CaCO₃) ile aşırı doymuş durumda olduğundan, kalsiyum karbonatla dengeli bir hale gelmez. Bu durum, kalsiyum karbonatın filtreler, boru hatları ve su sayaçları gibi ekipmanlarda çökerek tıkanmalara yol açmasına neden olur. Bu tür sorunların önüne

geçebilmek için çöktürme havuzlarında çökelmeyen fazla kalsiyum karbonatın kalsiyum bikarbonata ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) dönüştürülmesi gereklidir. Çünkü kalsiyum bikarbonat, kalsiyum karbonata göre suda daha kolay çözündüğünden ve arıtma ekipmanlarında çökeltme yapmaz. Karbonatların bikarbonata dönüşmesi için suyun pH değerinin yaklaşık 8,3 seviyesine düşürülmesi gerekir. Ancak, pH değerinin bu seviyenin altına inmemesi için suya fazla miktarda karbondioksit (CO_2) eklenmesinden kaçınılmalıdır. Çünkü pH değeri istenen seviyenin altına düştüğünde, tüm kalsiyum karbonatlar bikarbonata dönüşmez ve bu durum suyun karbonat ve bikarbonat iyonları açısından dengede tutulmasını zorlaştırır.

İyon değiştirme: Katyon değiştirme (baz değiştirme) ve anyon değiştirme (asit değiştirme) şeklinde iki kısımda ele alınan iyon değiştirme, bir iyonun diğer bir iyonla yer değiştirmesi esasına dayanmaktadır. Katyon değiştirme, pozitif bir iyonun veya katyonun, diğer bir pozitif iyonla yer değiştirmesi, anyon değiştirme ise negatif bir iyonun veya anyonun, diğer bir negatif iyonla yer değiştirmesi olarak tanımlanır. Doğal sularda katyonlar; Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , H^+ , Fe^{2+} ve Mn^{2+} gibi maddelerken, anyonlar genel olarak; Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- gibi maddelerdir. Suyun yumuşatılması işleminde, sodyum formundaki katyonik iyon değiştiriciler kullanılmaktadır (ÇŞİDB., 2013).

Çamur yoğunlaştırma ve bertaraf sistemi: Bu sistem arıtma sürecinden kaynaklanan çamurun hacmini azaltarak daha kolay ve ekonomik bir şekilde bertaraf edilmesini sağlamak amacıyla kullanılır. Çökeltim havuzu tabanında bulunan çamur, genellikle %0,5- 1,5 arasında katı madde içerir. Çamurun geri kazanılması için, çöken çamur da ayrıca bir durultma işlemine tabi tutulur. Durultuculardan ve filtre geri yıkama suyu tutma tankından gelen çamurlar, çamur yoğunlaştırma ünitelerine gönderilir. Burada yoğunlaşan çamur daha sonra cazibe veya otomatik çamur pompaları aracılığı ile çamur susuzlaştırıcı tesisine gönderilerek burada yaklaşık %2-7 civarında katı madde oranı yüksek çamur elde edilir. Tabii ki bu yüzde farklı yöntemler kullanılarak daha da artırılabilir. İçme suyu arıtma tesislerinde oluşacak çamurların depolanması, nakliyesi ve bertarafı gibi işlem süreçleri Çevre Kanunu ve ilgili mevzuat hükümlerince yapılır (ÇŞİDB., 2013).

Çamur susuzlaştırma sistemi: Çamur yoğunlaştırma tankından çamur susuzlaştırma ünitesine gelen çamurun tesisten uzaklaştırma işlemini daha ekonomik hale getirmek için birçok metot kullanılmaktadır. Bunlar; filltre pres, bel filtre ve santrifüj yöntemleridir. Filtre pres yöntemi, birbirine paralel olarak sıralanmış ve çevresi özel filtre bezleriyle kaplanmış plakalar içeren bir sistemden oluşur. Bu yöntemle, polielektrolit ve sönmüş kireç ilave edilen çamura yüksek basınç uygulanarak çamurun içerisindeki suyun filtre bezlerinden geçmesi

sağlanır. Bu işlem sonucunda, filtre bezleri sayesinde sıvı kısmı ayrıştırılan çamur, yaklaşık %30 oranında katı madde içerebilir. Bu sistem, çamur toplama havuzlarının tabanında biriken yoğun çamurun suyunun alınarak tesisten uzaklaştırılmasını mümkün kılar. Belt filtre yöntemi, çamurun hareketli bir bant üzerinde fiziksel olarak iki bant arasında sıkıştırılarak susuzlaştırıldığı bir işlemdir. Bu yöntem, özellikle biyolojik çamurların ve çamur çürütme ünitelerinden çıkan atıkların susuzlaştırılmasında yaygın olarak tercih edilmektedir. Santrifüj yöntemi (dekantör), tamburun yüksek hızla dönerek merkezkaç kuvveti oluşturması ve bu sayede çamur içerisindeki sıvının katı maddelerden mümkün olduğunca ayrıştırılması prensibine dayanır (ÇŞİDB., 2013).

Temiz su deposu: İçme suyu arıtma tesisinin çıkışında, arıtılan su ile ihtiyaç duyulan su miktarının dengelenmesini sağlamak amacıyla, en az 1 saatlik su ihtiyacını karşılayabilecek kapasitede bir temiz su haznesi inşa edilmelidir. Dibe çöken maddelerin temizlenmesi ve yosunlaşmanın önlenmesi için deponun temizliği oldukça önemlidir. Genellikle iki göz olarak yapılan temiz su deposu temizlenmesi gerektiğinde bir göz devre dışı bırakılarak temizlik yapılır (ÇŞİDB., 2013).

Kimyasal maddelerin temini, taşınması ve depolanması: Malzemelerin dış tesirlere karşı korunacağı depolama bölümü, kimyasal maddeleri taşıyan araçların rahatlıkla ulaşabileceği şekilde ve zemin katta bulunurlar. Çünkü bu kimyasal maddeler fiziki özelliklerine göre paketler halinde de taşınabilir, tank veya silolarda da taşınabilmektedir. Kimyasalın türü ve tesise ulaşım koşulları, kimyasalın depolama süresini belirleyen önemli faktörlerdir. Depolama miktarları, kimyasalın ortalama kullanım dozuna göre hesaplanır ve en az 15 günlük ihtiyacı karşılayacak şekilde planlanır. Kimyasal maddelerin depolandığı yerler nemden korunmalı, istifleme aşamasında aspiratör çalıştırılmalı ve buralarda sadece kimyasal maddeler depolanmalıdır. Ayrıca depo bölümü tozlanmaya karşı araklı olarak temizlenmelidir.

Çözelti hazırlama tanklarının üst kapak seviyesinin, zemin kat tabanı ile aynı kotta olması sağlanır. Bu düzenleme, tankların yer altına gömülü olmasını mümkün kılar. Çözelti dozlama pompaları ise, çözelti tanklarının taban seviyesinden emiş yapacak şekilde yerleştirilmiş olup, genellikle bodrum katında konumlanır. Bu yapı, sistemin verimli çalışmasını ve gerekli debinin sağlanmasını temin eder (ÇŞİDB., 2013).

Su ve enerji temini: Tesisin su ihtiyacını karşılamak amacıyla kullanılan su, tesisin çıkış suyundan (muhtemelen atık su ya da işlenmiş su) alınarak, ihtiyaç duyulan bölgelere borularla taşınmaktadır. Yani, tesisin içindeki çeşitli alanlarda kullanılacak su, bir yerden

alınarak boru sistemi ile ilgili noktalara iletilir. Bu şekilde, tesisin su ihtiyacı sağlanmış olur. Tesisin elektrik ihtiyacını karşılamak üzere ise, elektrik sağlayan kuruma ait bir trafo veya elektrik hattından enerji temin edilir. Bunun için bir enerji nakil hattı (elektrik hattı) projesi hazırlanır ve bu proje, ilgili elektrik idaresinin (yani enerji sağlayan kurumun) onayına sunulur. Onay alındıktan sonra, tesisin elektrik enerjisi sağlanabilir. Olası bir elektrik kesintisinde aksaklık yaşanmaması adına asgari seviyede (geri yıkama işlemleri hariç) elektrik üretilmesini sağlayan bir jeneratör grubu hazır edilir. Enerji kesintisi sonrası tesis tekrar eski çalışma moduna otomatik olarak geçmelidir (ÇŞİDB., 2013).

Tesis deneyleri: Deneyler işletmeci tarafından tesis içinde veya tesis dışında, “İçme Suyu Temin Edilen Suların Kalitesi ve Artırılması Hakkında Yönetmelik” kapsamında akretide olmuş laboratuvarlarda rutin deney ve analizler olarak gerçekleştirilir. Tesise ait bu deneyler ham su, proses ve çıkış suyu deneyleri olmak üzere 3 noktada gerçekleştirilir. Arıtmada kullanılacak kimyasal madde ve miktarlarına karar vermek ve giriş suyunun kalitesini sürekli izlemek için ham su deneyleri gerçekleştirilir. Arıtma sürecinde kullanılacak kimyasalların türü ve ne kadar kullanılacağı, arıtmanın etkinliği ve maliyetinin optimize edilmesi için dikkatlice tespit edilmelidir. Bu tespit, arıtma işleminin hem verimli olmasını hem de maliyet açısından ekonomik olmasını sağlamaktadır. Proses deneyleri bu süreci kapsamaktadır. Çıkış suyunun istenen içme suyu standardında olup olmadığını takip etmek için ise çıkış suyu deneyleri yapılmaktadır. Bunların dışında günlük olarak yapılan deneyler de bulunmaktadır. Bunlar; giriş suyunda iletkenlik, bulanıklık, pH, E.koli, fekal koliform, renk, tat ve koku; çıkış suyunda ise bakiye klor ve bakiye klor analizleridir (ÇŞİDB., 2013).

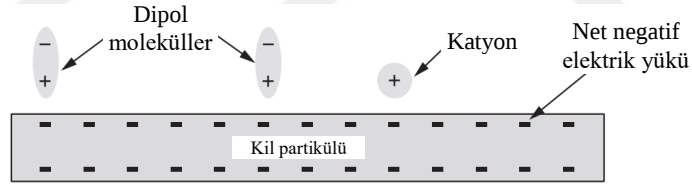
1.4. Killi Zeminler

1.4.1. Kilin Genel Yapısı ve Özelliği

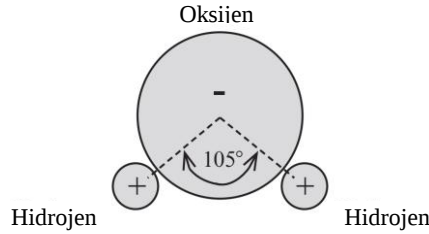
Kil, kayaçların çeşitli nedenler ile ayrışması sonucu oluşan dane boyutu 0,002 mm'den küçük plaka şeklinde ince daneli bir sedimandır. Çapları 0.001 mm'den daha küçük olanlara ise “kolloidal kil” adı verilir. Alüminyum, silis ve suyun farklı şekillerde birleşmesinden meydana gelen kil mineralleri özel elektron mikroskopunda plaka şeklinde görülürler. Mineral yapılarına bağlı plaka genişlik, uzunluk ve kalınlıklarında farklılıklar gösterebilir. Fakat tabiatta bazı illit grubu killer gibi, çubuk biçiminde kil danecikleri de vardır (Şengöz,

2006). Kil bünyesinde Halloysit, İllit, Kaolen ve Montmorilonit gibi farklı mineraller bulunabilir. Montmorilonitin ana bileşen olması halinde Bentonit olarak isimlendirilir (Yılmaz ve Özgen, 1993).

Kil mineralleri, su molekülleri ve değiştirilebilir katyonlarla (örneğin kalsiyum, Ca^{++} ; magnezyum, Mg^{++} ; sodyum, Na^{+} ; potasyum, K^{+}) birlikte alüminyum silikatlardan oluşur. Zemin stabilizasyon reaksiyonlarıyla ilgili olarak anlaşılması gereken birkaç önemli ayrıntı vardır ki ilk olarak, kil parçacıkları genellikle yanal boyutlarına kıyasla çok incedir, bu da çok yüksek özgül yüzeylere (yani çok büyük yüzey-hacim oranlarına) yol açar. Bu nedenle, kil parçacık yüzeylerinin kimyası hayati önem taşır (Nicholson, 2014). Su molekülleri dipolar yapıya sahiptir, yani her iki uçlarında pozitif ve negatif yüklerin bulunduğu belirli bir yönelime sahiptirler (Şekil 16). Su varlığında, bir kil partikülünün net negatif yükü, dipolar su moleküllerinin pozitif uçlarını kendine çeker. Daha fazla su molekülü elektriksel çekim kuvvetiyle kil partikülüne bağlandıkça, kil partikülünü çevreleyen bir tabaka oluştururlar. Su moleküllerinin pozitif uçları kil yüzeyinin negatif yükleri ile hizalandığında, su tabakasının dış kenarı net bir negatif yük oluşturur ve bu da genellikle başka bir su tabakası şeklinde daha fazla pozitif yükü kendine çeker (Şekil 17).

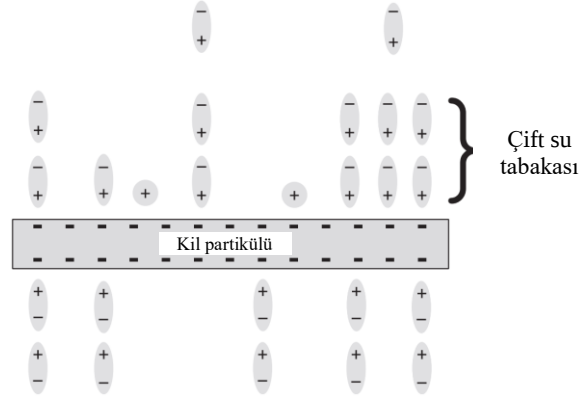


Şekil 16. Negatif yüklü yüzeye pozitif yüklü iyonların ve dipollerin çekimini gösteren kil partikülü şeması



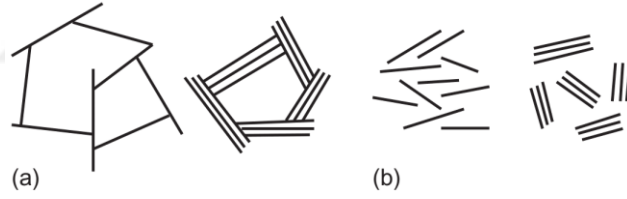
Şekil 17. Dipol su molekülünün şematik gösterimi

Kile elektriksel olarak bağlı olan bu su konfigürasyonu “çift su tabakası” veya “difüze çift tabaka” olarak adlandırılır (Şekil 18)



Şekil 18. Difüze çift (su) tabakasının temsili gösterimi

Bu bağlı su, kil partikülleri arasında etkili bir tampon görevi görerek, malzemenin çeşitli mühendislik özelliklerini etkiler. Bireysel partiküller, kenar-kenara yakın temastan, yani dağınık yapıdan, uzak tutulur (Şekil 19a). Çift su tabakası, genellikle mevcut net negatif elektriksel yükteki bir değişim nedeniyle önemli ölçüde azaldığında, kil partikülleri birbirleriyle daha fazla temas edebilir ve floküle bir yapı oluşturur (Şekil 19b).

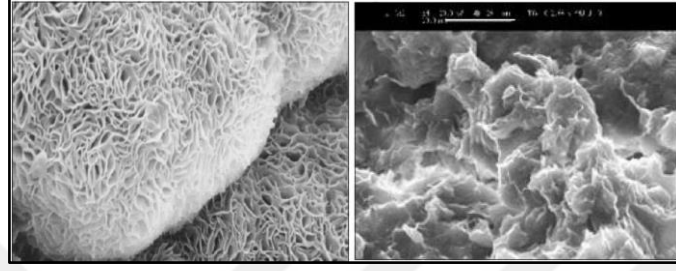


Şekil 19. Kil partikülü yapısı: (a) floküle, (b) dağınık

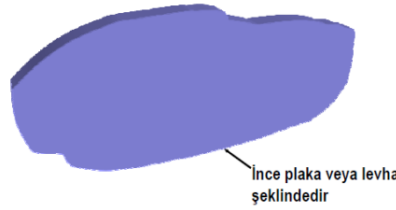
Günümüz teknolojisinde gıda, petrol, ilaç, plastik vb. birçok alanda oldukça geniş kullanım alanına sahip olan kil minerali, kolayca şekil alabilmeleri, su etkilerine karşı geçirimsizlik sağlamaları, ısı etkisi altında dayanıklı malzeme oluşturmaları bakımından tercih edilmektedirler. Daha fazla su molekülünün çekildiği dağınık bir yapı, genellikle daha düşük tepe dayanımına, daha yüksek sıkışabilirliğe, daha sünek bir davranışa, daha yüksek şişme potansiyeline ve daha düşük geçirgenliğe sahiptir. Floküle bir yapıya sahip kil zemin ise daha yüksek tepe dayanımı gösterir, ancak kırıldığında daha gevrek bir şekilde davranır ve daha düşük sıkışabilirlik, daha düşük şişme potansiyeli ve daha yüksek geçirgenlik sergiler (Nicholson, 2014).

Kil minerallerinin yüzey alanı, dış yüzey alanlarıyla çözelti halindeki iyonların geçebilecekleri iç boşlukların yüzey alanlarının toplamıdır. Dane çapı veya boyutu

küçüldükçe, yüzey alanı yüksek oranda büyüme göstermektedir. Killer saf durumda beyaz renklidirler ve kaolen adını alırlar. Dolayısı ile kilin rengi, içerisinde bulunan maddeler hakkında fikir vermektedir. Örneğin kilde, limonit bulunması halinde rengi esmer iken, manganez bioksit bulunması halinde rengi siyah ve demir peroksit bulunması halinde rengi kırmızıdır (Şengöz, 2006).

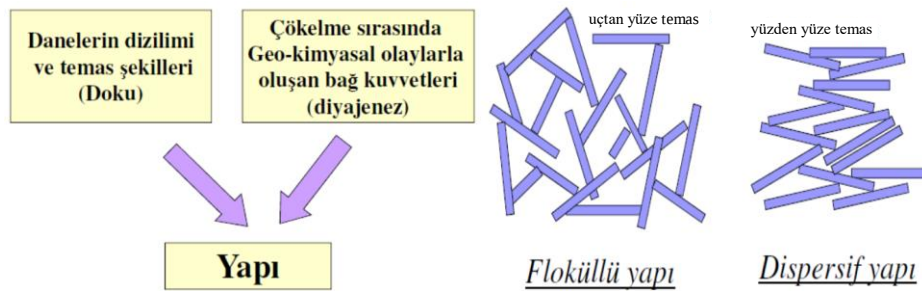


Şekil 20. Killerin özel mikroskoplardaki iki farklı görüntüsü (Şengöz, 2006)



Şekil 21. İnce plaka veya levha şeklindeki temsili bir kil danesi (Partikül) (Şengöz, 2006)

Sıcaklık, pH düzeyi, asitli ortamlar ve doğal çimento özelliği gösteren minerallerin çökelme sırasında kil dokusu üzerindeki etkisi büyüktür (Şekil 20-21-22). Kil daneleri dokuları itibari ile yüksek miktarda su tutma özelliğine sahiptirler. Dolayısı ile gerek depolama gerek ise çökelme sırasında boşluklarda bulunan yeraltı su seviyesi içindeki killer, bu etkiler ile ilave dayanım kazanmış olur (Şengöz, 2006).



Şekil 22. Killerde yapı (structure) (sol) ve kil dokusu (fabric) (sağ) (Şengöz, 2006)

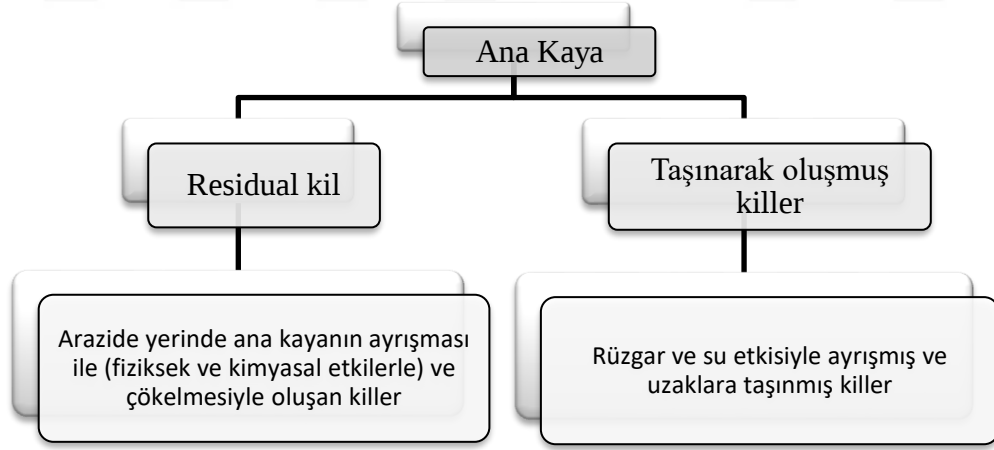
Killer nadir şekilde saf halde tek mineral hakim olmasına rağmen beraberindeki yabancı maddelerin;

- Karışım oranları,
- Kil ve yabancı madde ebat ve şekli,

- Reaksiyonların oluşturduğu şartlar gibi faktörler kilin özelliklerini oldukça etkilemektedir. Örneğin kilin içerisinde bulunan silika minerali; plastisiteyi, kopma ve kırılma mukavemetini ve birçok durumda kilin refrakterliğini azaltır. Alümina; kilin plastisitesini azaltır, yüzde 5'ten yüksek bir alümina kilin refrakterliğini artırır (Poyraz, 2019).

1.4.2. Kil Minerolojisi ve Kimyasal Bileşimi

Kil mineralleri yeraltı ve yerüstü sularının etkisiyle ayrılmış olan feldispatlarca zengin magmatik kayaların aşınma ve taşınması ve havzalarda birikmesi ile oluşur. Ayrılan kayaca ve depolanma-çökme sırasındaki kimyasal şartlara göre farklı kil mineralleri oluşmaktadır. Kil minerallerinin oluşumu Şekil 23'te gösterilmiştir.

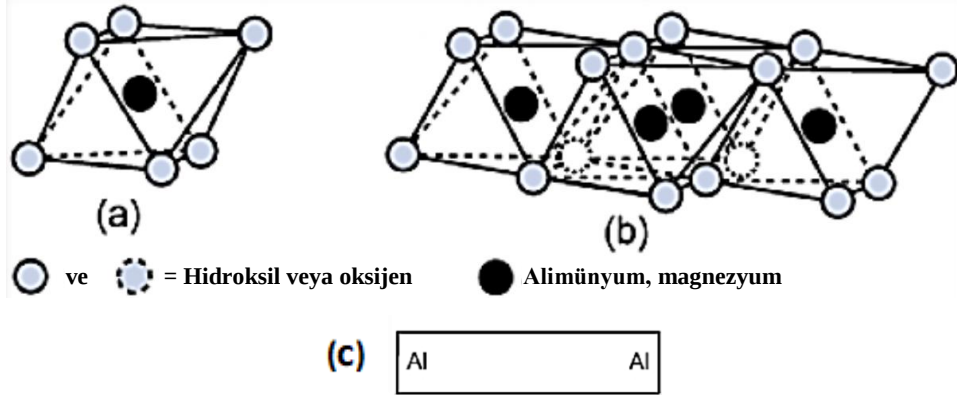


Şekil 23. Kil minerallerinin oluşum şekilleri

Kil minerallerinin kristal yapısı O ve OH iyonlarının tabakalarından ve bu tabakalar arasında bulunan oksijene oranla küçük Si, Al, Fe ve Mg gibi katyonlardan oluşur. Bu katyonlar O ve OH iyonlarının negatif yüklerini nötrleştirirler. Si (aynı zamanda Al) gibi küçük iyonlara 4 oksijen iyonu, daha büyük olan Al, Fe ve Mg iyonlarına ise 6 oksijen ya da OH iyonu bağlanmıştır (Uğur, 2005). Bu şekilde oluşan kil minerallerinin temel bileşimini

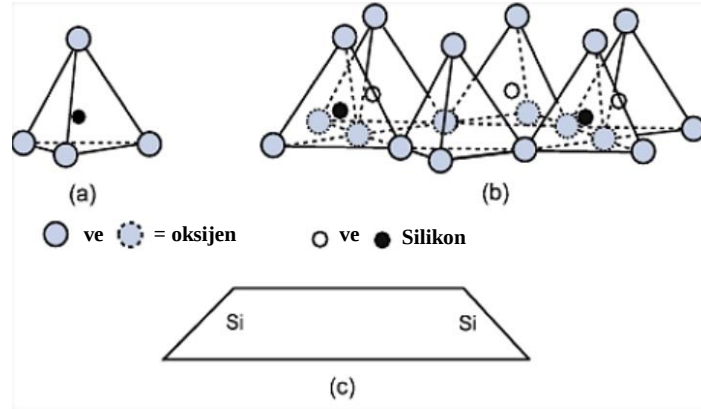
SiO_2 ve Al_2O_3 kristal yapıları oluşturur. Bu yapılar geometrik şekli oktahedral (düzgün sekiz yüzlü) ve tetrahedral (düzgün dört yüzlü) olmak üzere iki yapısal birimden oluşmaktadır. Oktahedral merkezinde alüminyum, demir ve magnezyum, köşelerde ise merkez atoma eşit uzaklıkta oksijen ve hidroksiller bulunmaktadır (Grim, 1962).

Merkezde Alüminyum (Al) bulunması halinde Alüminyum oktahedral, Magnezyum (Mg) bulunması halinde ise Magnezyum oktahedral olarak isimlendirilmektedir. Oktahedronların birleşmesi ile de “Oktahedron Tabaka” veya “Alümina Tabakası” meydana gelir. Alüminyum oktahedron (alümina) ve oktahedral tabaka yapısı Şekil 24’te görülmektedir (Angın ve Angın, 2005). Tetrahedral ise merkezde silisyum atomu, köşelerde ise merkez atomuna eşit uzaklıkta oksijen ve hidroksiller yer almaktadır (Kırıkoglu, 1990; Şengöz, 2006).

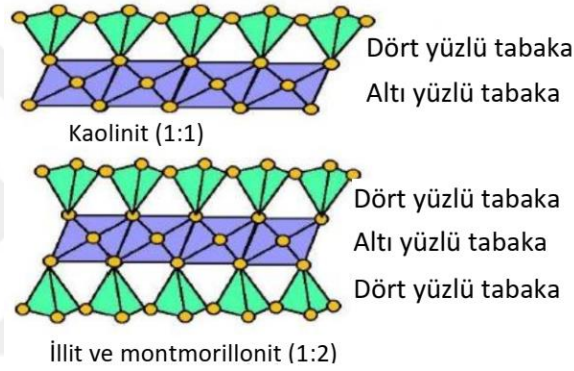


Şekil 24. Oktahedron tabakası (a) alüminyum oktahedron, (b) oktahedral tabaka, (c) alümina tabakasının temsili gösterimi (Fell vd., 1992)

Tetrahedral yapı, silis (Si) iyonu ile 4 adet oksijen (O_2) atomunun birleşmesinden oluşmuştur. Silis tetrahedronlarının birleşmesi sonucu “Tetrahedron Tabakası” veya “Silis Tabakası” oluşmaktadır (Ünver, 2015). Silis tetrahedron (silika) ve tetrahedron tabaka yapısı Şekil 25’te görülmektedir. Tetrahedral ve oktahedral tabakalar bir araya gelerek farklı kombinasyonlar oluşturur. Bunun sonucu olarak farklı kil mineralleri meydana gelmektedir (Şekil 26).



Şekil 25. Tetrahedron tabakası (a) Silis tetrahedron (b) Tetrahedral tabaka (c) Silika tabakasının temsili gösterimi (Fell et al., 1992)



Şekil 26. Farklı kil minerallerinin oluşum şekilleri

1.4.3. Kil Türleri

Kil minerali türü ana kayaktan ziyade çevre koşulları gözetilerek belirlenir. Killerin fiziksel özellikleri, plastisite özellikleri, geçirimsizliği, şişme-büzülme davranışı, sıkışabilirlik ve kayma direnci gibi davranışları geoteknik mühendisliğinde tanımlanmaları bakımından oldukça önemlidir. Özellikle davranışları bünyelerine ne kadar su alabildikleri ile yakından ilgilidir. Buna göre killer plastik ve amorf olarak iki gruba ayrılır. Amorf killer nemli durumda şekillerini koruyamazlar. Örneğin kum karışımı, kili amorflaştırır. Plastik killerin doğal su muhtevası yaklaşık %20 kadardır (Yılmaz ve Özgen, 1993). Kil minerallerinin sınıflandırılmasında genel olarak bir birliktelik mevcut değildir. Birçok araştırmacı tarafından kabul edilen çeşitli sınıflandırma yöntemleri olmakla birlikte Grim R. E.'nin yaptığı sınıflama yaygın şekilde kabul görmüştür (Tablo 2).

Tablo 2. Grim R. E'ye göre killerin sınıflandırılması

Amorf Olanlar	Kristal Yapıda Olanlar		
Allofan Grubu	A: İki tabakalı olanlar	Eş boyutlu olanlar	Kaolinit grubu (<i>Kaolinit, dikit, nakrit</i>)
		Bir yönde uzamış olanlar	Halloysit grubu
	B: Üç tabakalı olanlar	Genişleyen kristal yapılı olanlar	Eş boyutlu montmorillonit grubu (<i>Montmorillonit, savkonit, vermikülit</i>)
		Genişlemeyen kristal yapılı olanlar	Bir yönde uzamış montmorillonit grubu (<i>Nontronit, saponit, hektorit</i>)
	C: Düzenli Karışık Tabakalı Olanlar		İllit grubu
	D: Zincir Yapılı Olanlar		Klorit grubu
			Atapulgit, sepiyolit, poligorskit

Degens tarafından Tablo 3'deki sınıflandırma şekli de önerilmektedir (Poyraz, 2019).

Tablo 3. Degens'e göre killerin sınıflandırılması

Tabaka	Grup	Cins
2 Tabakalı olanlar	Kaolinit Grubu a- Eş boyutlu olanlar b- Bir yönde uzamış olanlar	Kaolinit, Dikit Halloysit
3 Tabakalı olanlar	Smektit Grubu İllit Grubu Vermikülit Grubu	Montmorillonit Bediellit, İllit Vermikülit
4 Tabakalı olanlar	Klorit Grubu	Klorit
Zincir yapısı olanlar	Sepiyolit Grubu	Sepiyolit Atapulgit Paligorskit

Tablolardaki bilgilere göre, kil türleri hakkında genel bilgiler aşağıda verilmiştir.

Allofan Grubu Kil Mineralleri: Allofan grubuna ait kil minerallerinin kimyasal bileşimi XAL_2O_3 , $YSiO_2$, $2H_2O$ 'dur. Saf olduğu durumda saydam ve renksiz, yabancı madde ile karışığında ise mavi, yeşil, sarı ve kahverengidir. X-ışını ile yapılan incelemelerde bazen amorf bazen ise kristalli yapıda olduğunu görülen Allofan grubu kil minerallerinin alkali ve toprak alkali içeriği diğer killere oranla oldukça azdır. Diğer kil mineralleri ile birlikte bulunmaktadır (Yılmaz, 1994; Poyraz, 2019).

Kaolinit Grubu Kil Mineralleri: Kaolinitin yapısal formülü $(OH)_8 Si_4 Al_4 O_{10}$ 'dur. Teorik olarak SiO_2 oranı %46, Al_2O_3 oranı %39.50 ve H_2O oranı ise %13.96'dır. Saf oldukları zaman beyaz renkli olup mat görünüşlüdürler. $330^\circ-450^\circ C$ ' de su kaybederler. Yoğun sülfat asidinde çözünürler (Yılmaz, 1994; Yılmaz, 1998). Kaolen tipi mineralleri montmorillonit, illit ve klorit tipi minerallerden ayıran genellikle SiO_2/Al_2O_3 oranıdır. İyi

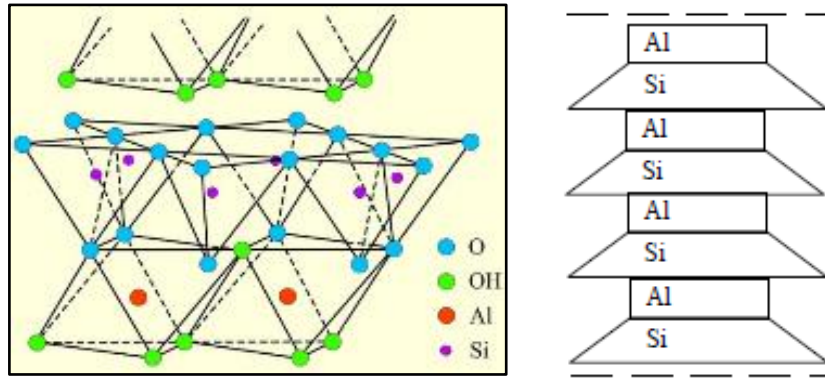
kaolinit killerde bu oran yaklaşık 2/1 iken diğerlerinde 3/1 dir (Poyraz, 2019). Kaolinit kristalleri levha şeklindedir (Şekil 27). Güçlü Hidrojen Bağları ve Van Der Waals kuvvetleri ile birbirine bağlı olan tetrahedron (silika) ve oktahedron (alümina) tabakalarını içerirler. Bu nedenle hidrasyonu önler ve kil ıslandığında tabakalar arası şişme görülmez. Kristallerin arasına katyonların ve su moleküllerinin girebilmesi çok zordur. Ayrıca, kaolinitin kristalleri montmorillonite göre daha büyük olduğundan kohezyon, plastiklik, şişme ve büzülme özellikleri çok zayıf, ıslandığında plastisitesi orta dereci olup içsel sürtünme açısı diğer kil minerallerinden daha büyüktür (Şengöz, 2006). Kaolinit 1000 °C civarında ısıtılırsa, mullit kristalleri oluşur (Poyraz, 2019). Sulu alüminyum silikatlar olan Kaolinit grubu kil mineralleri iki şekilde oluşurlar;

- Smektitin bulunduğu ortama yeterli miktarda Mg^{++} gelirse brusitin içerdiği ara tabaka suyunun yerini bir katyon olarak klorite dönüşüm sağlanır.

- Uygun kimyasal ve fiziksel koşullarda feldispatça zengin magmatik kayalar (granit, gnays, diyorit) biyotit ayrışmaya uğrayarak trioktahedral klorit ve klorit-vermikülit karışık tabakalı mineralini oluşturur.

Kaolinit grubu kil mineralleri kendi içerisinde üç gruba ayrılır (Şengöz, 2006):

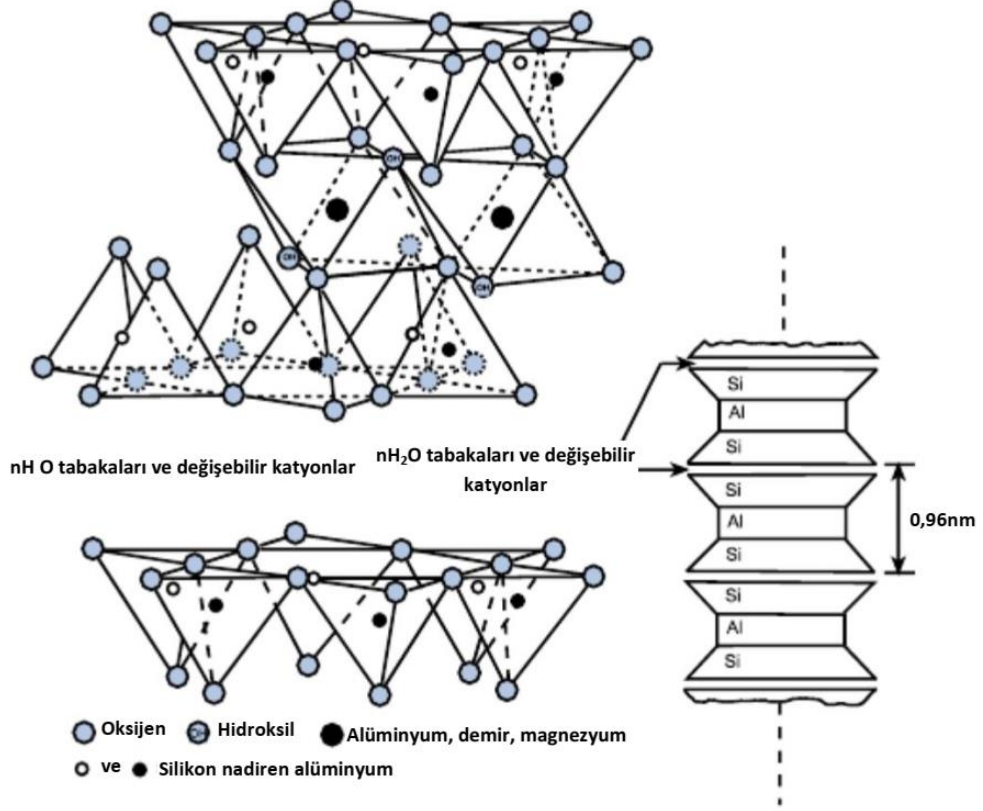
- a) Kaolen: $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ veya $Al_2(OH)_4(SiO_2O_5)$
- b) Dikit ve Nakrit: $Al_2SiO_5(OH)_4$ veya $Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot H_2O$
- c) Halloysit: $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$ veya $Al_2SiO_5(OH)_4 \cdot nH_2O$



Şekil 27. Kaolinitin şematik taslağı (sol), şematik görünümü (sağ) (Başer, 2009)

Smektit Grubu Kil Mineralleri: Çok küçük kristal daneciklerinden oluşan smektit grubu mineralleri önceleri montmotillonit grubu olarak adlandırılmaktaydı (Poyraz, 2019). Silikanın bol olduğu yerlerde gelişen Smektitler herhangi bir sebeple yıkandıklarında

kaolinite dönüşebilirler. Bu nedenle buharlaşmanın yağış düzeyini geçtiği kurak ve yarı kurak yani yıkanmanın yetersiz olduğu iklimlerin mineralidir (Şengöz, 2006).



Şekil 28. Montmorillonit kil mineralinin yapısı ve şematik gösterimi (Fell vd., 1992)

İllite benzeyen montmorillonit üç katman ve eş boyutlu bir smektit grubu kildir. Sekiz yüzeyli alüminyumda demirin yerini magnezyumun almasıyla oluşan eş yapı (isomorf) yapıya sahiptir. Genellikle oldukça ince ve eş boyutlu bir kabuk şeklinde meydana gelen montmorillonitin formülü $(OH)_4Si_8(Al_{3.34}Mg_{0.66})O_{20}$ dir (Şengöz, 2006). Fakat alüminyum, çinko ile yer değiştirdiği zaman sosonit, demir ile yer değiştirdiği zaman nontronit, Mg ile yer değiştirdiği zaman ise hektorit meydana gelmektedir (Poyraz, 2019). Elektron mikroskopuyla bakıldığında smektitin kristalleri çok ince ve katlanmış veya yuvarlanmış yapraklar şeklinde görünürler. Ayrıca düzensiz bir biçimde sınırlandırılmışlardır ve birçok yapı bozuklukları vardır (Uğur, 2005). Bentonit, montmorillonit grubu kil minerallerine aittir. Montmorillonit daha çok kuru veya çöl iklimlerinde volkanik kül, tuf ve lavların kimyasal ayrışması ve bozunmasıyla oluşmuş ise de çok farklı ortamlarda da oluşabilirler. Ayrıca zayıf drenaj koşullarında volkanik küllerin günlenmesi sonucu oluşabilirler (Şengöz, 2006).

Montmorillonit grubu kil mineralleri kendi içerisinde dört gruba ayrılabilir:

- a) Montmorillonit: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + n\text{H}_2\text{O}$
- b) Baydellit: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
- c) Nontronit: $(\text{AlFe})_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
- d) Saponit (Hektorit): $2\text{MgO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

Montmorillonit minerali özgül spesifik yüzey ve minerolojik yapısı sebebi ile yüksek şişme potansiyeli, su tuma potansiyeline sahiptir. Ayrıca yüksek hacim değişimi ve plastisite özelliğine de sahiptir (Angın ve Angın, 2005). Montmorillonit minerali kristalleri 2:1 ile gösterilir. Bunun nedeni 2 tetrahedral tabakanın arasına 1 oktahedral tabakanın sıkışmasıdır. Bilindiği üzere montmorillonit yüksek su tutma kapasitesine sahiptir. Bunun nedeni tabakalar arası bağın çok zayıf olması ve oktahedral levhada (-) negatif yük boşluğu olmasından dolayı suyun kolayca bu tabakalar arasına girebilmesidir (Şekil 28). Yüksek şişme oranı da bu nedenledir. Montmorillonit, illit ve kaolinit killерinin genel özellikleri Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Bazı kil minerallerinin genel özellikleri (Önalp, 1983)

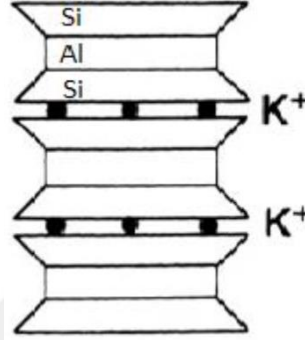
	Montmorillonit	İllit	Kaolinit
Dane Büyüklüğü	10 A-1	0.1-2	0,1-5
Dane Şekli	Eş boyutlu yaprak	Pul	Altı köşeli pul
Özgöl Yüzeyi (m²/g)	50-800	65-100	10-20
Dane Kalınlığı (Ångström)	10Å	30Å	0,05-2
Likit Limit	110-710	60-120	30-70
Plastisite İndisi	51-100	34-60	26-38
Şişme - Büzülme	Yüksek	Orta	Düşük
Özgöl Ağırlık	2.35-2,70	2,60-3,00	2,60-2,95

Bentonit, renkleri, griden siyaha, yeşilden beyaza kadar değişen iki katmanlı kristal yapıya smektit grubu kil minerallerindendir.

İllit ve Vermikülitler Grubu Kil Mineralleri: İllit düzgün bir kristal yapıya sahiptir. Bu nedenle rezidüel zeminlerde olduğu gibi çökellerde, deniz ve okyanus sedimentlerinde bol miktarda bulunmaktadır. Ayrıca yoğun potasyum iyonu bulunması durumunda montmorillonitler de illite dönüşebilir. Bazı illit mineralleri, oktahedral katmanında alüminyumla birlikte magnezyum ve demir içerebilirler (Şengöz, 2006). İllitin kristal yapısı 2:1 olarak gösterilir. Bunun nedeni temel yapısının iki tabakalı silika tetrahedronlar ile birlikte alümina oktahedronlar tabakasından oluşmasıdır. Oktahedral tabakada Magnezyum (Mg) ve Demir (Fe) ile Alüminyum'un kısmi yer değiştirmesi; tetrahedral tabakada ise

Alüminyum (Al) ile Silis (Si)'in kısmi yer değiştirmesi görülür (Şekil 29). Tabakalar arasında tutulan Potasyum (K) iyonlarına bağlı olarak çok zayıf bağlarla bağlanmıştır (Craig, 1997). İllit grubu kil mineralleri kendi içerisinde üç gruba ayrılabilir:

- a) İllit: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{OH}_4\text{K}_2 (\text{Si}_6\text{Al}_2) \text{Al}_4\text{O}_2$
- b) Muskovit: $\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- c) Biyotit: $\text{K}_2\text{O} \cdot 4\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$



Şekil 29. İllit türü minerallerin şematik görünümü (Başer, 2009)

Vermikülit nemli ve ılıman iklimlerde daha sık görülen yeşil, kahve renkli genişleyebilen üç tabakalı kil mineralleridir. Yapısı, biyotit mika tabakaları ve çift su molekül tabakalarının düzenli sıralanmasıyla oluşur. Kalsiyum ve magnezyum var ise çift su tabakası oluşur. İllit grubu gibi kil mineralleri feldispat veya mikanın ayrışması ile oluşabileceği gibi herhangi bir çözeltiden çökelti olarak da oluşabilir. Yapı itibarıyla montmorillonite benzer fakat dane boyutu daha iridir (Şengöz, 2006). Vermikülit ile kloritin gözle görünür iri mineralleri birbirine benzer olduğundan mikroskopa polarizasyon renkleri ayrılabilirler. 110 °C kadar ısıtılmış kloritin X-ışını difraksiyonu 14 angstrom, vermükülitin 11,6 angstromdur (Poyraz, 2019).

Klorit Grubu Kil Mineralleri: Kimyasal formülü $(\text{Mg,Fe;Al})_6(\text{Al,Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ dir. Klorit grubu kil mineralleri mafik açıdan zengin, düşük dereceli yeşil şist fasiyesindeki metamorfik kayalardan oluşmaktadır (Lambe, 1960). Klorit daneleri dört katlı (2:1:1) yapısal tabakaya sahiptir. Kloritlerin kristal yapısını mika ve brusit tabakaları meydana getirir (Yalçın, 1997; Poyraz, 2019). Klorit minerallerinin klivajı mükemmeldir. Yoğunlukları 2,6–3,3 gr/cm³, sertlikleri ise 2-3'dür. Renkleri ise yeşil, sarı, beyaz, kırmızı, pembe, kahverengi ve renksizdir (Poyraz, 2019) (Tablo 5).

Tablo 5. Kil minerallerinin iklim ve ana kaya koşullarına göre oluşumu (Lambe, 1960)

Kil Minerali	Oluşumu
Kaolinit	Volkanik kayaların aşınması sonucu genellikle tropik ve astropik alanlarda oluşur.
Klorit	Metamorfik ana kaya alanlarında, genellikle deniz tortularda ve çökelti kayalarda oluşur. Normal olarak yüksek oranlarda bulunmaz.
İllit	Sıcak ve kurak bölgelerde çökelti kayaların aşınması ile oluşur.
Montmorillonit	Zayıf drenaj şartlarında volkanik kül ve kayaların aşınması sonucu, genellikle kurak alanlarda illit ile beraber bulunur.

1.5. Problemli Zeminler

Organik zeminler, turba ve bataklık: Kolloidal veya lifli formda organik madde içeren zeminler; özellikle turba, organik siltler ve haliç, gölssel ya da akarsu kökenli killeri gibi oluşumları kapsar. Bu tür zeminler düşük taşıma gücüne sahip olup, yük altında aşırı oturma eğilimi gösterirler. Alüvyonlar ise akarsuların taşıdığı kil, kum ve çakılın, akış hızının azalmasıyla birikmesi sonucu oluşan tortul zeminlerdir. Bu zeminler, yüksek oturma potansiyelleri nedeniyle genellikle yapı temelleri için uygun değildir (Sivrikaya, 2021). İçerdikleri bitkisel maddelerin çürümesi sonucu büyük şekil değişimleri meydana gelebilir ve taşıma kapasiteleri yok denecek düzeydedir. Bu nedenle, temel zemini olarak kullanılacaklarsa mutlaka iyileştirme gerektirirler (Özdemir, 2006).

Normal Konsolide Killer: Yumuşak ila orta katı kıvamda, organik içerikli killeri birçok bölgede yaygın olarak bulunur. Bu zeminler, yapı yükleri altında uzun süreli ve önemli oturmaları neden olabilir. Oturma miktarı ve hızı, örselenmemiş numunelerle yapılan konsolidasyon deneyleriyle tahmin edilebilir. Önemli yapıların inşasından önce bu analizlerin yapılması gereklidir. Yumuşak killeri düşük taşıma gücüne sahip olup, küçük yükler altında dahi büyük deformasyonlara uğrayabilirler. Bu nedenle, temel zemini olarak kullanılmadan önce mutlaka iyileştirilmelidirler (Sivrikaya, 2021).

Hassas killeri: Hassas killeri, yoğrulmuş numunenin mukavemetinin örselenmemiş numuneye oranının %25 veya daha az olduğu killeri olarak tanımlanır. Bazı killerde bu oran 1/20 hatta 1/100'e kadar düşebilir (CFEM, 2006). Genellikle arazi su muhtevası likit limite eşit veya daha yüksektir ($w \geq w_L$) ve bu durum hassas kil varlığına işaret eder.

Eğer bu killeri önceden konsolide olmuşsa, temeller dikkatle tasarlandığında güvenli şekilde yerleştirilebilir. Aksi takdirde aşırı oturma veya göçme riski doğar. Bu killerde büyük ölçekli akma kaymaları gelişebilir ve tehlike her zaman göz önünde bulundurulmalıdır. Hassas killerde yapılan derin kazılar, kayma mukavemetindeki ciddi kayıplar nedeniyle

oldukça risklidir. Bu tür zeminlerde mühendislik değerlendirmesi, hem örselenmemiş hem de yoğrulmuş numunelerle yapılan detaylı fiziksel analizleri gerektirir. Numune alma ve deney işlemleri için hassasiyeti koruyacak özel ekipmanlar kullanılmalı ve yalnızca yetkin personel tarafından yürütülmelidir (Sivrikaya, 2021).

Şişen ve büzülen killer: Şişen ve büzülen killer, su muhtevastaki değişimlere bağı olarak hacimsel genişleme veya büzölme gösteren zeminlerdir. Bu özellik, genellikle birikintili ortamlarda ve kıltaşı ile şeyl gibi tortul kayaçlarda görülür. Su içeriğindeki artış veya azalma, zemin hacminde önemli değişikliklere neden olarak yüzeysel temellerde oturma, kaldırma ya da eğilme gibi yapısal sorunlara yol açabilir. Derin temeller de, çevreleyen aktif kil tabakalarıyla temas halindeyse benzer etkilerden zarar görebilir. Bu nedenle, şişme potansiyeli dikkate alınarak uygun tasarım ve önlemler geliştirilmelidir (Sivrikaya, 2021).

Dispersif Killer: Dispersif killer genellikle düşük kohezyonlu, yüksek plastisiteli (CH veya MH sınıfı) zeminlerdir. Dispersiyon süreci nedeniyle içsel bağlar zayıf olduğundan kolay dağılıabilir özelliğe sahiptirler. Suyun mevcut olduğu ortamda düşük akış hızlarında dahi yüzeysel erozyon, içsel boşalma (piping) ve tünelleşme gibi olgular meydana gelebilir. Bu da özellikle baraj dolgularında, kanal kaplamalarında, toprak setlerde ve otoyol dolgu sistemlerinde yapısal istikrarsızlıklara neden olmaktadır (Sherard et al., 1976; Ali ve Shankar, 1992).

Dispersif killerin en belirgin özelliklerinden biri, yüksek oranda değişebilir sodyum (Na^+) katyonu içermeleridir. Bu durum, killerin danecikleri arasındaki elektrostatik çekim kuvvetlerini azaltmakta ve kil fraksiyonlarının ayrı partiküller gibi davranmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, bu parçacıklar diğer zemin bileşenleriyle bağ kurmakta yetersiz kalmakta ve çevresel etkilere karşı daha savunmasız hale gelmektedir. Dispersif killer ile dispersif olmayan killer arasındaki temel fark, boşluk suyu içerisinde bulunan katyonların türü ile ilişkilidir. Dispersif killerin boşluk suyu genellikle sodyum katyonları açısından zengin iken; dispersif olmayan killerin boşluk suyu, kalsiyum (Ca^{2+}), potasyum (K^+) ve magnezyum (Mg^{2+}) gibi diğer katyonlar bakımından zengindir. Bu katyon farkı, killerin dağılma eğiliminde belirleyici rol oynamaktadır (Tosun, 1995).

Gevşek kumlar ve kaba daneli zeminler: Kaba daneli zeminler, titreşim altında belirli düzeyde sıkışma eğilimi gösterir. Su seviyesinin üzerindeki kumlar, kapiler kuvvetlerin etkisiyle genellikle küçük titreşimlerle hafif sıkışır. Sıkı kumlarda bu oturmalar çoğunlukla

yapısal tolerans sınırları içindedir. Ancak kum gevşek veya çok gevşek yapıdaysa, küçük titreşimler ya da yakındaki kazık çakma işlemleri bile önemli oturmalarla yol açabilir.

Deprem gibi dinamik yüklemeler, çok gevşek kumların sıvılaşmasına neden olabilir; bu da yapıların ciddi şekilde hasar görmesine veya kullanılamaz hale gelmesine yol açabilir (Özdemir ve Özdemir, 2006). Ayrıca gevşek kumlar statik yük altında da aşırı oturma gösterebilir. Bu nedenle bu tür zeminler dikkatle incelenmeli, sınırları belirlenmeli ve gerekli durumlarda sıkıştırma ile iyileştirilmelidir (Sivrikaya, 2021)

Çökebilen zeminler: Çökebilen zeminler, doygun olmayan koşullarda stabil görünebilen ancak su ile temas ettiğinde ani ve büyük oturmalarla neden olabilen, gevşek yapılı doğal veya yapay zeminleri içerir. Bu zeminler üzerinde inşa edilen yapılar, ciddi oturma ya da yıkım riski ile karşı karşıya kalabilir. Yaygın örnekleri; kontrolsüz dolgular, alüvyonlar, kolüvyonlar ve rüzgarla taşınan malzemelerin oluşturduğu lös ve kumullardır (CFEM, 2006; Day, 2010).

Lös en yaygın çökebilen zemin türü olup, tipik olarak yüksek poroziteye (%50 civarı) ve düşük birim hacim ağırlığına (11–14 kN/m³) sahiptir. Her bir zemin danesi, yapısal bütünlüğü geçici olarak sağlayan ince kil tabakasıyla kaplıdır. Ancak bu çimentolaşma (kil, tuz, jips) zayıftır ve ıslanma veya yüksek gerilme altında çökmeye neden olabilir (Coduto et al., 2016). Kurak iklimlerde kuru halde yeterince güçlü görünen bu zeminler, bu yönleriyle araştırmalarda yanıltıcı olabilir. Bu nedenle, çökebilen zeminlerin varlığı şüphesi durumunda dikkatli tanımlama ve uygun temel tasarımı büyük önem taşır (Sivrikaya, 2021).

Dolgular: Kontrollü koşullar altında yerleştirilen dolgular, doğal zeminlere kıyasla daha sıkı, homojen, rijit ve dayanımlı olabilir. Ancak uygun denetim olmadan yapılan dolgular; heterojen, gevşek ve taşıma gücü düşük malzemelerden oluşabilir ve bu tür dolgular "vahşi dolgu" olarak tanımlanır. Dolgunun kalitesi bu iki uç arasında değişkenlik gösterebilir. Yerleştirme koşulları ve kalite kontrolü bilinmeyen dolgular, temel zemin olarak uygun kabul edilmemelidir. Bu nedenle dolgunun sınırları, derinliği ve özellikleri detaylı incelemelerle belirlenmelidir (Sivrikaya, 2021).

Donmuş zeminler: Mühendislik yapıları düşük sıcaklıklardan ciddi şekilde etkilenebilir. Donmuş zemin, buzun varlığıyla kayaca benzer yüksek mukavemetli bir yapı kazanır. Ancak yapıdan iletilen ısı buzun erimesine neden olur; bu da taşıma gücünün kaybına ve yapısal hasara yol açar. Kışın zemin kabarıken, bahar aylarında erime ile taşıma gücü azalır. Bu durum, inşaat ve bakım süreçlerinde ek önlemler gerektirir. İklim değişikliği bu sorunları daha da artırmaktadır (CFEM, 2006).

Donma ile oluşan iki yaygın hasar; çatlaklarda buzlanma ve buz mercceklerinin gelişimidir. Donma, zemin hacminde %10'a kadar artışa neden olarak kaya şevlerinde göçmelere ve beton yapılarda hasara yol açabilir. Özellikle betonun yerleştirme aşamasında donması engellenmelidir (Day, 2010).

Don kaynaklı kabarma, silt boyutunda en yüksek, kaba kum ve yağlı killerde en düşük seviyededir. Kritik dane çapı 0.02 mm olup, bu boyuttaki danelerin %1'den az olması durumunda kabarma riski düşüktür. Üniform olmayan zeminlerde %3, üniform zeminlerde %10'un üzerindeki ince dane içeriği kabarma riskini artırır. Kumlar genelde $C_c < 0.6$ ve $M+C < 0.6$ olduğunda dona karşı duyarsızdır. Organik zeminlerde ise bu duyarlılık değişkendir (Sivrikaya, 2021).

Sülfatlı zeminler ve yeraltı suyu: Zemin ve yeraltı sularında bulunan sülfatlar, portland çimento esaslı betonlarda ciddi bozulmalara yol açabilir. Bu bozulmalar genellikle sülfat içeren yeraltı sularıyla doğrudan temastan kaynaklanır. Bu tür durumlarda betonun yalıtımı ya da sülfatlı suyun uzaklaştırılması, yapının korunmasında etkili olabilir. Alternatif olarak, sülfata dayanıklı çimento kullanımı da bozulmayı önlemek için önerilen bir çözümdür (CFEM, 2006).

1.6. Zeminlerin Stabilizasyonu

Zemin iyileştirmesi, bir zeminin mevcut mühendislik özelliklerini geliştirmek için yapılan her türlü işlemi ifade eder. Dolayısı ile daha geniş bir hedef yelpazesine sahiptir. Stabilizasyonda ise genellikle çimento, kireç, bitüm veya uçucu kül gibi bağlayıcı veya kimyasal maddeler gibi ekonomik ve kolay temin edilebilen sanayi atıkları taşıma kapasitesi düşük, yüksek kil içeriği bulunan ve hızlı şekil değişiklikleri gösteren zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla, katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Bu katkı maddeleri, zemin özelliklerini iyileştirerek, daha dayanıklı ve stabil bir yapının elde edilmesine katkı sağlarken aynı zamanda olası çevresel problemlerinde önüne geçmiş olmaktadır. Zemin iyileştirmesi katkı maddesi kullanmadan da yapılabilir (örneğin, sıkıştırma), ancak zemin stabilizasyonu genellikle kimyasal veya bağlayıcı madde kullanımını içerir. Stabilizasyondaki temel ilke, çeşitli karışımlarla zemin boşluklarının doldurulması, yeraltı su seviyesinin azaltılması veya su muhtevasının azaltılmasıdır. Dolayısı ile bu sayede zeminin permeabilitesi azalmış kayma mukavemeti ve zemin taşıma kapasitesi artmış olmaktadır (Sağlam, 1985). Bu yöntem ile bir yandan zemin özellikleri

beklenen seviyeye çıkarılırken diğer yandan da birtakım atık malzemelerin değerlendirilmesi ile atıkların olası zararlarını en aza indirilerek bertaraf edilmektedir.

Atık yönetimi, geri kazanım mekanizmasının en kritik aşamalarından biri olarak öne çıkmaktadır. Endüstriyel, tıbbi, zararlı ve zararsız atıkların, türlerine göre ayrıştırılması, uygun şekilde depolanması, aktarım mekanizmalarının oluşturulması ve bu süreçlerde doğru sistemlerin seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Atıkların bir noktadan diğerine taşınması, üretim süreçlerine yeniden dahil edilmesi, geri dönüşüm işlemleri ve imha yöntemlerinin uygulanması gibi süreçler, atık yönetiminin temel yapı taşlarını oluşturmaktadır. Aynı zamanda, bu sistemlerin işletme ömürlerinin sonunda kapatılması, kapatma sonrası bakım, izleme ve kontrol süreçlerini içeren çeşitli otonom sistemlerin entegrasyonu, atık yönetiminin sürdürülebilirliği açısından kritik bir rol oynamaktadır (Zorluer ve Usta, 2003). Bununla birlikte, atıkların depolanması süreci, beraberinde önemli zorlukları ve yüksek maliyetleri de getirmektedir. Depolama alanlarının sınırlı olması, çevresel etkiler ve uzun vadeli izleme gerekliliği, bu süreci daha da karmaşık hale getirmektedir. Özellikle tehlikeli atıkların doğru bir şekilde depolanması ve yönetilmesi, çevresel ve insan sağlığı üzerindeki riskleri en aza indirmek açısından büyük bir sorumluluk gerektirir. Bu bağlamda, atıkların yalnızca depolanması yerine, farklı alanlarda yeniden kullanımının sağlanması, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik faydalar açısından oldukça önemlidir.

Atıkların farklı sektörlerde yeniden değerlendirilmesi, hammadde tüketimini azaltarak doğal kaynakların korunmasına katkı sağlamaktadır. Örneğin, endüstriyel atıklar inşaat sektöründe dolgu malzemesi olarak kullanılabilirken, organik atıklar kompost üretiminde değerlendirilebilir. Bu tür geri kazanım uygulamaları, hem atık yönetiminin maliyetlerini düşürmekte hem de çevresel etkileri minimize etmektedir. Böylelikle, atık yönetimi, yalnızca bertaraf süreçlerinden ibaret olmayıp, ekonomik ve çevresel sürdürülebilirliğe katkıda bulunan bütüncül bir sistem olarak ele alınmalıdır.

1.7. Zemin Stabilizasyonunun Amaçları

Zemin stabilizasyonunun amacı, doğal haliyle istenilen mühendislik özelliklerini sağlamayan zeminlerin; mukavemeti artırmak, oturma miktarını azaltmak, su geçirgenliğini ve plastisitesini kontrol altına almak, erozyon direncini artırmak ve zemin davranışını uzun vadede kararlı hale getirmek için fiziksel veya kimyasal yöntemlerle iyileştirilmesidir. Her stabilizasyon projesi sahaya özeldir ve probleme karşı en etkili çözümü geliştirmek için

standart test yöntemlerinin, analiz prosedürlerinin ve tasarım adımlarının entegrasyonunu ve birçok değişkenin dikkate alınmasını gerektirir (Little ve Nair, 2009).

Bu nedenle öncelikle temel hedef problemi belirlemek olmalıdır. Genel anlamda Das (2007)'a göre zemin iyileştirmenin amacı, zeminlerin mukavemetini artırmak, şişme ve oturma kapasitesini azaltmaktır. Ek olarak neden sonuç ilişkisi içerisinde ele alınırsa;

- Donma-çözülme, ıslanma – kuruma gibi çevresel faktörler sonucu olumsuz fiziksel ve kimyasal etkilerin önlenerek stabilitenin artırılması

- Erozyona karşı mukavemetin artması

- Tekrarlı yükler altında olası sıvılaşma, dayanım ve rijitlik kaybı potansiyelinin düşürülmesi

- Gerilmelere bağlı şekil değiştirmelerin azaltılması

- Zeminin permeabilitesi, su basınçları ve sızıntı suyu kontrolü

- Atık malzemelerinin değerlendirilmesi ve depolanması şeklinde özetlenebilir (Özaydın, 2012).

Özellikle problemli zeminlerde, zemin yapı yapılmadan önce mutlaka zemin yeterince araştırılmalı ve en uygun iyileştirme yöntemi kullanılmalıdır.

1.8. Zemin Stabilizasyon Türleri

Stabilizasyon projeleri, yerel koşullara özgüdür ve kabul edilebilir çözümler geliştirmek için standart test yöntemlerinin, analiz prosedürlerinin ve tasarım adımlarının entegrasyonunu gerektirir. Zemin stabilizasyonu uzun vadeli bir etki sağlamak amacıyla yapılıyorsa, birçok değişkenin dikkate alınması gerekir. Zemin ve katkı maddesi etkileşimleri, zemin türüne göre farklılık gösterir ve dolayısıyla zemin özelliklerindeki iyileşmenin derecesi de buna bağlı olarak değişir. Bu nedenle, tüm stabilizatör türlerine uygulanabilir ortak bir prosedür geliştirmek pratik değildir. Zemin özellikleri; mineraloji, gradasyon ve ince daneli zeminlerin fiziko-kimyasal özellikleri, zemin ve katkı maddesi etkileşimini etkiler. Bu nedenle, stabilizatör seçimi, seçilen zeminin fiziko-kimyasal özelliklerini iyileştirme konusunda belirli bir stabilizatörün etkinliğine dayanmalıdır (Little ve Nair, 2009).

Arora ve Scott (1974), kili stabilize edebilecek 18 farklı kimyasal mekanizmayı (katyon değişimi, anyon değişimi, adsorpsiyon, tutma, yeni minerallerin oluşumu, çimentolama, tuz dönüşümü, su filmlerinin modifikasyonu, su filmlerinin adsorpsiyonu,

gözenek suyunun iyonlarla zenginleştirilmesi, kapiler kuvvetlerin modifikasyonu, kil minerallerinin elektriksel yüzey geriliminin modifikasyonu, parçacıklar arasındaki elektriksel kuvvetlerin modifikasyonu, kimyasal olarak bağlı suyun modifikasyonu, kimyasal olarak bağlı suyun adsorpsiyonu, asitlerin nötralizasyonu, bazların nötralizasyonu ve proton değişimi) raporlamışlardır.

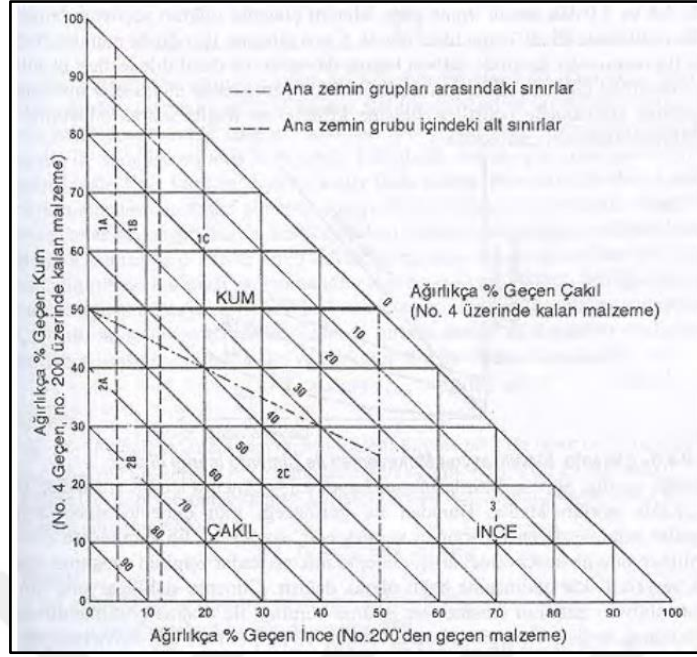
Tablo 6. Stabilizör seçimi için rehber (Tunç, 2002)

Alan	Zemin sınıfı	Önerilen stabilizör	Kısıt	No.200den Geçen	Açıklamalar
1A	SW SP	Asfalt Çimento K-Ç-UK	$I_p < 25$		
1B	SW SP SW-SC	Asfalt Çimento Kireç	$I_p < 10$ $I_p < 30$ $I_p > 12$		
1C	SM SC SM-SC	Asfalt Çimento Kireç K-Ç-UK	$I_p < 10$! $I_p > 12$ $I_p < 25$	Max %30	
2A	GW GP	Asfalt Çimento K-Ç-UK	$I_p < 25$		Sadece iyi gradasyonlu zemin No.4den geçen ağırlık min %45
2B	GW GP GW-GC GP-GC	Asfalt Çimento Kireç K-Ç-UK	$I_p < 10$ $I_p < 30$ $I_p > 12$ $I_p < 25$	Max %30	Sadece iyi gradasyonlu zemin No.4den geçen ağırlık min %45
2C	GM GC GM-GC	Asfalt Kireç K-Ç-UK	$I_p < 10$! $I_p > 12$ $I_p < 25$		Sadece iyi gradasyonlu zemin No.4den geçen ağırlık min %45
3	CH CL ML OL ML-CL	Çimento Kireç	$LL < 40$, $I_p < 20$ $I_p > 12$		Organik ve kuvvetli asidik Zeminler bu alana giriyorsa stabilizasyon için uygun değildir.

Ayrıca, parçacıkların flokülasyonu, kimyasal reaksiyonlar sırasında ısı üretimi vb. işlemler gerçekleşebilir. Bu mekanizmalardan biri veya bir kombinasyonu, zeminle karıştırılan katkı maddelerinin türüne bağlı olarak meydana gelebilir (Patel, 2019). Stabilizör seçimi zeminlerin stabilizasyonunda oldukça önemli bir faktördür. Bu nedenle stabilize edilecek zemin cinsi, stabilize amacı, hangi özelliğin iyileştirileceği ve maliyet gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Aşağıda verilen zemin gradasyon üçgeni ve stabilizör seçimine yardımcı bir rehber tablonun birlikte kullanımı ile stabilizör seçilebilmektedir (Nicholson, 2014).

Tablo 6'daki "K-Ç-UK" kireç-çimento-uçucu kül kombinasyonunu göstermektedir. Çizelgede "!" işareti $I_p \leq 20 - ((50 - \text{no.200'den geçen \% 'si})/4)$ olduğunu göstermektedir. Zemin stabilizasyon çalışmalarında, killi zeminlerin ufalanma özellikleri önemli bir faktördür. Bu bağlamda, üçgen gradasyon monogramı, zeminlerin bu özellikleri göz önünde bulundurularak geliştirilmiştir (Şekil 30).

Zemin stabilizasyon çalışmalarında, killi zeminlerin ufalanma özellikleri önemli bir faktördür. Bu bağlamda, üçgen gradasyon monogramı, zeminlerin bu özellikleri göz önünde bulundurularak geliştirilmiştir (Şekil 30). Özellikle kuru killi zeminler, farklı boyutlarda ve sert topraklar halinde bulunur. Bu toprakların kimyasal stabilizasyonun etkili bir şekilde uygulanabilmesi için parçalanarak daha küçük ve homojen bir yapıya dönüştürülmesi gerekir. Böylece stabilizör malzeme, zemine daha iyi nüfuz ederek istenilen teknik özelliklerin sağlanmasına katkı sunar. En uygun stabilizör seçimi için zeminin I_p , w_L , ve gradasyon özellikleri gerekmektedir. Eğer stabilize edilmesi gereken zeminin I_p değeri 15 ise ve zemin bileşiminde %67 çakıl, %26 kum ve %7 ince malzeme bulunuyorsa, üçgen gradasyon monogramına göre bu zemin 2B alanına düşmektedir. Bu tür zeminler için stabilizasyon seçenekleri arasında asfalt, çimento, kireç veya kireç-çimento-uçucu kül karışımı önerilmektedir. Ancak, I_p değerinin 10'dan büyük olması nedeniyle asfalt stabilizasyon yöntemi bu zemin için uygun değildir. Bunun yanı sıra, No.4 eleğinden geçen malzeme oranının toplam %33 (%26 kum + %7 ince) olması ve bu değer %45'in altında kalması, çimento stabilizasyonu seçeneğini de devre dışı bırakmaktadır (Tunç, 2001).



Şekil 30. Zemin gradasyon üçgeni (Tunç, 2001)

Bu bağlamda, söz konusu zemin için kireç veya kireç-çimento-uçucu kül karışımının kullanılması önerilmektedir. Bu iki stabilizör, zeminin özelliklerini iyileştirme konusunda hem uygun hem de teknik gerekliliklere uyum sağlayabilecek niteliktedir. Bu yaklaşımla, zemin stabilizasyonunda istenen sonuçların elde edilmesi mümkün olacaktır.

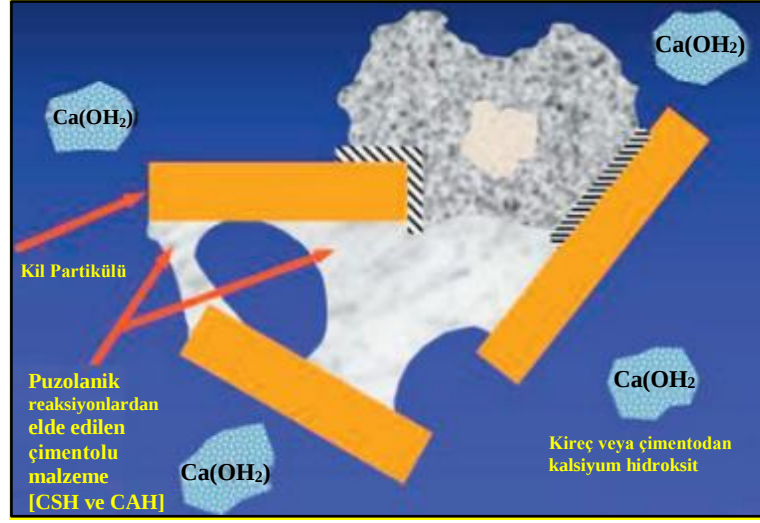
1.8.1. Kireç ile Stabilizasyon

Kireç malzemesi Çin ve Romalılar tarafından kullanılan en eski stabilizasyon malzemesidir. Roma yakınlarındaki Pozzuoli bölgesinde çıkarılan volkanik küllerin, kireçle karıştırıldığında kimyasal reaksiyonlar sonucu yüksek dayanım özellikleri kazandığı gözlenmiştir. Bu malzeme, antik dönemde özellikle dayanıklı yapıların inşasında kullanılmış ve uzun ömürlü mühendislik performansı sergilemiştir (Ayan, 2009; Houben ve Guillaud, 1996). Kireç, kalsiyum ve magnezyumun oksitleri ve hidroksitlerine verilen genel addır. Genellikle beyaz ila gri kristal bir katıdır. Kireç için terminoloji (ASTM C51'den uyarlanmıştır) içerdiği magnezyum ($MgCO_3$) miktarına bağlıdır. Kirecin üç temel formu, %0-5 $MgCO_3$ (magnezyum karbonat) içeren yüksek kalsiyumlu kireç, %5-35 $MgCO_3$ içeren magnezyumlu kireç ve %35-46 $MgCO_3$ içeren dolomitik kireçtir (Hall vd., 2012).

Kireç, kil zeminle su varlığında birleştirildiğinde reaksiyonlar meydana gelmeye başlar. Kısa vadede (neredeyse anında başlayarak 24 ila 48 saatlik bir süre boyunca) bir dizi

fizikokimyasal reaksiyon gerçekleşebilir. Eğer katkı malzemesi olarak sönmemiş kireç kullanılırsa, hızlı bir hidrasyon gerçekleşir. Hidrasyon, ekzotermik bir reaksiyondur, yani önemli miktarda ısı açığa çıkar (bu nedenle sönmemiş kireç, nemle temas ettiğinde –örneğin elde– "yakıcı" bir etkiye sahiptir). Bu hidrasyon, kirecin nemi absorbe etmesine neden olur ve bu da zemini kurutma eğilimi yaratır ve desikasyon (kuruma) yoluyla zeminin sıkışmasını sağlar. Eğer kuru kireç uygulanırsa, nemli bir zemine kuru bir malzeme eklemenin basit bir sonucu olarak da zemin kuruyabilir. Kireç zemine karıştırıldığında, katyon değişimi başlatabilir; bu süreçte, kil partiküllerinin yüzeyine adsorbe olmuş düşük yüklü katyonlar, yüksek pozitif yüklü kalsiyum katyonları (Ca^{++}) ile yer değiştirir. Bu durum, net negatif yükü azaltır ve bu da difüze çift tabakanın dağılmasına ve suyun daha az çekilmesine neden olur (Nicholson, 2014). Kirecin, orta derecede ince ve ince daneli zeminlerle başarılı bir şekilde reaksiyona girerek, sodyum (Na^+) ve hidrojen (H^+) iyonları ile kalsiyum (Ca^{2+}) iyonlarının suyla etkileşime girmesi sonucu zeminlerde genleşme meydana gelir. Bu süreç, zemin plastisitesini ve şişme potansiyelini azaltırken, işlenebilirlik ve mukavemet özelliklerinde ise artış sağlar. Çünkü kireç zeminle yaptığı reaksiyon sonunda zeminin I_p ve w_L değerini önemli ölçüde azaltır. Araştırmalar kirecin kil içeriği %7 kadar düşük olan zeminlerde ve plastisite indisleri 10'un altında olan zeminlerde etkili bir stabilizatör olabileceğini kanıtlamıştır. (Thompson ve Robnett, 1970). AASHTO sınıflandırmasına göre, A-4, A-5, A-6, A-7 zemin tipleri ve A-2-6 ve A-2-7'nin bazıları kireçle stabilizasyon için uygundur (Terrel vd., 1979).

Kil mineralleri içeren birçok zemin, %3-8 oranında sönmüş kireç eklenmesiyle hidratlı silis içeren kil mineralleri ve diğer ince daneli malzemeler, kireçle girdiği reaksiyon sonucu kristal yapılarındaki silis bileşenlerini serbest bıraktırmaya başlayarak sert ve suda çözünmeyen bir kalsiyum silikat jeli oluşturur. Oluşan silikat jeli, kil tabakalarını çevreleyerek zemin boşluklarını doldurur ve zamanla kristalleşerek tobermoit ve hillebrandit olarak adlandırılan hidratlı silise dönüşür. Oluşan reaksiyon zemin dayanımının artmasına ve uzun vadeli stabiliteye katkı sağlar. Bu sırada ortamda su azalırsa süreç önlenecektir (Tumluer, 2006). Uzun vadeli tepkimeler arasında puzolanik reaksiyonlar veya çimentolama (Şekil 31) yer almaktadır.

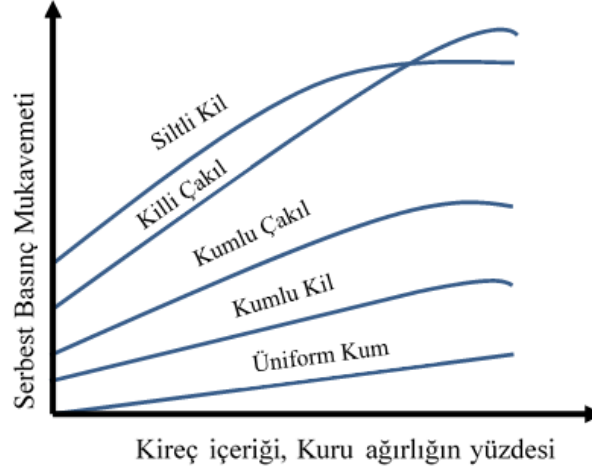


Şekil 31. Pozzolanik reaksiyonlar sonucu oluşan karmaşık zemin-kireç çimentolamasının şematik gösterimi (Nicholson, 2014)

Bu süreç, uygun miktarda silika veya alümina içeren kil mineralleri (veya eklenen pozzolanik malzeme, örneğin uçucu kül) ya da Portland çimentosunda zaten bulunan ince malzemenin, kalsiyum ve su ile reaksiyona girerek çözünmeyen kalsiyum silikat hidratları (CSH) (veya kalsiyum alüminat hidratları, CAH, CASH) üretmesidir. Ayrıca eklenen kireç, nem ve karbondioksit ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonat oluşturabilir.

Oluşan çimentolama ürünleri kalıcı olup, geri dönüşümsüz reaksiyonlarla günler, aylar veya yıllar boyunca devam edebilir. Stabilize edilmiş zeminin dayanım artışı (genellikle 28 gün veya daha uzun kürleme sonrası ölçülen) ve tekrar yüklenme, donma-çözülme döngüleri ile uzun süreli suya maruz kalmaya karşı dayanıklılığı, kürleme sırasında zemin sıcaklığı, karıştırma uniformitesi, karıştırma ve sıkıştırma arasındaki gecikme süresi, sıkıştırma koşullarının (nem ve yoğunluk) uygunluğu ve kürleme boyunca yeterli nemin sağlanması gibi faktörlerden etkilenir. Kireç stabilizasyonunda genellikle hidrate kireç, diğer adıyla sönmüş kireç (Ca(OH)_2 veya kalsiyum hidroksit) tercih edilmektedir. Bunun temel nedeni, sönmüş kirecin uygulamada daha güvenli ve kullanışlı olmasıdır. Öte yandan, sönmemiş kireç (CaO) yakıcı ve tehlikeli özelliklere sahip olduğu için stabilizasyon işlemlerinde genellikle kullanılmamaktadır. Organik madde oranı yüksek veya kil içermeyen zeminler üzerinde kireç stabilizasyonu genellikle etkisiz bir yöntemdir. Ancak, killi zeminlerde kireç stabilizasyonu son derece etkili sonuçlar verebilmektedir. Bu tür zeminlerde, çimento stabilizasyonuna kıyasla kireç kullanımıyla daha yüksek dayanım değerleri elde etmek mümkündür. Bunun yanı sıra, killi zeminlerde su içeriğinin sürekli değişim göstermesi

durumunda, kireç stabilizasyonu uygulanarak zeminin hacimsel değişimleri kontrol altına alınabilir ve daha kararlı bir yapı sağlanabilir. Şekil 32’de, farklı zemin türlerinde kullanılan kireç miktarının serbest basınç mukavemeti üzerindeki etkisi açık bir şekilde gösterilmiştir (Tunç, 2002).



Şekil 32. Kireç içeriğinin çeşitli zeminlerdeki etkisi (Tunç, 2002)

Kireçle stabilize edilmiş zeminlerin en önemli özelliklerinden biri otojen onarım mekanizmasıdır. Otojen onarım, bir malzemenin veya yapının kendi kendini onarma yeteneğini ifade eder. Bu süreç, dışarıdan herhangi bir müdahale veya ek malzeme eklenmeden, hasar gören bölgelerin doğal yollarla iyileşmesi anlamına gelir. Otojen onarım, genellikle canlı organizmaların iyileşme süreçlerine benzer şekilde, bazı malzemelerde doğal olarak gerçekleşebilen bir özelliktir. Özellikle inşaat ve mühendislik alanında, otojen onarım, beton veya diğer yapısal malzemelerin mikro çatlaklarını kendi kendine iyileştirme yeteneğiyle ilgilidir. Bu özellik, malzemenin dayanıklılığını artırır ve bakım maliyetlerini azaltabilir (Tumluer, 2006).

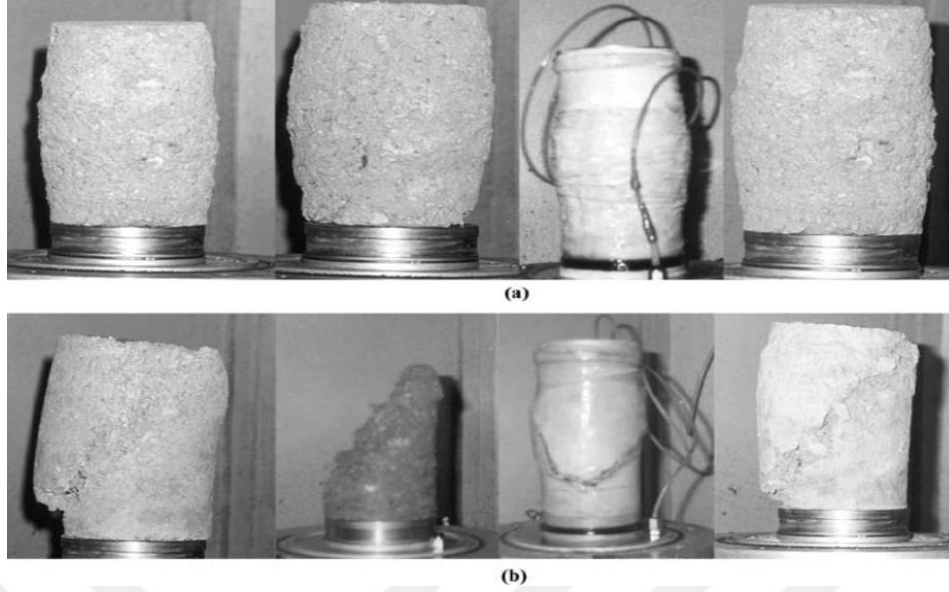
1.8.2. Çimento ile Stabilizasyon

Çimento; ana bileşenleri kalker, kil ve alçıtaşı olan hidrolik bir bağlayıcı malzemedir. Çimentonun yapıştırma özelliğini yerine getirebilmesi için suya ihtiyaç duyulur; su ile reaksiyona girerek sertleşir. Çimento üretimi için; kırılmış kalker, kil ve gerekirse demir cevheri ve/veya kum, öğütülüp toz haline getirilir. Bu karışım, 1400-1500°C sıcaklıkta döner fırınlarda pişirilir ve elde edilen ürün "klinker" olarak adlandırılır. Ardından, klinkere belirli

bir oranda (%4-5) alçıtaşı eklenir ve bu karışım çok ince toz haline öğütülerek Portland Çimentosu elde edilir. Zemin iyileştirmede çimentonun kullanımı, 1920’de Amerika eyalet karayolu uygulamalarında rastlansa da endüstrinin gelişmesine bağlı olarak Türkiye’de de kullanılan bir metot haline gelmiştir. Çimento stabilizasyonu yüksek organik zeminler dışında, değişik zeminlerin özelliklerini iyileştirmek üzere kullanılır. Çimentonun eklenmesiyle kumların ve çakılların permeabiliteleri büyük ölçüde azalırken, siltlerde, siltli killerde ve killerde permeabilite artış gösterir (Ayan, 2009).

Çimento stabilizasyonu, boşluk hacmini etkili bir şekilde dolduracak ve iri agrega parçacıklarının yüzmesini destekleyecek yeterli miktarda ince malzemeye sahip, iyi derecelenmiş agregalar için ideal bir yöntemdir. Stabilizasyon için genel yönergeler, kumlu malzemelerde plastisite indisinin (I_p) 30'dan az olması gerektiğini belirtmektedir. 75 μ m elek üzerinde ağırlıkça %50'den fazlası geçen ince daneli zeminler için önerilen kıvam parametreleri ise plastisite indisinin 20'den az ve likit limitinin (w_L) 40'tan düşük olmasıdır; bu koşullar uygun bir karışımın sağlanması için gereklidir (TM, 1994). Kohezyonlu zeminlerde çimento kullanımı, yüksek dozaj gereksinimleri ve inşaat (karıştırma) zorlukları nedeniyle, özellikle zemin ıslaksa ve aşırı büzülme özellikleri endişe konusuysa, nispeten etkisiz veya ekonomik açıdan verimsiz olabilir. İdeal çimento stabilizasyonu, küçük miktarda silt veya kil içeren, iyi derecelenmiş granüler zeminlere, özellikle çakıllı zeminlere ve kumlara en uygun şekilde uygulanabilir (Nicholson, 2014).

Çimento, içinde bulunan silika sayesinde stabilizasyon için gerekli puzolanik maddeyi sağlar. Bu özellik, içinde kil mineralleri bulunmayan zeminlerde bile etkili olmasına imkan tanır. Beton üretiminde olduğu gibi, çimento da zemin daneleri arasında bağlayıcı bir rol üstlenir. Betonla arasındaki en önemli fark, çok düşük çimento oranları kullanılmasıdır. Zemin-çimento karışımı, düşük mukavemetli bir beton gibi düşünülebilir. Zeminin mukavemetindeki artış çimento oranına bağlı olup, zamanla mukavemet artışı ilişkisi betonla benzerlik gösterir (Özaydın, 2000). Şekil 33’te optimum su muhtevasında hazırlanan numunelerin çimento ile stabilizasyonu sonucu 28 günlük kür sonucu kırılma biçimlerindeki farklılıkları göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere çimentosuz zemin numunesinde plastik kırılma, çimentolu zeminde ise sert zeminlerde gözlenen diyagonal kırılma meydana gelmiştir.



Şekil 33. Serbest basınç deneyinden sonra numunelerin görünüşü (Haeri vd., 2005)

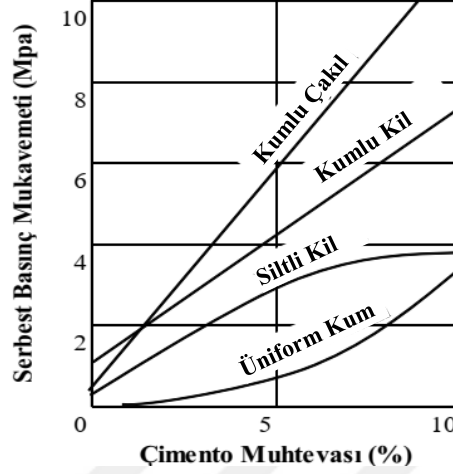
Çimento, 4 nolu eleğinde en fazla %45'i kalan çakıl zeminleri stabilize etmek için uygundur. Bu sisteme göre, AASHTO sınıflandırmalarına göre A-2 ve A-3 zeminler çimento ile stabilizasyon için idealdir; ancak çimento, A-4 ile A-7 arasındaki zeminleri stabilize etmek için de başarıyla kullanılabilir. Portland Çimento Birliği (PCA), çakıllardan killi zeminlere kadar geniş bir yelpazede zeminlerin stabilizasyonu için yönergeler belirlemiştir (Little ve Nair, 2009). Değişik zemin sınıflarına göre çimento miktarları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Değişik zemin sınıflarına göre çimento ihtiyacı (Tunç, 2002)

Birleştirilmiş Zemin Sınıfı	Tipik Çimento İçeriği (%Ağırlıkça)	Çimento İhtiyacı Sınırları	
		% Hacimce	%Ağırlıkça
GW,GP,GM,SW,SP,SM	5	5-7	3-5
GM,GP,SM,SP	6	7-9	5-8
GM,GC,SM,SC	7	7-10	5-9
SP	9	8-12	7-12
CL,ML	10	8-12	7-12
ML,MH,CH	10	8-12	8-13
CL,CH	12	10-14	9-15
MH,CH	13	10-14	10-16

Buradaki sonuçlara bakıldığında granüler zeminlerde kullanılması gereken çimento yüzdeleri ince daneli zeminlere oranla daha düşüktür. Aynı zamanda zemin cinsine göre serbest basınç mukavemeti-çimento içeriği arasındaki ilişki de Şekil 34'te görülmektedir.

Her iki durumdan da görüleceği gibi çimento stabilizasyonu granüler zeminlerde en iyi sonucu vermektedir.



Şekil 34. Çimento stabilizasyon mukavemeti ile çimento içeriği ilişkisi (Tunç, 2002)

1.8.3. Uçucu Kül ile Stabilizasyon

ASTM C 618-01 standardına göre, uçucu küller kimyasal bileşimlerine bağlı olarak C ve F sınıfı olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Ayrıca bu iki sınıfa uymayan, farklı özelliklere sahip üçüncü bir grup, sınıflandırılmayan uçucu kül olarak adlandırılmaktadır. F sınıfı uçucu kül, bitümlü kömürün yanması sonucu oluşur ve düşük miktarda kireç (CaO) içermesiyle karakterizedir. Bu sınıf uçucu küllerin silis ve alümina içeriği yüksektir, ancak çimentolaşma potansiyeli sınırlıdır. Normal sıcaklık koşullarında nemin etkisiyle ve ortamda bulunan kireçle reaksiyona girdiğinde çimentolaşma meydana gelir. Bu nedenle F sınıfı uçucu kül stabilizasyon amacıyla kullanıldığında dışarıdan bir bağlayıcı maddeye ihtiyaç duyabilir.

C sınıfı uçucu kül ise genellikle linyit veya alt kalite kömürlerin yanmasıyla elde edilir ve daha yüksek oranda kireç (CaO) içerir. Bu özellik, C sınıfı uçucu külün çimentolaşma reaksiyonunu doğal ve hızlı bir şekilde başlatmasını sağlar. Yüksek kireç içeriği sayesinde, herhangi bir dış bağlayıcıya gerek kalmadan zemin stabilizasyonunda etkili bir rol oynar. Buna karşılık F sınıfı uçucu külün daha düşük kireç içeriği, çimentolaşma sürecinin başlaması için ortama dışarıdan kireç eklenmesini zorunlu kılar. Bu farklılıklar, C ve F sınıfı uçucu küllerin kullanım alanlarını belirlerken, her birinin zemin stabilizasyonu ve çimentolaşma süreçlerindeki rolünü açıkça ortaya koyar (Şenol vd., 2004). Literatürde,

zemin stabilizasyonunda uçucu külün kullanımına ilişkin seçim parametreleri net bir şekilde tanımlanmamıştır. Yoğunluğu optimize etmek amacıyla iri daneli zeminlere uygun miktarda uçucu kül eklenerek boşluklar doldurulduktan sonra, karışımdaki puzolanik reaksiyonu artırmak için genellikle bir aktivatör kullanılması gerekmektedir. Aktivasyon için kullanılan malzeme oranı, genellikle boşluk doldurucu olarak kullanılan uçucu kül miktarının %20 ile %30'u arasında değişmektedir. Bu aktivatörler çoğunlukla kireç veya Portland çimentosu olmakla birlikte, kireç fırını tozu ya da çimento fırını tozu gibi alternatif malzemeler de kullanılabilir (Little ve Nair, 2009; Nicholson, 2014).

Bunun yanında, puzolanik olarak reaktif olmayan bir kil zemini ele alacak olursak, bu zeminlerin kireç ile stabilizasyonunda uçucu külün eklenmesi, karışımdaki mukavemeti önemli ölçüde artırabilmektedir (Çokça ve Toktaş, 2002; Dermatas ve Meng, 2003; Kalinski ve Hippley, 2005). Bu durum, uçucu külün sağladığı reaktif puzolanlar sayesinde mümkün olmaktadır. İnce daneli zeminlerde, uçucu kül genellikle kireç veya çimento ile birlikte kullanılarak zeminin reaktivitesini artırmakta ve bu sayede stabilizasyon sürecine olumlu katkı sağlamaktadır (Little ve Nair, 2009).

1.8.4. Bitüm ile Stabilizasyon

Bitüm, asfalt çimentosu, cutback bitüm, katran ve emülsiyon bitüm gibi farklı formlarda zemin stabilizasyonunda kullanılabilir. Stabilizasyon için seçilecek bitümün türü ve sınıfı, stabilize edilecek zeminin özelliklerine, uygulama yöntemine ve çevresel koşullara bağlı olarak belirlenir. Zemin stabilizasyonunu etkileyen başlıca faktörler arasında nem oranı, asfaltın viskozitesi, kullanılan asfalt miktarı, karışımın homojenliği, havalandırma, sıkıştırma ve kürlenme süreçleri yer almaktadır. Bitüm, zemin parçacıkları arasında bağlayıcı bir özellik sağlayarak zemini suya daha dayanıklı hale getirir. Ayrıca, suyun zemin partiküllerine ya da zeminin yığınlarına nüfuz etmesini engelleyerek, toprağın dayanıklılığını ve çevresel etkilere karşı direnç kapasitesini önemli ölçüde artırır (Patel, 2019).

Kireç ve çimento stabilizasyonu, puzolanik reaksiyonlar sonucu zeminin mukavemetini artırırken, asfalt stabilizasyonu, zeminin suyun zararlı etkilerinden korunması ve daneleri kimyasal olarak değil fiziksel olarak birleştirici bir rol üstlenmesiyle ön plana çıkmaktadır (Nicholson, 2014). Asfalt, zemin yüzeyini kaplayarak ince daneli zeminlerin sudan etkilenecek yumuşamasını önlerken, iri danelerden oluşan zeminlerde kohezyon

oluşumuna katkı sağlamaktadır. Ayrıca, asfaltın danelerin birbirine yapışmasını sağlayıcı etkisi, zeminin su ve rüzgâr erozyonuna karşı direncini artırmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle, asfalt stabilizasyonunun en yaygın kullanım alanının karayolları olduğu bilinmektedir (Özaydın, 2000; Uzuner, 1995). Orta Doğu ve Amerika'nın Orta Batı eyaletleri gibi bazı bölgelerde, silt ve siltli kil, kil içeren zeminlerin su içerikleri, sıcak mevsimlerde düşüş göstermekte olup, bu tür zeminler, kaplamasız olarak trafik yüklerini taşıma kapasitesine sahip değildir. Bu tür yol güzergahlarında, zeminlerin tozlanmasını önlemek ve yağmurlu mevsimlerde yumuşama riskiyle karşılaşmalarını sağlamak amacıyla, ucuz yağlar veya 25°C'de 3-5 saniye arasında viskoziteye sahip orta kürlü katbek bitümü püskürtülmektedir. Bitümlü madde, zemine 2-4 yayılım halinde ve 5,40 litre/m² oranında tatbik edilerek, 1,25-2,50 cm derinliğe nüfuz etmektedir (Ayan, 2009).

İnce daneli zeminlerde geçirimsizlik sağlamak amacıyla genellikle %4 ila %7 oranında asfalt katkısı yeterli olmaktadır. Bununla birlikte, istenen performansın sağlanabilmesi için No. 200 eleğinden geçen malzeme oranının %12 ile %18 arasında olması ve plastisite indisinin (I_p) 10'un altında olması gereklidir. Kumlu zeminlerde %2 ila %4 oranında asfalt katkısı yeterli kabul edilmekle birlikte, kumun tek boyutlu bir dane dağılımına sahip olması durumunda istenen sonuçlar elde edilememektedir. Bitümle yapılan stabilizasyon uygulamalarında en iyi sonuçlar, derecelenmiş granüler zeminlerde görülmekte olup, %1 ila %3 oranındaki asfalt katkısıyla geçirimsiz ve dayanıklı zeminler elde edilebilmektedir (Tumluer, 2006). Bitüm içeriğinin artırılması zeminin geçirimsizlik özelliğini iyileştirse de, fazla miktarda bitüm kullanımı, uygulama sırasında işlenebilirlik ve sıkışma sorunlarına neden olarak stabilizasyon sürecinin başarısızlıkla sonuçlanmasına yol açabilmektedir.

1.8.5. Yüksek Fırın Cürufu ile Stabilizasyon

Kireç ve çimento yüksek fırın cüruflarının bağlayıcı özelliklerinin keşfedilmesi, bu malzemenin inşaat sektörü için önemli bir hammadde haline gelmesini sağlamıştır. 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren, yüksek fırın cürufu içeren bağlayıcıların ticari üretimine başlanmış ve bu yenilik, çimento endüstrisinin gelişiminde dönüm noktalarından biri olmuştur. Yüksek fırın cürufları, ilk kez 1883 yılında Portland çimentosunun hammaddesi olarak kullanılmış, 1892 yılında ise mineral katkı maddesi olarak değerlendirilmeye başlanmıştır. Bu dönemden itibaren yüksek fırın cürufu, hem çevresel sürdürülebilirliği

artırmak hem de ekonomik fayda sağlamak amacıyla çimento üretiminde önemli bir bileşen haline gelmiştir.

Günümüzde yüksek fırın cürufu içeren çimentolar, birçok ülke tarafından farklı isimler ve standartlarla üretilmekte ve yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu tür çimentolar özellikle dayanıklılık, çevresel etkilerin azaltılması ve enerji tasarrufu sağlamaları nedeniyle tercih edilmektedir. Yüksek fırın cüruflarının kullanımı, çimento üretiminde karbondioksit salınımını azaltarak çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkılar sunmakta ve aynı zamanda atık malzemelerin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Tokyay, 2003). Cüruflar, metalurji tesislerinden elde edilen atık malzemeler olup, kimyasal bileşimleri ve özellikleri üretildikleri tesisin ana ürün tipine ve kullanılan üretim yöntemine göre büyük farklılıklar göstermektedir. Örneğin, yüksek fırın cürufları bağlayıcı özelliklere sahipken, nikel ve bakır cürufları yalnızca puzolanik özellikler göstermektedir. Bu atıklar arasında en yaygın ve en önemli olanı yüksek fırın cüruflarıdır (YFC). Ham demir üretimi sırasında yüksek fırınlarda oluşan YFC, daha hafif olması nedeniyle erimiş demirin üzerinde birikir. YFC, demir filizi gangi, kok ve kireçtaşı gibi malzemelerin yanma sonucu ortaya çıkan atıklarından meydana gelir. Oluşum sıcaklığı ise genellikle 1400-1600°C arasında değişmektedir.

1.8.6. Mermer Tozu ile Stabilizasyon

Mermer tozu atığı, doğal taş endüstrisinde mermer bloklarının işlenmesi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür. Mermer endüstrisi, hammadde işleme süreçleri sırasında çeşitli fiziksel ve kimyasal işlemleri içerir ve bu işlemler sonucu hem katı hem de sıvı atıklar oluşur. Mermer tozunun oluşumuna imkân veren bu işlemler mermerin ocaktan çıkmasıyla başlar, blok kesimi, parlatma, cilalama ve şekillendirmeye devam eder. Ayrıca bu işlemler sırasında su kullanıldığından çıkan tozların önemli bir bölümü su ile birleşerek atık çamur oluşturur. Çökelme havuzlarındaki bu çamur kurutularak içerisindeki mermer tozları ayrıştırılır. Yüksek miktarlarda açığa çıkan bu toz atıkları uygun bertaraf yöntemleri kullanılmadığında, önemli çevresel sorunlara yol açabilir. Bu atıklar, su kaynaklarının kirlenmesine, tarım arazilerinin verimliliğinin düşmesine ve zemin yapısının bozulmasına neden olabilir. Neyse ki son yıllardaki çalışmalara baktığımızda mermer tozu, çimento üretimi, dolgu malzemesi, zemin stabilizasyonu gibi çeşitli alanlarda geri dönüşümle değerlendirilmektedir. Mermer tozunun zemin stabilizasyonunda kullanımı ile alakalı çalışmalar yakın zamanda başlanmıştır. Literatür incelendiğinde özellikle kil zeminlerin

stabilizasyonunda kullanıldığı ve başarılı sonuçlar elde edildiği görülmektedir (Solanki ve Sharma, 2020; Sivrikaya vd., 2020; Jain vd., 2020; Eltwati vd., 2020; Abdelkader vd., 2021; Alam vd., 2021; Mahdi ve Nalbantoglu, 2021; Hamdy, 2022). Çalışmalarda farklı bölgelerden alınan kil numunelerine %1 den %50 oranlarına kadar mermer tozu ilave edilmiş ve birçok deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler arasında şişme, kıvam, kompaksiyon, CBR, kesme kutusu, tek eksenli basınç ve geçirgenlik deneyleri yer almaktadır. Genel olarak elde edilen verilerden çıkarılan sonuç mermer tozu ilavesinin mühendislik parametrelerini iyileştirdiği yönündedir.

1.9. İçme Suyu Arıtma Tesisi Atık Çamuru Üzerine Yapılan Çalışmalar

Literatür taraması kapsamında çalışmaların bir kısmında, içme suyu arıtma çamurunun farklı malzemelerin mukavemet özelliklerini iyileştirici malzeme olarak, farklı malzemelere ilave çimento malzemesi olarak ve kirleticileri gidermek için sorbent olarak kullanılmıştır. Ayrıca literatürde atık çamur malzemesinden Arsenik, Demir, Manganez, Zeolit, Alüminyum, Kurşun, Krom, Bakır, Organik madde, Kadmiyum, Selenyum ve bunların dışında “Diğer” olarak adlandırılan farklı malzemelerin giderilmesi, çamurun susuzlaştırılması, atık çamurun tarımda kullanım karakterizasyonunun araştırılması, çamurun canlılar üzerindeki etkilerinin araştırılması, atık çamurun koagülasyon ve adsorpsiyon proseslerinde yeniden kullanımı, içerisinde bulunan Fosfor’un geri kazanımı ve giderimi ve çamurunun yönetimi ve modellemesi ile geoteknik alanında kullanımı gibi alanlarda da çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmalar öncelikle sınıflandırıldığı başlık ve devamında yapılan çalışmaları içerecek şekilde aşağıda verilmiştir.

- Farklı malzemelerin mukavemet özelliklerini iyileştirici malzeme olarak kullanılması üzerine yapılan çalışmalar; beton karışımlarında ince agrega olarak kullanılmıştır (Alzoubi vd., 2021; Huang vd., 2013; Kaish vd., 2021; Gualdrón vd., 2019); tuğla üretiminde yardımcı malzeme olarak kullanılmıştır (Anderson vd., 2003; Huang vd., 2005; Rodrigues vd., 2015; Benlalla vd., 2015; Huang vd., 2001; Kizinievič vd., 2018; Torres vd., 2012a; Torres vd., 2012b; Rahman vd., 2021; Bakıroğlu, 2024); harcın performans analizinde ara malzeme olarak kullanımı araştırılmıştır (Al-Rawashdeh vd., 2022; Bohórquez; González vd., 2020; Haider vd., 2012; Liu vd., 2020b; Nowasell vd., 2015; Owaid vd., 2014); seramik malzeme olarak fayans imalatında kullanımı araştırılmıştır (Cremades vd., 2018; Kizinievič vd., 2013; Kizinievič vd., 2016; Kizinievič vd., 2017;

Sarabia vd., 2019; Teixeira vd., 2011; Vicenzi vd., 2005; Wolff vd., 2015; Çetin, 2023); çimento üretiminde tamamlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır (El-Didamony vd., 2014; Frias vd., 2014; Rodríguez vd., 2010; Rodríguez vd., 2011); su arıtma tesisi çamur külü ve öğütülmüş kireç taşının kullanımıyla Portland çimentosunun kısmi ikamesinin teknik ve ekonomik performansı değerlendirilmiştir (Hagemann vd., 2019); beton parke taşlarının mukavemet özelliklerini iyileştirici malzeme olarak kullanılmıştır (Liu vd., 2020a); alümina ve silika açısından zengin içme suyu arıtma tesisi çamuru kullanılarak düşük maliyetli seramik mikrofiltasyon membranlar geliştirilmesi ve atık su filtrasyonundaki etkinliklerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır (Mouratib vd., 2020); yol kaplamalarında çamurun faydalı kullanımı araştırılmıştır (Takao vd., 2024); kalsiyum karbür kalıntısıyla birlikte yapı malzemelerinde kullanımı araştırılmıştır (Tan vd., 2025; Wilson vd., 2017).

- Farklı malzemelere ilave çimento malzemesi olarak kullanımı üzerine yapılan çalışmalar; geri dönüşüme katkı sağlamak amacıyla, inşaat uygulamalarında ek çimentolu malzeme olarak filtre geri yıkama kalıntıları araştırılmıştır (Ahmad vd., 2018); su ve atıksu arıtımından kaynaklanan arıtma çamuru, çimento üretiminde hammadde olarak yeniden kullanılmıştır (Chen vd., 2010; Godoy vd., 2020; Husillos Rodriguez vd., 2011; Pan vd., 2004); mukavemet kaybını gidermek amacıyla öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBFS) ve DWTS içeriği içeren üçlü karışımlar geliştirilmiş, çimentonun %30'una kadar olan kısmının 1:1 kütle oranında DWTS ve GGBFS ile ikame edilerek çimento açığını ne ölçüde kapatabileceği araştırılmıştır (Duan vd., 2022); puzolanik malzeme olarak kullanımda aktivasyon sıcaklığının etkisi incelenmiştir (Frias vd., 2013; Gheller vd., 2022); beton blok üretiminde tamamlayıcı çimento malzemesi olarak potansiyel kullanımı değerlendirilmiştir (Liu vd., 2021); Değirmendere'den alınan yüzey suyunun arıtıldığı Trabzon İçmesuyu Arıtma Tesisi'nde (ATASU) oluşan ve tekrar dereye verilen alüm çamurunun, çimento ile karıştırılarak puzolanik malzeme olarak değerlendirilmesi araştırılmıştır (Üçüncü ve Gülay, 2003).

- Kirleticileri gidermek için sorbent olarak kullanımı üzerine yapılan çalışmalar; içme suyu arıtma artıklarının (Al-WTRs), sulu çözeltilerden cıvayı (Hg) etkin bir şekilde sorpsiyon ve immobilize etme potansiyeli değerlendirilmiş ve Al-WTR'lerin, Hg-immobilizasyonuna dayalı toprak iyileştirme tekniklerinde bir sorbent olarak kullanılabileceği anlaşılmıştır (Hovsepyan vd., 2009); alüminyum bazlı içme suyu arıtma kalıntılarının perklorat giderimi için yeni bir sorbent olarak kullanımı araştırılmıştır (Makris vd., 2006a); bir içme suyu atık yan ürününün arsenik için yeni bir sorbent olarak

değerlendirilmesi araştırılmıştır (Makris vd., 2006b); içme suyu arıtma çamuru kullanılarak ters ozmoz konsantresinden bor (III), bakır (II), krom (VI), kurşun (II) ve selenyumun (VI) sürekli akışlı sorpsiyon prosesleri ile bu süreci etkileyen faktörler araştırılmıştır (Lin vd., 2014); çoklu ağır metallerin su arıtma kalıntıları üzerine sorpsiyon kapasiteleri incelenmiştir (Chiang vd., 2012).

- İçme suyundan zararlı maddelerin giderilmesi üzerine yapılan çalışmalar; içme suyundan zararlı malzeme olarak arsenik etkisi araştırılmıştır (Bibi vd., 2015; Codling vd., 2007; Camacho vd., 2009; Elkhatib vd., 2015a; Kabir ve Chowdhury 2017; Kim vd., 2012; Laky ve Takó 2013; Makris vd., 2006b; Makris vd., 2008; Nagar vd., 2010; Ociński vd., 2016b; O'Connor vd., 2005; Pramanik vd., 2016; Radfard vd., 2019; Sarkar vd., 2007a; Sarkar vd., 2007b; Woolson, 1975; Yao vd., 2009; Özdemir, 2016; Alpaslan vd., 2010; Kavacık ve Dölgen, 2022), içme suyu kaynağından demir, manganez (Khadse vd., 2015; Dvorak vd., 2021), zeolit (Rozhkovskaya vd., 2021), alüminyum (Okuda vd., 2014), kurşun, krom (Zhou ve Haynes, 2011), bakır (Wu vd., 2004), kadmiyum (Siswoyo vd., 2014) ve selenyumun (Ippolito vd., 2009) uzaklaştırılması üzerine çalışmalar yapılmıştır, içme suyu arıtma kaynağından organik maddelerin uzaklaştırılması üzerine çalışmalar yapılmıştır (Andrade vd., 2024; Baghoth vd., 2011; Cerqueira vd., 2014; Fu vd., 2019; Hu vd., 2011; Kan vd., 2018; Koley vd., 2025; Matilainen vd., 2010; Plakas vd., 2016; Rosadi vd., 2020; Scalize vd., 2021; Öztürk vd., 2020), içme suyu arıtma tesisinden siyanobakterilerin (Camacho vd., 2017; Szlag vd., 2015; Benalia vd., 2018), azitromisin (Castro-Jiménez vd., 2025), florürün (Changmai vd., 2018), farmasötik olarak aktif bileşiklerin (PhACs) (Couto vd., 2019), mikrobiyal kontaminasyon ve partiküllerin (Guchi, 2015), mikrokirleticilerin (Manda vd., 2014), manyetik nanopartiküllerin (Simeonidis vd., 2015), yasadışı ilaçların (Szymonik vd., 2017), perflorooktanoik asit (PFOA) ve perflorooktanesülfonik asidin (PFOS) (Zhang vd., 2021), bor mineralinin (Ziyanak, 2016), çinkonun (Yıldız ve Karakuş, 2022) giderilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

- Çamurun susuzlaştırılması ve özelliklerinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalar; farklı şartlandırıcılar kullanılarak çamurun susuzlaştırılabilirliğinin artırılması araştırılmıştır (Ismaeel ve Tayeb, 2020); içme suyu arıtma çamurlarının susuzlaştırma performansı değerlendirilmiştir (Verrelli vd., 2010); içme suyu arıtımında üretilen çamurların susuzlaştırma özellikleri üzerine koagülasyon koşullarının etkisi araştırılmıştır (Verrelli vd., 2009); atık çamurun susuzlaştırılabilirliğini artırmak amacıyla şartlandırıcı olarak yeni bir içme suyu çamuru stratejisi geliştirilmiştir (Xiao vd., 2023); elektro-osmoz ile uyarılan

Fenton benzeri proses kullanılarak içme suyu arıtma çamurunun susuzlaştırılması incelenmiştir (Xu vd., 2016); Şanlıurfa İçme Suyu Arıtma Tesisi çamurunun fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri değerlendirilmiştir (Özbek, 2023).

- Atık çamurunun tarımda kullanım karakterizasyonunun araştırılması üzerine yapılan çalışmalar; alüminyum bazlı bir içme suyu arıtma kalıntısının toprak ıslahı üzerindeki reaktivitesi araştırılmıştır (Agyin-Birikorang ve O'Connor, 2009); tarımsal alanda içme suyu çamurlarının karakterizasyonu ve değerlendirilmesi yapılmıştır (Benlalla vd., 2015; Elliott ve Dempsey, 1991; Titshall ve Hughes, 2005); Oklahoma'daki Pb, Zn ve Cd ile kirlenmiş bahçe toprakları ve atık alanlarında, diamonyum fosfat gübresi (DAP), belediye biyokatı (BS), biyokatı kompostu ile Al ve Fe bazlı su arıtma atıkları gibi çeşitli toprak iyileştiricileri kullanılarak, vejetatif örtünün yeniden kazandırılması ve ağır metallerin yerinde bulunabilirliğinin azaltılabilirliği değerlendirilmiştir (Brown vd., 2007); şap çamurunun bitki büyümesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır (Bugbee ve Frink, 1985); Pennsylvania'daki farklı topraklarda uygulanan alternatif fosfor emici toprak değişikliklerinin çözünebilen fosforu azaltma etkinliği incelenmiştir (Callahan vd., 2002); atıkların araziye uygulanmasının bitki üretimi, toprak ve çevre kalitesi üzerindeki olumlu-olumsuz etkileri ve insan sağlığına yönelik olası tehlikeleri hakkında ayrıntılı bir inceleme yapılmıştır (Cameron vd., 1997); fosfat inaktif edici arıtma artıkları ile değiştirilmiş yüksek fosforlu topraklarda yetiştirilen buğdayın biyolojik verimi ve fosfor kullanılabilirliği üzerine çalışmalar yürütülmüştür (Codling vd., 2002); gelecekteki zorluklara karşı tarımsal uygulamalarda şap çamurunun yeniden kullanımı araştırılmıştır (Dassanayake vd., 2015); toprak ikamesi olarak kullanılmak üzere içme suyu arıtma kalıntılarının karakterizasyonu incelenmiştir (Dayton ve Basta, 2001); içme suyu arıtma çamurlarının tarım arazilerinden fosfor kaybını azaltmada etkili kullanımı araştırılmıştır (Dayton ve Basta, 2005); arıtma çamurunun siltli toprağın verimliliği üzerindeki etkisi, domates filizlerinin verimi ve element bileşiminin izlenmesiyle değerlendirilmiştir (Elliott ve Singer, 1988); içme suyu arıtma çamurunun, tavuk gübresi uygulanan arazilerden azot (N) ve fosfor (P) taşınımını azaltmadaki etkinliği araştırılmıştır (Gallimore vd., 1999); su arıtma çamurunun sorgum-sudan otunun büyümesi üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir (Heil ve Barbarick, 1989); vermikompost ve su arıtma kalıntılarının toprağın fiziksel özellikleri ve buğday verimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır (İbrahim vd., 2015); su arıtma artıklarıyla değiştirilmiş topraklar için fosfor uzaklaştırma yöntemleri değerlendirilmiştir (Ippolito ve Barbarick, 2006); su arıtma kalıntıları ve biyokatıların yarı kurak otlak toprak ve bitki örtüsü üzerindeki

uzun vadeli ortak etkileri araştırılmıştır (Ippolito vd., 2009a); tarımsal uygulamalarda şap çamurunda alüminyum yararlılığı incelenmiştir (Kluczka vd., 2017); alkali topraklarda bir değişiklik olarak içme suyu arıtma kalıntılarının mısırın büyümesi ve fosforun ekstrakte edilebilirliği üzerine etkileri araştırılmıştır (Mahdy vd., 2007; Mahdy vd., 2008); poliakrilamid türevi bir su arıtma kalıntısının dört zıt Güney Afrika toprağının hidrolik iletkenliği, su tutma ve buharlaşma üzerindeki etkileri ve arazi bertarafı üzerine çalışılmıştır (Moodley ve Hughes, 2006); Güneydoğu kıyı ovası topraklarının fosfor emme kapasitesinin su arıtma kalıntıları kullanılarak artırılması araştırılmıştır (Novak ve Watts, 2004); su arıtma çamuruyla iyileştirilmiş topraklarda Mn, Na, S ve C salınım dinamikleri incelenmiştir (Novak vd., 2007); Florida'da üretilen üç arıtma tesisi çamurunun Florida topraklarındaki çözünür P seviyelerini azaltma yetenekleri değerlendirilmiştir (O'Connor vd., 2002); tarımsal ve çevresel faydalar için su arıtma kalıntısının kontrollü uygulama oranı araştırılmıştır (Oladeji vd., 2007); su arıtma kalıntılarının Florida kumlarında biyolojik olarak kullanılabilir fosforu ne ölçüde uzaklaştırdığı araştırılmıştır (Oladeji vd., 2008); çamur özellikleri ve bertaraf maliyetlerindeki farklılıklar incelenmiştir (Owen, 2002); su arıtma kalıntısının fiziksel ve kimyasal özellikleri ile kırmızı biber yetiştiriciliğine etkileri değerlendirilmiştir (Park vd., 2010); biyokatıların karıştığı topraklardaki fosfor formları ve yüzey akışındaki kayıplar incelenmiştir (Penn ve Sims, 2002); yaprak döken bir orman toprağına çamur uygulamasının ardından metal sızıntısı değerlendirilmiştir (Roy ve Couillard, 1998); şap çamuru ilavesiyle toprak yapısının ve bitki büyümesinin iyileştirilmesi araştırılmıştır (Rengasamy vd., 1980); alüminyum içeren su arıtma kalıntısının Bahiagrass meralarına uygulanmasının toprak ve yem üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir (Silveira vd., 2013; Tisdale vd., 1985); kalsine edilmiş şap çamurunun karakterizasyonu ve puzolanik özellikleri araştırılmıştır (Tantawy, 2015); tarımda içme suyu arıtma tesisi çamurlarının yeniden kullanımı üzerine sorunlar, bakış açıları ve sınırlamalar değerlendirilmiştir (Verlicchi ve Masotti, 2000); hidrojen sülfürün, içme suyu arıtma atıkları katılmış göl sedimanlarındaki fosfor kararlılığı üzerine etkileri araştırılmıştır (Wang vd., 2013); Trabzon İçme Suyu Arıtma Tesisi'nde suyun arıtılma işlemi sonucunda atık olarak oluşan çamurun kimyasal yapısı araştırılarak, tarımsal açıdan mahsuru ve çevreye zararlı etkisinin olup olmadığı incelenmiştir (Gülay, 2002); atomik absorpsiyon yöntemleri kullanılarak çamurun kimyasal yapısı ve sera deneyleriyle tarımsal açıdan mahsurunun olup olmadığı değerlendirilmiştir (Arslan ve Atakol, 2005); içme suyu arıtma çamurunun *Stenotaphrum secundatum* ile kurulmuş çim alanlarında kullanılabilirliği araştırılmıştır (Amini vd., 2012);

Kocaeli İçme Suyu Tesisi arıtma çamurunun, kesme çiçek çeşitlerinden Arpa Zambağı yetiştiriciliğinde kullanılabilirliği araştırılmıştır (Ünal vd., 2011); Muğla içme suyu arıtma çamurlarının, süs bitkileri sektöründe kesme gül yetiştiriciliğinde, bahçe toprağına farklı oranlarda ilavesiyle kullanılması ve bu uygulamaların bitki büyümesi, gelişmesi ve kalite kriterleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir (Akat vd., 2017); Ankara İvedik İçme Suyu Arıtma Tesisi'nde arıtma işlemi sonucu elde edilen jelimsi çamurun kimyasal yapısı hem klasik hem de atomik absorpsiyon yöntemleriyle incelenmiş ve sera deneyleriyle tarımsal kullanımı değerlendirilmiştir (Uçar, 1997).

- Çamurun canlılar üzerindeki etkilerinin araştırılması üzerine yapılan çalışmalar; toprak ıslahı amacıyla alüminyum bazlı içme suyu arıtma kalıntısının reaktivitesi üzerindeki yaşlanma etkileri araştırılmıştır (Agyin-Birikorang ve O'Connor, 2009); fosfat giderici substrat olarak alüminyum bazlı içme suyu arıtma çamuru kullanan inşa edilmiş sulak alanlarda alüminyum salınımının endişe düzeyi değerlendirilmiştir (Babatunde vd., 2011); alüminyumun Alzheimer hastalığında birincil etiyolojik faktör olup olmadığı araştırılmıştır (Exley, 2015; Mirza vd., 2017; Tomljenovic, 2011); meralara su arıtımından arta kalan uygulamalardan kaynaklanan alüminyumun, otlayan sığırların mineral durumu ve yemlerin mineral konsantrasyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir (Madison vd., 2009; Oladeji vd., 2009); içme suyu arıtımının bir yan ürünü olan şap çamuru ve doğal zeolitlerin piliç altlığı bileşenleri olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır (Maurice vd., 1998); alüminyum toksisitesi ve kurutulmuş şap kalıntısının yüzey sularına atılmasının ekolojik riskleri değerlendirilmiştir (Mortula vd., 2009); ham su, arıtılmış su ve musluk suyundaki mikroplastiklerin küresel varlığına ilişkin mevcut bilgiler sistematik olarak incelenmiş ve mikroplastiklerin insan sağlığına yönelik tehdidi konusunda yeni bir bakış açısı geliştirilmiş, izleme stratejileri formüle edilmeye çalışılmıştır (Shen vd., 2020); şap çamurunun fizikokimyasal özellikleri ve *Daphnia similis* üzerindeki toksisitesi analiz edilerek, düşük doğurganlık ve bir miktar ölüm oranı ile kronik toksisiteye neden olup olmadığı araştırılmıştır (Sotero-Santos vd., 2005); alüminyum içeren su arıtma kalıntısının besi kuzularının performansı ve mineral durumu üzerindeki etkileri incelenmiştir (Van Alstyne vd., 2007).

- Atık çamurun koagülasyon ve adsorpsiyon proseslerinde yeniden kullanımı üzerine yapılan çalışmalar; içme suyu arıtma çamurunun ağır metallerin giderimi için etkili bir adsorban olarak kullanımı araştırılmıştır (Abo-El-Enein vd., 2017); karbon-gümüş elektrotlarla elektroliz kullanılarak Surabaya su arıtma çamurundan alüminyum sülfatın geri kazanımı araştırılmıştır (Barakwan vd., 2019); içme suyu arıtma artıklarının koagülasyon ve

adsorpsiyon proseslerinde kapsamlı bir şekilde yeniden kullanımı incelenmiştir (Jung vd., 2016; Katrivesis vd., 2019); su arıtma artıklarından koagülantın geri kazanımı konusunda uygulanabilir teknolojiler gözden geçirilmiştir (Keeley vd., 2014; Keeley vd., 2016; Nayeri ve Mousavi, 2022); içme suyu arıtma çamuru kullanılarak adsorpsiyon yoluyla sulu ortamda tekstil boyalarının giderimi üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yapılmıştır (Laib vd., 2022); afet koşullarında yüksek bulanıklıktaki suyun koagülasyon-flokülasyon prosesi ile arıtılmasına yönelik modelleme ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Nayeri ve Mousavi, 2020); koagülasyon-flokülasyon prosesi kullanılarak florürün sudan uzaklaştırılması karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Ozairi vd., 2020); su ve atık su arıtımında organik koagülantların uygulanması üzerine çalışmalar yapılmıştır (Tetteh ve Rathilal, 2019).

- İçerisinde bulunan Fosfor'un geri kazanımı ve giderimi ve çamurunun yönetimi ve modellemesi üzerinde yapılan çalışmalar; atık çamur ile hareketsiz hale getirilen fosforun kararlılığı, yapay yaşlanma (yüksek sıcaklıkta 4,5 yıl inkübasyon ve 2 yıl kurutma-nemlendirme döngüleri ile) ve pH (4-7 aralığında) etkileri incelenerek değerlendirilmiştir (Agyin-Birikorang ve O'Connor, 2007); susuzlaştırılmış su arıtma çamurları ile fosfor gideriminin özellikleri ve geri kazanımı araştırılmıştır (Al Tahmazi, 2017); içme suyu arıtma artıklarının, kanalizasyon tersiyer arıtımı için inşa edilmiş sulak alanlarda bir substrat olarak yeniden kullanımı araştırılmıştır (Bai vd., 2014); tasarlanmış sulak alanlarda potansiyel fosfor giderimi için alüminyum bazlı su arıtma kalıntısının karakterizasyonu araştırılmıştır (Babatunde vd., 2009); atık sudan fosforun gelişmiş giderimi için şap çamuru bazlı inşa edilmiş sulak alan sisteminin konsept, tasarım ve performans analizi araştırılmıştır (Babatunde vd., 2010); geleneksel ve ileri içme suyu arıtma tesislerinde organofosfat esterlerinin mevsimsel oluşumu ve giderimi araştırılmıştır (Choo ve Oh, 2020); içme suyu arıtma artıklarının fosfor risk endeksi skorlarını azaltmak için potansiyel bir yönetim uygulaması olarak kullanılması araştırılmıştır (Dayton ve Basta, 2005); biyokatırlarla değiştirilmiş kumlu topraklardan fosfor sızıntısının değerlendirmesi yapılmıştır (Elliott vd., 2002a); toz şap çamurunun farklı fosfor türlerini adsorplama kapasitesi yanıt yüzeyi optimizasyonu ile belirlenerek en etkili adsorpsiyon koşulları araştırılmıştır (Fu vd., 2008); inşa edilmiş sulak alanlarda hızlı fosfor giderimi için içme suyu arıtma çamuru (DWTS)/bentonit/zeolit/uçucu külden hazırlanan düşük maliyetli yeni bir substratın değerlendirilmesi yapılmıştır (Gao vd., 2020); atık şap çamuru kullanılarak sentetik ve kentsel atık sulardan fosfat giderimi araştırılmıştır (Georgantas ve Grigoropoulou, 2005);

Hou vd., 2018; Huang ve Chiswell, 2000; Zumpe ve Baskaran, 2002); çözelti P konsantrasyonu ve su basmış topraklarda pirincin büyüme durumu araştırılmıştır (Hossner vd., 1973); fotovoltaiik elektrolizle desteklenen biyokömürle inşa edilmiş sulak alanların azot ve fosfor giderimlerini iyileştirme potansiyeli araştırılmıştır (Gao vd., 2019); bir su arıtma kalıntısının fosfor tutma mekanizmaları araştırılmıştır (Ippolito vd., 2003); içme suyundan florürü uzaklaştırmak için manyetik bir kompozit malzemenin (ALCS-Fe-Al) sentezi için içme suyu arıtma çamurundan demir ve alüminyumun geri dönüşümü araştırılmıştır (Jing vd., 2020); su tesisi şap çamurunun sulu çözeltideki fosforu giderme kapasitesi araştırılmıştır (Kim vd., 2003); arıtma çamuru kaynaklı fosfor emici malzemelerin etkinliği ve fizikokimyasal özellikleri değerlendirilmiştir (Leader vd., 2008); fosfor giderimi için uygulanabilir ortam olarak içme suyu arıtma kalıntılarının granülasyonu değerlendirilmiştir (Li vd., 2018); içme suyu arıtma kalıntılarının mikro gözeneklerinde fosforun immobilizasyonu ve bu mekanizmanın uzun vadeli stabilitesi incelenmiştir (Makris vd., 2004; Makris vd., 2005); kentsel atık sularda fosfor giderimi için şap çamurunun adsorban olarak kullanılması araştırılmıştır (Muisa vd., 2020); kentsel atık suları arıtan reaktörün son arıtımı için su arıtma çamurunun koagülant olarak yeniden kullanımı araştırılmıştır (Nair ve Ahammed, 2015; Yang vd., 2014); Güneydoğu kıyı ovası topraklarının fosfor emme kapasitesinin su arıtma artıkları kullanılarak artırılması incelenmiştir (Novak ve Watts, 2004); Brachiaria bazlı inşa edilmiş sulak alanda fosfor ve azotun atık sudan uzaklaştırılması araştırılmıştır (Nandakumar vd., 2019); su arıtma kalıntılarının fosfor tutma özelliğinin karakterize edilmesi incelenmiştir (O'Connor vd., 2002); aerobik ve anaerobik koşulların su arıtma kalıntılarının fosfor sorpsiyonu ve tutma kapasitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir (Oliver vd., 2011); koagülasyonda farklı fosfor türlerinin kimyasal davranışı araştırılmıştır (Park vd., 2016); kentsel ve endüstriyel atıklar kullanarak topraktaki aşırı biyolojik olarak kullanılabilir fosforun azaltılması araştırılmıştır (Peters ve Basta, 1996; Razali vd., 2007); içme suyu arıtma artıkları ile zenginleştirilmiş tampon şeritler kullanarak biyokatı atık fosforunun yönetilmesi araştırılmıştır (Wagner vd., 2008); susuzlaştırılmış ferrik-alum kalıntıları üzerinde fosfat adsorpsiyonunun özellikleri ve kinetiği incelenmiştir (Wang vd., 2011); fosfor giderimi için granüler şap çamuru adsorbentinin hazırlanması üzerine araştırma yapılmıştır (Wu vd., 2019); içme suyu hazırlanmasından kaynaklanan atık kalıntılarının mikrobiyal kalitesi incelenmiştir (Wurzer vd., 1995); atık çamurdan elde edilen alüminyum kaynağı kullanılarak kalsine edilmiş kalsiyum-alüminyum katmanlı çift hidroksit (Ca-Al LDH) sentezlenmiş ve bu malzemenin

sudaki fosfatı etkin bir şekilde uzaklaştırması incelenmiştir (Xie vd., 2024); susuzlaştırılmış şap çamurunda fosfat adsorpsiyonunun özellikleri ve mekanizmaları araştırılmıştır (Yang vd., 2006; Yang vd., 2006a; Yang vd., 2006b); susuzlaştırılmış şap çamurunun tarımsal atık su alan arıtma sazlık yatağında ana substrat olarak uzun vadeli kullanımı denenmiştir (Zhao vd., 2009); inşa edilmiş sulak alanlardan fosforu uzaklaştırmak için içme suyu arıtma çamuru (DWTS) ve zeolitin fizibilitesi ile stabilitesi üzerine çalışmalar yapılmıştır (Zhao vd. ve Wang, 2022); atrazinin bozunması için içme suyu arıtma kalıntıları kullanılarak peroksimonosülfatın aktivasyonu incelenmiştir (Zhang vd., 2018).

- Geoteknik alanında değerlendirilmesi üzerine yapılan çalışmalar; şişen zeminlerin Trabzon içme suyu arıtma tesisi atık çamuru ile stabilizasyonu incelenmiş ve optimum iyileşme %10 katkı oranında sağlanmıştır (Çiftçi, 2003); Trabzon İçme Suyu Arıtma Tesisi Atık Çamuru kullanılarak düşük plastisiteli killerin stabilize edilmesi üzerinde çalışılmış ve % 10-25 katkı oram aralığında serbest basıncı dayanımında % 50 - 80 lere varan artışlar gözlenmiştir (Bayraktar, 2003); içme suyu arıtma çamuru zemin içerisine katılarak Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) değerleri incelenmiştir (Güner ve Bağrıaçık, 2021); içme suyu arıtma çamurlarının genel özellikleri hakkında bilgi verilmiş ve geoteknik alanındaki faydalı kullanım alanları incelenmiştir (Balkaya, 2019); endüstriyel atık olan içme suyu arıtma tesisi çamurları ile uçucu kül malzemelerin kumlu zemin ortamında geçirimsizlik davranışları incelenmiştir (Bağrıaçık ve Güner, 2020); içme suyu arıtma çamurunun, zemin, kireç veya kaya tozu ile karıştırılarak geoteknik uygulamalarda kullanılmasının fizibilitesini üzerine çalışma yapmıştır (Bosco vd., 2021); su arıtma çamurunun geoteknik özellikleri değerlendirilerek jipsli zeminin iyileştirilmesinde kullanılıp kullanılamayacağı değerlendirilmiştir (Ali vd., 2024); çamurun özellikle katı atık depolama alanlarında (sanitary landfills) zemin iyileştirmesi için uygun olup olmadığını değerlendirilmiştir (Mazzutti vd., 2023); Kore'deki içme suyu ve atıksu arıtma tesislerinden alınan iki farklı çamurun, kireç (Ca(OH)_2), uçucu kül ve loess ile karıştırılarak çamurların mühendislik özellikleri ve inşaat malzemesi olarak kullanım potansiyelleri araştırılmıştır (Lim vd., 2002); içme suyu arıtma tesislerinden elde edilen çamurun, kumlu zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılabilirliği değerlendirilmiştir (Güner, 2022).

Yukarıda, içme suyu arıtma tesisi atık çamurlarının çeşitli kullanım alanları, hem yerel hem de uluslararası literatür titizlikle incelenerek on temel başlık altında sınıflandırılmıştır. Şekil 35'te bu onbir başlık ve her bir başlık altında gerçekleştirilen yaklaşık çalışma sayıları gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde, atık çamurların birçok farklı alanda değerlendirildiği

görülmekte; ancak geoteknik alanında kullanımına yönelik çalışmaların sınırlı olduğu ve bu alanda literatürde önemli bir boşluk bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu tez çalışmasında, Trabzon'un farklı bölgelerinde yer alan içme suyu arıtma tesislerinden temin edilen atık çamurların karakterizasyonları belirlenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, içme suyu arıtma çamurunun zemin stabilizasyonunda kullanımına yönelik kapsamlı bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Literatürde bu alandaki çalışmaların sınırlı olması nedeniyle, elde edilen bulguların alana önemli katkılar sunması beklenmektedir.



Şekil 35. İçme suyu arıtma çamuru atığı üzerine yapılan çalışmalar

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar Proje Kodu: FDK-2022-10047 ve Proje Türü: Lisansüstü Tez Projesi, Doktora (BAP06) kapsamında Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Deney programı kapsamında ilk olarak kil malzemelerinin ve atık çamur malzemelerinin fiziksel, mekanik, kimyasal ve minerolojik özellikleri belirlenmiştir. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmalar 4 etap şeklinde bölümlere ayrılmıştır. Bunlar;

- a) Birinci Etap Deneyler: Malzeme Deneyleri
- b) İkinci Etap Deneyler: Atık Oranları Etkisi Deneyleri
- c) Üçüncü Etap Deneyler: Kür Deneyleri
- d) Dördüncü Etap Deneyler: Donma- Çözülme Deneyleri

Etaplara geçmeden önce malzemelerin temini ve laboratuvarda gerçekleştirilen deneylerin standartları ele alınmış ve daha sonra etaplara geçilerek her bir etap ayrı ayrı başlıklar halinde incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar “Bulgular ve Tartışma” bölümünde verilmiştir.

2.1. Atık ve Kil Zemin Malzemelerinin Temini

Laboratuvarda yapılacak deneysel çalışmalar kapsamında malzemelerin temin edilmesi laboratuvar çalışmalarının ilk adımını oluşturmuştur. Deneysel çalışmalarda kil malzemesi olarak Bentonit; Çankırı Bentonit San. ve Tic. A.Ş. (Çambensan) işletmesinden, Kaolen ise Bursa Lazoğlu Maden Tic. İşletmesinden temin edilmiştir. Atık malzemesi olarak ise Trabzon ilindeki farklı noktalarda bulunan Akçaabat İçme Suyu Arıtma Tesisi, Derecik İçme Suyu Arıtma Tesisi ve Esiroğlu İçme Suyu Arıtma Tesisi’nden elde edilen arıtma çamur örnekleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılacak malzemeler Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarı’na (Şekil 36) getirilmiştir.



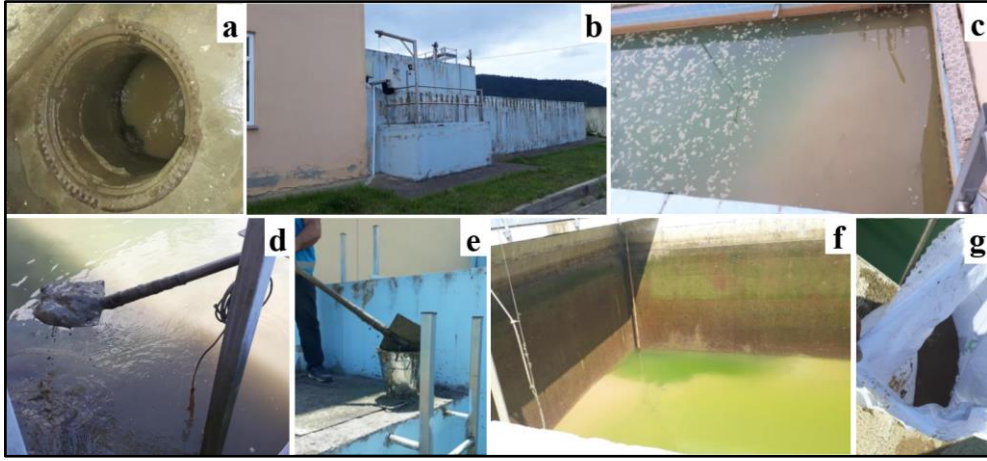
Şekil 36. Karadeniz Teknik Üniversitesi geoteknik laboratuvarı

Trabzon bölgesindeki farklı içme suyu arıtma tesislerinden alınan içme suyu arıtma tesisi atık çamurları, tesislerden poşet ve çuval yardımıyla, piyasadan alınan Kaolen ve Bentonit kil (Şekil 37) malzemeleri ise 35'er kg lık paketler halinde alınarak Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) İnşaat Mühendisliği Geoteknik laboratuvarına getirilmiştir.

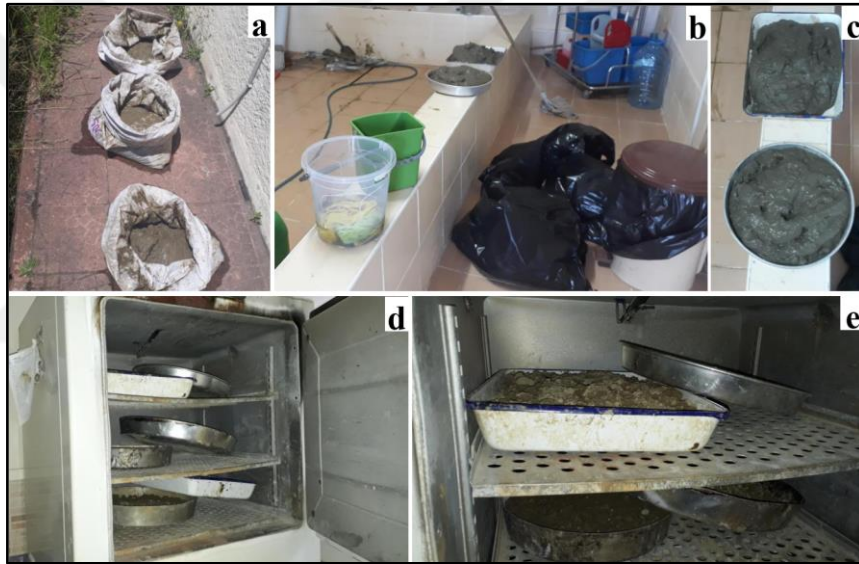


Şekil 37. Piyasadan temin edilen Kaolen ve Bentonit

Esiroğlu içme suyu arıtma tesisi atık çamuru flokleştirme ve çökeltim ünitesi altında, arıtma çamuru çıktıktan sonra kanal ile Değirmendere'ye verilen rögardan temin edilmiştir (Şekil 38a). Buradaki malzemeler kürek yardımı ile çuvalara doldurulmuş ve poşetlenerek laboratuvar ortamına götürülmüştür. Derecik – Akçaköy içme suyu arıtma tesisi atık çamuru filtre suyu tutma havuzundan kovalara alınmış ve çuvalara doldurulmuştur (Şekil 38b- c- d- e). Akçaabat içme suyu arıtma tesisi atık çamuru ise çamur tutma tankından temin edilmiştir. Tankın derinliği fazla olmasından dolayı ip bağlanarak kova sarkıtılmış ve çamur bu şekilde alınmıştır. Alınan çamur malzemesi çuvalara konmuş ve bir süre süzülmesi beklendikten sonra poşetlenerek araca yüklenmiş ve laboratuvara götürülmüştür (Şekil 38f-g).



Şekil 38. Tesislerden alınan içme suyu arıtma tesisi atık çamurları



Şekil 39. Atık çamurların deneye hazırlanması

Karadeniz Teknik Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı'na getirilen atık çamurları önce laboratuvar önünde açık havada buharlaşma ile su muhtevasının azaltılması sağlandı (Şekil 39a-b). Daha sonra malzemeler laboratuvar içerisine alınarak çuvallardan çıkarıldı ve tepsilere konuldu (Şekil 39c).

Tepsi içerisindeki numuneler etüve konularak 105 °C ile ısıtılarak, tamamen kuru malzeme elde edilene kadar etüvde bekletildi (Şekil 39d). Etüvdeki malzemeler etüvden ara ara çıkarılarak spatula veya kürek yardımıyla parçala ayrılıp kuru malzeme elde etme işlemi hızlandırıldı (Şekil 39d-e). Özellikle Derecik içme suyu arıtma tesisine ait atık çamurları diğer tesislere ait çamurlara oranla daha fazla hacim kaybı yaşadı. Bu durumun uzun yıllar

beklemeye bağılı olarak içerisinde çok fazla organik madde ihtiva etmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 40).



Şekil 40. Arıtma atık çamurlarının etüvden sonrası parçalanması ve hacim kaybı

Etüvden çıkarılan atık çamurların içerisinde çamur halindeyken belli olmayan fakat kurduğunda ortaya çıkan dal ve plastik parçaları gibi yabancı malzemeler ayıklandı (Şekil 41a). Ayıklanan malzemeler deneyler için gereken dane çapına kadar öğütülmek üzere tepsilere alındı (Şekil 41b).



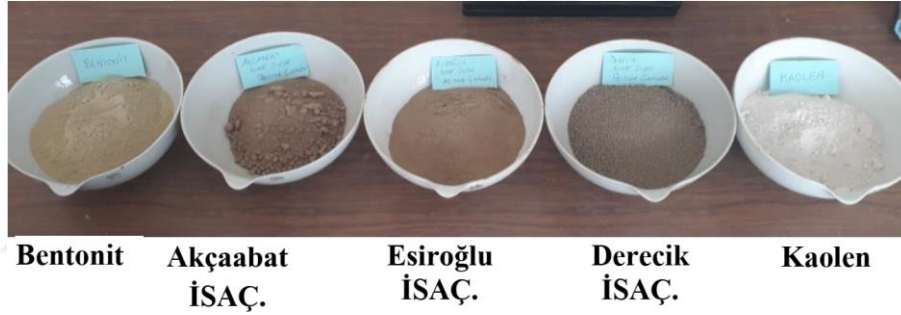
Şekil 41. Etüv sonrası atık çamuru içerisindeki yabancı malzemelerin ayıklanması

Malzemeler istenilen dane çapına getirilmek üzere geoteknik laboratuvarında bulunan öğütücüye konarak mümkün mertebe ince daneli hale getirilmeye çalışıldı. Fakat öğütücüde istenilen daha ince dane boyutu elde edilemediği durumda (kıvam deneyleri için) KTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Üretim Metalurjisi Laboratuvarı'nda bulunan demir çubuklu tambur öğütücü kullanıldı. Dane boyutu istenilen duruma getirildiğinde malzemeler isim yazılı plastik kaplara konularak geoteknik laboratuvarına getirildi (Şekil 42). Öğütülen malzemelerin tümü bir arada Şekil 43'te gösterilmektedir. Tüm deney malzemeleri etüv kurusu halinde küçük paketler halinde hazırlanarak XRD Analizleri için Karadeniz Teknik

Üniversitesi Merkezi Laboratuvarına, XRF Analizleri için ise Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Laboratuvarına gönderilmiştir.



Şekil 42. Malzemelerin öğütülmesi işlemleri



Şekil 43. Öğütülmüş kil ve atık çamur numuneleri

2.2. Laboratuvar Deneyleri

Killi zeminlerin özelliklerinin belirlenmesi, bu zeminlerin davranışlarını tahmin etmek için gereklidir. İnşaat sırasında, özellikle yoğun yağış, su baskınları veya diğer çevresel koşullar altında zemin davranışları değişebilir. Bu nedenle, killi zeminlerin indeks özelliklerinin bilinmesi, olası sorunların önceden tespit edilmesine ve çözülmesine ve ayrıca en etkili zemin iyileştirme yönteminin seçilmesi konusunda da önemli rol oynamaktadır. Bu kapsamda bu çalışmada zemin sınıfı ve indeks özelliklerini belirlemek için dane dağılımı su muhtevası, piknometre, likit limit, plastik limit ve rötre limit ile standart proktor deneyleri yapılmıştır. Ayrıca mekanik özellikleri belirlemek için serbest basınç ve konsolidasyon deneyleri yapılmıştır.

2.2.1. Su muhtevası (w_n) Belirlenmesi

Bu deney, TS 1900-1: 2006, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri- Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, Madde 5.1.1.1, Deney 1 (A): Etüvde kurutma metoduna göre yapılmaktadır.

İlk aşama olarak 0,01 g hassasiyetli terazi ile deney malzemesinin konulacağı kabın kütlesi belirlenir (M_1). Bu kap mutlaka temiz ve kuru olmalıdır. İkinci aşama olarak deney malzemesinden bir miktar alınarak, daha önce kütlesi belirlenmiş kap içerisine konur ve kap + yaş numune kütlesi belirlenir (M_2) ve etüve konur. Malzemeler etüv içerisinde, zemin türüne göre genellikle 105 ± 5 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca değişmez ağırlığa gelene kadar kurutulur. Son aşamada ise etüvden çıkarılan malzemenin kap + kuru zemin kütlesi belirlenir (M_3). Elde edilen değerler kullanılarak aşağıda verilen formül yardımı ile su muhtevası değeri yüzde olarak hesaplanır.

$$w = \frac{M_2 - M_3}{M_3 - M_1} * 100 \quad (1)$$

Burada;

M_1 = Kabın kütlesi (g),

M_2 = Kap + yaş numune kütlesi (g),

M_3 = Kap + kuru numune kütlesi (g) dir.

2.2.2. Piknometre (G_s) Deneyi

Bu deney, TS 1900-1: 2006, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, 5.1.5.1 Deney 5 (A): İnce daneli zeminler için deney metodu göre yapılmaktadır.

Piknometre şişesi, içerisi tamamen kuru olacak şekilde 0,001 g hassasiyet ile tartılır (M_1). Örselenmiş numunelerin deneye hazırlanması metoduna uygun olarak elde edilmiş malzeme, sıcaklığı (105 ± 5) °C olan bir etüvde kurutulur ve oda sıcaklığına kadar soğutulur. En az 10 g kütlesindeki zemin numunesi piknometre şişesine boşaltılarak şişe, içerisindeki zemin ve kapağı ile birlikte 0,001 g doğrulukla tartılır (M_2).

Piknometre şişesi içinde bulunan numuneyi ancak örtecek miktarda, havası alınmış damıtık su eklenir. Suda eriyebilen tuzlar içeren zeminler gibi bazı zeminler için su yerine gazyağı veya alkol kullanılabilir. Eğer bunlardan herhangi biri kullanılacak ise durum deney

raporunda mutlaka belirtilmeli ve sıvının deneyde kullanılan belirli sıcaklıkta yoğunluğunu ölçmek için ayrıca bir deney yapılmalıdır.

Piknometre şişesi, üzerinde kapağı bulunmaksızın içerisindeki zemin numunesi ve suyla, vakum desikatörüne konur ve emme uygulanarak yavaşça 760 mm eşdeğer cıva basıncına düşürülür. Bu işlem sırasında, zemin içindeki hava kabarcıklarının şiddetli köpürmeye yol açmamasına da özen gösterilmelidir. Aksi halde, karışımdan sıçrayan ufak damlacıklar hacim şişesinin ağzından çevreye saçılarak malzeme kütlelerinde kayba yol açar. Hacim şişesi, numuneden hava çıkışı durana kadar desikatörde bekletilir.

Vakum işleminden sonra ve desikatörün kapağı açılarak piknometre şişesinin içindeki numune, cam çubuk ile özenle karıştırılır veya piknometre şişesi çalkalanır. Spatülün piknometre şişesinden çıkarılmasından önce mutlaka üzerine yapışmış olan zemin danecikleri birkaç damla havası alınmış damıtık suyla temizlenmelidir. Bu işlem sonunda numune, hava kabarcıklarından arındırılana kadar vakum işlemine devam edilir.

Piknometre şişesi, desikatörden çıkarılır ve işaret çizgisine kadar havası alınmış damıtık su ya da deney sıvısı eklenerek doldurulur. Kapağı kapatıldıktan sonra, yaklaşık olarak 1 saat süreyle banyonun sıcaklığına (20 ± 1) °C sıcaklığa erişene kadar boyun seviyesine kadar su banyosu içerisinde bekletilir. Piknometre şişesi içerisindeki sıvıda gözle görülür bir azalma olursa, kapak çıkarılarak piknometre şişesi işaret çizgisine kadar doldurup kapak yeniden kapatılır. Kapağı kapalı durumdaki piknometre şişesi banyodan çıkartılır ve dış yüzeyi iyice kurulandıktan sonra 0,01 g doğrulukla tartılır (M_3).

Son işlem olarak piknometre şişesinin içindekiler boşaltılır, piknometre şişesi temizlenir ve havası alınmış damıtık su veya deney sıvısı ile işaret çizgisine kadar doldurulur. Kapağı kapatılan piknometre şişesi su banyosunda 1 saat süreyle veya banyonun deney için seçilmiş sıcaklığına erişene kadar bekletilir. Şişesinin içerisindeki suda (deney sıvısında) gözle görülür bir azalma olduğu takdirde kapak çıkarılır ve piknometre şişesini dolduracak kadar havası alınmış damıtık su eklenir. Kapağı kapatılan piknometre şişesi banyo içerisine konur ve banyonun belirli sıcaklığına yeniden erişmesine kadar bekletilir. Sudan çıkarılan piknometre şişesi ve dış yüzeyi iyice kurulandıktan sonra 0,01 doğrulukla tartılır (M_4). İyi bir ortalama değer elde etmek için deneyin birçok defa tekrarı gerekebilir. Zemin danelerinin özgül ağırlığı (G_s) aşağıda verilen eşitlik yardımı ile hesaplanır:

$$G_s = \frac{\rho_L(M_2 - M_1)}{\rho_w(M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)} \quad (2)$$

Burada;

M_1 : Piknometre şişesinin kütlesi, (g),

M_2 : Piknometre şişesi ile kuru zemin kütlesi, (g),

M_3 : Piknometre şişesi, zemin ve sıvının kütlesi, (g),

M_4 : Piknometre şişesinin sadece sıvı ile dolu kütlesi, (g),

ρ_L : Deneyde kullanılan sıvının deney sıcaklığında yoğunluğu, (kN/m^3),

ρ_w : Damıtık suyun deney sıcaklığında yoğunluğu, (kN/m^3)

Tekrarlanan iki deney sonucu elde edilen değerlerin ortalaması, zemin danelerinin bağıl yoğunluğu olarak kabul edilir ve $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ sıcaklık için en yakın 0,01 hanesine yuvarlatılarak verilir. İki değer arasındaki fark 0,03'ten büyük çıkmışsa, deney tekrarlanır.

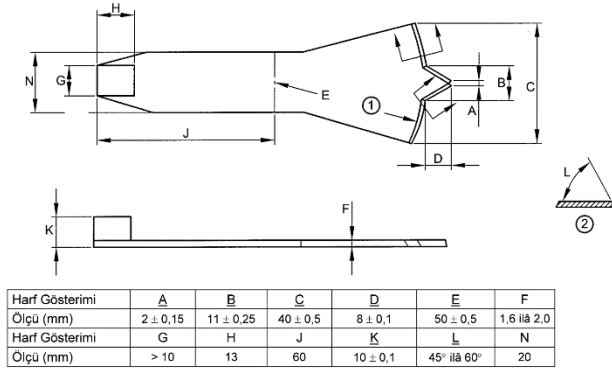
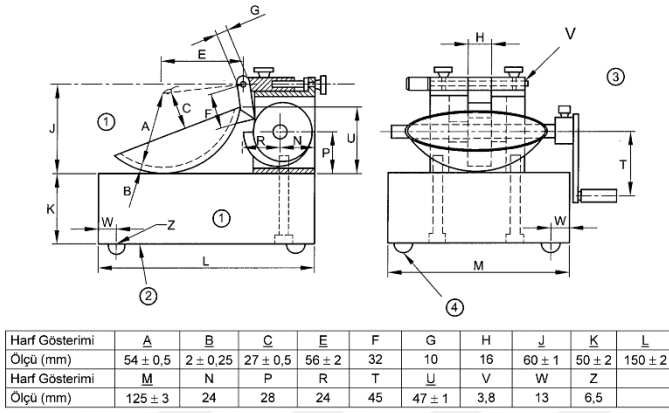
2.2.3. Likit limit (w_L) Deneyi (Cassagrande deneyi)

Bu deney, TS 1900-1: 2006, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, Madde 5.1.2.2, Deney 2 (B): Likit limitin çarpmalı cihazla tayini (yarı logaritmik grafik kullanılarak) metoduna göre yapılmaktadır.

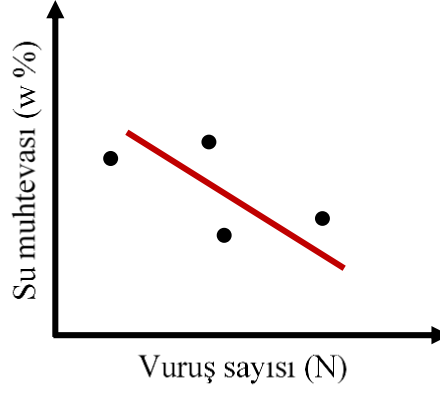
Deneye başlamadan önce deney aletinin temiz, kuru ve çalışır durumda olduğu mutlaka kontrol edilmelidir. Pirinç tasın düşme yüksekliği 1 cm yukardan düşecek ayar da ve serbest düşme yapabilir durumda olmalıdır. Aletin kolu bir tur döndüğünde bir adet düşüşün gerçekleşmesi gerekmektedir.

Öncelikle deney için # 40 nolu elekten geçen malzemeden yaklaşık 200 g kadar alınır. Alınan malzeme porselen vb. bir kabın içerisine konarak yavaşça su eklenir. Her su eklendiğinde malzeme mutlaka homojen karışım elde edilene kadar palet bıçağı ile karıştırılır (Şekil 44). Su katılıp malzeme homojen olarak karıştırıldıktan sonra ilk olarak, deney aletindeki pirinç tas üzerine tasın üzeri düz görünecek şekilde yerleştirilir. Daha sonra özel deney bıçağı yardımı ile malzemenin tam ortasından geçen ve düz bir şekilde yukarıdan aşağıya doğru bastırılarak malzemeyi ikiye bölecek “V” şeklinde bir yarık açılır. Bu aşamadan sonra deney aletinin kolu eşit hızda serbest düşme yaptırılacak şekilde saniyede 2 devirlik bir hızla çevrilerek, pirinç tasın 1cm yüksekten düşmesi sağlanır. Pirinç tasın ortasından geçen oyuğun her düşme sonucu bir miktar kapanması veya hiç kapanmaması gözlenebilir. Eğer yarıкта 13 mm lik bir kapanma gözlenirse deney durdurulur ve 13 mm kapanmayı veren düşme sayısı kaydedilir. Daha sonra kapanan bölgeden bir miktar malzeme

alınarak su muhtevası belirlenir. Eğer ilk iki deneyde 25 vuruş sayısını geçtiği halde kapanmaz ise o zaman malzemeye bir miktar daha su katılarak aynı işlemler tekrar edilir. Bu nedenle deney başında su ani olarak birden değil yavaş yavaş artırarak katmalıdır. Başlangıçta yapılan iki deney için düşme sayısı 25 vuruşun altında diğer yapılacak iki deneyin ise 25 vuruşun üstünde çıkması istenir. Bu şekilde yaparak elde edilen 4 adet vuruş sayısı ve su muhtevası değeri logaritmik grafik üzerine işaretlenir. Grafik üzerine işaretlenen noktalardan bir doğru geçirilir. Vuruş sayısını gösteren eksenden 25 vuruş sayısından bir doğru çizildiğinde, doğrunun su muhtevası ekseninde kestiği değer likit limit değerini vermektedir (Şekil 45).



Şekil 44. Casagrande deney aleti ve oyuk açma bıçağı ölçüleri (TS-1900-1)



Şekil 45. Casagrande logaritmik deney grafiği

2.2.4. Plastik Limit (w_p) Deneyi

Plastik limit deneyi için kullanılacak malzeme likit limit deneyi sırasında hazırlanan deney malzemesinden alınabilir. Likit limit deneyi için malzemeye belli aralıklarla eklenen su malzemeyi plastik kıvama getirince, plastik limit deneyi için kenara bir miktar ayrılır. Plastik kıvamdaki numune düz bir plaka üzerinde el ayası ile yuvarlanarak 3 mm çapında silindir çubuklar haline getirilir. Malzemenin plastik kıvamda olduğunun kabul edilmesi için 3 mm çapındaki çubuklar üzerinde çatlamlar meydana gelmesi gereklidir.

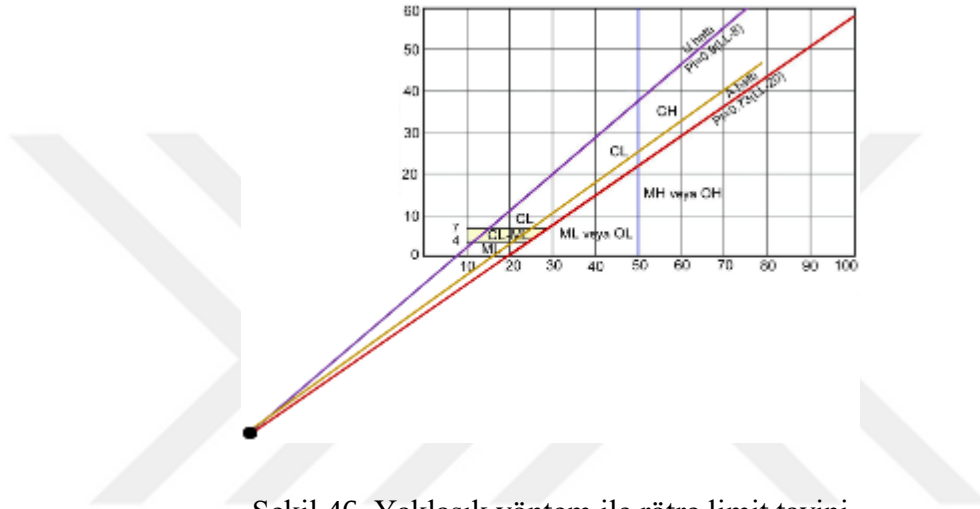
Eğer numune 3 mm çapa ulaşmadan yüzeyinde çatlaklar oluşuyorsa numunenin su muhtevası plastik limite göre yüksek, 3 mm çaptan daha düşük çapta yüzeyinde çatlaklar oluşuyorsa numunenin su muhtevası plastik limite göre düşüktür anlamına gelmektedir. Her iki durumda da deney tekrar edilerek uygun su muhtevası bulunmalıdır. Eğer numune 3 mm çapa ulaştığında yüzeyinde çatlaklar oluşmaya başlıyorsa deney tamamlanmıştır.

Bu parçalar alınarak ağırlığı belli kaplara konularak kap + yaş malzeme ağırlığı tartılır ve etüve konur. 24 saat süre ile etüvde 105 ± 5 °C' de etüvde bekleyen malzeme alınarak kap + kuru ağırlığı tartılır. Daha sonra su muhtevası formülü ile su içeriği hesaplanır.

2.2.5. Rötire Limit (Yaklaşık yöntem metodu) Deneyi

Kıvam limitlerinden biri olan rötire limit, malzemenin kıvamının katıdan yarı katı duruma geçtiği sınır su muhtevası değerini ifade etmektedir. Rötire limit deneyinde insan sağlığına oldukça zararlı bir madde olan civa kullanıldığından rötire limit deneyi pek tercih edilmemektedir. Bunun yerine plastisite indisi ve su muhtevası değerleri yardımı ile

plastisite kartından bulunan yaklaşık yöntem (Holtz vd., 1979) kullanılmaktadır. Bu yöntemde öncelikle malzemelere ait likit limit (w_L) ve plastik limit (w_P) değerleri bulunduktan sonra elde edilen veriler plastisite kartına işlenir. Daha sonra plastisite kartında bulunan U hattı ve A hattı Şekil 46'da gösterildiği üzere grafik dışında bir noktada kesişecek şekilde uzatılır. Grafik dışındaki bu noktadan grafik üzerine daha önceden işaretlenen malzemelere ait noktalara bir doğru geçirilir. Doğrunun x eksenini kestiği nokta o malzemenin rötre limit değerini verdiği kabul edilir.

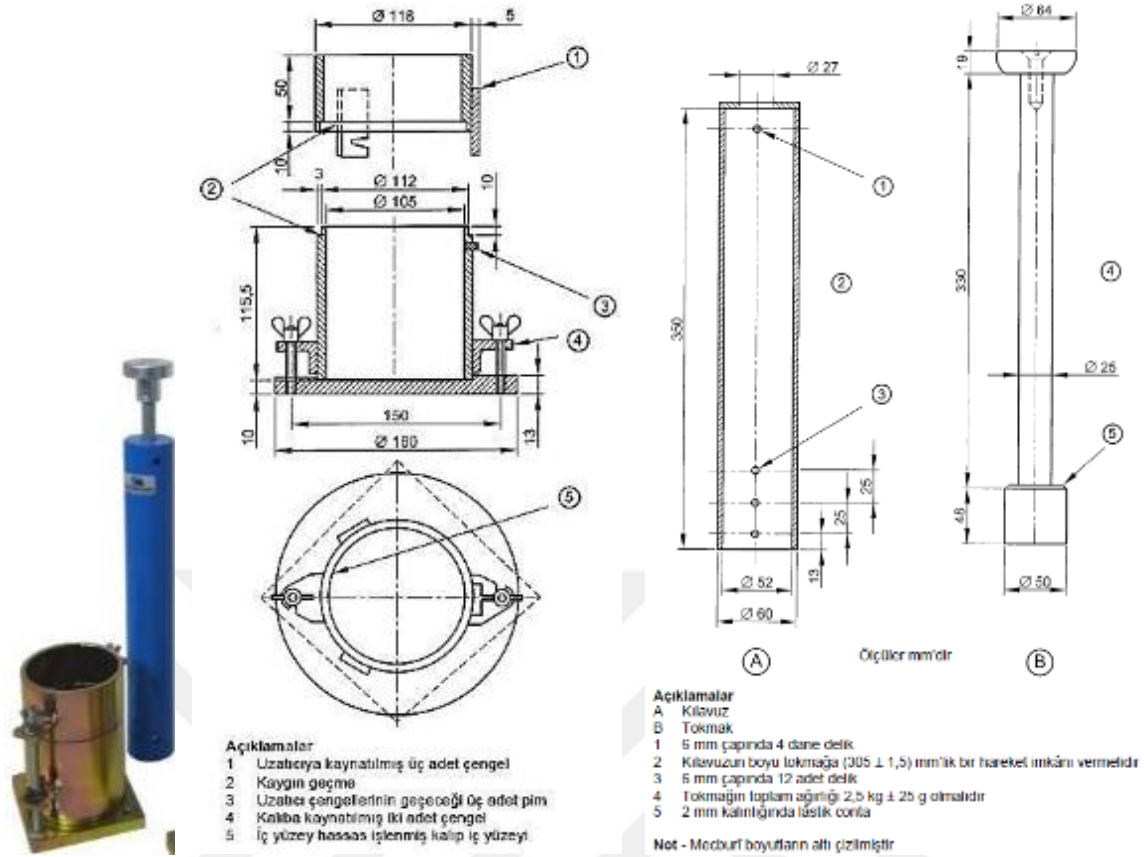


Şekil 46. Yaklaşık yöntem ile rötre limit tayini

2.2.6. Standart Proktor Deneyi

Bu deney, TS 1900-1: 2006, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini, Madde 5.2.1, Deney 7: Zeminde kuru birim hacim ağırlık - su muhtevası bağıntısının 2,5 kilogramlık tokmakla elde edilmesi (standart enerji) metoduna göre yapılmaktadır.

Bu deney belirli bir metot ile sıkıştırılmış zeminin maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) veren optimum su muhtevasının (w_{opt}) bulunması ile ilgilidir. Deney için iç çapı 105 mm, iç yüksekliği 115,5 mm ve iç çapı 152,4 mm, iç yüksekliği 115,5 mm olan iki farklı ebatta, silindir biçiminde, kolayca çıkarılabilen bir taban plâkasına sahip kalıp kullanılır. Malzemeleri silindir kalıba yerleştirebilmek için ise 2,5 kg kütleyle sahip tokmak kullanılır (Şekil 47).



Şekil 47. Standart proktor deney ekipmanları ve standartları

Deney öncesinde 4,75 mm, 9,5 mm ve 20 mm'lik eleklerde kalan malzeme yüzdeleri belirlenir. Deneyin kullanım şartı A, B ve C olmak üzere 3'e ayrılır. Detaylar Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8. Standart proktor için kullanılması gereken kalıp ve eleklerin seçim kuralları (TS 1900-1, 2006)

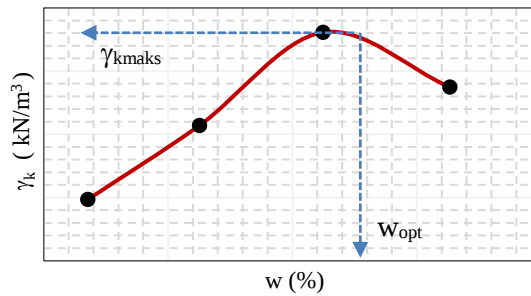
	Kullanım şartı	Kullanılan malzeme	Kalıp (iç boyutları)	Tabaka sayısı	Her tabakaya vuruş sayısı
A	% 20 ve daha az malzeme 4,75 mm'lik elek üzerinde kalıyor ise	4,75 mm'lik elekten geçen	Çapı: 101,6 mm Boy: 116,4 mm	Üç	25
B	% 20 ve daha fazla malzeme 4,75 mm'lik elekte kalıyor ve % 20 ve daha az malzeme 9,5 mm'lik elek üzerinde kalıyor ise	9,5 mm'lik elekten geçen	Çapı: 101,6 mm Boy: 116,4 mm	Üç	25

Deney, "A" kullanım şartını sağlayan deney kalıbı ile gerçekleştirileceğinden burada sadece buna uygun bilgilere yer verilecektir. Deneyin gerçekleştirilmesi için 4,75 mm'lik elekten geçen yaklaşık 3 kg kadar malzeme geniş bir kap içerisine konarak belirli bir miktar

su eklenir. Tokmakla sıkıştırma işlemine başlamadan önce, kullanılan kalıp tartılarak kütlesi kaydedilir (M_1). Zemin numunesi, gevşekliğini veya kabarıklığını kaybedene kadar el ile hafifçe bastırılır ve sıkıştırılır. Metot A'ya göre, zemin numunesi üç eşit tabakaya ayrılarak, her tabaka sıkıştırıldıktan sonra kalıp çeperlerine taşan zemin, bir bıçak veya uygun bir araçla düzeltilir ve tabakanın üstüne eşit olarak dağılır. Sıkıştırma, her bir tabakaya serbest düşürülen tokmakla yapılır; 305 mm yükseklikten 25 eşit vuruşla her bir tabaka sıkıştırılır.

İşlem tamamlandığında, eklenen yaka çıkartılır ve sıkıştırılmış zemin numunesi, çelik cetvel yardımıyla kalıp yüzeyinin düz olmasına dikkat edilerek tıraşlanır. Ardından, zemin numunesi ve kalıbın kütlesi gram cinsinden, 1 g hassasiyetle ölçülür (M_2). Yaş zemin numunesi kütlesi, kalıp hacmine (943 cm^3) oranlanarak, numunenin yaş birim ağırlığı hesaplanır. Kalıptan çıkarılan zemin, merkezi boyunca dikey olarak dilimlenir ve kesilen yüzeylerden birinden su içeriği tayini için temsili bir örnek alınır. Su içeriği analizi için, rutubet kabı kapağı ile birlikte zemin numunesi tartılır ve su içeriği belirlemek amacıyla temsili bir örnek alınır. Bu örnek, 110°C 'lik etüvde kurutuluncaya kadar bekletilir. Kurutma işlemi tamamlandıktan sonra, numunenin kütlesindeki azalma suyun kütlesini gösterir ve bu değer deney formuna kaydedilir.

Sıkıştırma işleminden sonra kalıptan çıkarılan zeminin geri kalanı, gözle incelenerek 4.75 mm (No. 4) elekten geçebilecek boyutta ufalanır ve test edilen numuneye eklenir. Zeminin su içeriğini %1-2 oranında artıracak şekilde yeterli su eklenir ve bu işlem her seferinde en az beş değer elde edene kadar tekrarlanır. Bu işlem, sıkıştırılmış yaş birim ağırlığında değişiklik olmadığı ya da azalma olduğu gözlemlenene kadar devam eder. Deneyde kullanılan su içerikleri, maksimum kuru birim ağırlığını veren optimum su içeriği sınırları içinde değişir. Elde edilen değerler deney forma işaretlenerek bir grafik oluşturulur. Bu grafiğin tepe noktası standart proktor parametreleri olan γ_{kmaks} ve w_{opt} değerlerini vermektedir (Şekil 48).



Şekil 48. Standart proktor deney grafiği

2.2.7. Serbest Basınç Deneyi

Bu deney, TS 1900-2: 2006, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini, Madde 5.3, Deney 3: Serbest (tek eksenli) basınç dayanımının tayini metoduna göre yapılmaktadır.

Bu deney ince daneli zeminlerin örselenmemiş veya sıkıştırılmış haldeki serbest basınç mukavemetini bulma ile alakalıdır. Deney öncelikle numunelerin hazırlanması ve daha sonra bu numunelerin deneye tabi tutulmasını içermektedir. Deney örselenmemiş numuneler üzerinde gerçekleştirilecek ise araziden alınan numune kalıptan çıkarılır. Yüzeyi tıraşlanarak düzgün hale getirilir. Eğer numune sıkıştırılarak hazırlanacak ise, 50 mm çap ve 100 mm yüksekliğe sahip yarı silindirik kalıp kullanılır. Numuneleri hazırlamak için 50 mm çapında fakat zorunlu hallerde deney raporunda belirtmek koşulu ile 38 mm çapında numuneler de kullanılmaktadır.

Öncelikle serbest basınç deneyi öncesi ilgili malzemenin proktor deney sonuçları bulunmalıdır. γ_{kmax} ve w_{opt} değerleri bulunduğundan sonra denklem 3'deki formül yardımıyla malzemenin birim hacim ağırlığı bulunur. Daha sonra 4. bağıntı yardımı ile de hacmi belli olan serbest basınç deney kalıbına girecek malzeme ağırlığı belirlenmiş olur. Burada kalıptan çıkan malzemenin tartılmasının nedeni kalıp içerisine girmesi gereken malzemenin ne kadarının girebildiğini ölçebilmektir.

$$\gamma_{kmax} = \frac{\gamma_n}{1 + w_{opt}} \quad (3)$$

$$\gamma_n = \frac{W_{yas}}{V_{kalıp}} \quad (4)$$

Deney numunesi 0,01 g doğrulukla tartılır ve boyutları 0,1 mm doğrulukla ölçülür. Numune vakit kaybedilmeden Şekil 49'da görülen presin alt platformuna merkez konumuna yerleştirilerek numune üst noktası presin üst kısmına gelecek şekilde yukarı kaldırılır.



Şekil 49. Serbest basınç deney aleti

Yük artışına paralel olarak boy değişimini ölçen komparatör saati, alt ve üst başlıklar arasına yerleştirilerek sıfırlanır. Yükleme numunede dakikada % 0,5 - % 2 arası birim boy kısalması oluşturacak biçimde yapılır. Yük ve boy değiştirme okumaları deney formunda belirtildiği üzere uygun aralıklarda kaydedilir. Her durumda deney süresi 10 dakikayı geçmemelidir. Deney, numunede kesin göçme (kırılma) elde edilene, en büyük dayanımın belirmediği yumuşak killerde ise % 20 birim boy kısalmasına kadar sürdürülür. Deney sonunda malzemenin göçmüş halinin resmi çizilerek kırılma yüzeyinin yatayla yaptığı açı bulunur. Malzemeye ait su muhtevasını hesaplamak üzere göçmüş malzeme 3'e ayrılarak her parçasına ait su muhtevası değeri bulunarak ortalaması alınır. Malzemeye ait serbest basınç mukavemeti değerleri aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanır.

Numunede eksenel birim şekil değiştirme (%):

$$A = \frac{A_0}{1-\varepsilon} * 100 \quad (5)$$

Burada;

ε : Düşey yöndeki eksenel birim şekil değiştirmesi,

A_0 : Numunenin deney başındaki kesit alanı (m^2) dır.

Numunenin serbest basınç dayanımı aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

$$q_u = \frac{P}{A} \text{ (kPa)} \quad (6)$$

Burada;

P: Göçmeyi sağlayan yük (kN) tür.

Yukarıda belirtilen formüller kullanılarak “Serbest Basınç Deney Formu” doldurulur.

2.2.8. Konsolidasyon Deneyi

Bu deney, TS 1900-2: 2006, İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 2: Mekanik özelliklerin tayini, Madde 5.2 Deney 2: Tek yönlü konsolidasyon özelliklerinin tayinine göre yapılmaktadır.

Konsolidasyon deneyi, öncelikle deney numunelerinin hazırlanması daha sonra ise deneyin gerçekleştirilmesi adımlarını kapsamaktadır. Deney için kullanılan malzemeler konsolidasyon halkası, poroz taşı, konsolidasyon hücresi (Şekil 50), süzgeç kağıdı, 0,004 mm hassasiyetli ve en az 25 mm kapasitede komparatör, istenilen basıncı % 1 doğrulukla uygulayabilen basma cihazıdır.



Şekil 50. Konsolidasyon halkası, poroz taşı, konsolidasyon hücresi

Deney için öncelikle malzemeye ait optimum su muhtevası standart proktor deneyi yapılarak bulunur. Daha sonra bu su muhtevasında sıkıştırılan zemine, konsolidasyon halkası numuneye yavaşça ve düzgün bir biçimde bastırılarak geçirilir. Numunenin tüpten taşan bölümü, ince bir piyano teli veya ince ağızlı bir bıçakla tüpün ağzıyla bir düzeyde kesilir. Bu işlemler malzemenin su muhtevasında herhangi bir değişiklik olmayacak şekilde dikkatli ve hızlıca yapılmalıdır. Konsolidasyon halkasının kalınlığı ölçülerek vakit kaybetmeden tartılır (Şekil 51).



Şekil 51. Konsolidasyon deney numunesi hazırlaması

Alt gözenekli disk, konsolidasyon hücresi içine kuru olarak yerleştirilir. Halka içindeki numunenin alt ve üstüne birer süzgeç kâğıdı konarak gözenekli diskin ortasına yerleştirilir. Üst gözenekli disk ve yükleme plakası numunenin ortasına yerleştirilir (Şekil 52).

Bundan sonra konsolidasyon halkası yükleme cihazındaki yerine oturtulur ve dengede bulunan yükleme kolu, yatay duruma getirilip yükü numuneye aktaran parçası yükleme plakasına değecek biçimde ayarlanır. Göstergeli mikrometre, konsolidasyon hücresinin tabanı ile yükleme plakası arasındaki bağıl hareketi ölçecek biçimde tespit edilir. Göstergeli mikrometre, az bir miktar şişmeyi ölçebilecek, ancak kapasitesinin çoğu oturumları kaydetmekte kullanılabilecek biçimde ayarlanmalıdır.



Şekil 52. Konsolidasyon deney aleti

Yükleme sırası deney boyunca: $\Delta\sigma = 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16 \text{ kg/cm}^2$ (12,5, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 kPa) dizisini takip etmelidir. Komparatör sıfırlanarak, zemin türüne bağlı olarak uygulanacak ilk basınç numunenin şişmesini önleyecek değerde olmalıdır. Numune ilk basıncı hissettiği anda konsolidasyon hücresi suyla doldurularak kronometre çalıştırılır. Belirli süreler sonunda gösterge okumaları alınır ve kaydedilir. Bunlar 0,1 (6 saniye), 0,3 (18 saniye), 0,5 (30 saniye), 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100,

150, 200, 300, 500, 1440 dakikadır. Okuma süreleri 0; 6; 18; 30 saniye; 1; 2,25; 4; 6,25; 9; 16; 25; 36; 49; 64; 81; 100; 121 dakika; 4, 9 ve 24 saat gibi karekökü rahat alınabilir sayılar olması durumunda grafiğe daha rahat yerleştirilebilir. Basınç, deney sırasında elde edilen eğriden, zeminin birincil sıkışması sona erdiği görülene kadar değiştirilmez; bunun için genellikle 24 saatlik bir süre uygun ve yeterlidir. Bu 24 saatlik sürenin sonunda gösterge ve kronometre okumaları alınır ve aynı süre içinde odanın en yüksek ve en düşük sıcaklıkları kaydedilir. Sıkışmaların ihmal edilecek düzeye düşmediği özel durumlarda süre 48 saate kadar uzatılabilir. Numune üzerine etkiyen basınç için, yukarıda verilen ağırlık dizileri bir üst değere artıracak biçimde eklenir ve okuma alma işlemi tekrarlanır. Deneyde en az yükleme basamağı kullanılmalı ve numuneye uygulanan en yüksek basınç, zeminin arazide etkisine uğrayacağı maksimum efektif düşey basıncı aşmalıdır. Bu basınç, numunenin alındığı noktadaki efektif düşey ve tasarlanan yapının aynı noktada yaratacağı gerilme artışının toplamına eşittir.

En yüksek konsolidasyon basınç uygulanıp gösterge okumaları tamamlandıktan sonra, numunenin boşaltma eğrisi istenirse, yükler yükleme kademelerine uygun olarak boşaltılır veya istendiği takdirde boşaltma, bir önceki basıncın dörtte biri olmak üzere de yapılabilir. Genellikle kabartma süresi, aynı basınç altında birincil konsolidasyon için gerekenden kısadır. Elde edilen bilgiler kullanılarak “Konsolidasyon Deney Formu” doldurulur. Yükleme adımlarına başlamadan önceki yükseklik H , ilk numune yüksekliğinden toplam oturma miktarı çıkarılarak bulunur. Daha sonra her bir yükleme başındaki ve sonundaki numune yüksekliğinin ortalaması bulunur (H_{ort}).

Katı danelerin eşdeğer yüksekliği H_0 aşağıda verilen eşitlikten bulunur:

$$H_0 = \frac{W_s}{G_s A} \quad (7)$$

Burada;

W_s : Deney öncesi numunenin kuru ağırlığı (g),

G_s : Katı danelerin özgül ağırlığı (γ_s/γ_{su}),

A : Numune kesit alanı (cm^2)

Boşluk oranı “e” aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır:

$$e = \frac{H - H_0}{H_0} \quad (8)$$

Ortalama boşluk oranları aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır:

$$e_{ort} = \frac{e_i - e_{i+1}}{2} \quad (9)$$

Boşluk oranları farkı aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır:

$$\Delta_e = e_i - e_{i+1} \quad (10)$$

Basınç artırımı oranları aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır:

$$\Delta_\sigma = \sigma_i - \sigma_{i-1} \quad (11)$$

Sıkışma katsayısı (a_v) aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır:

$$a_v = \frac{\Delta_e}{\Delta_\sigma} \quad (12)$$

Hacimsel sıkışma katsayısı m_v aşağıda verilen eşitlikten hesaplanır (1 kg/cm² lık bir basınç artışının numunede yaratacağı sıkışma miktarı):

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_{ort}} \quad (13)$$

Deneydeki yükleme değerlerine karşılık zeminin hacmindeki değişimi gösteren basınç (σ) - boşluk oranı (e) grafiği yarı logaritmik “Basınç - boşluk grafiği” ne çizilir. Bu grafik üzerindeki yükleme sayısı kadar noktadan bir eğri, son iki yükleme değerinden bir doğru ve yükleme dönüşündeki noktalardan ise, ikinci bir doğru çizilir. İlk doğrunun eğimi sıkışma indisini (C_c), ikinci doğrunun eğimi ise şişme indisini (C_s) verir ve hesaplanma şekli sıkışma indisi gibidir.

$$C_c = \frac{e_{i-1} - e_i}{\log\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{i-1}}\right)} \quad (14)$$

Malzemelere ait şişme basınçları bulunurken, ringe alınan numune konsolidasyon hücresine yerleştirilir ve komparatör belli bir değerde sabitlenir. Hücreye su doldurulur ve komparatör sabitlendiği değerde tutulmaya çalışılır. Saat her hareket ettiğinde konsolidasyon koluna yük koyularak komparatörün sabit kalması sağlanır. Komparatör 12 saat hareketsiz kaldığı zamandaki koldaki yük tartılır ve deney hesaplamasına geçilir. Hesaplama için kola koyulan toplam yük miktarı ring içindeki numunenin hacmine bölünür ve şişme basıncı bulunur.

Konsolidasyon deneyinde, şişme yüzdesi, zemin malzemesinin suyla doymun hale geldikten sonra şişme davranışını anlamaya yardımcı olur. Bu şişme, yük kaldırılmadan önceki başlangıç koşullarında gerçekleşir ve daha sonra, zemin üzerindeki yük arttırıldıkça, şişme miktarının nasıl değiştiği gözlemlenir. Konsolidasyon deneyindeki şişme yüzdesini hesaplamak için, şişmeden önce ve şişme sonrası hacimler arasındaki farkı kullanarak bir oran hesaplanır. Öncelikle başlangıç hacminin ölçülmesi (şişmeden önceki hacim) için numune, deney öncesinde belirli bir yük uygulanmadan suyla doymun hale getirilir. Bu durumda zemin numunesinin başlangıç hacmi, genellikle numunenin yatay çapı ve yüksekliği ölçülerek hesaplanır. Daha sonra numune, yük kaldırıldıktan sonra şişmeye başlar ve suyla doymun hale gelir. Şişme sonrası yeni hacim ölçülür. Şişme sonrası hacim, yine numunenin yüksekliği ve çapı ölçülerek hesaplanır. Elde edilen değerler eşitlik 15’de yerine konarak şişme yüzdesi hesaplanır.

$$\text{Şişme yüzdesi} = \left(\frac{V_f - V_0}{V_0} \right) * 100 \quad (15)$$

V_0 : Başlangıç hacmi (şişmeden önceki hacim),

V_f : Şişme sonrası hacim,

2.3. Birinci Etap Deneyler: Malzeme Deneyleri

Kil malzemelerinin davranışlarını anlamak için, çeşitli analizler ve deneyler yapılır. Bu analizler, malzemenin yapısal ve kimyasal özelliklerini ortaya koyarak, mühendislerin ve bilim insanlarının doğru tasarım ve uygulama kararları almalarına yardımcı olur. Kil malzemelerinin karakterizasyonu, zemin mühendisliğinde önemli bir konu olup, bu malzemelerin mineralojik, kimyasal, indeks ve mekanik özelliklerini belirlemek,

mühendislik uygulamaları ve inşaat projeleri için kritik öneme sahiptir. Bu analizler sayesinde, kilin karakteristik özellikleri hakkında ayrıntılı bilgi elde edilmiş olur.

Birinci etap deneyler malzemelerin karakteristik özelliklerinin belirlenmesine yönelik deneylerdir. Bu kapsamda KTÜ Geoteknik Laboratuvarı'nda "Piknometre", "Kıvam Deneyleri", "Standart Proktor Deneyi", "Serbest Basınç Deneyi", "Kondolidasyon Deneyi" ve "Şişme Deneyleri" gibi bir dizi laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Ayrıca KTÜ Merkezi Laboratuvarı'nda X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), KTÜ Malzeme ve Metalurji bölüm laboratuvarında Lazer Kırınım Yöntemi (Laser Diffraction Method) (Owaid vd., 2014) ile Dane Dağılımı ve Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Labratuvarı'nda ise X-Işını Floresans (XRF) (Owaid vd., 2014) ve SEM (Owaid vd., 2014) analizleri yapılmıştır.

2.3.1. Mineral Özellikleri

Mineral analizleri, kilin içindeki farklı mineralleri tanımlamak ve miktarlarını belirlemek için yapılır. Bu analizler, kilin fiziksel özelliklerini ve dayanıklılığını doğrudan etkileyen mineral bileşenleri hakkında bilgi verir. Kilin mineral bileşimi, şişme, sıkışabilirlik, su emme kapasitesi ve dayanıklılık gibi önemli özellikleri doğrudan etkiler. Örneğin, montmorillonit gibi mineraller yüksek şişme eğilimine yol açarken, kaolinit gibi mineraller daha stabil bir yapı sunar (Yang vd., 2025; Li vd., 2020). Mineral analizi sayesinde, kilin taşıma kapasitesi, suya karşı tepkisi ve yapısal davranışları hakkında doğru tahminler yapılabilir, bu da zemin iyileştirme ve inşaat projelerinde doğru kararların alınmasına yardımcı olur. Bu analizler, yapıların uzun ömürlü ve güvenli olmasını sağlamak için kritik bir rol oynar. Mineral analizler, bir malzemenin kristal yapısını, mineralojik bileşimini ve morfolojik özelliklerini belirlemek için kullanılan X-ray difraksiyonu (XRD) yöntemiyle belirlenir. Bu analiz, numuneye X-ışınları gönderilmesi ve numunenin bu ışınları nasıl kıldığına (difrakte ettiği) bakılması esasına dayanır.

İlk olarak, analiz edilecek malzeme (zemin, kaya, sıvı, metal veya başka bir kristalize materyal) seçilir. Numune, kristal yapıya sahip olmalıdır çünkü XRD, kristalin düzenli yapısından faydalanır. Numune genellikle ince bir toz haline getirilir, böylece yüzey düzgün hale gelir ve X-ışınlarının düzgün bir şekilde dağılması sağlanır. Çünkü numune çok ince toz haline getirilmezse, difraksiyon desenleri bozulabilir. İçerisinde X-ışını kaynağı, dedektör ve numune tutucu bulunan XRD cihazının örnek kısmına düzgün bir şekilde yerleştirilen numuneye belirli bir açıyla X-ışınları gönderilir. X-ışını kaynağı, genellikle

bakır (C_u) veya molibden (M_o) gibi elementlerden yapılmış bir tüpten gelir. Cihazın parametreleri (enerji seviyesi, tarama açısı, analiz süresi vb.) seçilen malzemeye göre ayarlanır. X-ışınları numune yüzeyine çarptığında, numunede bulunan kristal yapıdaki atomlar bu ışınları belirli açılarla kırar (difraksiyon). Difraksiyon olayı, malzemedeki düzenli atom aralıkları nedeniyle gerçekleşir. X-ışınlarının kırılma açıları, malzemenin kristal yapısı hakkında bilgi verir. Farklı mineraller farklı kırılma açılarına sahip oldukları için her mineralin kendine özgü bir XRD deseni vardır. Difrakte olan X-ışınları dedektörler tarafından toplanır. X-ışınının farklı açılarda kırılması, numunede kristalin yapısına ve atom dizilimine bağlıdır. XRD cihazı, bu kırılma desenini ölçer ve kaydeder. Çoğunlukla 2θ (iki theta) adı verilen bir açı aralığında yapılan ölçümlerle, X-ışınlarının kırılma açıları ve yoğunlukları belirlenir.

XRD cihazı, toplanan difraksiyon verilerini dijital formata dönüştürür. Bu veriler, numunede bulunan minerallerin türünü ve oranını belirlemek için kullanılır. Difraksiyon desenleri genellikle bir grafik üzerinde sunulur. Bu grafik, X-ışınlarının yoğunluğunun (piklerin) belirli açıları (2θ) ile ilişkilendirilmiş halidir. Piklerin konumları (2θ değerleri) ve piklerin yoğunlukları, malzemedeki bulunan minerallerin türünü belirlemek için kullanılır. Elde edilen XRD deseni, literatürdeki referanslarla karşılaştırılır. Her mineralin kendine özgü bir difraksiyon deseni vardır ve bu desenler veritabanları aracılığıyla tanımlanabilir. Piklerin konumları, mineralin kristal yapısının özelliklerini, örneğin kristalin aralıklarını ve kristal düzlemlerini gösterir. Sonuçlar, malzemedeki mineral bileşimlerinin tespit edilmesini sağlar. XRD, özellikle çok bileşenli sistemlerde, hangi minerallerin bulunduğunu belirlemek için son derece faydalıdır (Zhou vd., 2018).

2.3.2. Kimyasal Özellikleri

Killi zeminler için kimyasal analiz, zeminin kimyasal bileşenlerini belirlemek amacıyla yapılan testlerdir ve bu testler, killi malzemenin mühendislik özelliklerini anlamak için büyük önem taşır. Kimyasal analiz, kilin içeriğindeki başlıca bileşenlerin (silika, alümina, demir oksit, magnezyum oksit vb.) oranlarını belirler. Bu bileşenler, kilin suya karşı tepkisini, şişme özelliklerini, stabilitesini ve dayanıklılığını etkiler. Kimyasal analizler, bir malzemenin kimyasal bileşenlerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan X-Ray Floresans (XRF) yöntemiyle belirlenir. XRF; özellikle zemin, mineraller, metaller ve diğer malzemelerin elementel bileşimlerini hızlı ve doğru bir şekilde analiz etmek için kullanılır.

Bu yöntem, numuneye X-ışını gönderilerek malzemedeki atomların uyarılması ve bu atomların yaydığı floresan ışınlarının ölçülmesi prensibine dayanır. Bunun için numune, yeterli homojenliği sağlamak amacıyla ince bir toz haline getirilir ve düzgün bir yüzey elde edilmesi için sıkıştırılır. XRF cihazı, belirli elementlerin analiz edilmesi için optimize edilir. Cihazda X-ışınları üreten bir kaynak bulunur. Cihazın parametreleri (enerji seviyesi, analiz süresi vb.) analiz edilecek malzemenin türüne göre ayarlanır. X-ışını kaynağı, malzemeye doğru yönlendirilir. Numune üzerine yüksek enerjili X-ışınları gönderilir. Bu X-ışınları numuneye çarptığında, malzemedeki atomlar uyarılır ve enerji alırlar. Uyarılan atomlar daha sonra karakteristik floresan ışınları yayar. Her element, kendine özgü bir floresan ışın enerjisi yayar, bu da her bir elementin benzersiz bir "parmak izi" oluşturmalarını sağlar. Yayınlanan floresan ışınları, dedektörler tarafından ölçülür. Bu ışınlar, malzemede bulunan elementlerin türünü ve konsantrasyonlarını belirlemek için analiz edilir. Cihaz, bu verileri kullanarak numunede bulunan her elementin miktarını hesaplar. XRF cihazı, her elementin yoğunluğunu ve oranını hesaplayarak bir rapor sunar. Bu rapor, numunedeki elementlerin türlerini ve konsantrasyonlarını gösterir. Analiz edilen elementler arasında Silika (Si), Alümina (Al), Demir (Fe), Kalsiyum (Ca), Magnezyum (Mg), Potasyum (K), Sodyum (Na) gibi önemli elementler yer alır.

2.3.3. Fiziksel (İndeks) Özellikleri

Alt başlık 2.2’de Laboratuvar deneyleri kısmında genel olarak laboratuvar deneylerinin standartlara uygun olarak nasıl yapılması gerektiğinden bahsedilmişti. Burada ise tez kapsamında, malzemelere ait indeks özelliklerini belirleyen deneylerin nasıl gerçekleştirildiğine dair bilgi ve görseller paylaşılacaktır.

Deneyler Karadeniz Teknik Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin öğütülmesi aşamasında gerekli hallerde KTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Üretim Metalurjisi Laboratuvarı’ndan yardım alınmıştır. Deney sonuçlarının objektifliği ve deneyler süresince meydana gelebilecek olası hataların minimuma indirilmesi açısından deneyler en az üç defa titizlikle tekrarlanmış ve birbirine en yakın iki sonuç anlamlı değer olarak kabul edilmiştir. Kaolen, Bentonit ve içme suyu arıtma tesisi atık çamur malzemelerin indeks özelliklerini belirlemek amacıyla dane dağılımı analizi, piknometre (TS 1900-1), kıvam limiti (TS 1900-1), standart proktor (TS 1900-1), serbest basınç ve konsolidasyon deneyleri yapılmış ayrıca malzemelere ait şişme basıncı ve

şışme yüzdesi değerleri bulunmuştur. Malzemelere ait dane dağılımları KTÜ Malzeme ve Metalurji Bölümü'nde lazer kırınımı analiz metodu ile bulunmuştur. Lazer kırınımı, boyutları yüzlerce nanometreden birkaç milimetreye kadar değişen malzemeler için yaygın olarak kullanılan bir parçacık boyutlandırma tekniğidir. Geleneksel boyutlandırma tekniklerinden daha hızlı, daha basit ve daha iyi çözünürlüğe sahip olması nedeniyle oldukça tercih edilen bir yöntemdir.

Lazer kırınım yöntemiyle zeminlerin dane büyüklüğü dağılımını belirlemeye yönelik araştırmalar, ilk olarak 1980'li yıllarda başlamış ve 2000'li yıllarda da hız kesmeden devam etmiştir. Bu alanda öne çıkan birçok araştırmacı ve çalışma bulunmaktadır (Wen vd., 2002; Vitton ve Sadler, 1997; Beuselinck vd., 1998; Konert ve Vandenberghe, 1997; Murray, 2002; Buurman vd., 1997; McCave vd., 1986; Chappell, 1998; Eshel vd., 2004; Muggler vd., 1997; Loizeau vd., 1994; Pabst vd., 2000).

Söz konusu çalışmaların büyük bir bölümü, lazer kırınım yöntemiyle elde edilen sonuçların elek ve hidrometre yöntemleriyle karşılaştırılmasına odaklanmıştır. Bu sayede her iki yöntem arasındaki benzerlikler ve farklılıklar ortaya konmuş, lazer kırınım yönteminin daha hızlı ve etkili bir analiz sağlayıp sağlamadığı araştırılmış ve bu yönde olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Kaolen, Bentonit ve tesislerden elde edilen içme suyu arıtma tesisi atık çamur malzemelerinin kıvam limiti deneylerinde likit limitleri (w_L) değerleri Casagrande deneyi ile belirlenmiştir. Deney malzemeleri Şekil 53'te gösterilmiştir.



Şekil 53. Casagrande deney malzemeleri

Plastik limit deneyi için likit limit belirleme aşamasında hazırlanan malzemeden bir miktar ayrılmış ve el ayağı yöntemi kullanılmıştır (Şekil 54). Rötire limiti (w_R) değerleri ise plastisite kartından hareketle yaklaşık yöntem (Holtz ve Kovacs, 1981) ile bulunmuştur.



Şekil 54. Plastik limit deneyi silindir çubuklar

Piknometre deneyi öncesi malzemeleri için piknometre şişeleri hazır edildi ve tartılarak ağırlıkları belirlendi. Kil ve atık çamur malzemelerine ait etüv sonrası malzemeler piknometre içerisine kondu ve hassas terazi ile tartıldı. Bu işlem sonucu piknometre + malzeme ağırlığı belirlenmiş oldu. Daha sonra içerisinde malzeme bulunan piknometre şişesi içerisine içerisindeki malzemeyi örtecek kadar su eklendi. İçerisindeki havanın dışarı çıkması için hafifçe sallanarak vakumlama işlemi yapıldı. Bu işlemin ardından içerisine işaret çizgisine gelecek tekrar su eklendi (Şekil 55).



Şekil 55. Piknometre deneyi aşamaları

Mevcut durumundaki (Piknometre şişesi + zemin + su) ağırlığı ölçülerek not edildi. Bu işlemlerin ardından piknometre içerisindeki malzemeler boşaltılarak piknometre üzerindeki işaretli çizgiye kadar yalnızca su doldurularak tartım yapıldı. Bu işlemle dikkatli

bir şekilde en az üç defa her bir malzeme için tekrarlanarak ortalama değeri alındı. Elde edilen değerler eşitlik 2’de yerine konularak her bir malzemeye ait yaklaşık piknometre (G_s) değerleri elde edildi.

Malzemelere ait standart proktor deneyi için Şekil 56’da gösterilen deney malzemeleri kullanıldı. Deney, “A” kullanım şartını sağlayan malzeme deney kalıbı ile gerçekleştirildi. Deneyin gerçekleştirilmesi için yaklaşık 3 kg kadar malzeme geniş bir leğen içerisine konarak belirli bir miktar su ile birlikte homojen bir karışım sağlanana kadar iyice karıştırıldı. Kalıp, taban plâkası takılmış halde tartılarak kaydedildi (M_1). Daha sonra belirli su muhtevasında karıştırılmış zemin, düz bir beton zemin üzerinde yakası takılmış haldeki kalıbın içerisine yerleştirilerek her aşamaya 25 vuruş darbesi ile 305 mm serbest düşüş yapan tokmakla her noktaya eşit darbe yapılacak şekilde sıkıştırıldı.



Şekil 56. Standart proktor deney aleti

Kullanılan zemin miktarı, kalıbı doldurmaya yetmeli, ancak sıkıştırılıp yaka çıkarıldıktan sonra kesilip atılacak artık zemin yüksekliği 6 mm’yi aşmamalıdır. Yaka çıkarılır ve sıkıştırılmış zemin, çelik cetvelle, kalıbın üst kenarı düzeyinde dikkatle düzlendi. Kalıp ve zemin, 1 g duyarlılıkla tartıldı (M_2) (Şekil 57). Kalıp + zemin ağırlığından kalıbın ağırlığı çıkarılarak zemin ağırlığı belirlendi. Ağırlık kalıp hacmine oranlanarak zeminin mevcut su muhtevası değerlerindeki birim hacim ağırlığı bulundu. Ardından mevcut durumdaki su muhtevasına ait olan kuru birim hacim ağırlık değeri hesaplandı. Bu işlem değişen her su muhtevası değeri için tekrarlanarak Şekil 59’daki proktor grafiği çizildi.



Şekil 57. Zeminin kalıba yerleştirilmesi ve tartılması

Zemin kriko yardımı ile kalıptan çıkarılır. En az 3 farklı noktasından bir miktar numune örneği alınarak su muhtevası değeri hesaplanır (Şekil 58).



Şekil 58. Zeminin kalıptan çıkarılması ve su muhtevası tespiti

Geriye kalan malzeme tekrar deneye hazır hale gelecek şekilde ufalanır, elekten geçirilir ve bir miktar daha su eklenir. Bu aşamadan sonraki adımlar ilk şamadaki ile aynı olarak ilerlemektedir. Bu şekilde deney en az beş defa tekrar edilerek su muhtevasının artmasına bağlı olarak artan M_2 değerinin düşmesi beklendi. Çünkü bu değer düşmesi demek w_{opt} değerinin aşıldığı anlamına gelmektedir. Elde edilen değerler deney formuna işaretlenerek bir grafik oluşturuldu. Bu grafiğin tepe noktası standart proktor parametreleri olan γ_{kmaks} ve w_{opt} değerlerini vermektedir (Şekil 48).

Serbest basınç deneyleri için piyasada 50 cm çap ve 100 cm boya sahip ikiye ayrılabilir yarı silindirik çelik numune hazırlama kalıbı (Şekil 60a) yaptırılmıştır. Numune kalıbı 5 adet parçadan oluşmaktadır. Bunlar; silindirik kalıp üzerinde malzemenin daha iyi

sıkıştırılmasına yardımcı olması için 5 cm yüksekliğe sahip ayrıca bir başlık (Şekil 59b), yarık silindirik çelik kalıbın oturacağı bir tabla (Şekil 60c), yarık silindiri bir arada tutmaya yarayan alt ve üst bilezik (Şekil 59d) ve zemini kalıba yerleştirmeye yarayan bir adet silindirik tokmaktır (Şekil 59e).



Şekil 59. Serbest basınç deney numune kalıbı ve parçaları

Deney için hazırlanan atık çamur malzemeler #200 elek yani 0,075 mm açıklığa sahip elekten geçebilecek şekilde öğütüldü. Bunun nedeni atık çamur malzemesinin 0,425mm elekten elendiğinde kil malzemelerine oranla yüksek dane çapına sahip olması ve deneylerde objektif karışım elde edilememesinden kaynaklı deneylerden verimli sonuçların alınmamasıdır. Böylece kil ve atık çamur malzemelerinin belli oranlarda karıştırılarak hazırlanan yapay numunelerinde, atık malzemeler ile piyasadan temin edilen oldukça küçük dane çapına sahip kil malzemeler homojen olarak karışabilmiştir. Kalıba girecek malzeme ağırlığı belirlendikten sonra kalıba 3 aşamada ve eşit tabaka kalınlığında yerleştirebilmek için toplam malzeme 3 ayrı kaba paylaştırıldı. Öncelikle yarık şeklindeki numune kalıp yağlanarak birleştirildi. Daha sonra üst ve alt bileziği takılarak kalıp tablasına oturtuldu. Daha sonra yakası takılarak birinci kaptaki zemin, numune kalıbına konup, 3 ayrı kaptaki zemin girecek ölçüsünde uygun sıkıştırma işlemi uygulandı.



Şekil 60. Yarık silindirik çelik tüp seti ile hazırlanan numune örnekleri

Daha sonra kalan 2/3 lük kısım da aynı şekilde kalıba yerleştirildikten sonra kalıp başlığı çıkarılarak, kalıp dışına çıkan kısımlar tıraşlanarak düzeltildi (Şekil 60). Kriko yardımı ile numune kalıptan çıkarılarak ağırlığı 0.01 g hassasiyete boyutları 0,1 mm doğrulukla ölçüldü.



Şekil 61. Malzemenin kriko ile kalıptan çıkarılışı (a), Numunenin serbest basınç deney aletine yerleştirilmesi (b)

Burada kalıptan çıkan malzemenin tartılmasının nedeni içerisine girmesi gereken malzemenin ne kadarının girebildiğini ölçebilmektir. Numune vakit kaybedilmeden Şekil 61’de görülen presin alt platformuna merkez konumuna yerleştirilerek numune üst noktası presin üst kısmına değecek şekilde yukarı kaldırıldı. Numuneye 0,85mm/dk hızla yükleme işlemi uygulanarak düzenli olarak deformasyon ve kuvvet halkası okumaları alındı ve föye kaydedildi. Deney sonunda yükleme durduruldu ve yük geri boşaltılarak numune yüzeyindeki kırılma durumu fotoğraflandı (Şekil 62).



Şekil 62. Yükleme sonrası numunedeki kırılma durumu

Yükleme sonrası numune ağırlığı tartılarak kaydedildi. Boş bir kap içerisinde 3 parçaya ayrılan numunenin her parçasından birer örnek alınarak su muhtevası değerleri hesaplanmak üzere etüve kondu (Şekil 63). Etüvden çıkan parçalardan su muhtevası değerleri hesaplandıktan sonra SEM ve EDS analizlerine gönderilmek üzere paketleni. Deneyler sonucu elde edilen veriler deney föyüne işlenerek serbest basınç grafikleri çizildi.



Şekil 63. Malzemelerin etüve konması

Konsolidasyon deneyleri öncelikli olarak Karadeniz Teknik Üniversitesi Geoteknik laboratuvarında yapılmış fakat elde edilen sonuçların verimli olmamasından dolayı gerekli kalibrasyonların eksik olduğu düşünülerek özel bir işletmeden yardım alınarak standarda uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney için öncelikle belirlenen etkili atık oranları kullanılarak serbest basınç numuneleri hazırlandı.



Şekil 64. Konsolidasyon halkasına numunelerin yerleştirilmesi

Hazırlanan numuneler uygun şekilde yüksek nitelikte paslanmaz çelikten veya kaplanmış çelikten yapılmış bir ucu keskin konsolidasyon halkası içerisine yerleştirildi (Şekil 64). Daha sonra içerisinde malzeme bulunan halkalar konsolidasyon hücresi içerisine yerleştirilerek deneye hazır hale getirildi (Şekil 65). Bu aşamada standartlara uygun olarak numunenin ilk olarak şişme basıncı bulunmuş ve deney devam ettirilerek konsolidasyon deneyi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 65. Konsolidasyon deney aleti

2.4. İkinci Etap Deneyler: Atık Oranları Etkisi Deneyleri

Birinci etap deneyler sonucunda kil malzemelerin ve arıtma tesisi atık çamurlarının karakterizasyon özellikleri belirlenmişti. Dolayısı ile bu etapta gerçekleştirilecek deneyler ile karakterizasyonları belirlenen kil malzemeler üzerinde, arıtma tesisi atık çamurlarının farklı oranlardaki etkileri değerlendirilmiştir. Bu amaçla düşük plastisiteli (CL) ve yüksek plastisiteli kil (CH) olarak belirlenmiş iki ana kil malzemesi üzerinde atık oranlarının değişim etkileri incelenmiştir. Atık malzemeler %5-10-20-30 ve 50 oranlarında CL ve CH olmak üzere iki farklı ana malzeme ile karıştırılarak serbest basınç mukavemet

değerlerindeki değişimleri belirlenmiş ve zeminlerin stabilizasyonu açısından en etkili atık yüzdesine karar verilmiştir. Böylece en etkili oranlar kullanılarak gerçekleştirilecek 3. ve 4. etaplardaki deneylerde hem atık malzeme hem de zaman açısından oldukça tasarruf sağlanmıştır. Farklı atık oranlarının CL ve CH olmak üzere iki farklı plastisiteye sahip malzeme üzerindeki değişimleri sonucunda hangi atık oranlarının diğerlerine göre daha etkili sonuç verdiğine karar verilerek 3. ve 4. etap deneyler bu oranlara göre gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar “Bulgular ve Tartışma” bölümünde tablo halinde verilmiştir.

2.5. Üçüncü Etap Deneyler: Kür Deneyleri

Bu etapta, ikinci etap deneyler sonucunda belirlenen en etkili atık oranları kullanılarak küre bırakılacak deney numuneleri hazırlandı. Bunun için #200 nolu elek altı Esiroğlu İ.S.A.T.A.Ç atığı malzemesi kullanıldı. Hazırlanan tek eksenli basınç deney numuneleri tartılarak başlangıç ağırlıkları belirlendi. Daha sonra numunelerin üzerine atık oranı, kür süresi, deney no ve tarih bilgileri yazılı etiketler konularak numunelerin su muhtevalarını korumaları için ayrı ayrı streçlendi (Şekil 66).



Şekil 66. Atık çamur malzemesi ve kür numuneleri

Streçlenen ve etiketlenen kür numuneleri desikatörlere yerleştirilerek 7 gün (7G), 15 gün (15G), 30 gün (30G) ve 60 gün (60G) ve 360 gün olmak üzere 5 farklı kür süresi boyunca hava almayacak şekilde izole edildi (Şekil 67).



Şekil 67. Küre bırakılan deney numuneleri

K r süresi sonunda deney malzemelerine ait serbest basınç mukavemeti deneyleri yapılarak k r sürelerinin zemin numuneleri üzerindeki etkileri incelendi. Deney numuneleri k r süresi sonunda desikat rlerden alınarak k r süresi boyunca değişimleri belirlemek üzere ağırlık bilgileri not edildi. Daha sonra tek eksenli deney aletine yerleştirilen örnekler burada deneye tabi tutuldu. Deney sonrası numune üzerinde gerilmenin meydana getirdiği değişimleri belirlemek üzere numune değişik açılardan defalarca fotoğraflandı. Bu aşamadan sonra numunelerin ağırlığı tekrar ölçülüp, su muhtevası değerlerini belirlemek üzere etüve konuldu (Şekil 68).



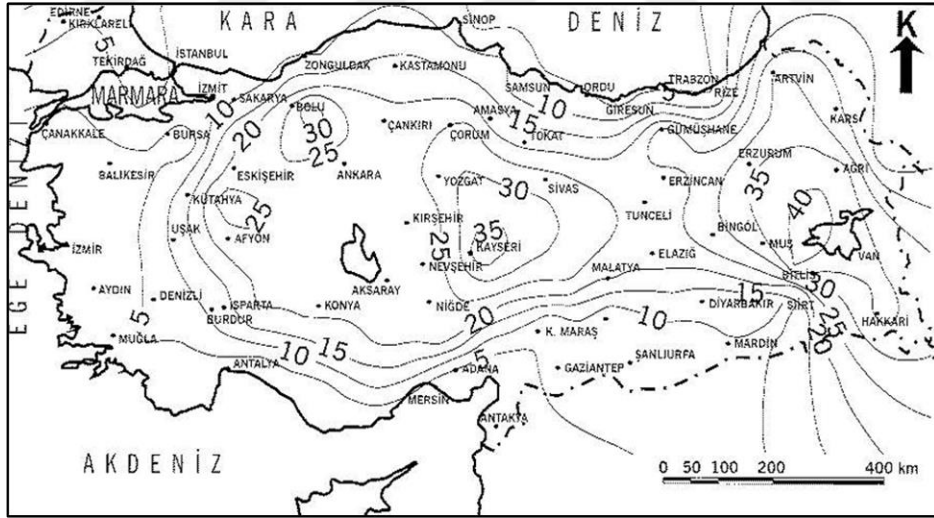
Şekil 68. Serbest basıncı deneyi ve sonrasında malzemelerin etüve konulması

Ek olarak mikro yapıdaki değişimleri takip etmek için SEM (Scanning Electron Microscopy) analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM analizlerine ilave olarak, XRF analizleri yapılmıştır.

2.6. Dördüncü Etap Deneyler: Donma-Çözülme Deneyleri

Ülkemiz, dört mevsimin belirgin şekilde yaşandığı ve çeşitli iklim tiplerinin görüldüğü karmaşık bir coğrafyada yer almaktadır. Bu nedenle özellikle iç kesimlerde karasal iklimin etkisiyle kış aylarında donma ve çözülme döngüleri sıkça meydana gelmektedir. Bu döngüler, özellikle kil içerikli zeminlerde dayanım özelliklerinin ve taşıma kapasitesinin zamanla azalmasına neden olabilir. Bu durum, yapıların uzun vadeli performansını olumsuz etkileyebileceğinden, killi zeminlerin iklimsel koşullara karşı dayanıklılığını belirlemeye yönelik donma-çözülme deneyleri büyük önem taşımaktadır.

Türkiye'deki donma-çözülme periyotlarını gösteren harita ise Şekil 69'da sunulmaktadır (Binal, 1996; Ayyıldız, 2003). Buna göre bölgelerin iklim durumlarına göre maruz kaldıkları çevrim sayıları harita üzerinde yer almaktadır. Buna göre Trabzon ili için bakıldığında çevrim sayısının 5 ve en yakın civar illerde 10 olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmada da çevrim sayıları 1-3-5-7 ve 11 çevrim olarak ele alınmıştır (Zaimoğlu vd., 2013).



Şekil 69. Türkiye için hazırlanmış eş donma-çözülme haritası (Binal,1996; Ayyıldız, 2003)

Bu etapta, ikinci etap deneyler sonucunda belirlenen en etkili atık oranları kullanılarak hazırlanan örnek numuneler üzerinde donma çözülme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Donma çözülme deneyleri Karadeniz Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği, Uygulamalı Jeoloji Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deneylerin gerçekleştirileceği laboratuvar da donma-çözülme işlemlerini gerçekleştirecek cihaz UTEST firmasına ait iklimlendirme kabini

bulunmaktadır. İklimlendirme kabini, dikey olarak dizayn edilmiş ve kapağı üzerinde kabin sıcaklığını, numune sıcaklığını, program ısıtma-soğutma ve bekletme zamanlarını ayarlama gibi program bilgilerini gösteren bir led ekrana sahiptir (Şekil 70).



Şekil 70. İklimlendirme kabini

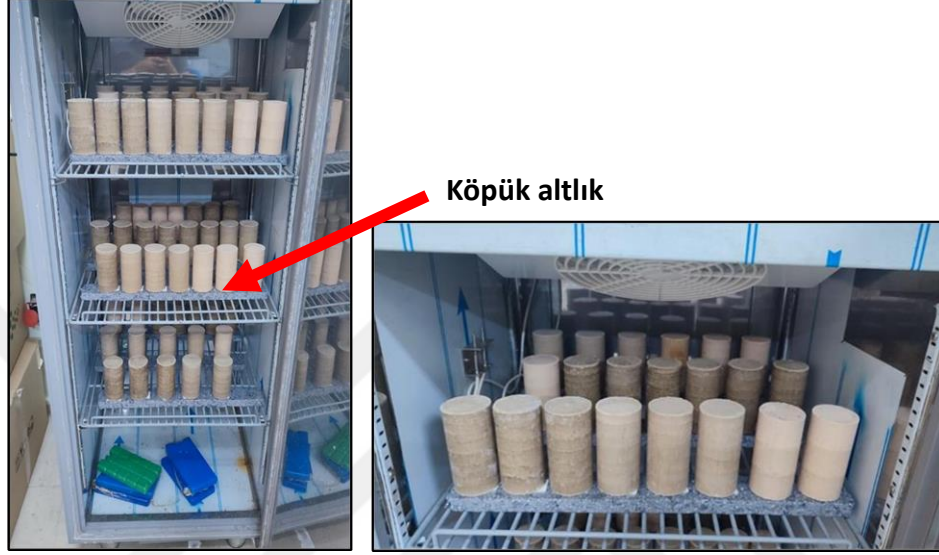
Etkili atık yüzdeleri olan %10-30 ve 50 oranlarındaki atık malzemesi ile hazırlanan CL ve CH zeminleri hazırlanmış ve aynı anda konulmak üzere su muhtevasını muhafaza edecek şekilde paketlenmiş (Şekil 71) ve deney vakti donma-çözülme kabini içerisine özenle yerleştirilmiştir (Şekil 72).



Şekil 71. İklimlendirme kabinine konacak numuneler

Kabin içerisi 3 adet tel ızgaralı raflardan oluşmaktadır. Ayrıca kabin içerisinde sıcak ve soğuk hava akışını sağlamak adına bir fan ve kabin içerisindeki havanın derecesini ölçen

sensörler bulunmaktadır. Izgaraların deney numunelerine zarar vermemesi ve aynı zamanda kabin içerisindeki havanın akışını da bozmamak için sadece numunelerin dizildiği sıra kalınlığında numune dizisinin altına köpük altlıklar konuldu. Böylece numuneler düz bir zemin üzerinde hasarsız olarak çevrime maruz bırakıldı.



Şekil 72. Malzemelerin iklimlendirme kabinine yerleştirilmesi

Kabine yerleştirilen numuneler burada 1.Çevrim (1Ç), 3. Çevrim (3Ç) Ç, 5. Çevrim (5Ç), 7. Çevrim (7Ç) ve 11. Çevrim (11Ç) olmak üzere 5 adet çevrime tabi tutulmuştur. Her bir çevrim 6 saat $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 6 saat $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda bekletilmesi işlemi bir çevrim olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Çevrim sıcaklıkları literatür çalışmalarına uygun olarak belirlenmiştir (Çoban vd., 2019). Bekletilen çevrimler sonucunda donma-çözülme kabininden çıkarılan malzemeler serbest basınç deneyine tabi tutularak mukavemet değerlerindeki değişimler belirlenmiştir. Tek eksenli deneyi için laboratuvarında bulunan 200 ton kapasiteli tek eksenli ve üç eksenli deneylerin yapımına uygun hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 73).



Şekil 73. Serbest basınç deney aleti

Ayrıca malzemelerin ilk ağırlıkları belirlenerek çevrimler sonucunda hem kabin içerisinde meydana gelen çevrimler sonucu kaybedilen su muhtevasına bağlı ağırlık kaybı hem de numunelerin kabin sonrası numunelerin kırılması sırasındaki malzeme ağırlık kayıp yüzdeleri belirlenmiş ve elde edilen veriler “Bulgular ve Tartışma” kısmında verilmiştir. Ek olarak mikro yapıdaki değişimleri takip etmek için SEM (Scanning Electron Microscopy) analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM analizlerine ilave olarak genellikle taramalı elektron mikroskopları (SEM) ile entegre çalışan EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) analizleri yapılmak istenmiş fakat hafif elementleri analzi etmede zayıf olması, genelde vakum altında çalışması ve mikron seviyesinde nokta analizi yapması gibi özellikleri yönünden XRF analizi tercih edilmiştir. Özellikle mikron seviyesinde nokta analzi yapması belli oranlarda atık malzemeler ile hazırlanan numunelerin, yeterli homojen karışıma sahip olduğu bilinemediğinden analizlerde seçilen farklı noktalardan elde edilen sonuçların numunenin tamamını yansıtamayacağı düşünülerek daha genel tarama sonuçlarını içeren XRF analizleri sonuçların güvenilirliği açısından daha mantıklı bulunmuştur. XRF analizleri bağımsız cihazlar olup makro ölçekli daha derin analizler yaparak hafif ve ağır elementler geniş aralıkta tespit edilebilir.

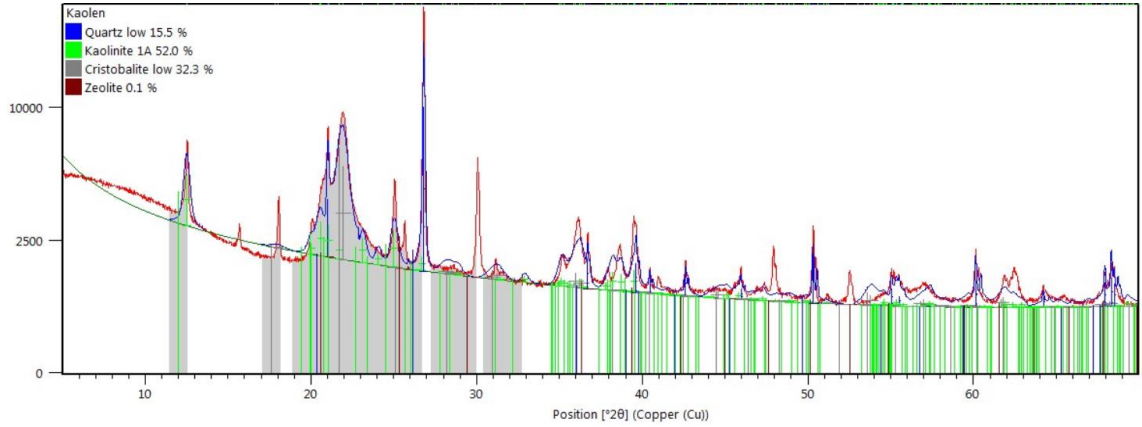
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bulgular ve tartışma bölümü, araştırma sürecinde elde edilen deney ve analiz sonuçlarının detaylı bir şekilde sunulduğu, bu sonuçların değerlendirildiği kısımdır. Bu bölümde, yapılan çalışmalara ait her bir çıktı, araştırma sürecinde kullanılan yöntemler doğrultusunda toplanan veriler, tablolar, grafikler veya diğer görsel araçlar ile desteklenerek sistematik bir biçimde açıklanmıştır.

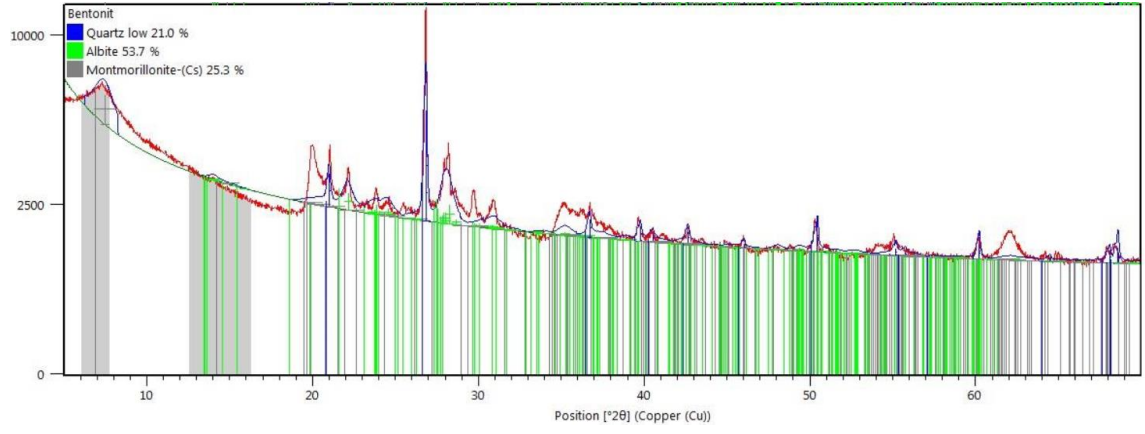
3.1. Kil ve Farklı Tesislere Ait Atık Çamur Malzemelerinin Karakterizasyonu

3.1.1. Mineral Özellikleri

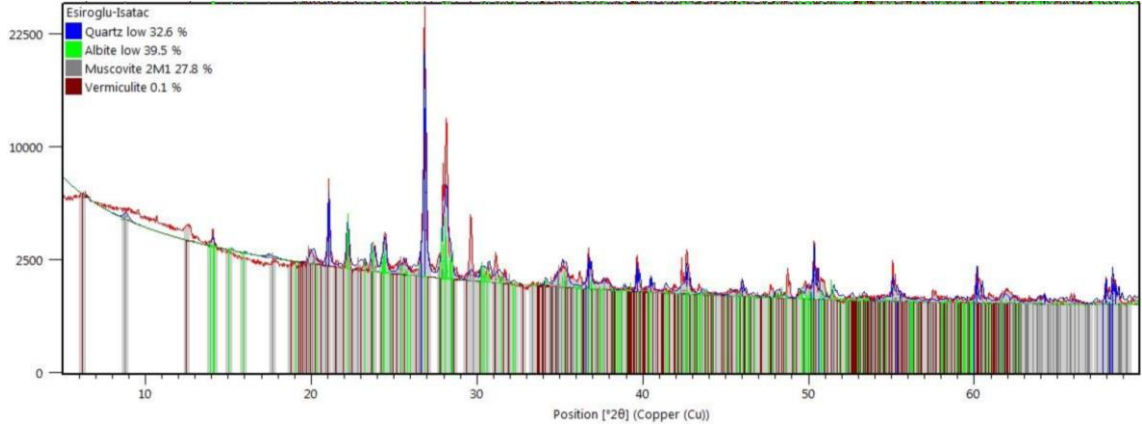
Kil malzemelerinin ve atık çamurlarının minerolojik özelliklerini belirlemek amacıyla Karadeniz Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda XRD Mineral Analizi gerçekleştirilmiştir. Malzemelere ait analiz sonuçları her bir malzeme için aşağıda verilmiştir (Şekil 74-75-76-77-78).



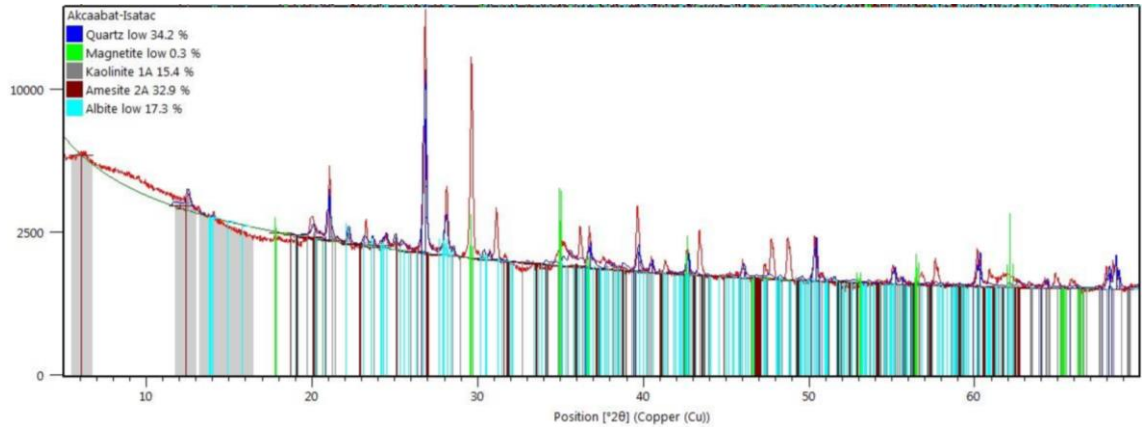
Şekil 74. Kaolen XRD analiz sonuçları



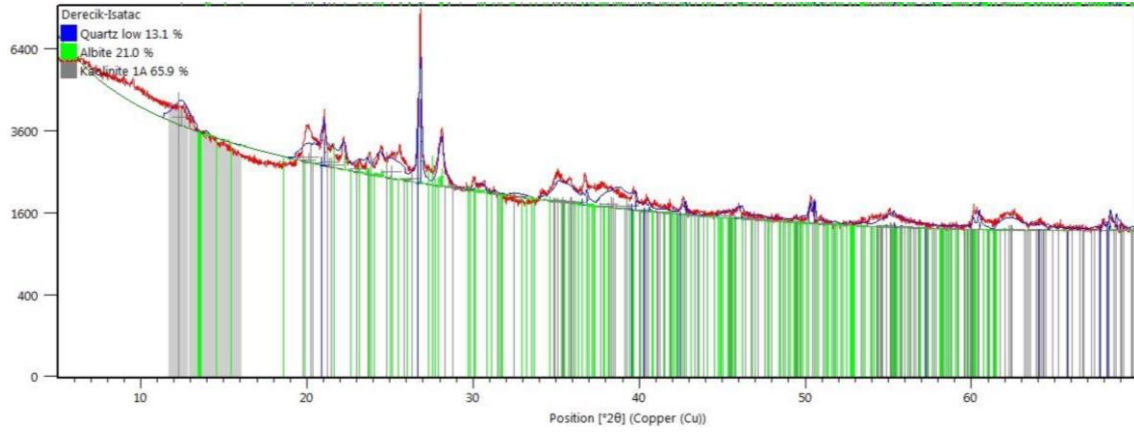
Şekil 75. Bentonit XRD analiz sonuçları



Şekil 76. Esiroğlu XRD analiz sonuçları



Şekil 77. Akçaabat XRD analiz sonuçları



Şekil 78. Derecik XRD analiz sonuçları

XRD analizleri sonucunda Kaolen kil örneğinde %15,5 Kuvars, %52 Kaolinit ve %32,3 oranında Kristobalit mineralleri tespit edilmiştir. Bentonit kiline yönelik yapılan XRD analizleri sonucunda, örnek içerisinde %21 Kuvars, %53,7 Albit ve %25 oranında Montmorillonit mineralleri tespit edilmiştir. Esiroğlu İçme Suyu Arıtma Tesisi'nden alınan atık çamur örneğine uygulanan XRD analizi sonucunda, %32,6 düşük Kuvars, %39,5 düşük Albit ve %27,8 oranında Muskovit mineralleri tespit edilmiştir. Akçaabat İçme Suyu Arıtma Tesisi'nden elde edilen atık çamur örneğine uygulanan XRD analizi sonucunda, %34,2 düşük Kuvars, %15,4 Kaolinit, %32,9 Amesit ve %17,3 oranında düşük Albit mineralleri tespit edilmiştir. Derecik İçme Suyu Arıtma Tesisi'nden alınan atık çamur örneği üzerinde gerçekleştirilen XRD analizi sonucunda, örnekte %13 düşük Kuvars, %21 düşük Albit ve %65,9 oranında Kaolinite mineralleri tespit edilmiştir (Tablo 9).

Tablo 9. Kil zeminlerine ve atık çamurlarına ait XRD analiz sonuçları

	Kaolen	Bentonit	Esiroğlu	Akçaabat	Derecik
Amesit	-	-	-	32,9	-
Kaolinit	52	-	-	15,4	65,9
Kuvars	15,5	21	-	-	-
Kristobalit	32,3	-	-	-	-
Kuvars	-	-	-	-	-
Düşük Kuvars	-	-	32,6	34,2	13
Albit	-	53,7	-	-	-
Düşük Albit	-	-	39,5	17,3	21
Montmorillonit	-	25	-	-	-
Muskovit	-	-	27,8	-	-

Analiz sonuçlarında malzemeler üzerinde bulunan mineraller, Kuvars, Kaolinite, Kristobalit, Albit, Montmorillonite, Muskovit, Amesit mineralleridir. Öncelikle Kuvars, yer kabuğunda en yaygın bulunan minerallerden biri olup, özellikle sert ve aşınmaya karşı dirençli oluşu nedeniyle inşaat mühendisliği açısından oldukça önemli bir mineraldir. Kil malzemeleri ya da atık çamurlarında bulunması, malzemenin mekanik dayanıklılığını, kimyasal kararlılığını, fiziksel stabilitesini ve sıcaklık direncini artırabilir. Kuvars daha düşük kimyasal dayanıma sahip olup düzgün olmayan kristal yapı gösterir (Khan vd., 2023; Hernández-Carrillo., 2022).

“Kaolinit”, inşaat mühendisliği açısından, stabilite sağlayan, düşük plastisite ve şişme kapasitesine sahip bir mineraldir. Su geçirimsizliğini azaltma, düşük şişme kapasitesine sahip olma ve yüksek sıcaklıklara dayanma gibi özelliklerle de inşaat mühendisliği projelerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Şengöz, 2006).

“Kristobalit”, çok yüksek sıcaklıklarda oluşan bir silika (SiO_2) formu olup plastisite göstermez, yani su ile hacimsel şişme yapmaz. Kristobalit’in kaolen kil matrisi içinde tespit edilmesi, zeminin düşük plastisiteli ve düşük şişme potansiyelli karakterini desteklemekte; aynı zamanda sıkıştırılabilirliği azaltarak daha rijit bir yapı kazandırmaktadır. Ancak, bu mineralin kırılgan yapısı nedeniyle zeminin çekme dayanımı düşebilir ve gevrek kırılma davranışı gösterebilir (Aras ve Kristaly, 2019).

“Albit”, alkali feldispatlar arasında ayrılmaya en dirençli olanlardan biridir. Su ile etkileşime girmeyen Albit, plastisite özelliği göstermeyen, sert ve kristalin yapıda bir feldspat mineralidir. Albitin, “Düşük Albit” ve “Yüksek Albit” olarak adlandırılan iki çeşidi vardır. High albit, yüksek sıcaklıkta kararlı, daha simetrik, düşük albit düşük sıcaklıkta kararlı, daha az simetriktir. Düşük Albit minerali, mekanik olarak dayanıklı, şişmeyen ve kimyasal olarak inert bir yapıya sahiptir (Wang-hong ve Kirkpatrick, 1989). Bu özellikleriyle kil zeminlerin stabilizasyonunda fiziksel katkı malzemesi olarak kullanılabilir. Şişme riskini azaltır, taşıma kapasitesini artırabilir ve kompaksiyonu iyileştirebilir. Özellikle AÇ-1 malzemesinde %40 seviyelerinde olması AÇ-1 malzemesinin zeminde stabilizatör olarak kullanılmasını destekleyici nitelikte olabilir.

“Montmorillonit”, su ile temas ettiğinde kristal yapısına su alır ve şişerek hacmini büyük ölçüde artırır. Geoteknikte “şişen zemin” olarak sınıflandırılır ve özel tasarım gerekir. Montmorillonit içeren bentonit, çok yüksek plastik limitlere ve likit limitlere sahiptir ($w_L > 100$). Zemin stabilitesi ve taşıma kapasitesi bakımından zayıf bir zemin oluşturur. Bentonit kilinde montmorillonit mineralinin bulunması, zeminin çok yüksek plastisite, su

tutma kapasitesi ve şişme potansiyeline sahip olduğunu gösterir. Bu tür zeminler, mühendislik uygulamaları açısından özel dikkat gerektirir; özellikle hacim değişimi ve düşük dayanım özellikleri, temel tasarımı ve oturma analizlerinde kritik rol oynar (Angın ve Angın, 2005).

“Muskovit”, mika grubuna ait, yapraklı yapıya sahip bir silikat mineralidir. Muskovitin tabakalı yapısı, su akışını engelleyerek zeminlerde düşük geçirgenlik oluşturabilir. Muskovit, smektit veya montmorillonit gibi şişen kil mineralleri kadar su tutup hacim değiştirmez (Jia vd., 2015). Şekil 3’te görüldüğü üzere AÇ-1 malzemesi Çağlayan Formasyonu’nda yer almaktadır. Çağlayan Formasyonu’nun Geç Santoniyen–Erken Kampaniyen döneminde oluşan volkanik ve volkanoklastik kayaçları, bölgedeki yoğun tektonik ve magmatik aktiviteye bağlı olarak yaygın hidrotermal alterasyona uğramıştır. Bu alterasyon süreçleri sırasında potasyum ve alüminyum açısından zengin ortamlarda muskovit oluşumu kolaylaşmıştır. Çünkü Muskovit, magmatik kayaçların bileşimine ortalama %1,4 oranında katkıda bulunan önemli bir kayaç oluşturan mineraldir (Bernard ve Rost, 1992). Özellikle tuf, lav ve aglomera gibi kayaçların alterasyonu sırasında feldispat minerallerinin bozulması muskovit üretimine neden olmuş olabilir.

“Amesit” minerali, klorit grubu içerisinde yer alan bir filosilikat olup, genellikle magnezyum ve alüminyumca zengin bir yapıya sahiptir. Amesit mineralinin zeminde bulunması, düşük şişme potansiyeli ve sınırlı plastisitesi nedeniyle, hacim değişimlerinin kontrolünde ve oturma davranışının yönetilmesinde geoteknik açıdan avantaj sağlar. Ancak tabakalı yapısı nedeniyle anizotropik kayma davranışı gösterebilir (Stănciuc ve Dogaru, 2024). Bu nedenle, Amesit içeren zeminler, drenaj kapasitesi ve kesme dayanımı açısından projeye özel olarak değerlendirilmelidir. Bu anlamda Amesit oranı %33 olan AÇ-2 malzemesi zemin stabilizasyonu açısından potansiyel bir sorun teşkil edebilir.

XRD analiz sonuçları atık çamurdaki ana minerallerden biri olan büyük miktarda kuvars (SiO_2) ile birlikte kaolinit ve mika varlığını göstermektedir ki bu da atık çamur üzerine yapılan diğer çalışmalarla benzerlik göstermektedir (Awab vd., 2012; Monteiro vd., 2008). Aynı zamanda malzemelere ait minerolojik analizler sonucu Kuvars mineralinin varlığı malzemenin amorf bir silika yapısına sahip olduğunu göstermektedir (Owaid vd., 2014). Nitekim Tablo 10’da XRF (X-Işını Floresans) analizleri sonucu malzemelere ait SiO_2 oranları açıkça görülmektedir.

3.1.2. Kimyasal Özellikleri

Kil ve atık çamur malzemelerinin kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda XRF analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları Tablo 10'da gösterilmiştir.

Analiz sonucunda dikkate alınacak mineraller Fe_2O_3 , CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO mineralleri olup tabloda farklı renklerde işaretlenmiştir. Özellikle tüm malzemelerde Si ve Al elementleri yüksek yüzdeye sahiptir. Kil minerallerinin doğası gereği, Si ve Al zaten ana yapısal bileşenlerdir. Atık çamurlarda bu bileşiklerinin tespit edilmesi, muhtemelen içme suyu arıtımında yaygın olarak kullanılan koagülantın alüminyum sülfat ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Owaid vd., 2014; Duc ve Phong, 2022).

Tablo 10. Kil malzemeler ve atık çamurlarına ait XRF analiz sonuçları

	Bentonit	Kaolen	AÇ-1 (Esiroğlu İ.S.A.Ç.)	AÇ-2 (Akçaabat İ.S.A.Ç.)	AÇ-3 (Derecik İ.S.A.Ç.)	Literatür Alüm Çamuru (Owaid vd.)
% Fe_2O_3	7,83	5,74	5,79	0,34	5,68	4,94
% TiO_2	0,77	0,84	0,72	0,29	0,65	-
% Mn_3O_4	0,17	0,12	0,16	0,001	0,14	-
% P_2O_5	0,23	0,11	0,24	0,08	0,18	0,26
% CaO	2,37	4,05	14,16	0,08	4,76	0,13
% K_2O	1,19	1,25	1,96	1,21	1,86	1,87
% SO_3	0,04	0,55	0,05	2,89	0,2	0,14
% SiO_2	45,62	56,02	45,77	64,14	50,47	42,38
% Al_2O_3	30,62	15,05	19,4	14,44	15,24	35,03
% MgO	2,06	2,83	2,37	0,03	2,05	0,29
% Na_2O	0,81	3,01	0,59	0,03	1,47	0,10
% L.O.I.	8.18	10.27	8.69	16.370	17.150	11,40

Çamur kuru kütlesi temel olarak mineraller; kumlu partiküller; humus ve organizma veya alg kalıntıları gibi az miktarda organik madde ve çamur şartlandırma aşamasından gelen alüminyum sülfat kalıntıları ve polimerler içerir. Aynı zamanda Alüminyum yer kabuğundaki en yaygın elementtir (ağırlıkça yaklaşık %8,8) ve farklı kayaların ve zeminlerin bileşimlerinde bulunur. Sudaki Al konsantrasyonu büyük ölçüde yağışa ve rezervuardaki su seviyelerine bağlı da olabilir (Angelova vd., 2019).

Atık çamurlarına ait kimyasal analiz sonuçlarının yer aldığı Tablo 10 incelendiğinde AÇ-1 atık çamurunun diğer iki atık çamuruna oranla yüksek miktarda Kalsiyum oksit (CaO) içerdiği görülmektedir. Bilindiği üzere CaO ticari adı ile adıyla sönmemiş kireçtir. Su ile

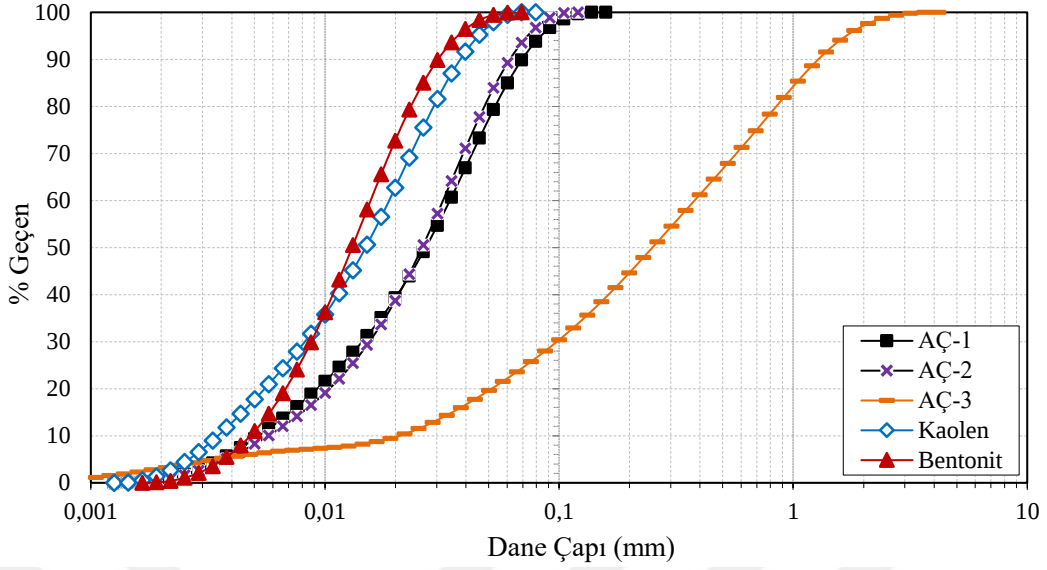
reaksiyona girdiğinde kalsiyum hidroksite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) yani ticari adı ile sönmüş kirece dönüşmektedir. Kirecin zeminler üzerindeki zamanla gelişen puzolanik özelliği, zeminlere yüksek oranda bağlayıcılık kazandırmaktadır. Literatürde bu konuda yapılmış oldukça fazla çalışma mevcuttur (Üçüncü ve Gülay, 2003; Frias vd., 2013). Dolayısı ile atıkların CaO değerleri incelendiğinde zeminlerin stabilizasyonunda kullanılacak en anlamlı atık çamurunun AÇ-1 olduğu görülmektedir. Bu nedenle 2. Etap deneylerden itibaren yapılan tüm deneylerde atık çamuru olarak AÇ-1 malzemesi kullanılmıştır.

Ayrıca tüm atık malzemelerinde benzer olarak Fe_2O_3 , SiO_2 ve Al_2O_3 bileşikler mevcut olup, oransal olarak birbirlerine oldukça yakın çıkmışlardır (Duc ve Phong, 2022). Örnek verilen literatür çalışmasının bizim atık çamur malzemelerine ait XRF sonuçlarıyla benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bu da çalışmamızda bulunan XRF sonuçlarının güvenilir olduğu göstermektedir (Owaid vd., 2014).

3.1.3. Mühendislik Özellikleri

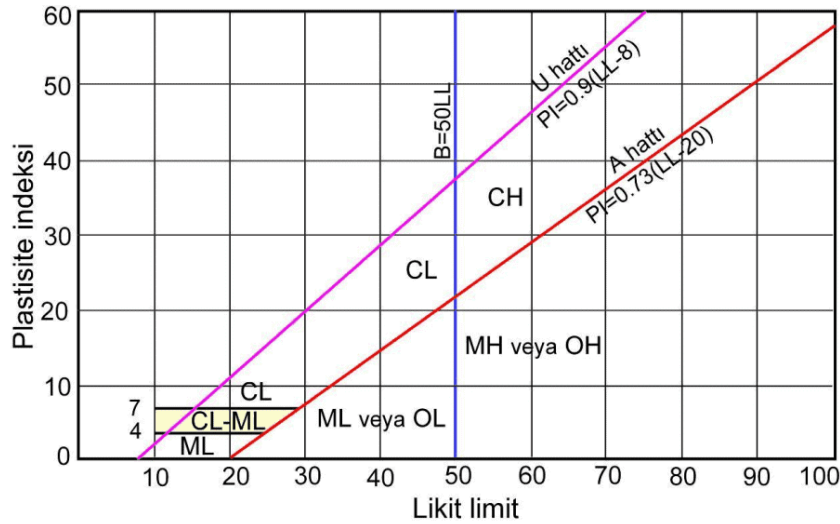
Kil ve atık malzemelere ait bir dizi laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin neler olduğundan daha önce bahsedilmişti. Bu kısımda ise bu deneyler sonunda elde edilen sonuçlar tablo yardımıyla paylaşılmış ve yorumlanmıştır.

Şekil 79’da Lazer Kırınım Metodu ile malzemelere ait dane dağılımlarının sonuçları verilmiştir. Buna göre malzemelerin dane dağılımları incelendiğinde, tüm malzemenin %50'sinden fazlasının #200 elekten geçtiği görülmektedir. Bu durumda tüm malzemeler ince daneli malzeme sınıfına girmektedir. Malzemelerin ince daneli malzeme türlerinden “Kil” veya “Silt” olmalarını anlamak üzere plastisite kartına bakılmalıdır.



Şekil 79. Lazer kırınım metodu ile malzemelere ait dane dağılımları

Plastisite kartı ince daneli malzemelerin sınıflandırılmasını sağlar (Şekil 80). Kart üzerindeki düşey eksen plastisite indisi (I_p) değerini, yatay eksen ise likit limit (w_L) değerini göstermektedir. Kart üzerinde iki adet hat bulunmaktadır. Bunlarda birincisi “A Hattı” ikincisi ise “U Hattı”dır. A hattı altında kalan bölge “Silt” olarak kabul edilir. Üstünde kalan bölge ise “Kil” olarak kabul edilmektedir. U hattı ise üzerinde bulunan bölge için herhangi bir isimlendirmenin bulunmayacağını ve eğer deney sonuçları bu bölgeyi gösterir ise deneyin tekrarlanması gerektiğini ifade etmektedir. Ayrıca kart üzerinde likit limit eksenini %50 değerinden ikiye ayıran bir çizgi daha bulunmaktadır. Bu çizginin solundaki bölgeyi işaret eden yani likit limit değeri %50 den düşük olan zeminler düşük plastisiteli (L), sağında kalan yani limit değeri %50 den yüksek olan bölgeyi işaret eden zeminler yüksek plastisiteli (H) olarak isimlendirilmektedir. Buna göre plastisite kartında malzemeler tek isim alabilmektedirler. Fakat bir istisna durum var ki plastisite kartında bu özellikle belirtilmektedir. Bu bölge, plastisite indisi değerinin 4 ve 7 arasında kalan bölgeyi işaret etmektedir. Plastisite indisi ve likit limit değerinin çakışma noktası, bu bölge içine düşen zeminler “CL-ML” olarak özellikle iki isim alırlar.



Şekil 80. Plastisite kartı

Plastisite kartına bakmadan önce malzemelere ait kıvam deneyleri sonuçları incelenmelidir. Plastisite kartında gerekli olan değerler plastisite indisi ve likit limit değerleridir. Bilindiği üzere plastisite indisi değeri, likit ve plastik limit değerlerinin farkı alınarak ($I_p = W_L - W_P$) bulunmaktadır. Malzemelere ait kıvam limitleri ve zemin sınıfları değerleri Tablo 11’de verilmiştir.

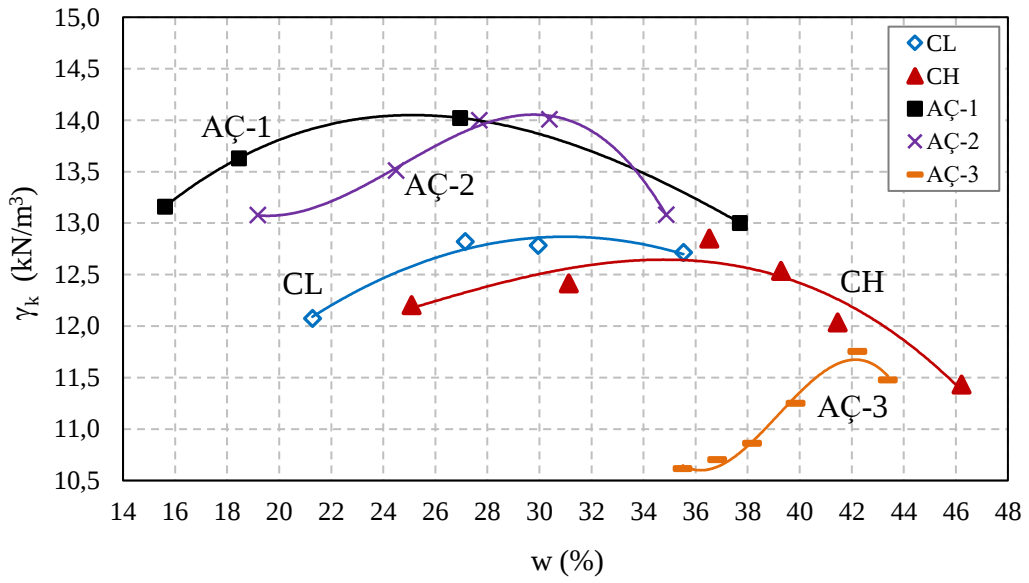
Tablo 11. Kil malzemeler ve atık çamurlarına ait kıvam limitleri ve zemin sınıfları

	W_L (%)	W_P (%)	W_R (%)	I_p (%)	USCS
Kaolen	43	20	16	23	CL
Bentonit	203	53	13	150	CH
AÇ-1 (Esiroğlu)	45	35	30	10	ML
AÇ-2 (Akçaabat)	42	37	35	5	ML
AÇ-3 (Derecik)	62	57	52	5	SM

Buna göre piyasadan alınan “Kaolen” olarak isimlendirilen malzemenin w_L değerinin %43, I_p değerinin ise %23 olduğu görülmektedir. Bu durumda Şekil 80’deki plastisite kartında Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi’ne (USCS) göre düşük plastisiteli kil (CL) malzemesi olduğu anlaşılmaktadır. “Bentonit” olarak isimlendirilen malzemenin plastisite indisi değeri %150, su muhtevası ise %203 olarak görülmektedir. Piyasadan “Bentonit” olarak alınan malzemenin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi’ne (USCS)

göre yüksek plastisiteli kil (CH) malzemesi olduğu belirlenmiştir. Farklı içme suyu arıtma tesislerinden alınan atık çamur malzemelerinin de aynı şekilde plastisite kartındaki yerleri bulunmuş ve Tablo 11’de gösterilmiştir. Buna göre AÇ-1 malzemesi “Düşük Plasisiteli Silt” (ML), AÇ-2 malzemesi “Düşük Plasisiteli Silt” (ML) ve AÇ-3 malzemesi ise “Siltli Kum” (SM) olarak isimlendirilmiştir.

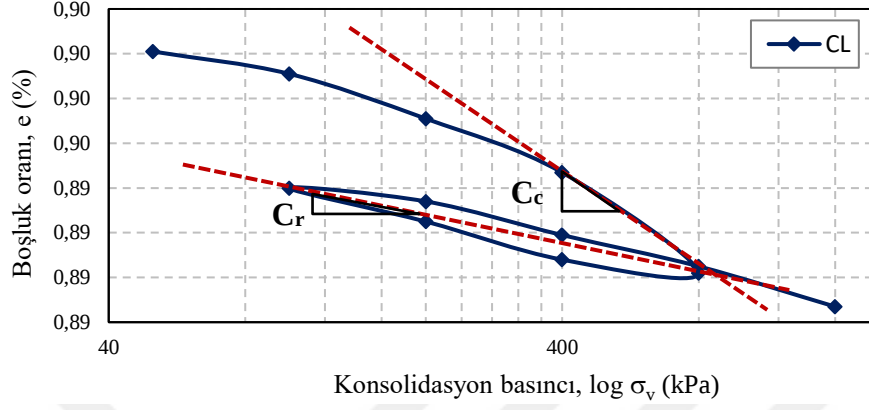
Kil ve farklı tesislere ait içme suyu arıtma çamurlarına ait kompaksiyon parametrelerini belirlemek üzere yapılan standart proktor deneyi sonuçları Şekil 81’de gösterilmiştir.



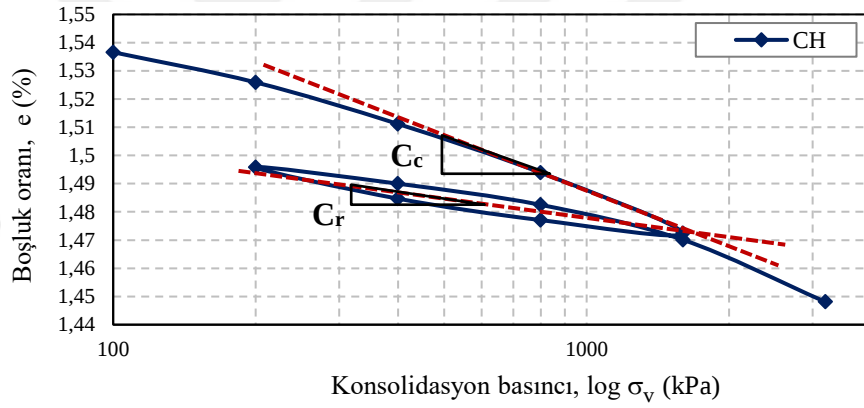
Şekil 81. Kil ve farklı atık çamur malzemelerine ait standart proktor deney sonuçları

Buna göre içi dolu siyah kutu ile gösterilen grafik AÇ-1 malzemesine, mor çarpı ile gösterilen AÇ-2 malzemesine, içi boş mavi kutu ile gösterilen CL malzemesine, kırmızı üçgen ile gösterilen CH malzemesine ve turuncu renkte çizgi ile gösterilen ise AÇ-3 atık malzemesine ait grafiği göstermektedir. AÇ-1 ve AÇ-2 çamur atık malzemelerinin proktor değerleri kil malzemelerine oranla iyi bir dağılım gösterse de AÇ-3 atığına ait proktor deney sonuçları arzu edilmeyen değer çıkmıştır (Tablo 12). Grafikten de anlaşılabacağı üzere AÇ-1 atığının, kompaksiyon parametrelerinde her ne kadar AÇ-2 ile yakın sonuç verse de daha iyi olduğu ve kimyasal analiz sonuçları da göz önüne alındığında CaO oranının fazla olmasından dolayı atık malzeme olarak seçilmesinin diğer atık malzemelere oranla daha mantıklı olduğu görülmektedir.

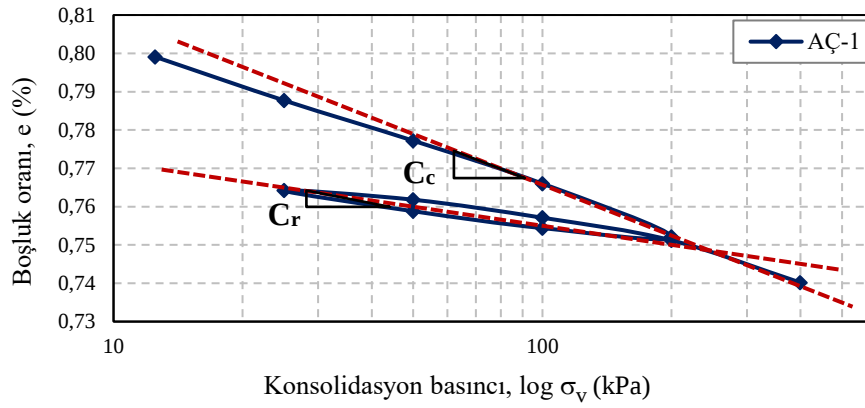
Kil ve farklı tesislere ait atık çamur malzemelerine ait konsolidasyon deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen $\log \sigma_v$ - e grafikleri Şekil 82,83,84,85,86'da gösterilmiştir.



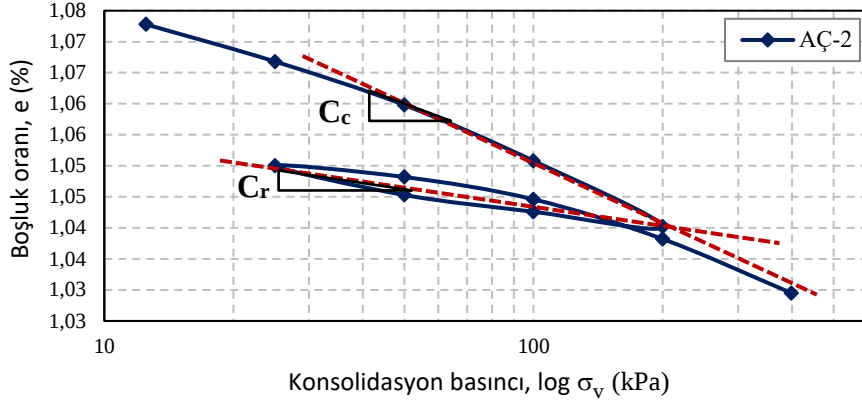
Şekil 82. CL zeminine ait konsolidasyon deney sonuçları



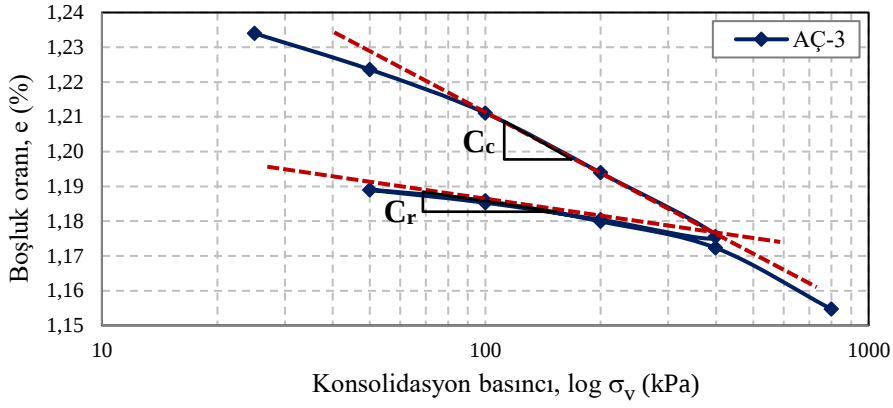
Şekil 83. CH zeminine ait konsolidasyon deney sonuçları



Şekil 84. AÇ-1 malzemesine ait konsolidasyon deney sonuçları



Şekil 85. AÇ-2 malzemesine ait konsolidasyon deney sonuçları



Şekil 86. AÇ-3 malzemesine ait konsolidasyon deney sonuçları

Grafiklerde malzemelere ait sıkışma (C_c) ve yeniden sıkışma (C_r) indisi eğrileri yer almaktadır. Bu parametreler, oturma hesaplamaları ve geoteknik tasarım süreçlerinde kritik öneme sahiptir. C_c , zeminin büyük ölçüde yük altında sıkışmasını temsil eder. Bu parametre, özellikle ilk yükleme sırasında, zemin partiküllerinin suyun dışarı çıkmasına bağlı olarak sıkışma oranını gösterir. C_r ise, zemin üzerindeki yük kaldırıldığında oluşan sıkışmanın tersine (geri yüklenme sırasında) zemin sıkışmasının oranını ifade eder. Genellikle zeminin daha önce sıkışmış, ancak şu an yük kaldırılmış olduğu durumlarda önemli bir parametre olarak kabul edilir. C_c , genellikle daha büyük bir sıkışma oranını temsil eder, çünkü yeni yük altında büyük hacim kaybı ve suyun dışarı çıkması gerçekleşir. C_c parametresi, özellikle kil ve silt gibi ince daneli zeminlerde daha yüksektir. Bu tür zeminler, suyu tutma kapasitesine sahip oldukları için, yük altında sıkışma daha belirgindir.

Zeminlerin plastisite durumlarına göre sıkışma indisi (C_c) ve yeniden sıkışma indisi (C_r) değerleri önemli farklılıklar gösterir. Plastisite endeksi (I_p) yüksek olan zeminlerde, C_c parametresi genellikle daha yüksektir. Bu durum, zemin partiküllerinin su içeriğiyle daha fazla etkileşime girmesi ve suyun dışarıya çıkmasının daha belirgin hale gelmesiyle açıklanabilir. Yüksek plastisite, zeminin daha elastik ve plastikte kalma eğiliminde olmasına yol açar, bu da sıkışma sırasında daha fazla hacim kaybına neden olabilir. Yüksek plastisiteli zeminler, daha önce sıkıştıkları zaman önemli bir hacim kaybı yaşayabilir ve yük kaldırıldığında bu zeminler yeniden su alarak hacim kazancı sağlarlar. Bu durumda, C_r değeri de genellikle daha yüksek olur. Çünkü zemin daha önce sıkışmış ve su kaybetmiş olduğu için, yük kaldırıldığında suyun yeniden zemin içine girmesiyle hacim artışı gerçekleşir. CH malzemesine bakıldığında %150 plastisite indisi değeri ile oldukça yüksek plastisiteye sahip bir malzemedir. Malzemelere ait C_c , C_r , şişme basıncı ve yüzdesi değerleri Tablo 12’de gösterilmiştir.

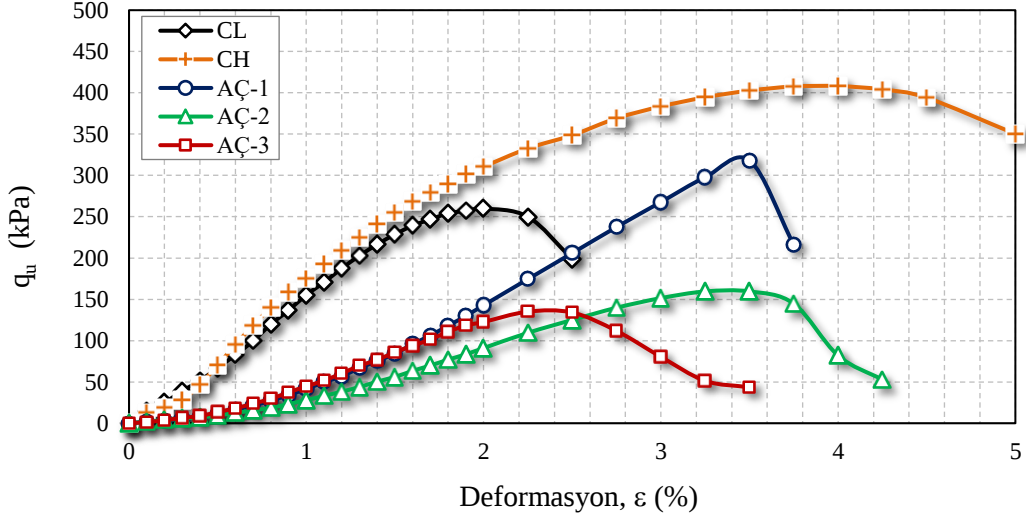
Tablo 12’ye göre CL malzemesi için C_c ve C_r değerleri incelendiğinde $C_c = 0,15$ ve $C_r = 0,05$ olduğu görülmektedir. Aynı şekilde CH malzemesi için C_c ve C_r değerleri sırasıyla $C_c = 0,71$ ve $C_r = 0,13$ çıkmıştır. Buna göre CL kil malzemesine ait sıkışma indisi değeri CH malzemesine oranla düşüktür. Çünkü plastisite indisi düşük olan zeminlerde (örneğin, kumlu zeminler veya düşük I_p değerine sahip ince zeminler), C_c değeri genellikle daha düşüktür (İbrahim vd., 2012; Jain vd., 215; Ara vd., 2021; Vinod ve Bindu, 2010; Thin vd., 2017). Bu tür zeminler, daha az su tutar ve suyun dışarıya çıkması sırasında sıkışma oranı da daha düşüktür. Bu zeminler, su içeriğinin değişimine karşı daha az duyarlıdır ve genellikle daha az sıkışma eğilimindedir. Bu sınırlı hacim değişimleri nedeniyle bu zeminlerin C_r değeri genellikle daha düşüktür. Zemin daha önce sıkışmış olsa da, yük kaldırıldığında hacim kazancı daha küçük olur. Aynı şekilde şişme parametrelerine bakıldığında CL için şişme basıncı ve yüzdesi sırasıyla 61,7 kPa ve %1,16 olurken, CH için bu değerlerin 118,2 kPa ve %2,33 olduğu görülmektedir. Buna göre aynı koşullar altında daha fazla hacim değişimi gösteren CH’nın şişme basınç ve yüzdesinin oldukça fazla çıkması normal bir durumdur.

AÇ-1, AÇ-2 ve AÇ-3 atık çamur malzemelerine ait konsolidasyon sıkışma eğrileri incelendiğinde AÇ-1 için $C_c=0,04$ ve $C_r=0,01$, AÇ-2 için $C_c=0,03$ ve $C_r=0,01$, AÇ-3 için $C_c=0,06$ ve $C_r=0,01$ olduğu görülmektedir. Her üç çamur atığında sıkışma ve yeniden sıkışma değerlerine bakıldığında oldukça düşük çıktığı görülmektedir. Malzemelere ait plastisite indisi değerlerine bakıldığında AÇ-1 için $I_p= \%10$, AÇ-2 için $I_p= \%5$, AÇ-3 için $I_p= \%5$ olduğu görülmektedir. Dolayısı ile C_c ve C_r değerlerinin düşük olmasının plastisite

indislerinin düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Plastisite indisi diğer atık çamur malzemelerine oranla daha düşük olan AÇ-3 malzemesinin C_c değerinin yüksek çıkmasının, içerisinde ihtiva ettiği organik madde miktarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Nitekim plastisite indeksi (I_p) düşük olan bir zemin, organik içerik nedeniyle sıkışma indeksi (C_c) yüksek olabilir (Hameedi vd., 2020). Çünkü organik madde içeriği, doku ve oldukça değişken kimyasal bileşime sahip olmalarıyla karakterize edilirler. Bu nedenle yüksek sıkıştırılabilirlik, yüksek çökme ve tatmin edici olmayan mukavemet özelliklerine sahiptirler (Pradeep ve Vinu 2015). Dolayısıyla, organik içerik barındıran zeminler, I_p düşük olsa bile yüksek sıkışma eğilimi gösterebilir. Bu durum, zemin mühendisliğinde özellikle organik maddelerin etkisi altında olan zeminlerin dikkatlice değerlendirilmesi gerektiğini gösterir. Nitekim malzemelerin deneye hazırlanması aşamasında etüve atılması halinde en fazla ağırlık kaybı AÇ-3 malzemesinde meydana gelmesi, diğer atık çamur malzemelerine oranla bünyesinde fazla oranda organik madde taşıdığına kanıt olarak gösterilebilir.

Atık çamur malzemelerine ait plastisite indisi değerlerinin düşük olması su tutma kapasitelerinin de düşük olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısı ile şişme basıncı ve yüzdesi değerleri de oldukça düşük çıkmıştır. AÇ-3 malzemesinin diğer atık çamur malzemelerine oranla şişme basıncı ve yüzdesi değerlerinin fazla olmasının organik madde içeriğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kil ve farklı tesislere ait atık çamur malzemelerine ait serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 87’de gösterilmiştir. Siyah çapraz kutu ile gösterilen CL zemini, turuncu artı CH zemini, mavi yuvarlak AÇ-1 malzemesini, yeşil üçgen AÇ-2 malzemesini, kırmızı kutu ile gösterilen ise AÇ-3 malzemesine ait grafikleri göstermektedir.



Şekil 87. Atık ve kil malzemelerine ait serbest basınç deney sonuçları

Buna göre CL ve CH zeminlerine bakıldığında CH zemini $q_u=400$ kPa, CL zemini ise $q_u=260$ kPa serbest basınç mukavemet değerine sahiptir. Buna göre CH zeminine ait serbest basınç mukavemet değeri CL zeminine oranla oldukça yüksek çıkmıştır. AÇ-1, AÇ-2 ve AÇ-3 atık malzemelerine ait serbest basınç mukavemet değerleri AÇ-1 $q_u=325$ kPa, AÇ-2 $q_u=175$ kPa, AÇ-3 ise $q_u=133$ kPa olarak bulunmuştur. Buna göre AÇ-1 $q_u=325$ kPa değeri ile diğer iki atık malzemesine oranla oldukça yüksek mukavemet göstermiştir. AÇ-1 malzemesine ait kimyasal analiz sonuçlarında CaO oranının yüksek çıkmasının serbest basınç mukavemet değerini artırdığı düşünülmektedir.

Buraya kadar kil ve farklı tesislere ait atık çamur malzemelerinin mühendislik (fiziksel ve mekanik) özelliklerini belirlemek amacı ile deneyler gerçekleştirildi. Kil ve farklı tesislere ait arıtma çamur atıklarına ait gerçekleştirilen deneyler sonucu belirlenen indeks özelliklere ait değerler aşağıdaki Tablo 12’de bir arada gösterilmiştir.

Tablo 12. CL, CH ve atık çamur malzemelerin mühendislik özellikleri

	WL (%)	WP (%)	WR (%)	I _p (%)	USCS	G _s (kN/m ³)	γ _{kmaks} (kN/m ³)	W _{opt} (%)	q _u (kPa)	C _c	C _r	Şişme Basıncı (kPa)	Şişme Yüzdesi (%)
CL	43	20	16	23	CL	2,43	12,7	29	260	0,15	0,05	61,7	1,16
CH	203	53	13	150	CH	2,65	13,1	35	400	0,71	0,13	118,2	2,33
AÇ-1 (Esiroğlu)	45	35	30	10	ML	2,2	14,3	26	325	0,04	0,01	0,163	0,49
AÇ-2 (Akçaabat)	42	37	35	5	ML	2,09	14	28	175	0,04	0,01	0,132	0,34
AÇ-3 (Derecik)	62	57	52	5	SM	2,25	11,6	42	133	0,06	0,01	0,308	0,99

Birinci etap deneyler ile malzeme karakterizasyonları belirlendikten sonra ikinci etap deneyler için farklı atık oranlarının etkisinin değerlendirilmesi amacı ile serbest basınç deney kalıbında düşük plastisiteli (CL) ve yüksek plastisiteli (CH) olmak üzere iki farklı plastisiteye sahip yapay kil numunesi hazırlanmıştır. Bunun için Kaolen ve Bentonit kil malzemeleri belli oranlarda karıştırılarak plastisite durumları incelenmiştir. Farklı karışım oranlarında hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilen kıvam deneyleri sonucunda %40B-%60K için $w_L = \%92$, %50B-%50K için $w_L = \%109$, %60B-%40K için $w_L = \%123$ ve %70B-%30K için $w_L = \%132$ olarak bulunmuştur. Buna göre karışımda Kaolen oranının artışı plastisiteyi her ne kadar düşürse de, Kaolen zaten CL zemin sınıfına sahip olduğundan herhangi bir karışıma gerek duyulmadan da kullanılabileceği görülmüştür. Yine aynı şekilde Bentonit de zaten CH zemin sınıfına sahip olduğundan doğrudan kullanılabilecektir. Bu nedenle her ne kadar Kaolen ve Bentonit'in farklı karışım oranları ile birbirleri üzerindeki plastisite değişimleri incelense de herhangi bir karışım oranı ile yapay kil numunesi yapmaya gerek olmadığı, CL zemini olarak Kaolen'in ve CH zemini olarak da Bentonit'in kullanılabileceğine karar verilmiştir.

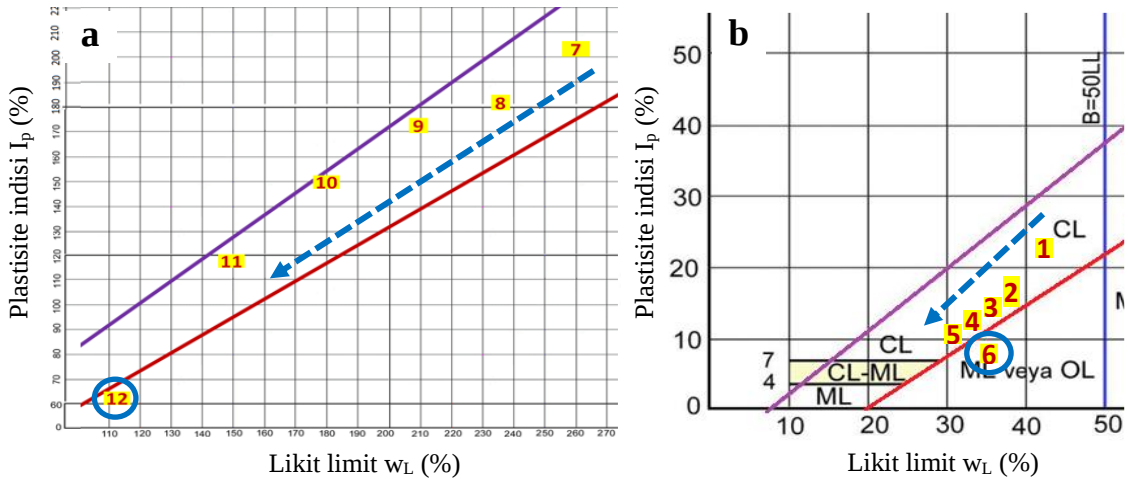
3.2. Atık Malzemesi Karışım Oranlarının Kıvam Limitleri Üzerindeki Etkisi ve Etkili Atık Yüzdelерinin Belirlenmesi

Kil ve atık çamur malzemelerinin karakteristik özellikleri incelendiğinde 2. etap deneylerden itibaren kullanılacak en anlamlı atığın AÇ-1 atık malzemesi olduğu belirtilmişti. Dolayısı ile burada farklı atık oranlarının kıvam limitleri üzerindeki etkisini incelemek için CL ve CH zeminlerine %5, %10, %20, %30 ve %50 oranlarında AÇ-1 atığı katılarak stabilize edilmiş kil numuneleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu kil numunelerinin w_L (Casagrande yöntemi), w_P ve w_R (yaklaşık yöntem) değerlerini bulmak için kıvam limiti deneyleri yapılmış olup elde edilen sonuçlara göre plastisite indisi (I_p) değerleri ve “Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi”ne göre zemin türleri belirlenmiştir. Her iki kil numunesi için de elde edilen deney sonuçları Tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 13. AÇ-1 atığının CL ve CH kıvam limitleri üzerindeki değişimi

AÇ-1 (%)	CL						CH				
	w_L (%)	w_P (%)	w_R (%)	I_p (%)	ZEMİN CİNSİ		w_L (%)	w_P (%)	w_R (%)	I_p (%)	ZEMİN CİNSİ
0	43	20	16	23	CL		260	58	11	202	CH
5	38	21	16	17	CL		234	54	12	180	CH
10	36	25	18	11	CL		210	38	10	172	CH
20	34	22	17	12	CL		174	24	8	150	CH
30	34	23	17	11	CL		150	33	12	117	CH
50	32	23	21	9	ML		106	43	20	63	MH

Tablo 13 incelendiğinde AÇ-1 oranlarının CL ve CH kil numuneleri üzerindeki etkilerinin benzer bir eğilimde olduğu görülmektedir. Atık oranlarının artışı ile birlikte hem CL zemininde hem de CH zemininde plastisite indisinin kademeli olarak azaldığı görülmektedir. CL zemininde ait I_p değeri katkısız halde %23 iken %50 AÇ-1 oranıyla birlikte %9'a düşmüştür. CH zemini ise katkısız halde I_p değeri 202 iken %50 AÇ-1 oranıyla birlikte bu değer %63'e düşmüştür. Her ne kadar atık oranının artışı zemin üzerinde iyileşmeye neden olsa da her iki zemin türü için de en etkili sonuç %50 atık oranında alındığı görülmektedir. Buna göre, atık oranlarının artışıyla bağlı olarak CL, ML'ye ve yine atık oranlarındaki artışa paralel olarak CH, MH zemin türüne dönüşmüştür. Şekil 88'de atık oranının değişiminin zemin türü üzerindeki değişimi plastisite kartı üzerinde açıkça görülmektedir.



Şekil 88. Farklı oranlardaki AÇ-1 atığının CH (a) ve CL (b) zemin türleri üzerindeki etkisi

“1” numara CL malzemesinin %0 AÇ-1 için plastisite kartındaki konumunu göstermektedir. “7” numara ise CH malzemesinin %0 AÇ-1 için plastisite kartındaki

konumunu göstermektedir. Dolayısı ile atık oranlarının sırasıyla %5-10-20-30-50 oranında artışına bağlı olarak CL zemini de sırasıyla “2-3-4-5” numaralarını takip ederek “6” numarada ML zemin türüne dönüşmektedir. Aynı şekilde CH zemini de sırasıyla %5-10-20-30-50 oranında artışına bağlı olarak sırasıyla “8-9-10-11” numaralarını takip ederek “12” numarada MH zemin türüne dönüşmektedir. Ayrıca Tablo 14’te görüldüğü üzere, atık oranının artışı her iki zemin türü için de plastisite indisinde düşüşe neden olmuştur. Bu durum, zeminin işlenebilirliğinin arttığını, şişme potansiyelinin azaldığını ifade etmektedir. Dolayısı ile AÇ-1 oranındaki artışın zemin türü değişimleri ve plastisite indisi değerlerinde olumlu etkilere neden olması, bu atığın zemin stabilizasyonu için kullanılabilir olduğunu ifade etmektedir.

Atık malzemesi oranındaki artış CL ve CH zeminlerinin kıvam limit değerlerinde olumlu değişikliklere neden olmuştur. Özellikle zemin türündeki bu değişikliklerin %50 gibi yüksek oranda gerçekleşmesi kil malzemeleri üzerindeki anlamlı değişikliğin atık miktarındaki artışa bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısı ile hem atık miktarının daha verimli kullanılması hem de deneylerdeki yükü azaltabilmek amacı ile en anlamlı atık oranlarıyla çalışmanın daha doğru olacağı düşünülmüştür. Atık miktarındaki artış stabilizasyon açısından olumlu sonuç verdiği için %5 gibi bir oranın etkisi fazla olmamaktadır. Tabii ki bu düşük oranların uzun süreli ve ısı değişimleri sonucundaki etkileri de görülmek istendiğinden %10 oranıyla başlamak daha doğru olacaktır. Bu yüzden birbirine yakın %5-10-20-30-50 yüzdelerinden %5 ve %20 oranları çıkarılarak ileri deneyler %10-30-50 oranları kullanılarak gerçekleştirildi. Burada elde edilen değerler etkili atık yüzdeleri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve tüm değerler sırasıyla aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

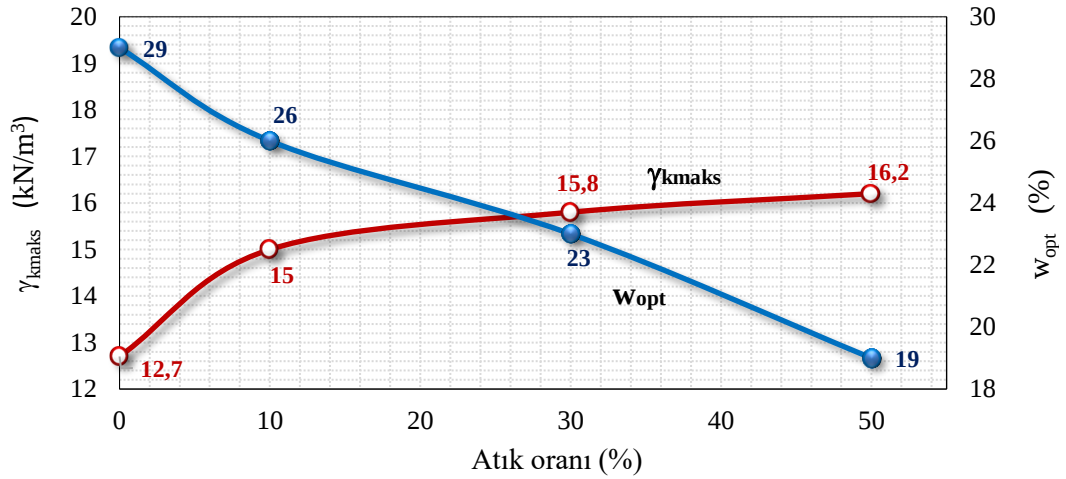
Tablo 14. Etkili atık yüzdelerinin kıvam limitleri üzerindeki etkisi

	WL (%)	WP (%)	WR (%)	I _p (%)	USCS
CL + %0E	43	20	16	23	CL
CL + %10E	36	25	18	11	CL
CL + %30E	34	23	17	11	CL
CL + %50E	32	23	21	9	ML
CH + %0E	260	58	11	202	CH
CH + %10E	210	38	10	172	CH
CH + %30E	150	33	12	117	CH
CH + %50 E	106	43	20	63	MH

3.3. Etkili Atık Yüzdesi ile Hazırlanan Karışımların Kompaksiyon Parametreleri Üzerindeki Etkisi

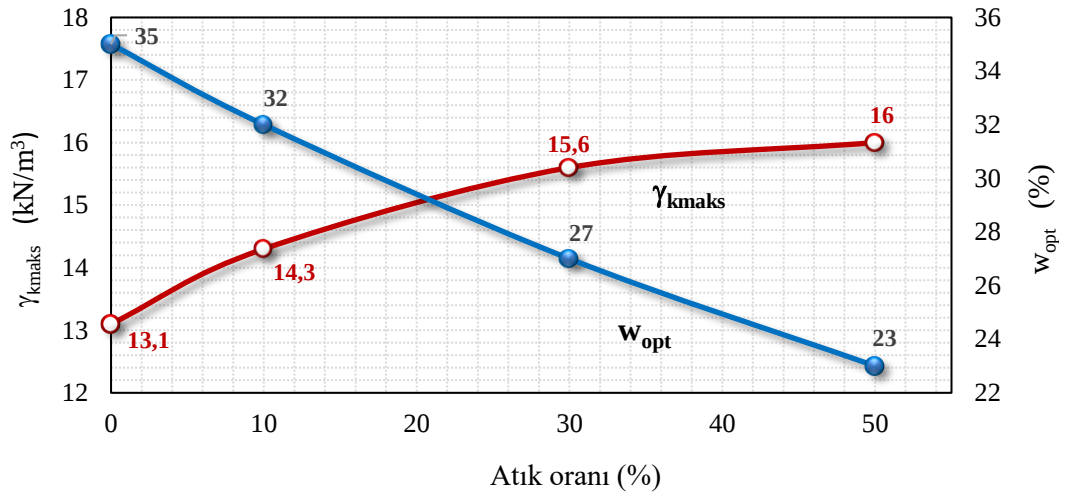
Atık malzemelerinin tek eksenli basınç mukavemeti (q_u) üzerindeki etkisinin incelenmesi deneylerin ikinci etabını oluşturmaktadır. İkinci etap deneylerde CL ve CH zeminleri üzerinde en anlamlı oranlar olan %10, %30 ve %50 atık oranları kullanılarak deneyler gerçekleştirildi. Öncelikle malzemelere ait kompaksiyon parametrelerini (γ_{kmaks} ve w_{opt}) belirlemek amacıyla Standart Proktor deneyleri yapıldı.

Şekil 89'a göre CL zeminine katılan atığın yüzdesi arttıkça kompaksiyon parametrelerinden maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) değerinin $12,7 \text{ kN/m}^3$ 'ten $16,2 \text{ kN/m}^3$ 'e arttığını optimum su muhtevası (w_{opt}) değerinin ise %29'dan %19'a azaldığı görülmektedir.



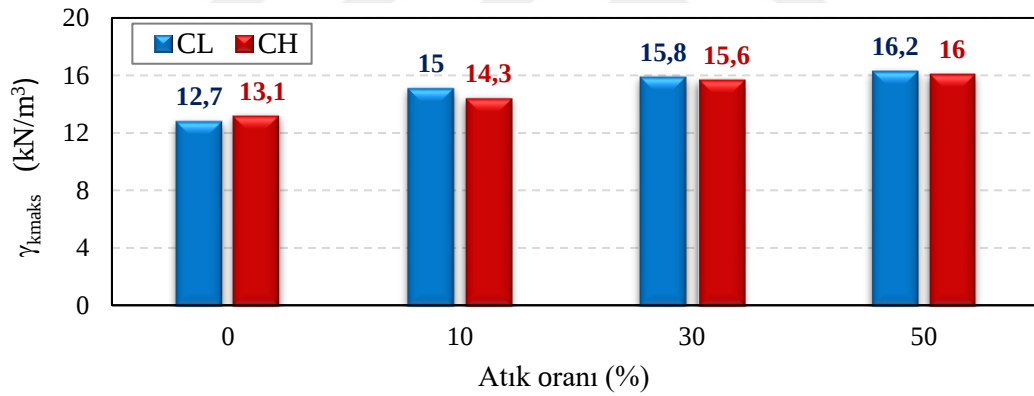
Şekil 89. CL zemini kompaksiyon parametrelerinin atık oranlarına bağlı değişimleri

Atık yüzdelilerindeki artışlara bağlı kompaksiyon parametrelerindeki bu değişimler atık malzemesinin kil zemin üzerindeki olumlu etkilerini göstermektedir. Yani zeminin kompaksiyon özelliklerinde iyileşmelerin olduğu görülmektedir. Aynı şekilde Şekil 90'da CH zemini için de γ_{kmaks} değerinin $13,1 \text{ kN/m}^3$ 'ten 16 kN/m^3 'e arttığını w_{opt} değerinin ise %35'den %23'e azalmış olup değerlerdeki bu değişim, atık oranlarının artışına bağlı malzemelerin kompaksiyon özelliklerinde iyileşmeler olduğunu göstermektedir.

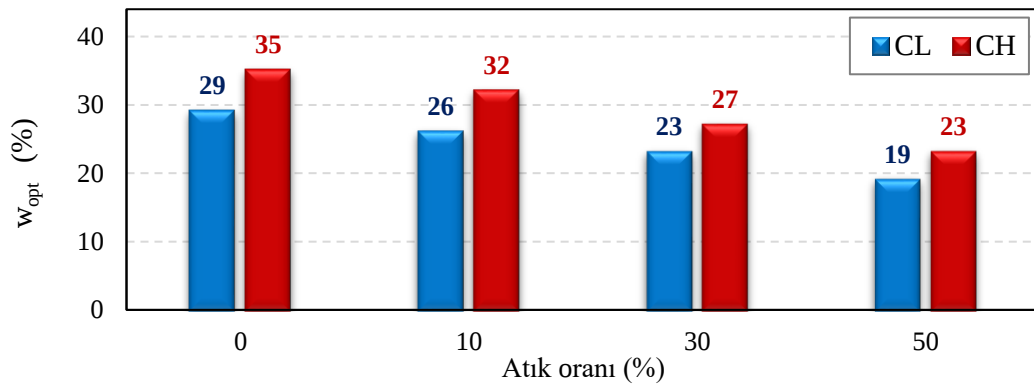


Şekil 90. CH zemini kompaksiyon parametrelerinin atık oranlarına bağlı değişimleri

CL ve CH zeminlerinin atık oranlarına bağlı kompaksiyon parametreleri, çubuk grafikler ile Şekil 91 ve Şekil 92’de gösterilmiştir.



Şekil 91. CL ve CH zeminlerinin Atık oranı - γ_{kmaks} değişimleri



Şekil 92. CL ve CH zeminlerinin Atık oranı- W_{opt} değişimleri

Maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değerlerinin katkı yüzdesine bağlı değişimleri açıkça görülmektedir. Ayrıca kompaksiyon deney sonuçları toplu halde Tablo 15’te verilmiştir.

Tablo 15. Etkili atık yüzdelerinin kompaksiyon parametreleri üzerindeki etkisi

	WL (%)	WP (%)	WR (%)	Ip (%)	USCS	γ_{kmaks} (kN/m ³)	Wopt (%)
CL + %0E	43	20	16	23	CL	12,7	29
CL + %10E	36	25	18	11	CL	14,8	28
CL + %30E	34	23	17	11	CL	15,4	26
CL + %50E	32	23	21	9	ML	15,8	22
CH + %0E	260	58	11	202	CH	12,9	37
CH + %10E	210	38	10	172	CH	14,2	33
CH + %30E	150	33	12	117	CH	15,2	30
CH + %50E	106	43	20	63	MH	16	23

3.4. Etkili Atık Yüzdeleri ile Hazırlanan Karışımların Konsolidasyon Deney Sonuçları Üzerindeki Etkisi

Etkili atık yüzdeleri kullanılarak hazırlanan karışım numuneleri üzerinde gerçekleştirilen konsolidasyon deney sonuçları Tablo 16’da gösterilmiştir.

Tablo 16. Etkili atık yüzdelerinin konsolidasyon deneyi sonuçları üzerindeki etkisi

	WL (%)	WP (%)	WR (%)	Ip (%)	USCS	γ_{kmaks} (kN/m ³)	Wopt (%)	C _c	C _r	Şişme Basıncı (kPa)	Şişme Yüzdesi (%)
CL + %0E	43	20	16	23	CL	12,7	29	0,15	0,05	61,7	1,16
CL + %10E	36	25	18	11	CL	14,8	28	0,11	0,02	36	0,24
CL + %30E	34	23	17	11	CL	15,4	26	0,10	0,02	32,7	0,20
CL + %50E	32	23	21	9	ML	15,8	22	0,09	0,01	13	0,12
CH + %0E	260	58	11	202	CH	12,9	37	0,71	0,13	118,2	2,33
CH + %10E	210	38	10	172	CH	14,2	33	0,47	0,09	267	3,92
CH + %30E	150	33	12	117	CH	15,2	30	0,28	0,09	230,3	2,90
CH + %50E	106	43	20	63	MH	16	23	0,20	0,11	131,1	1,66

Buna göre CL + %0E malzemesine ait sıkışma indisi $C_c = 0,15$, yeniden sıkışma indisi $C_r = 0,05$, şişme basıncı 61,7 kPa ve şişme yüzdesi %1,16 olarak bulunmuştur. CL + %10E malzemesine ait sıkışma indisi 0,11, yeniden sıkışma indisi 0,023, şişme basıncı 36 kPa ve şişme yüzdesi %0,24 olarak bulunmuştur. CL + %30E malzemesine ait sıkışma indisi 0,10, yeniden sıkışma indisi 0,025, şişme basıncı 32,7 kPa ve şişme yüzdesi %0,2 olarak

bulunmuştur. CL + %50E malzemesine ait sıkışma indisi 0,09, yeniden sıkışma indisi 0,01, şişme basıncı 13 kPa ve şişme yüzdesi %0,12 olarak bulunmuştur.

CL zeminine ait serbest basınç mukavemetinin artması, kilin daha yoğun ve daha az sıkışabilir hale geldiğini gösterir. Dolayısı ile yüksek mukavemetli killer, boşluk oranı daha düşük ve daha sert yapıya sahip olduğu için sıkışma esnasında daha az hacim değişimi gösterir. Dolayısıyla, sıkışma indisinin daha düşük olması beklenir. Bu anlamda CL malzemelerinin etkili atık oranları karşısındaki değerlerine bakıldığında, atık miktarındaki artışın sıkışma indisi (C_c) değerlerinde azalmaya neden olduğu görülmektedir. Sıkıştırma indisindeki bu azalma, fiziko-kimyasal değişikliklerden kaynaklanan gözenek boşlukları içinde puzolanik ürünlerin oluşumunun artmasının bir sonucu olabilir ve bu da sıkıştırma indisinde bir azalmaya yol açar (Osinubi ve Eberemu, 2006).

Yeniden sıkışma indisi ($C_r \cong C_s$), daha önce konsolidasyon geçirmiş (ön yükleme görmüş) bir zeminin yeniden yüklenmesi sırasında gerçekleşen hacim değişimini tanımlar. Genellikle elastik deformasyon ile ilişkilidir, çünkü önceden sıkışmış bir zemin tekrar yüklendiğinde, ilk sıkışmaya kıyasla daha az hacim değişimi gösterir. Yeniden sıkışma indisi (C_r) değeri genellikle sıkışma indisinden (C_c) çok daha küçüktür, çünkü önceden yüklenmiş zeminler (aşırı konsolide), yeni yüklemeye karşı daha az hacim değiştirir. Etkili atık oranları ile hazırlanmış CL malzemesinde C_r değerlerinin C_c değerlerinden oldukça düşük olduğu görülmektedir. Örneğin CL + %10E malzemesinde C_c değeri 0,11 iken C_r değeri 0,02 dir. Bu eğilim tüm oranlarda da görülmektedir.

Şişme basıncı, kil zeminlerin su alarak hacim değiştirmesi sonucu oluşturduğu içsel basınçtır. Özellikle plastik özellik gösteren killer, su emdiğinde genişleyerek önemli mühendislik sorunlarına yol açabilir. Şişme basıncı, bu genişleme sırasında zeminin uyguladığı tepki kuvvetini ifade eder, zemin mekaniği ve geoteknik mühendisliğinde kritik bir parametredir. Bu nedenle zeminin şişme basıncı ne kadar düşükse, şişme eğilimi de o kadar az olacağından atık etkisinin şişme basıncını düşürmesi beklenmektedir. Değerlere bakıldığında atık miktarındaki artışın, şişme basıncı ve yüzdesini azalttığını göstermektedir.

Tabloya 16'ya göre CH + %0E malzemesine ait sıkışma indisi $C_c=0,71$, yeniden sıkışma indisi 0,13, şişme basıncı 118,2 kPa ve şişme yüzdesi %2,33 olarak bulunmuştur. CH + %10E malzemesine ait sıkışma indisi 0,474, yeniden sıkışma indisi 0,094, şişme basıncı 267 kPa ve şişme yüzdesi %3,92 olarak bulunmuştur. CH + %30E malzemesine ait sıkışma indisi 0,283, yeniden sıkışma indisi 0,090, şişme basıncı 230,3 kPa ve şişme yüzdesi

%2,9 olarak bulunmuştur. CH + %50E malzemesine ait sıkışma indisi 0,202, yeniden sıkışma indisi 0,110, şişme basıncı 131,1 kPa ve şişme yüzdesi %1,66 olarak bulunmuştur.

Yüksek plastisiteli killeri (CH), daha fazla su içeriği tutabilir ve daha yüksek boşluk oranına sahiptir, bu da yük altında daha fazla hacim değişimi göstermesine neden olur. Bu yüzden CH malzemesindeki C_c ve C_r değerleri CL malzemesine göre yüksek çıkmıştır. Değerlerin kendi içerisindeki dağılımlarına bakıldığında atık oranının artışı sıkışma ve yeniden sıkışma indislerinde azalmaya neden olmuştur. Bu eğilim beklenen bir durumdur.

Şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerinin CL malzemesine oranla oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Yüksek plastisiteli killeri (CH) ve düşük plastisiteli killeri (CL) arasındaki şişme yüzdesi ve şişme basıncı farkı, temel olarak mineralojik yapı, su tutma kapasitesi, özgül yüzey alanı, katmanlar arası su alımı ve boşluk oranı gibi faktörlere bağlıdır. CH killeri genellikle montmorillonit gibi yüksek şişme potansiyeline sahip mineraller içerirken, CL killeri kaolinit veya illit gibi daha az şişen minerallerden oluşur. Bu durum CH killeri suyu daha fazla emerek hacim değiştirmesine neden olur. Ayrıca, CH killeri özgül yüzey alanı daha büyük olduğundan su molekülleriyle daha fazla etkileşime girer ve katmanlar arası su alımı sayesinde hacim genişlemesi daha fazla olur. CL killeri ise bu etki sınırlıdır. Boşluk oranı da önemli bir etkidir. CH killeri başlangıç boşluk oranı genellikle daha yüksek olduğu için su alımı sonrası daha büyük hacim değişimi meydana gelir. Tüm bu nedenlerden dolayı, CH killeri şişme yüzdesi ve şişme basıncı CL killeri göre daha fazladır.

3.5. Etkili Atık Yüzdeleri ile Hazırlanan Karışımların Serbest Basınç Mukavemeti Üzerindeki Etkisi

Kompaksiyon parametrelerinin belirlenmesi, malzemelere ait serbest basınç mukavemet deneylerinin yapılması için oldukça önemlidir. Çünkü yarık silindirik çelik tüp setinde serbest basınç deneyi için hazırlanacak numunelere ait kuru ağırlıklar, o malzemelere ait γ_{kmaks} ve w_{opt} değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Aşağıdaki eşitlik 16(a)'da γ_{kmaks} ve w_{opt} değerleri yerine konulduğunda malzemeye ait birim hacim ağırlık (γ_n) değeri bulunur. Bilindiği üzere γ_n değeri malzemeye ait yaş ağırlığının o malzemenin hacmine (yarık silindirik çelik tüp hacmi) oranıdır. Burada γ_n ve hacim değeri bilindiğinden $W_{yaş}$ değeri hesaplanır (16b). Daha sonra eşitlik 16(c) kullanılarak serbest basınç deneyi için gereken kuru malzeme ağırlıkları belirlenmiş olur.

$$\gamma_{maks} = \frac{\gamma_n}{1 + w_{opt}} \quad (a) \quad \gamma_n = \frac{w_{yaş}}{V} \quad (b) \quad W_{kuru} = W_{yaş} - w \cdot \gamma_s \quad (c) \quad (16)$$

Buna göre gerekli malzeme miktarları aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Kalıba girmesi gereken malzeme miktarları ile malzemelerin deney başı ağırlıkları, malzemelerin sıkıştırılma derecelerini göstermesi bakımından oldukça önemlidir. Çünkü uygulanan enerji, yalnızca belirlenen miktardaki malzemeyi kalıba sokmaya yetecek ayarda uygulanarak ilgili malzemeye ait kompaksiyon koşullarını yansıtmalıdır.

Tablo 17’de CL ve CH zeminlerinin farklı atık oranlarında hazırlanmış malzemelerinin deney kalıbına girmesi gereken malzeme miktarları, deney başı ağırlıkları, kalıba girme yüzdeleri yer almaktadır.

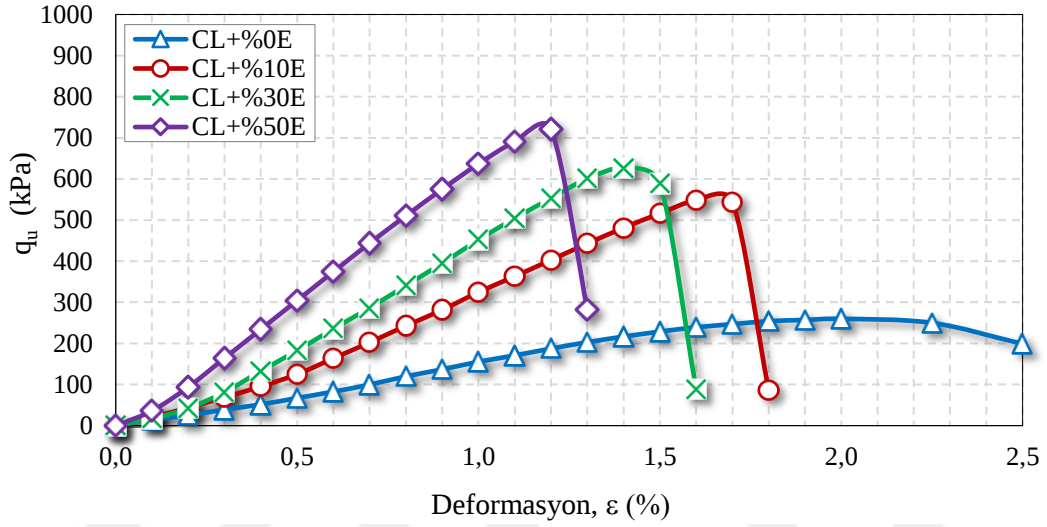
Tablo 17. Yarık silindir çelik tüp setine girmesi gereken malzeme miktarları

	Kalıba Girmesi Gerekten Malzeme Miktarı	Malzeme Deney Başı Ağırlık	Kalıba Girme Yüzdesi
CL + % 0E	322	320	99,3
CL + % 10E	372	340	91,4
CL + % 30E	380	358	94,2
CL + % 50E	378	354	93,7
CH + % 0E	347	327	94,2
CH + % 10E	371	353	95,1
CH + % 30E	388	363,4	93,6
CH + % 50E	386	373,4	96,7

Sıkıştırma el ile manuel olarak yapıldığından, girmesi gereken ağırlıklar tam olarak kalıp içerisine yerleştirilememiştir. Bu nedenle kalıba giren ağırlıklar girmesi gerekenden bir miktar düşük olmuştur.

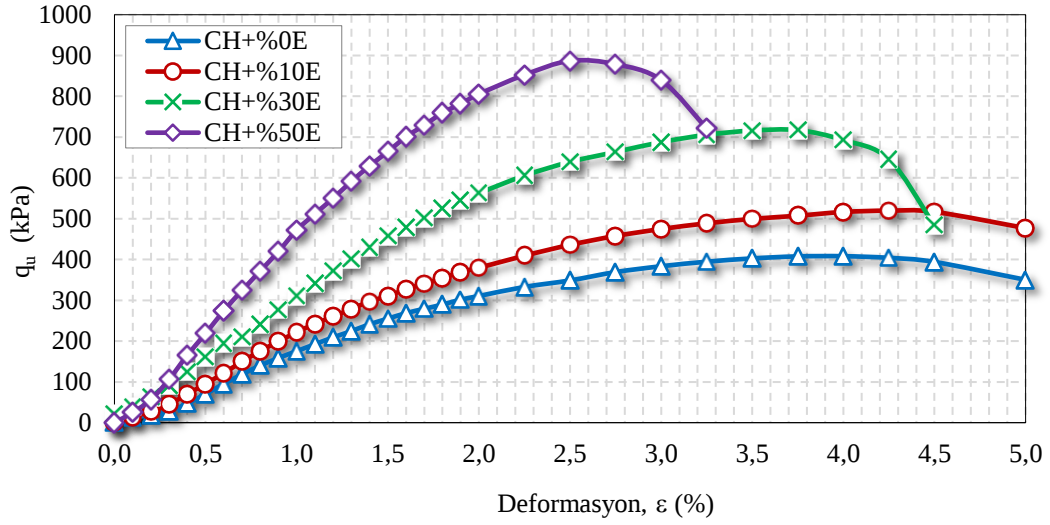
Düşük plastisiteli kil malzemesine ait $q_u - \varepsilon$ ilişkisini gösteren davranış Şekil 93’te gösterilmiştir. Burada mavi üçgen ile gösterilen grafik CL malzemesinin katkısız haldeki davranışını, kırmızı yuvarlak grafik %10 katkılı, yeşil çarpı işaretli grafik %30 katkılı ve mor renkteki kare grafik ise %50 katkılı haldeki grafiğini göstermektedir. Buna göre katkısız haldeki CL malzemesine ait grafik incelendiğinde, serbest basınç mukavemet değeri (q_u) oldukça düşük ve buna rağmen deformasyon yüzdesinin oldukça fazla olduğu görülmektedir. Fakat %10 gibi bir atık katkısı ilavesi ile q_u değerinin neredeyse iki katına çıktığı görülmektedir. Buna bağlı deformasyon yüzdesinde de önemli oranda iyileşme

meydana gelmiştir. Atık oranının %30 gibi bir seviyeye çıkması aynı şekilde serbest basınç parametrelerinde iyileşmeleri artırmıştır. Nitekim %50 gibi bir önemli atık miktarı da benzer şekilde iyileşmelere neden olmuş ve malzeme üzerindeki deformasyonları azaltarak serbest basınç mukavemet değerlerini önemli ölçüde artırmıştır. Burada %10 gibi bir atık oranı ilavesi ile parametrelerde önemli bir değişiklik olmakla birlikte atık miktarı artışı CL malzemesi üzerinde kademeli bir iyileşmeye neden olmuştur.



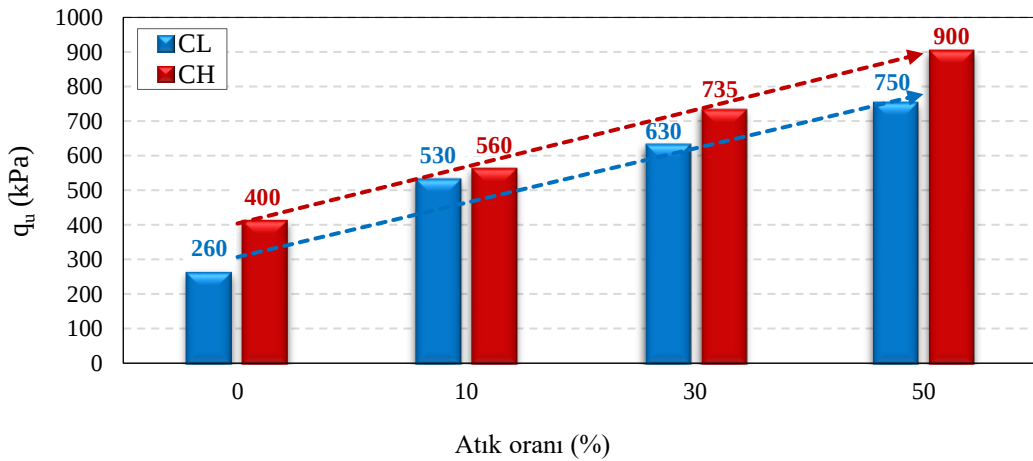
Şekil 93. CL zeminine ilave edilen katkı oranlarının anlık q_u üzerindeki etkisi

Yüksek plastisiteli kil malzemesine ait serbest basınç deney sonuçları Şekil 94'te gösterilmiştir. Burada mavi üçgen ile gösterilen grafik CH zemininin katkısız haldeki davranışını, kırmızı yuvarlak grafik %10 katkılı, yeşil çarpı işaretli grafik %30 katkılı ve mor renkteki kare grafik ise %50 katkılı haldeki grafiğini göstermektedir. Buna göre katkısız haldeki CH zeminine ait grafik incelendiğinde, CL zeminine oranla deformasyon yüzdesinin oldukça fazla olduğu görülmektedir. Fakat %10 gibi bir atık katkısı ilavesi ile q_u değerinde artış olmasına rağmen deformasyon yüzdesinde kayda değer bir iyileşme görülmemiştir. Fakat atık oranının %30 gibi bir seviyeye çıkması serbest basınç değerini önemli oranda artırmış ve deformasyon yüzdesinde de iyileşmeye neden olmuştur. Nitekim %50 gibi bir önemli atık miktarı, CH zemini üzerinde en etkili iyileşmeyi göstermiş olup hem serbest basınç değerini önemli seviyede artırmış hem de deformasyon yüzdesinde gözle görülür bir azalmaya neden olmuştur.



Şekil 94. CH zeminlerine ilave edilen katkı oranlarının anlık q_u üzerindeki etkisi

Şekil 95’de atık yüzdesine bağlı CL ve CH zeminlerinin serbest basınç mukavemet değerlerinde meydana gelen değişimler sütun grafik olarak değerleri ile birlikte verilmiştir. İlk olarak verilen kırmızı sütunlar CL zeminini, mavi ile gösterilen sütunlar ise CH zeminini göstermektedir. Buna göre katkısız halde CL zeminine ait q_u değeri 260 kPa iken %10 katkı ilavesinde 530 kPa, %30 katkı ilavesinde 630 kPa ve %50 oranında katkı ilavesi ile 750 kPa değerine ulaşmıştır. Buna göre katkı ilavesinin artışı serbest basınç mukavemet değerleri üzerinde olumlu etkiye sebep olmuş öyle ki katkısız duruma göre %50 katkı ilavesi CL zemini üzerinde % 288 oranında bir mukavemet artışına neden olmuştur.

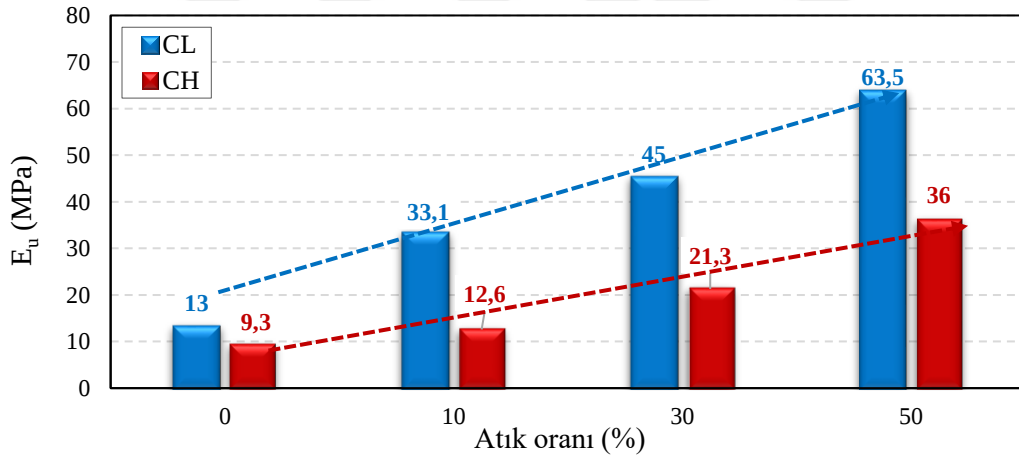


Şekil 95. CL ve CH zeminlerine ilave edilen katkı oranlarının anlık q_u üzerindeki etkisi

Aynı şekilde katkısız halde CH zeminine ait q_u değeri 400 kPa iken %10 katkı ilavesinde 560 kPa, %30 katkı ilavesinde 735 kPa ve %50 oranında katkı ilavesi ile 900 kPa değerine ulaşmıştır. Buna göre katkı ilavesinin artışı serbest basınç mukavemet değerleri üzerinde sistematik bir artış göstermiştir. Özellikle katkısız duruma göre %50 katkı ilavesi CH zemini üzerinde % 225 oranında bir mukavemet artışına neden olmuştur.

Atık yüzdesinin artışına bağlı olarak her iki kohezyonlu zemin türünde de kademeli olarak iyileşmenin olduğu açıkça görülmektedir. CH gibi problemli bir zeminin atık miktarındaki artışa bağlı gösterdiği önemli miktardaki iyileşme trendi, bu atık malzemesinin zeminlerin stabilizasyonunda etkili olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Zeminlerin Elastisite modülü (Young modülü, E_u), geoteknik mühendisliği uygulamaları açısından oldukça önemli bir parametredir. Bu modül, zeminin deformasyon kabiliyetini ve yük altında davranışını belirler. Etkili atık oranları ile hazırlanan zemin numunelerinin Elastisite modülleri hesaplanmış ve Şekil 96'da gösterilmiştir. Burada hesaplanan drenajsız Elastisite modülüdür (E_u).



Şekil 96. CL ve CH zeminlerine ilave edilen katkı oranlarının E_u üzerindeki etkisi

Şekil 96'da etkili oranlar kullanılarak hazırlanan kil zemin numunelerinde atık oranlarının artışına bağlı olarak zeminlerin drenajsız Elastisite modüllerinde artışların olduğu görülmektedir. Kırmızı ile gösterilen CL zeminine ait Elastisite modülü katkısız halde 13 MPa, %10 katkı ilavesinde 33,1 MPa, %30 katkı ilavesinde 45 MPa ve %50 katkı ilavesinde 63,5 MPa seviyelerindedir. Özellikle %10 gibi bir atık ilavesi elastisite modülü değerinde 13 MPa'dan yaklaşık 34,3 MPa'a çıkarak önemli bir artış göstermiştir. Katkı

miktarının artışına bağlı olarak bu değer %50 atık ilavesi ile katkısız duruma göre %488,4 artış göstererek 63,5 değerine ulaşmıştır.

Aynı şekilde grafikte mavi ile gösterilen CH zemininde de durum benzerdir. Katkısız durumda CH zeminine ait Elastisite modülü 9,3 MPa, %10 atık ilavesinde 12,6 MPa, %30 atık ilavesinde 21,3 MPa ve %50 atık seviyesinde 36 MPa olarak bulunmuştur. CL zeminine göre buradaki Elastisite modülündeki artış durumu daha yavaş artış göstermesine rağmen katkısız durumda 9,3 MPa olan elastisite modülü atık miktarına bağlı kademeli artış göstererek %50 atık ilavesinde % 387 oranında bir artış ile 36 MPa değerine ulaşmıştır. Değerlerden de anlaşılacağı üzere atık miktarındaki artış gerek CL üzerinde gerekse CH üzerinde olumlu etkiye neden olarak her iki zemin içinde mukavemet değerinin arttığını göstermiştir. Etkili atık yüzdelерinin kullanılarak gerçekleştirilen serbest basınç deneyi sonuçları ile birlikte, daha önce karışımlara ait kıvam, kompaksiyon ve konsolidasyon sonuçları toplu olarak Tablo 18’de gösterilmektedir.

Tablo 18. Etkili atık oranlarıyla hazırlanan CL ve CH zeminlerin özellikleri

	W _L (%)	W _P (%)	W _R (%)	I _p (%)	USCS	γ _{kmaks} (kN/m ³)	W _{opt} (%)	C _r	C _c	Şişme Basıncı (kPa)	Şişme Yüzdesi (%)	q _u (kPa)	E _u (MPa)
CL + % 0E	43	20	16	23	CL	12,7	29	0,15	0,05	61,7	1,16	260	13
CL + % 10E	36	25	18	11	CL	14,8	28	0,11	0,02	36	0,24	530	33,1
CL + % 30E	34	23	17	11	CL	15,4	26	0,10	0,02	32,7	0,20	630	45
CL + % 50E	32	23	21	9	ML	15,8	22	0,09	0,01	13	0,12	750	63,5
CH + % 0E	260	58	11	202	CH	12,9	37	0,71	0,13	118,2	2,33	400	9,3
CH + % 10E	210	38	10	172	CH	14,2	33	0,47	0,09	267	3,92	560	12,6
CH + % 30E	150	33	12	117	CH	15,2	30	0,28	0,09	230,3	2,90	735	21,3
CH + % 50E	106	43	20	63	MH	16	23	0,20	0,11	131,1	1,66	900	36

3.6. Kür Süresi ve Malzeme Kaybının Serbest Basınç Mukavemeti (q_u) Üzerindeki Etkisi

Malzemeler laboratuvar ortamında hazırlanmış ve desikatörlerde 7, 15, 30, 60 ve 360 gün olacak şekilde farklı gün sürelerince küre bırakılmıştır. Kür sonunda malzemeler alınarak serbest basınç deneyi yapılmış ve elde edilen serbest basınç mukavemeti (q_u) ve Elastisite modülü (E_u) değerleri Tablo 19 ve Tablo 20’de verilmiştir.

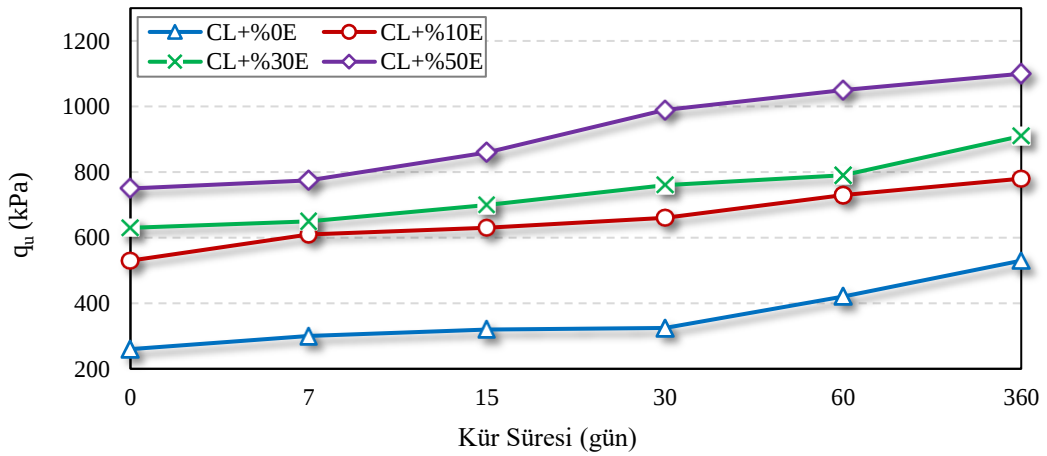
Tablo 19. Etkili atık oranları ile stabilize edilen CL ve CH zeminlerinin kür sürelerine bağlı q_u değişimleri

	Anlık q_u (kPa)	7 Gün q_u (kPa)	15 Gün q_u (kPa)	30 Gün q_u (kPa)	60 Gün q_u (kPa)	360 Gün q_u (kPa)
CL + % 0E	260	300	320	325	420	530
CL + % 10E	530	610	630	660	730	780
CL + % 30E	630	650	700	760	790	910
CL + % 50E	750	775	860	990	1050	1100
CH + % 0E	400	450	500	380	480	520
CH + % 10E	560	650	720	660	770	800
CH + % 30E	735	950	1080	890	1000	1060
CH + % 50E	900	1050	1210	1110	1190	1390

Tablo 20. Etkili atık oranları ile stabilize edilen CL ve CH zeminlerinin kür sürelerine bağlı E_u değişimleri

	Anlık q_u (MPa)	7 Gün q_u (MPa)	15 Gün q_u (MPa)	30 Gün q_u (MPa)	60 Gün q_u (MPa)	360 Gün q_u (MPa)
CL + % 0E	13	13,2	14,5	16,2	23,3	26,5
CL + % 10E	33,1	38,1	42,0	44,5	47,1	50,3
CL + % 30E	45	50,7	52,2	54,3	58,1	62,3
CL + % 50E	63,5	71,8	72,8	76,2	82,0	85,9
CH + % 0E	8,3	15,0	18,5	17,3	19,2	22
CH + % 10E	12,6	28,3	33,5	33,0	37,1	55,6
CH + % 30E	21,3	43,2	54,0	44,5	50,0	68,4
CH + % 50E	36	61,8	71,2	61,7	62,6	86,9

Şekil 97’de, CL zemininin etkili atık oranları ile stabilizasyonu sonucu kür sürelerine bağlı serbest basınç mukavemeti değerlerindeki değişimleri gösterilmektedir.



Şekil 97. CL zemininin etkili katkı oranlarında kür sürelerine bağlı q_u üzerindeki değişimleri

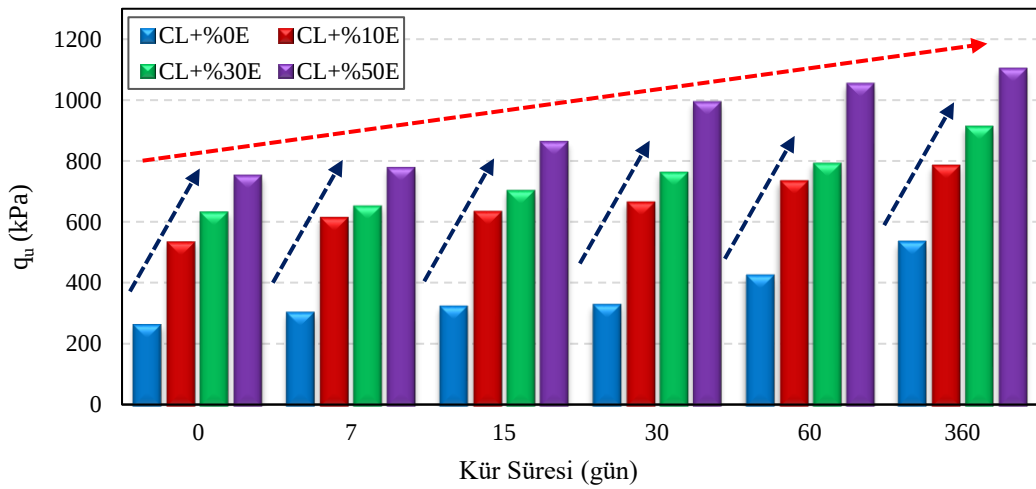
Grafikte mavi üçgen çizgi katkısız CL zeminini, kırmızı yuvarlak çizgi %10 katkılı CL zeminini, yeşil çarpı çizgi %30 katkılı CL zeminini ve mor kutu çizgi %50 katkılı CL zemininin farklı kür sürelerine bağlı q_u değişimlerini göstermektedir.

Çalışmada kullanılan CL (düşük plastisiteli) zemin numunesi, katkısız durumda anlık olarak $q_u=260$ kPa değerinde serbest basınç mukavemeti göstermiştir. Bu değer, 7 günlük kür süresi sonunda 300 kPa, 15 günlük kür süresi sonunda 320 kPa, 30 günlük kür sonunda 325 kPa, 60 günlük kür sonunda 420 kPa ve 360 günlük kür sonunda 530 kPa seviyesine ulaşmıştır.

%10E katkısı ilavesi ile hazırlanan CL numunelerinde anlık q_u değeri 530 kPa olarak belirlenmiştir. Kür süresinin artmasıyla bu değer sırasıyla 7 gün için 610 kPa, 15 gün için 630 kPa, 30 gün için 660 kPa, 60 gün için 730 kPa ve 360 gün için de 780 kPa şeklinde artış göstermiştir.

%30E katkısında CL zemin numuneleri anlık olarak 630 kPa değerine ulaşmış, 7 günlük kür süresi sonunda 650 kPa, 15 günde 700 kPa, 30 günde 760 kPa, 60 günde 790 kPa ve 360 günde 910 kPa değerine kadar yükselmiştir.

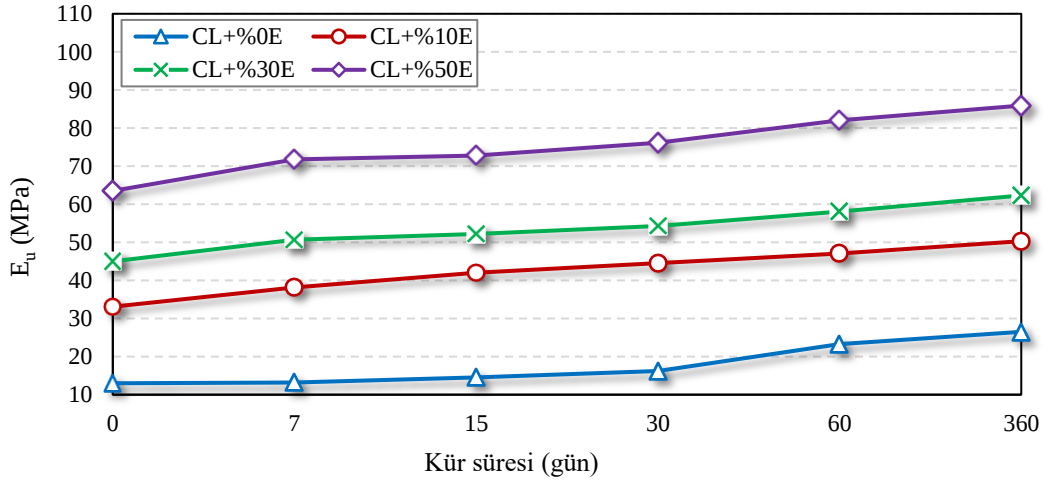
En yüksek katkı oranı olan %50E ilavesiyle hazırlanan CL zemin numuneleri ise anlık durumda 750 kPa olarak ölçülmüştür. Kür sürelerine bağlı olarak bu değerler 7 gün için 775 kPa, 15 gün için 860 kPa, 30 gün için 990 kPa, 60 gün için 1050 kPa ve 360 gün için ise 1100 kPa seviyelerine ulaşmıştır. Şekil 98'deki çubuk grafik, sonuçlar arasındaki değişimi görsel olarak sunarak bulguların daha net ve sistematik yorumlanmasını sağlamaktadır.



Şekil 98. CL zemininin etkili katkı oranlarında kür sürelerine bağlı q_u üzerindeki değişimleri

Özetle, kürsüz durumda anlık değeri 260 kPa olan katkısız CL zemini 360 günlük kür süresi sonunda bu değerini 530 kPa'ya, %10 katkılı CL zemini 530 kPa olan değerini 360 gün sonunda 780 kPa, %30 katkılı CL zemini 635 kPa olan değerini 360 gün kür süresi sonunda 910 kPa ve %50 katkılı CL zemini 750 kPa olan değerini 360 gün kür süresi sonunda 1100 kPa değerine çıkarmıştır. Genel eğilim, kür sürelerinin etkili atık oranlarında hazırlanmış CL zemini üzerinde olumlu sonuçlar gösterdiği yönündedir.

Şekil 99'da etkili atık oranlarında hazırlanan CL zemininin kür sürelerine bağlı Elastisite modülündeki değişimleri gösterilmektedir. CL zemini katkısız (CL+%0E) durumunda anlık olarak 13 MPa Elastisite modülüne sahipken, 7 günlük kür sonunda 13,2 MPa, 15 gün sonunda 14,5 MPa, 30 gün sonunda 16,2 MPa, 60 gün sonunda 23,3 MPa ve 360 gün sonunda 26,5 MPa değerine ulaşmıştır.

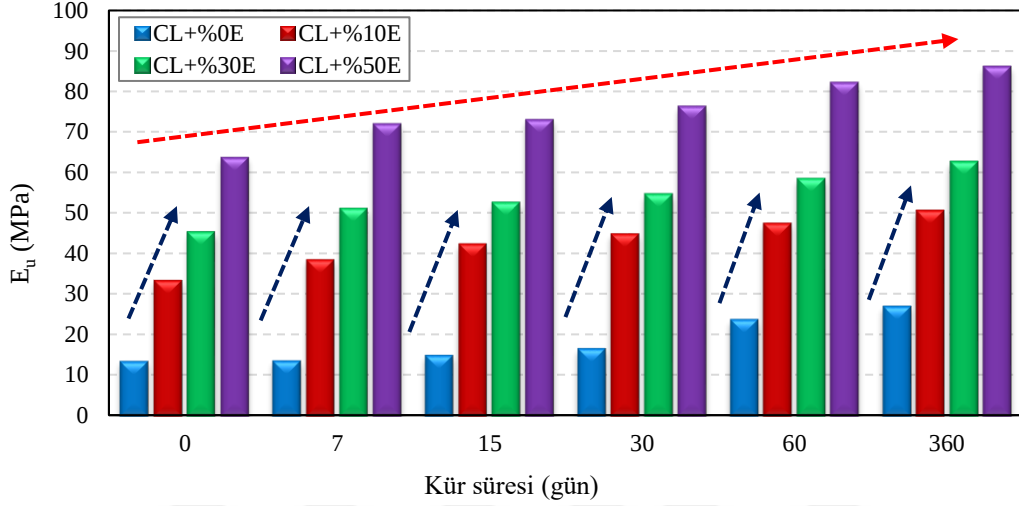


Şekil 99. CL zemininin etkili katkı oranlarında kür sürelerine bağlı E_u üzerindeki değişimleri

%10E katkısı içeren CL zemin numunesi anlık durumda 33,1 MPa Elastisite modülüne sahipken, kür süresi 7 gün olduğunda bu değer 38,1 MPa'ya, 15 gün sonunda 42 MPa'ya, 30 gün sonunda 44,5 MPa'ya, 60 gün sonunda 47,1 MPa'ya ve 360 gün sonunda 50,3 MPa'ya yükselmiştir.

%30E katkısı ile hazırlanan CL numunesi anlık durumda 45 MPa Elastisite modülü göstermiştir. Kür süresinin 7 gün olmasıyla bu değer 50,7 MPa'ya, 15 gün sonunda 52,2 MPa'ya, 30 gün sonunda 54,3 MPa'ya, 60 gün sonunda 58,1 MPa'ya ve 360 gün sonunda 62,3 MPa'ya ulaşmıştır.

%50E katkı oranına sahip CL zemin numunesi ise anlık olarak 63,5 MPa Elastisite modülüne sahipken, bu değer 7 gün sonunda 71,8 MPa'ya, 15 gün sonunda 72,8 MPa'ya, 30 gün sonunda 76,2 MPa'ya, 60 gün sonunda 82 MPa'ya ve 360 gün sonunda 85,9 MPa'ya kadar artış göstermiştir. Şekil 100'de verilen çubuk grafikler ile bu değişimler daha belirgin görülmektedir.

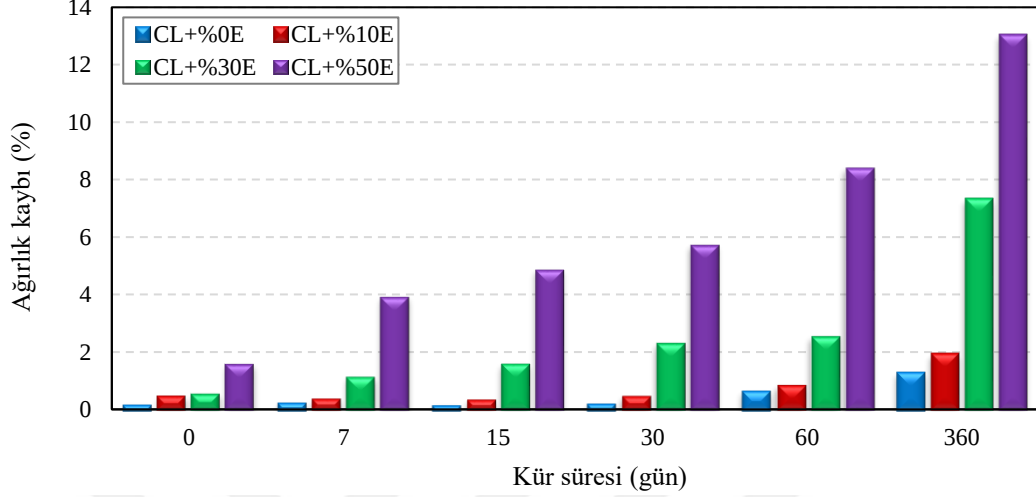


Şekil 100. CL zemininin etkili katkı oranlarında kür sürelerine bağlı E_u üzerindeki değişimleri

Şekil 100'de verilen değerlere bakıldığında CL zeminindeki bu eğilim tüm katkı oranlarındaki malzemelerde geçerli olup genel trend olarak artan kür süresi malzemelere ait Elastisite modülü değerlerinde artışa neden olmuştur. Sonuç olarak, kür süresi malzemelerde zamana bağlı olarak bir takım pozitif reaksiyonlar meydana getirerek malzemelerin mukavemet özelliklerinde iyileşme meydana getirdiği söylenebilir.

Kür süresi boyunca rijitlik artışına bağlı olarak numune yüzeyinde veya kütlesinde meydana gelen malzeme kaybı da önemli bir durumdur. Ağırlık kayıplarının belirlenmesinde, numunelerin kür işlemi sonunda ölçülen ağırlıkları ile serbest basınç deneyi sonrası sonrasında kalan numune ağırlıkları arasındaki fark esas alınmış ve bu fark, toplam ağırlığa oranlanarak yüzde cinsinden ifade edilmiştir (Zaimoğlu vd., 2013). Bu bağlamda, numunelerin kırılma anında gösterdiği davranışlar, ağırlık kaybı üzerinden değerlendirilerek, stabilizasyonun uzun vadeli fiziksel etkileri hakkında çıkarımlar yapılmıştır. Aşağıda verilen Şekil 101'de CL zemininin farklı kür süreleri için katkı oranlarına bağlı malzeme kayıpları verilmiştir. Kür süresi sonunda ölçülen su muhtevası

değerleri, numunelerin kür işlemine tabi tutulmadan önceki başlangıç su muhtevası değerlerinden ortalama olarak %1 daha düşük bulunmuştur.

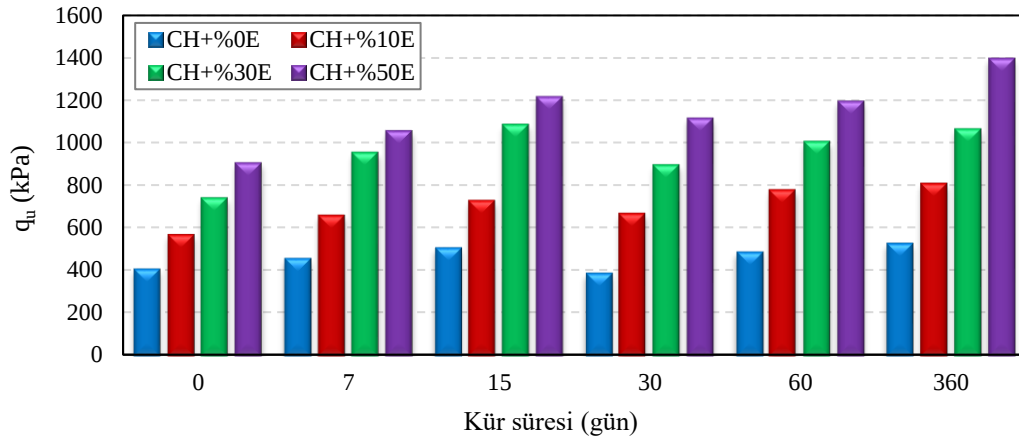


Şekil 101. CL zemininin kür sonrası serbest basınç deneyi sırasındaki malzeme kayıp yüzdesi

%0 ve %10E katkılı numuneler, düşük katkı oranına bağlı olarak daha az rijitlik kazanmış ve buna paralel olarak kırılma sırasında daha yumuşak deformasyon göstermiştir. Bu numunelerde oluşan düşük düzeydeki ağırlık kayıpları (<%1), malzemenin iç bütünlüğünün korunabildiğini ve kırılma sırasında parçalanma etkisinin sınırlı olduğunu göstermektedir.

%30E katkılı numunelerde, hem rijitlik hem de mukavemet artışı daha belirgin hale gelmiş, buna bağlı olarak ağırlık kaybı %2,5 seviyesine ulaşmıştır. Bu aşamada zemin daha rijit hale gelirken, kırılma davranışı da plastikten gevreğe doğru kayma eğilimi göstermektedir.

%50 E katkılı numuneler, en yüksek rijitlik ve mukavemet artışını sergilemiş, ancak bu artış, kırılma esnasında malzemenin ciddi oranda parça kaybına uğramasına neden olmuştur. 360 günlük kür sonunda gözlemlenen ağırlık kaybı, yüksek rijitliğin etkisiyle gevrek kırılmanın yoğunlaştığını ve numune bütünlüğünün kırılma sırasında daha fazla bozulduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, kür süresine paralel olarak katkı oranının artması zemin mukavemetini ve rijitliğini artırmakta, ancak bu artış aynı zamanda kırılma anındaki parça kopmalarını (dolayısıyla ağırlık kaybını) da beraberinde getirmektedir. Şekil 102’de, CH zemininin etkili atık oranları ile stabilizasyonu sonucu kür sürelerine bağlı serbest basınç mukavemeti değerlerindeki değişimleri gösterilmektedir.



Şekil 102. CH malzemesinin etkili katkı oranlarında kür sürelerine bağlı “ q_u ” üzerindeki değişimleri

CH (yüksek plastisiteli) zemin tipi katkısız (%0E) durumda anlık olarak 400 kPa serbest basınç mukavemeti göstermiştir. Bu değer kür süresinin 7 güne çıkarılmasıyla 450 kPa’ya, 15 gün ile 500 kPa’ya ulaşırken, 30 günlük sürede 380 kPa’ya düşmüş; 60 günde yeniden 480 kPa’ya ve 360 günde 520 kPa’ya yükselmiştir.

%10E katkısı ile hazırlanan CH zemin numuneleri anlık olarak 560 kPa mukavemet göstermiş, bu değer sırasıyla 7 gün için 650 kPa, 15 gün için 720 kPa, 30 gün için 660 kPa, 60 gün için 770 kPa ve 360 gün için 800 kPa değerine ulaşarak artış göstermiştir.

%30E katkı oranında CH zemin numunelerinde anlık q_u değeri 735 kPa olarak ölçülmüş, 7 gün sonunda 950 kPa, 15 gün sonunda 1080 kPa, 30 gün sonunda 890 kPa, 60 gün sonunda 1000 kPa ve 360 gün sonunda 1060 kPa değerine ulaşmıştır.

Son olarak, %50E katkısı ile hazırlanan CH zemini anlık durumda 900 kPa değerinde mukavemet göstermiştir. Bu değerler kür sürelerine bağlı olarak 7 gün için 1050 kPa, 15 gün için 1210 kPa, 30 gün için 1110 kPa, 60 gün için 1190 kPa ve 360 gün için 1390 kPa değerine ulaşmıştır. Şekil 102’de verilen grafik ile bu değişimler daha belirgin görülmektedir.

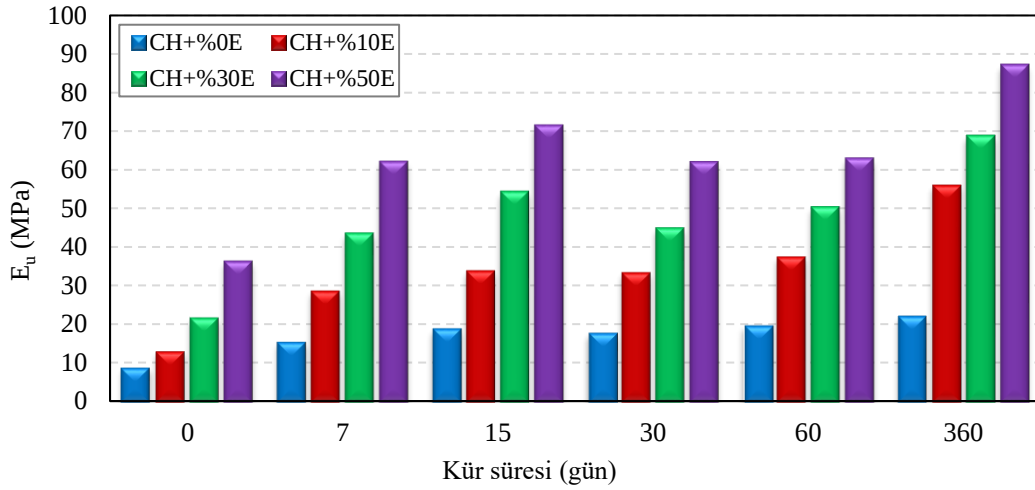
Anlık durumda malzemeler üzerinde atık yüzdesinin artışı mukavemet değerlerini artırmıştır. Nitekim anlık durumda $q_u=400$ kPa olan değeri %50 atık oranı ile $q_u=900$ kPa değerine çıkmıştır. Genel olarak kür süresi artışı Şekil 102’den de görüldüğü üzere, mukavemet değerleri artmış böylece 7 gün sonunda anlık 450 kPa olan q_u değeri 360 günlük kür sonunda 520 kPa değerine, %50 atık oranında 900 kPa q_u değeri 360 günlük kür sonunda 1390 kPa değerine ulaşmıştır. 15 günlük kür sonunda yüksek miktarda mukavemet artışı gözlenmiş ve daha sonraki mukavemet artışları yavaş hızda devam etmiştir.

İçme suyu arıtma tesislerinde genellikle alüminyum sülfat (alüm) veya demir klorür gibi koagülantlar kullanılır. Bu maddeler zemin ile karıştırıldığında özellikle kalsiyum içeriğiyle birlikte puzolanik reaksiyonları başlatabilir. Puzolanik reaksiyon, silis ve alüminyum içeren malzemelerin kalsiyum iyonları (örneğin kireçle veya doğal olarak zeminde varsa) ile reaksiyona girerek sekonder bağlayıcılar (C-S-H gibi) oluşturmaktadır. Bu reaksiyonlar ilk 7–15 gün arasında oldukça hızlı gerçekleşir. Amiri vd. (2024) marl zeminin stabilitesinin artırılması konusundaki çalışmasında puzolanik reaksiyonların kısa vadede yoğunlaştığını savunmuştur. James vd. (2018) kireçle stabilize edilmiş zeminin tek eksenli basınç dayanımının geliştirilmesinde uçucu kül ve çelik cürufu karışımlarının puzolanik faydasının araştırılmasını kapsayan çalışmasında, 7 ve 14. günlerde hızlı ve yüksek değerlerde mukavemet değerleri elde etmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, literatür ile uyumludur. Kısa sürede mukavemet artışları birçok faktöre bağlanabilir. İlk 15 gün, uygun sıcaklık ve nem koşullarında puzolanik reaksiyonlar hızla ilerler; oluşan C-A-H ve C-S-H jel fazları mikroyapının rijitliğini artırarak erken yaş dayanım gelişimine katkı sağlar.

Çamur atıkları, çok ince daneli yapıları sayesinde zemin içindeki gözenekli boşlukları etkili bir şekilde doldurarak mikro dolgu etkisi yaratır. Bu durum, zeminin boşluk oranını azaltmakta ve dane içi temas yüzeyini artırarak daha kompakt bir yapı oluşmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, bu atıklar yüksek su tutma kapasiteleri sayesinde ortamda bulunan serbest suyun bir kısmını absorbe eder. Böylece kilin plastikliği azalır ve daha az şekil değiştiren, daha rijit bir yapı ortaya çıkar. Plastik özelliklerin azalması, kohezyon kuvvetlerini artırarak zemin yapısının erken yaşta daha stabil ve dayanıklı bir matris haline gelmesine neden olur. Bu mekanizmalar birlikte değerlendirildiğinde, çamur atıkları ile zenginleştirilmiş zeminlerin kısa kür süreleri içinde belirgin bir dayanım artışı gösterdiği görülmektedir.

Arıtma çamurunda bulunan Al^{3+} ve Fe^{3+} gibi multivalan katyonlar, kil minerallerinin yüzeyinde yer alan zayıf bağlı monovalent katyonlarla (örneğin Na^+) iyon değişimine girerek kilin dispers yapısını bozar ve flokülasyon ile agregasyon süreçlerini başlatır. Bu iyon değişimi sonucunda kil danecikleri birbirine yaklaşarak daha yoğun bir yapı oluşturur; böylece zemin içerisindeki boşluk oranı azalır ve danecikler arası bağlar güçlenir. Bu mikroyapısal düzenlenme, zemin mukavemetinin artmasına ve daha kararlı bir yapı oluşmasına katkı sağlar. Sonraki süreçlerde mukavemet artışının yavaş gelişmesi, sistemin dengeye ulaşmasına bağlı puzolanik reaksiyonların daha yavaş gelişmesine ya da yeniden kristalleşme sürecine bağlanabilir (Wang vd., 2025).

Şekil 103'te etkili atık oranlarında hazırlanan CH zemininin kür sürelerine bağlı Elastisite modülündeki değişimleri gösterilmektedir. CH zemini katkısız durumda anlık olarak 8,3 MPa Elastisite modülü değerine sahipken, bu değer 7 gün sonunda 15,0 MPa, 15 gün sonunda 18,5 MPa, 30 gün sonunda 17,3 MPa, 60 gün sonunda 19,2 MPa ve 360 gün sonunda 22,0 MPa olarak ölçülmüştür.



Şekil 103. CH zemininin etkili katkı oranlarında kür sürelerine bağlı E_u üzerindeki değişimleri

%10E katkısı ile hazırlanan CH numunesi anlık olarak 12,6 MPa Elastisite modülüne sahip olmuş, bu değer 7 gün kür sonunda 28,3 MPa'ya, 15 gün sonunda 33,5 MPa'ya, 30 gün sonunda 33,0 MPa'ya, 60 gün sonunda 37,1 MPa'ya ve 360 gün sonunda 55,6 MPa'ya ulaşmıştır.

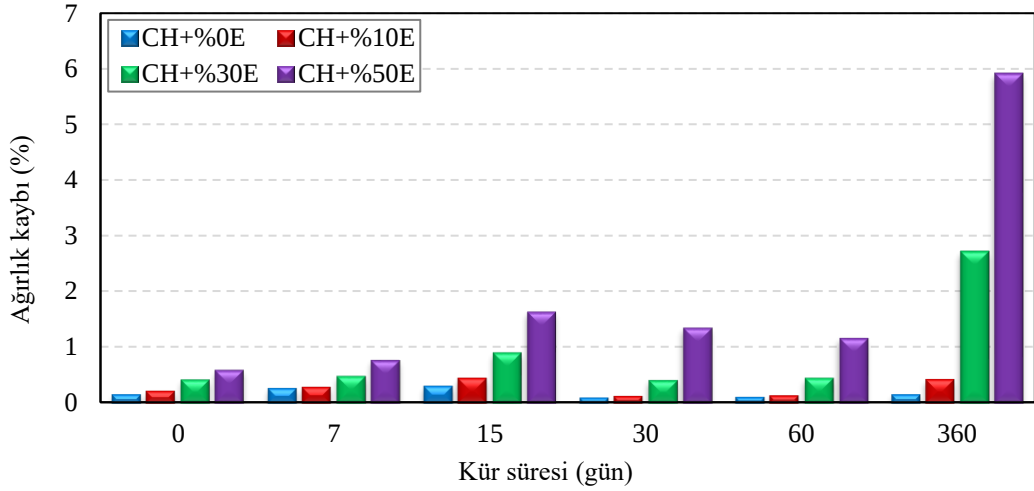
%30E katkı oranına sahip CH zemin numunesi anlık durumda 21,3 MPa Elastisite modülüne sahipken, 7 gün sonunda 43,2 MPa, 15 gün sonunda 54,0 MPa, 30 gün sonunda 44,5 MPa, 60 gün sonunda 50,0 MPa ve 360 gün sonunda 68,4 MPa değerlerine ulaşmıştır.

%50E katkısı ile hazırlanan CH zemin numunesi ise anlık olarak 36 MPa Elastisite modülüne sahip olup, bu değer 7 gün sonunda 61,8 MPa, 15 gün sonunda 71,2 MPa, 30 gün sonunda 61,7 MPa, 60 gün sonunda 62,6 MPa ve 360 gün sonunda 86,9 MPa olarak belirlenmiştir.

Artan kür süresi malzemelerin Elastisite modüllerinde artışa neden olmuş ve mukavemet değerlerini iyileştirmiştir. 7 ve 15 günlük kısa süreli kür sürelerinde, değişimler hızlı olmakla birlikte kür süresinin uzamasına bağlı olarak serbest basınç mukavemeti ve Elastisite modüllerindeki artış daha yavaş gelişmiştir. Bu durumun, kabin içerisine henüz

bırakılmış malzemelerin kimyasal tepkimelerinin daha hızlı gerçekleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kür süresine bağlı olarak zemin yapısında meydana gelen fizikokimyasal değişimler rijitlik ve mukavemet artışı ile sonuçlanırken, bu artış aynı zamanda deney esnasında numunelerde gözlemlenen malzeme dökülmelerine (parça kayıplarına) da neden olmuştur. Bu kapsamda, numunelerin kür sonundaki ağırlıkları ile kırılma sonrası ölçülen ağırlıklar ölçülerek kayıp yüzdeleri belirlenmiş ve rijitlik-parçalanma ilişkisi değerlendirilmiştir (Şekil 104). Kür süresi sonunda ölçülen CH zeminine ait su muhtevası değerleri, numunelerin kür işlemine tabi tutulmadan önceki başlangıç su muhtevası değerlerinden ortalama olarak %1 daha yüksek bulunmuştur.



Şekil 104. CH zemininin kür sonrası serbest basınç deneyi sırasındaki malzeme kayıp yüzdesi

CH + %0E katkılı kontrol numunesi, tüm kür süreleri boyunca en düşük ağırlık kaybını göstermiştir. Bu durum, katkı içermeyen zeminlerin nispeten daha düşük rijitliğe sahip olması nedeniyle kırılma sırasında daha az parçalanmaya uğradığını göstermektedir.

CH + %10E katkılı numune, başlangıçta düşük seviyede ağırlık kaybı göstermiş; kür süresi boyunca bu değer sabit kalmış ve 360 günde sınırlı bir artış göstermiştir. Bu katkı oranında rijitlik artışı kısıtlı olduğu için gevrek kırılma etkisi minimumda kalmıştır.

CH + %30E ve %50E katkılı numuneler, kür süresi uzadıkça özellikle 60. ve 360. günlerde belirgin şekilde artan ağırlık kayıpları sergilemiştir. Özellikle “%50E” katkılı numunede 360. gün sonunda ağırlık kaybı %6’ya ulaşmıştır. Bu durum, yüksek katkı

oranının zemin mukavemetini artırmakla birlikte kırılma anında yapısal bütünlüğün korunmasında zayıflamalara yol açtığını göstermektedir.

Katkı oranı ve kür süresi arttıkça zeminlerin iç yapısında meydana gelen puzolanik reaksiyonlar ve partiküller arası bağların gelişmesi, mukavemet ve rijitlik kazancına neden olmuştur. Ancak bu rijitlik artışı, kırılma anında elastoplastik deformasyon yerine gevrek kırılma davranışının baskın hale gelmesine yol açmıştır. Bu da numunelerin bütün halde dağılmadan kırılmasına engel olmuş; büyük parça kopmalarıyla sonuçlanan yüksek ağırlık kayıplarına neden olmuştur.

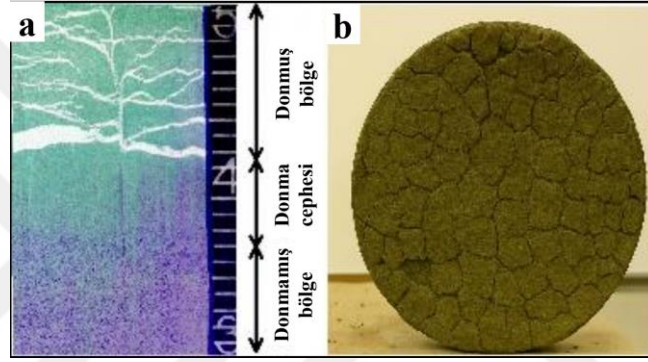
Elde edilen serbest basınç mukavemeti, Elastisite modülü ve ağırlık kaybı yüzdeleri birlikte değerlendirildiğinde, hem CL (düşük plastisiteli kil) hem de CH (yüksek plastisiteli kil) zemin tiplerinde, içme suyu arıtma çamuru katkı oranının ve kür süresinin artmasıyla birlikte serbest basınç mukavemetinde ve Elastisite modülü değerlerinde anlamlı düzeyde artışlar gözlemlenmiştir. Bu artışlar, zemin matrisinde rijitliğin belirgin şekilde yükseldiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, rijitlik kazanan numuneler, deformasyon kapasitesinin azalması nedeniyle daha gevrek bir kırılma davranışı sergilemiş; bu durum da deney sırasında parçalanma eğilimini artırarak kütsel malzeme kayıplarının yükselmesine neden olmuştur. Dolayısıyla, katkı oranı ve kür süresi, hem dayanım hem de kırılma mekanizması üzerinde birlikte etkili olmuş ve kırılma sonrası bütünlük açısından dikkate değer farklılıklar meydana getirmiştir.

3.7. Donma-Çözülme ve Malzeme Kaybının Serbest Basınç Mukavemeti Üzerindeki Etkisi

Donma-çözülme (D-Ç) döngüleri, zemin yapısının hem fiziksel hem de mekanik özelliklerinde önemli değişikliklere neden olan çok fazlı bir süreçtir. Literatürde donma-çözülmenin zeminlerin mekanik karakteristikleri üzerindeki etkileri hakkında birçok çalışma mevcuttur (Ma vd., 1999; Zhang vd., 2004; Simonsen vd., 2002; Lee vd., 1995). Sıcaklık düştükçe zemindeki su buza dönüşür, bu da hacimsel bir genişlemeye ve boşlukların artmasına yol açar. Bu genişleme, zemin danelerinin birbirinden ayrılmasına ve parçacıkların kırılmasına sebep olur. Sonuç olarak, zemin yapısının bütünlüğü bozulur ve dayanıklılığı azalır (Andersland ve Ladanyi, 2003).

Donma-çözülme sürecini anlamak için birçok araştırmacı tarafından uzun zamandır farklı çalışmalar yürütülmektedir (Beskow, 1991; Bronfenbrener ve Bornfenbrener, 2010;

Gilpin, 1980; Harlan, 1973; Konrad ve Morgenstern, 1980; Taber, 1929). Şekil 105'te görüldüğü gibi donma sırasında yatay buz mercekları ve dikey buz damarları oluşarak buz merceği ağı yapısı oluşur. Donma kabarması sırasında donan zeminde üç belirgin bölge bulunur: donmuş bölge, donmamış bölge ve donmuş saçak. Bu bölgeler Şekil 105'te gösterildiği gibidir. Donmuş saçak, büyüyen (en sıcak) yatay buz merceği ile don cephesi (sıfır derece izoterm) arasındaki bölgedir, yani en sıcak gözenek buzunun bulunduğu bölgedir. Donmuş saçak kavramı ilk olarak Miller (1972) tarafından ortaya atıldığından beri, donmuş saçığın özelliklerinin don kabarma sürecinde çok önemli bir rol oynadığı anlaşılmıştır.



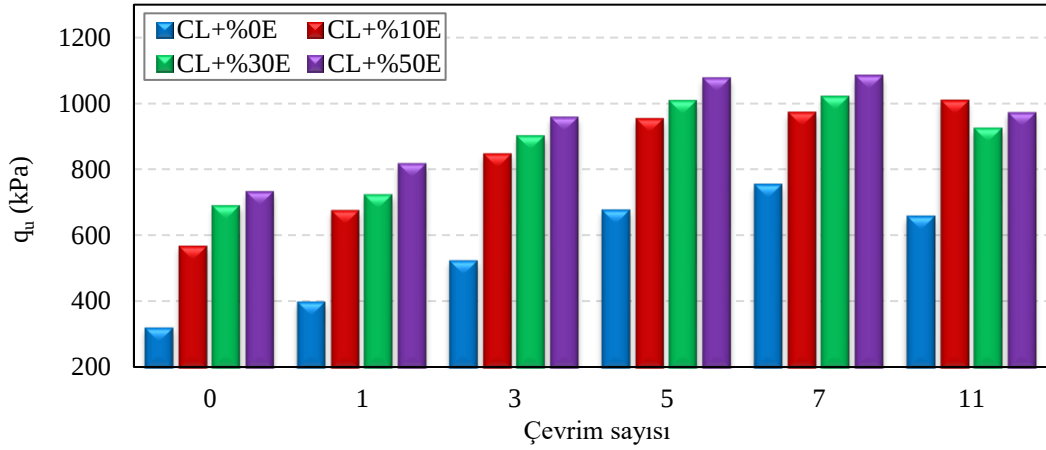
Şekil 105. Don kabarması özellikleri: (a) dikey numune kesitinde görülen ağıs buz yapısı ve (b) son buz merceğinin tabanındaki yatay numune kesitinde görülen donmuş saçak içindeki donma kaynaklı çatlaklar (Xia, 2006). Numune çapı = 10 cm.

Xia (2006) tarafından gerçekleştirilen tek boyutlu donma testleri, donmuş saçak ve/veya içinden geçen çatlakların varlığını göstermiştir (Şekil 105). Yatay buz merceklarinin ve dikey buz damarlarının oluşumundan önce oluşan bu çatlaklar, don kabarma süreciyle ilişkili önemli özelliklerdir, çünkü bunların hem don kabarmasının büyüklüğünü hem de donmuş saçak içindeki nem transfer hızını veya hidrolik iletkenliği etkilediğine inanılmaktadır (Arenson vd, 2008; Azmatch vd, 2008). Don kabarması üzerine yapılan önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlar, sahada veya laboratuvarında gözlenen önemli don kabarmasının, suyun donma cephesine göçü ve gelişen ayrışma buzuyla ilişkili buz merceği oluşumuna atfedildiğini göstermektedir. Tablo 21'de farklı çevrim sayılarının CL ve CH zeminleri üzerinde atık yüzdesine bağlı serbest basınç mukavemeti değerlerindeki değişimleri göstermektedir. Bu değerler ile oluşturulan CL zeminine ait grafik Şekil 106'da verilmiştir. Buna göre mavi üçgen çizgi katkısız CL zeminine ait D-Ç grafiğini

göstermektedir. Kırmızı yuvarlak çizgi %10 atık oranını, yeşil çarpı işaretli çizgi %30 atık oranını ve mor renkli kare çizgi %50 atık oranını ifade etmektedir.

Tablo 21. Farklı çevrim sayılarının q_u üzerindeki etkisi

	Anlık q_u (kPa)	1. Çevrim q_u (kPa)	3. Çevrim q_u (kPa)	5. Çevrim q_u (kPa)	7. Çevrim q_u (kPa)	11. Çevrim q_u (kPa)
CL + % 0E	316	395	520	673	751	655
CL + % 10E	566	673	844	950	970	1006
CL + % 30E	687	720	899	1006	1018	922
CL + % 50E	731	815	955	1074	1081	969
CH + % 0E	403	353	313	390	292	456
CH + % 10E	692	423	381	623	410	611
CH + % 30E	1021	857	756	1037	645	929
CH + % 50E	1097	1080	1069	1098	895	1226



Şekil 106. CL zemininin etkili katkı oranlarında çevrim sürelerine bağlı q_u değeri üzerindeki değişimleri

Şekil 106'daki grafik sonuçlarında bakıldığında, öncelikle atık miktarının artışı, gerek anlık durumda gerek ise çevrim sayılarının artışına bağlı olarak CL zemininin mukavemet değerinde artışa neden olmuştur. %10 gibi bir atık oranı bile atıksız CL zemininin mukavemet değerini gözle görülür seviyede artırmıştır. Fakat %30 ve %50 oranları %10 kadar etkili bir artışa neden olmamıştır. Çevrim sayılarının durumunu değerlendirmek gerekirse aslında her atık oranında benzer bir eğilimin gözlemlendiği ve 7. çevrime kadar tüm oranlarda bir artışın meydana geldiği açıktır. Fakat çevrimlerin devam etmesi ile birlikte mukavemet değerlerinde fazla olmamakla birlikte bir miktar azalmanın olduğu görülmektedir. %10 atık oranındaki çizgiye ait 11. çevrim değerinin grafikteki eğilime aykırılığının deneysel bir hatadan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Düşük plastisiteli kil üzerine içme suyu arıtma çamuru eklenerek yapılan donma-çözülme çevrim deneylerinde, ilk çevrimlerde suyun donmasıyla gözeneklerdeki basıncı artırdığı, bu durumun daneciklerin düzenini değiştirerek birbirine daha sıkı bağlanmasına ve erken dönemde mukavemet artışına yol açtığı düşünülmektedir. 7. çevrime kadar mukavemette artışın olması bu durumdan kaynaklanabilir. Nitekim birçok araştırma, donma-çözülme döngülerinin yalnızca zeminin mukavemetini değiştirmediğini, aynı zamanda parçacıkların düzenlenmesini de yeniden yapılandırıldığını bildirmektedir (Ahmadi vd., 2021a; Changizi vd., 2022). Bu süreç, mukavemetin artışına katkı sağlar.

Donma-çözülme süreci sırasında zemin içerisinde sıcaklık farklarına ve suyun faz değişimine bağlı olarak üç farklı nem bölgesi meydana gelir. Bu bölgeler, donma-çözülme döngüsünün zemin üzerindeki etkilerini anlamak açısından kritik öneme sahiptir. Bunlar, “Donmuş Bölge”, “Donma Cephesi” ve “Donmamış Bölge”dir. *Donmuş bölge* (Frozen Zone), sıcaklığın 0°C ’nin altına düştüğü ve zemin içindeki boşluk suyunun tamamen donarak buz haline geldiği alandır. Mekanik olarak zemin sertleşmiş ve gevrekleşmiş yapıdadır. *Donma Cephesi* (Freezing Front), donmuş ve donmamış bölgeler arasında yer alan geçiş zonudur. Burada sıcaklık yaklaşık 0°C civarındadır ve suyun sıvıdan buza dönüşümü gerçekleşir. Bu bölgede su yukarıya doğru göç eder ve donarak buz mercekleri (ice lenses) oluşturur. Bu nedenle nem içeriği en yüksek olan ve suyun yoğunlaştığı kritik bölgedir. *Donmamış Bölge* (Unfrozen Zone), zemin sıcaklığının hâlâ 0°C ’nin üzerinde olduğu ve suyun sıvı halde bulunduğu en alt katmandır. Nem oranı yüksektir, çünkü su henüz donmamıştır. Bu bölge, donma cephesine su temin eden kaynak konumundadır (Joudieh vd., 2024).

Donma-çözülme döngüleri, dış ortamdan su girişinin olmadığı kapalı sistemlerde gerçekleştiğinde, zemin içerisinde mevcut olan nem ve çevresel nem, döngü süresince kritik bir rol oynar. Zemin yüzeyine, donma sıcaklığının altında ani ve sabit bir sıcaklık uygulandığında, sistemde dengede olmayan bir ısı akışı başlar. Oluşan bu ısı dengesizliği, termodinamiğin temel yasası olarak sıcaktan soğuğa doğru ilerleyen bir ısı gradyanı (emme gradyanı) oluşturarak, ısının donmamış bölgeden daha soğuk olan donma cephesine doğru taşınmasına neden olur. Donma cephesine ilerleyen su, don olaylarının yaygın olarak görüldüğü kış aylarında, zeminin yüzey kısmının donmaya başlamasıyla donma cephesi zamanla derinleşerek zeminden aşağıya doğru ilerler (Azmatch et al., 2012) ve zemin içindeki boşluk suyunun yerinde (in-situ) donmasına yol açarak bu bölgede buz kristalleri

oluşmaya başlar. Bu buz mercekleleri (ice lenses) zeminde şişme, çatlama, mukavemet kaybı gibi mühendislik açısından önemli etkiler yaratabilir.

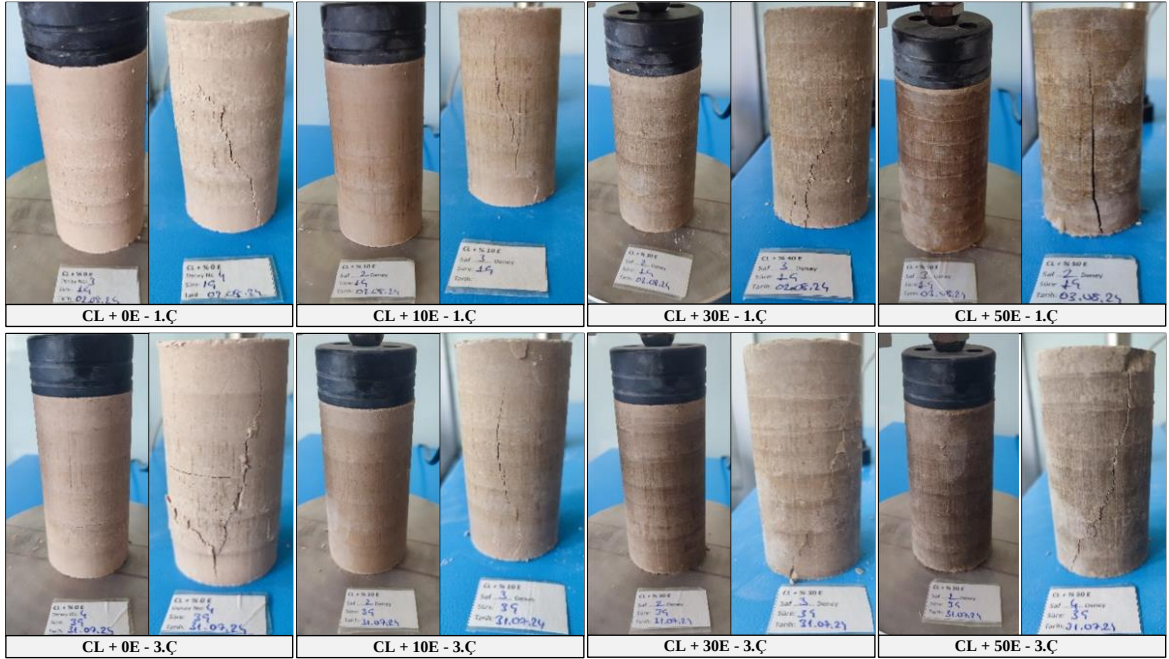
Donma cephesine doğru bu taşınım, donma cephesine yakın bölgelerde su içeriğini artırır, çünkü su bu bölgeye toplanır. Su içeriği arttıkça, aynı hacimdeki zeminde kuru zemin miktarı azalır (Wong ve Haug, 1991). Bu da kuru birim hacim ağırlığının düşmesine neden olur. Fakat bu su göçü, killi zeminlerin hem çok düşük su geçirgenliğine sahip olması ve kapalı sistemde nem oranının azlığı hem de su hızının düşük olması nedeniyle kısa sürede durur ve donma cephesine ulaşamaz (Andersland ve Ladanyi, 2003). Sonuç olarak, donma cephesinde sürekli su beslemesi gerçekleşemez, bu da buz merceklelerinin oluşumunu sınırlar ve zemin şişmesi gibi etkiler daha sınırlı olur.

Çözülme sürecinde, örneğin çekirdek sıcaklığı yüzeye göre daha düşük kalır; bu nedenle yüzeyde eriyen su, iç kısımlara doğru göç eder. Aslında daha düşük sıcaklıkta olan çekirdek kısımda bir emme gradyanı oluşur ve su bu bölgeye doğru hareket eder. Ancak çekirdek sıcaklığının artmasıyla bu su göçü de kısa sürede durur. Numune sıcaklığının artmasıyla birlikte, zemin içindeki buz erir; üst tabakaların kendi ağırlığıyla birlikte boşluk hacmi azalır ve bu da örnek hacminde (yükseklik olarak) bir azalmaya neden olur. Ancak bu hacim azalışı, donma sırasında oluşan şişme miktarından daima daha azdır. Bu fark, zeminin kohezyon (bağlayıcılık) özelliğinden kaynaklanır.

Donma sırasında merkezden yüzeye doğru olan su göçüne “ileri göç (forward migration)”, çözülme sırasında yüzeyden merkeze doğru olan su göçüne ise “ters göç (converse migration)” adı verilir. İleri göç miktarı her zaman ters göçten fazladır. Ancak birkaç çevrimden sonra bu iki göç türü arasında da bir denge oluşur ve hacim değişimi (numune yüksekliği ile ölçülen), sabit bir değere ulaşır. Bu durum, numunenin iç yapısında dinamik bir denge oluştuğunu gösterir. Mevcut deneyde, bu dengeye ulaşmak için gereken çevrim sayısı 7'dir (Wang vd., 2007). Bu anlamda Şekil 106'da görüldüğü üzere çalışmamız 7. çevrimde dengenin sağlanması bakımından literatürle uyumludur.

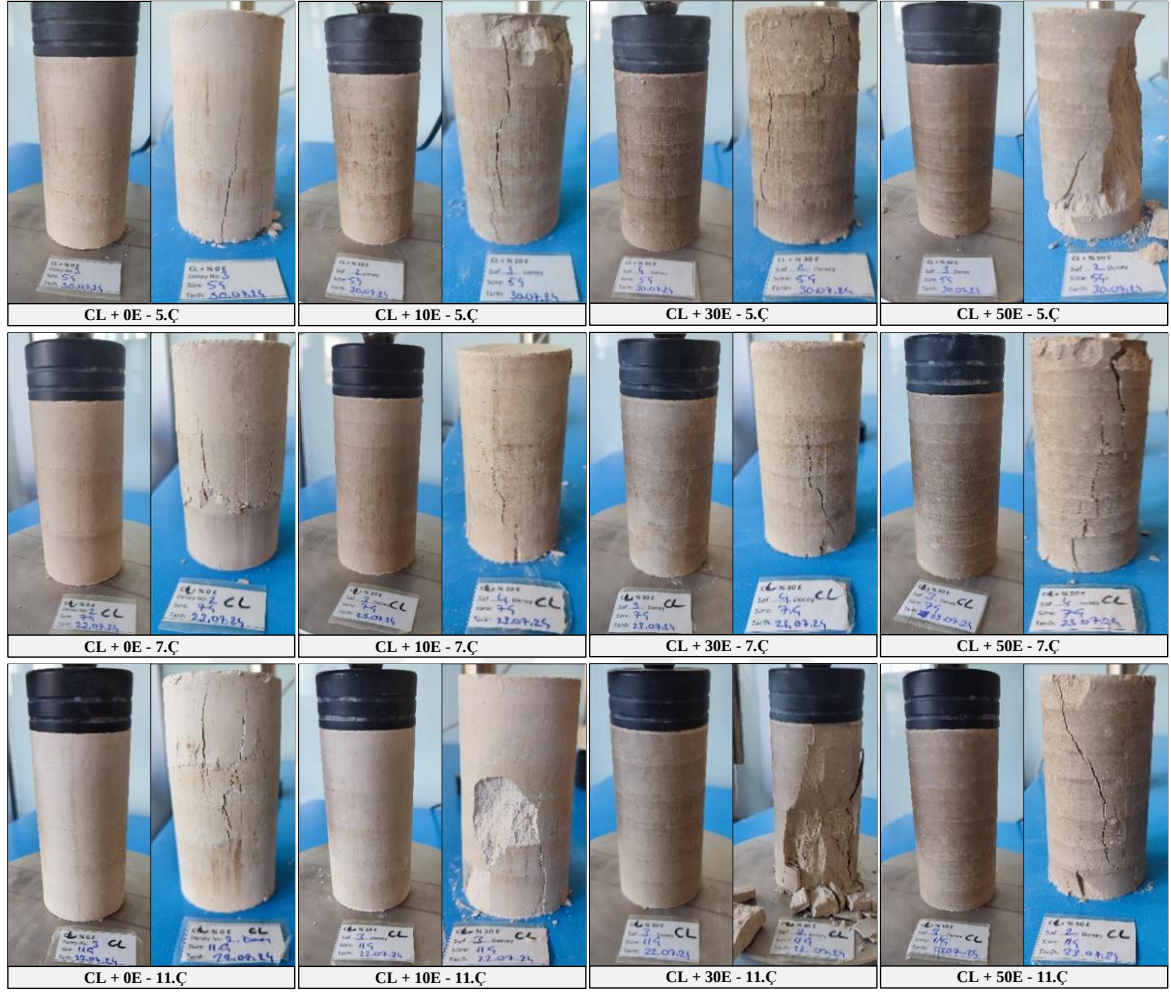
Kısaca kapalı sistemde zeminlerde 11. çevrim gibi çevrim sayısının artmasıyla birlikte kabinde kalma süresi arttıkça su muhtevasında bir kısım artışlar görülebilir. Fakat denge konumuna ulaştıktan sonra sürekli bir nem taşınımı olmadığından bu su miktarındaki sınırlı artış dahi kuru birim hacim ağırlığının dolayısı ile mukavemet değerinin düşmesine neden olmaktadır. Düşük plastisite zeminlerin plastisite özellikleri yüksek plastisiteli zeminlerinkinden daha düşük olduğundan her ne kadar kabin içi su muhtevalarında artış görülse de Şekil 107 ile Şekil 114'ten de görüldüğü üzere hacim değişim miktarları aynı

olmamaktadır. Literatürde benzer çalışmalar mevcuttur. Örneğin, Ahmadi vd., 2021b donma çözülme döngülerinin killi zeminlerin mikro yapısal ve işlevsel özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması üzerine yaptığı çalışmasında mukavemet değerlerinin donma ve çözülme sürelerinin artmasıyla düştüğü göstermiştir. Şahin vd., 2008 çalışmasında, tuzlu-sodali zeminlerin kanalizasyon çamuru veya uçucu kül ile karıştırılması sonucu elde edilen malzemeler üzerinde donma ve çözülme işlemlerinin etkisini incelemiş ve çamur atığı eklenen tuzlu-kil zeminlerin donma-çözülme çevrimleri sırasında 3. ve 6. çevrimlerde stabilitesinin arttığı, ancak 9. çevrimde bulk yoğunluğunun önemli ölçüde azaldığı belirtilmiştir. Liu vd. (2020), artan D-Ç döngülerinin zemin içindeki hidratasyon ürünlerinin kristal yapısına zarar verebileceğini ve mukavemette azalmaya yol açabileceğini belirtmişlerdir. Fakhrabadi vd. (2025), D-Ç döngüleri sırasında sertleşmiş zemin içerisinde hidratasyon ürünlerinin oluşumu ve çözünmesinin, mukavemetin önce artmasının ve ardından kademeli olarak azalmasının temel nedeni olduğunu bulmuştur. Shi vd. (2024) sertleşmiş zeminin mukavemetinin D-Ç döngülerindeki artışla azaldığını ve bunun sonucunda zemin içerisinde çapı 1 μm 'den büyük gözenek sayısında artış meydana geldiğini incelemiştir. Çetin vd. (2024), yüksek donma-çözülme döngülerinin zeminin mukavemet özelliklerini azalttığını savunmuştur.



Şekil 107. Deney öncesi ve sonrası CL zemini D-Ç numuneleri

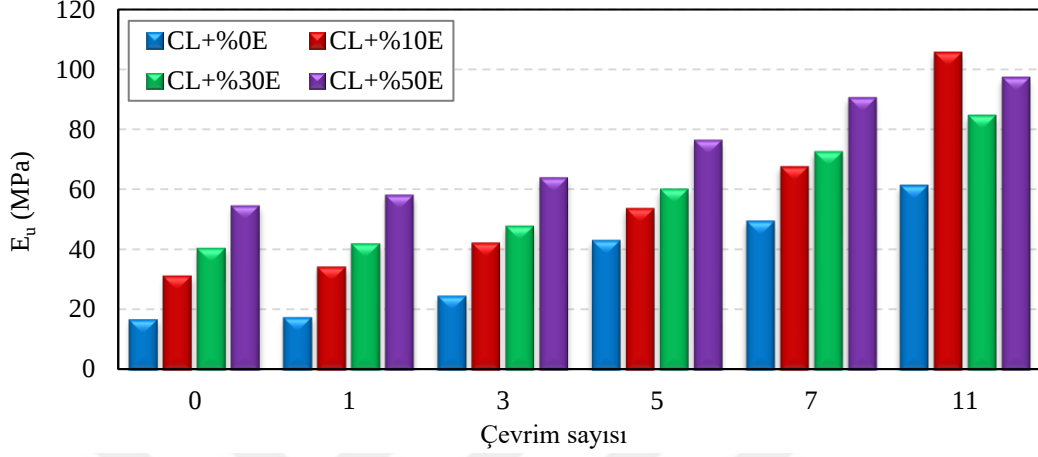
Şekil 107'nin devamı



Farklı çalışmalarda artan çevrim sayısına bağlı mukavemet değerinin sürekli artışı çalışmalar bulmak da mümkündür. Örnek olarak Zhang vd. (2024) yılında depolama sahası çamurunda donma-çözülme döngüsü işleminin fizikokimyasal ve fiziksel-mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırdığı çalışmasında çevrim sayısının artışının olumlu değişimlere sebep olduğunu açıklamıştır. Dolayısı donma çözülme döngülerinin etkileri atık türüne, donma-çözülme sıcaklık değerlerine, çevrim sayısına ve deney süresi gibi birçok farklı parametrelere bağlı olarak değişebilmektedir (Ahmadi vd., 2021b; Li vd., 2012; Liu vd., 2016). Bu nedenle farklı donma-çözülme döngüleri altında fizikokimyasal özelliklerin ve fiziksel-mekanik özelliklerin değişimi hala belirsizliğini korumaktadır (Zhang vd., 2024).

Elastisite modülü, zeminlerin deformasyon ve stabilite analizinde hesaba katılması gereken önemli bir parametredir (Liu vd., 2016). Donma-çözülme döngülerinin elastisite modülü üzerindeki etkilerini inceleyen birçok çalışma mevcuttur (Klaveren 1987; Formanek vd., 1984; Aoyama vd., 1985; Yong vd., 1985; Simonsen vd., 2002). Johnson ve arkadaşları

(1979) donma-çözülme döngüsü altında gerçekleştirdikleri yerinde ve laboratuvar testleri sonucunda hem silt hem de kilin elastisite modülünün ve poisson oranının donma-çözülme döngüsünden önemli ölçüde etkilendiğini göstermişlerdir.



Şekil 108. CL zemininin etkili katkı oranlarında çevrim sürelerine bağlı E_u üzerindeki değişimleri

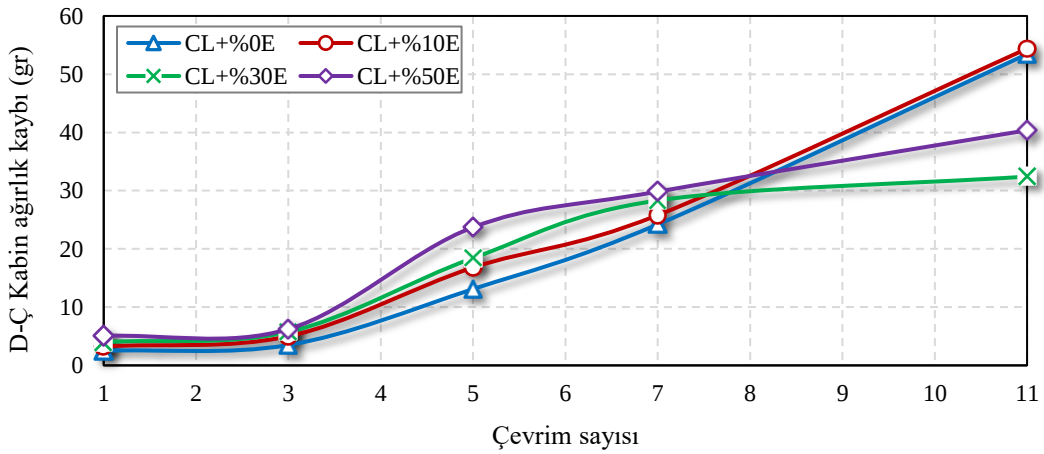
Çevrim sayısının Elastisite modülü üzerindeki etkisine bakıldığında CL+%0E (mavi üçgen) en düşük başlangıç elastisite modülüne sahiptir ve çevrim sayısının artışına bağlı zamanla artış göstermektedir. Fakat diğer gruplara göre artış daha düşüktür. CL+%10E (kırmızı daire), orta seviyede bir başlangıç Elastisite modülü ile başlamakta fakat çevrim sayısının artışına bağlı mukavemet değerindeki artış miktarı, atıksız CL+%0E malzemesine oranla daha belirgin olmaktadır. CL+%30E (yeşil çarpı), başlangıç değeri CL+%10E'den biraz daha yüksek olup, zamanla düzenli bir artış göstermektedir. Ancak, CL+%10E kadar büyük bir artışa sahip değildir. Şekil 108'den de görüldüğü üzere birbirlerine oldukça yakındır. CL+%50E (mor beşgen), en yüksek başlangıç Elastisite modülü ile başlamakta ve zamanla artış göstermektedir. Ancak artış oranı belirli bir noktadan sonra azalmaktadır. Grafikten genel eğilim olarak her ne kadar çevrim sayısını artışının tüm oranların mukavemet değerlerini artırdığı gösterse de, grafiğine dikkatli bakıldığında 7. ila 11. çevrimler arası artışın 7. çevrim kadar güçlü olmayıp malzeme üzerindeki değişimlerin oldukça yavaşladığı görülmektedir. Bu anlamda 7. çevrim, malzeme için en anlamlı değerin alındığı çevrim süresidir.

Donma-çözülme döngüleri, zeminlerin hem taşıma kapasitesi (mukavemeti) hem de deformasyon davranışlarını etkileyen karmaşık fiziksel değişimler oluşturur. Bu bağlamda,

yüksek sayıda çevrim, özellikle puzolanik reaksiyon sonucu oluşmuş olan C-S-H veya C-A-H bağlayıcı fazların çözünmesine veya ayrışmasına neden olabilir. Bu da 11. çevrimde malzemede mukavemet kaybı yaşatabilir. Mukavemet düşerken elastisite modülünün artması, yapının daha rijit fakat daha kırılğan hâle gelmesiyle açıklanabilir. Yani zemin, daha az deformasyonla daha erken kırıldığı için elastisite modülü yükselmiş görünür, ancak enerji absorbe edebilme kapasitesi azalmıştır.

Donma-çözülme deneyleri sırasında oluşan malzeme kaybı, genellikle malzemenin dayanıklılığını ve mekanik özelliklerini ölçmek amacıyla yapılan testler sırasında ortaya çıkar. Bu tür testler, malzemenin çevresel koşullara (özellikle su buharı, sıcaklık değişimleri ve nem) karşı gösterdiği dayanıklılığı değerlendirir. Donma ve çözülme sürecinin tekrar etmesi, malzemenin yapısal bütünlüğünü zayıflatabilir, çünkü her döngüde malzeme mikro düzeyde genişler ve büzülür, bu da çatlamlar veya diğer deformasyonlara yol açabilir.

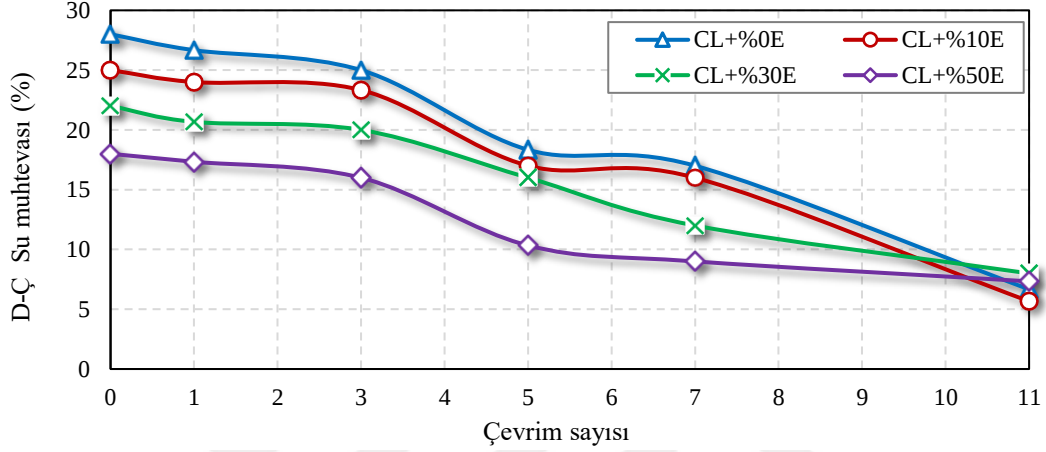
Şekil 109'da malzemelerin donma-çözülme döngüleri sonucunda kabin içerisinde meydana gelen ağırlık değişimleri gösterilmektedir. Bu değişimler numunelerin D-Ç kabine girmeden önceki ağırlıkları ile çevrim sonucu kabinden çıktıktan hemen sonraki ağırlıklarının değişimini ifade eder.



Şekil 109. Etkili katkı oranlarında hazırlanan CL zemininin D-Ç sonucu çevrim sürelerine bağlı ağırlık kayıpları

Şekil 110'da ise numunelerin kabin öncesi su muhtevası değerleri ile tamamlanan çevrim sonunda kabin içerisinden çıktığı andaki su muhtevası değerlerini ifade etmektedir. Numunelerin kabine bağlı ağırlık kayıplarını gösteren grafik (Şekil 109) ile kabine bağlı su muhtevalarındaki değişimleri gösteren grafiklerin (Şekil 110) uyum içinde olması,

malzemelerdeki kabin içerisinde ağırlıklarında meydana gelen değişimlerin tamamen su muhtevassından kaynaklı olup çevrimler sırasında malzemelerde herhangi bir parça kaybının olmadığını göstermektedir. Her iki grafikte de CL+%0E zemini mavi üçgen çizgi ile, CL+%10E zemini kırmızı yuvarlak çizgi ile, CL+%30E zemini yeşil çarpı çizgi ve CL+%50E zemini mor kare çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 110. Etkili katkı oranlarında hazırlanan CL zemininin D-Ç sonucu su muhtevallerindeki değişim

Şekil 110'da, tüm atık oranları için 1. çevrim ile 3. çevrimler arasında kabin ağırlık kaybındaki değişimin sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, su muhtevassındaki değişimi gösteren grafikte de benzer şekilde izlenmektedir. Ancak Şekil 109'dan da görüldüğü üzere 3. çevrimden 7. çevrime kadar olan süreç incelendiğinde, tüm atık oranları için ağırlık kaybında belirgin bir artış meydana gelmiştir. Su muhtevasına ilişkin grafikte de bu artış, eğimlerin daha dik hale gelmesiyle, yani su kaybının hızlanmasıyla kendini göstermektedir. Bu dönemdeki ağırlık kaybının artışının nedeni, numunelerin kuruma sürecinde serbest suyun büyük ölçüde buharlaşmaya başlaması ve yapısal su kaybının hızlanması olabilir. Şekil 106'daki numunelere ait serbest basınç mukavemetini gösteren grafik incelendiğinde 3. çevrim ile 7. çevrim aralığında mukavemette artışların olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu çevrim aralığındaki mukavemet artışı, su muhtevassının azalmasına bağlı olarak plastisite değerleri düşen numunelerin daha gevrek hale gelerek rijitliklerini artırmalarına bağlanabilir.

7. çevrim ile 11. çevrim arasındaki dönemde, atık oranlarına bağlı olarak farklı bir eğilim gözlemlenmektedir. Atıksız ve %10 atık içeren numunelerde ağırlık kaybı, önceki çevrimlerde olduğu gibi benzer bir eğimle artmaya devam ederken, %30 ve %50 atık içeren

CL zeminlerinde bu artış daha düşük eğimle, yani daha yavaş gerçekleşmektedir. Benzer bir durum, Şekil 110'da sunulan su muhtevası değişim grafiğinde de açıkça izlenebilmektedir. Bu durum, artan atık oranlarının numunelerin su muhtevası değerlerini düşürmesiyle ilişkilendirilebilir. Atıksız ve %10 atık içeren numunelerde başlangıçtaki su muhtevası görece yüksek olduğundan, çevrim sayısındaki artışa paralel olarak su kaybı devam etmekte ve bu da ağırlık kaybının düzenli şekilde artmasına neden olmaktadır. Ancak %30 ve %50 atık içeren numunelerde başlangıçtaki su muhtevası daha düşük olduğundan, ilerleyen çevrimlerde kaybedilecek su miktarı sınırlı kalmakta ve bu da ağırlık kaybı hızının düşmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak, su muhtevasının başlangıç seviyesinin azalması, çevrimler ilerledikçe ağırlık kaybı oranındaki artışı yavaşlatmaktadır.

Şekil 111'den önce verilen ağırlık kaybı grafikleri, CL zeminine ait donma-çözülme döngüleri sonucunda alınan numunenin serbest basınç deneyi sırasında meydana gelen malzeme kaybına bağlı ağırlık kayıplarıdır. Dolayısı ile asıl malzeme kaybı serbest basınç deneyi boyunca meydana gelen kırılma sonucu malzemeden kopan parçaların oluşturduğu kayıptır. Bunu nedenle aşağıda verilen denklem 18 yardımıyla parça kaybına bağlı ağırlık kaybı yüzdeleri hesaplanmıştır (Lu vd., 2025).

$$\text{Malzeme Kaybı (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (17)$$

W_1 : Donma-çözülme çevriminden sonraki numune kuru ağırlığı

W_2 : Serbest basınç deneyinden sonra kalan sağlam numunenin kuru ağırlığı

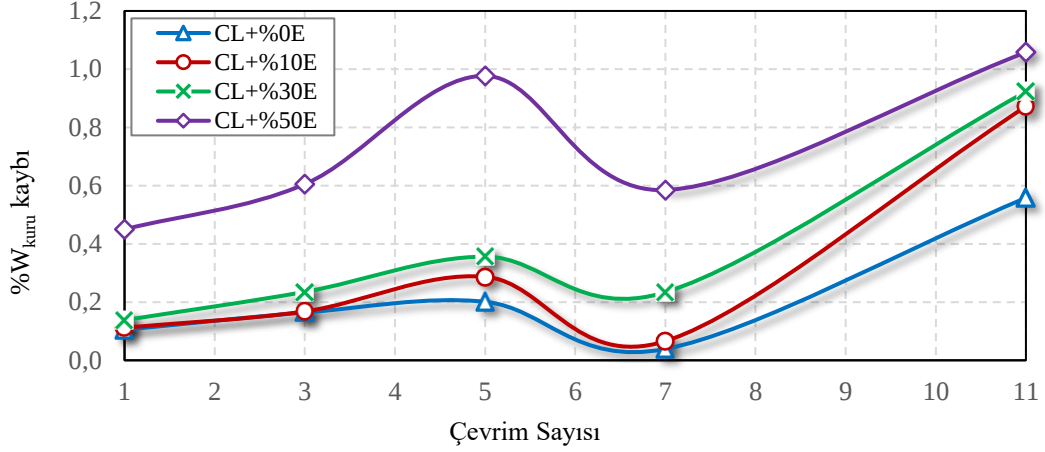
Denklem, kuru ağırlık kayıplarını yüzde olarak verdiği için bizim de kuru ağırlıkları hesaplamamız gerekir. Bunun için kabin sonrası ölçülen yaş numune ağırlıkları ile deney sonrası kopan parçalar uzaklaştırıldıktan sonraki bulunan yaş ağırlıklar hesaplanarak aşağıda verilen denklem yardımı ile kuru ağırlıklara çevrilmiştir.

$$W_{kuru} = \frac{W_{yaş}}{1+w} \times 100 \quad (18)$$

$W_{kuru} (gr)$ = SB deney sonrası kopan parçalardan arındırılmış kuru numune ağırlığı

$W_{yaş} (gr)$ = SB deney sonrası kopan parçalardan arındırılmış kalan yaş numune ağırlığı

$w (\%)$ = İlgili çevrim sonrası kabinden alınan su muhtevasının deney sonrası ölçülen su muhtevası değeri



Şekil 111. D-Ç kabinden alınan CL zemininin serbest basınç deneyi sırasındaki malzeme kaybı

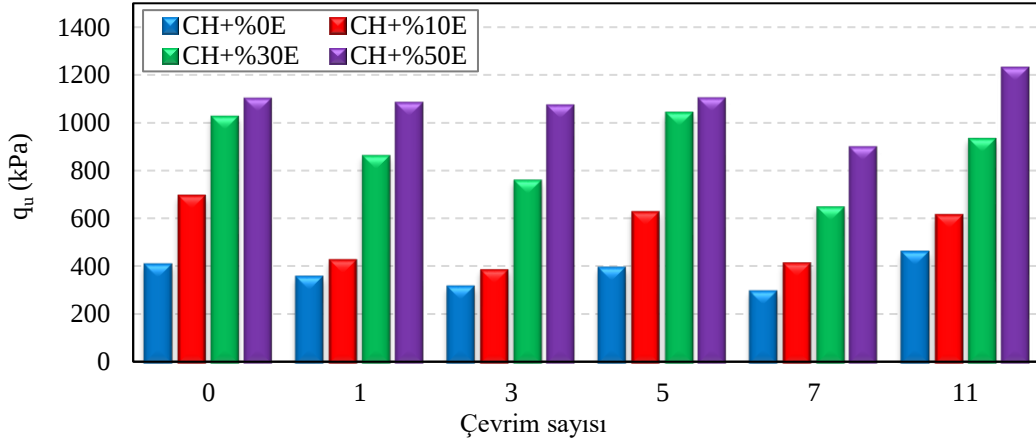
Denklem 18’de kabinden alınan numunenin kuru ağırlığının belirlenmesinde kullanılacak su muhtevası değeri, aslında numunenin kabinden çıkarıldığı andaki su muhtevası olmalıdır. Ancak donma-çözülme işlemi sonrasında tartılarak yaşı ağırlığı belirlenen numunenin, o anda geçerli olan su muhtevasını doğrudan belirlemek mümkün değildir; çünkü bu aşamada henüz serbest basınç deneyine tabi tutulmamıştır. Su muhtevası, yalnızca deney sonrası kırılan numuneden alınan parça üzerinde yapılan ölçümlerle dolaylı olarak belirlenebilmektedir.

Bu nedenle, kuru ağırlık hesabında kullanılan su muhtevası değeri, numunenin deney sonrası kırıldıktan sonra laboratuvar ortamında belirlenen su muhtevası olarak alınmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, numunenin kabinden çıkarılması ile deneyin uygulanması arasında geçen sürede herhangi bir nem kaybının olup olmamasıdır. Ancak bu süredeki nem değişimini doğrudan ölçmek mümkün olmadığından, bu aralık mümkün olduğunca kısa tutulmuş ve olası nem kayıpları ihmal edilmiştir. Bu varsayım altında, deney sonrası belirlenen su muhtevası kullanılarak, hem kabin sonrası hem de deney sonrası kuru numune ağırlıkları hesaplanmış; bu değerler ilgili denkleme yerleştirilerek Şekil 114’te gösterilen grafik oluşturulmuştur.

Şekil 111’de farklı atık çamur katkı oranlarına (CL + %0 E, %10 E, %30 E, %50 E) sahip numunelerin donma-çözülme (D-Ç) çevrimleri sonrası malzeme kaybı (% ağırlık kaybı) değişimini gösterilmektedir. Grafikteki genel eğilime bakıldığında tüm atık oranlarında çevrim sayısı arttıkça malzeme kaybının arttığı görülmektedir (Lu vd., 2025). Bu

durum beklenen ve doğal bir sonuçtur, çünkü artan çevrim sayısı ile birlikte mikro çatlak oluşumu, bağ yapısının zayıflaması ve çözülme nedeniyle numune bütünlüğü bozulur. Ayrıca atık oranlarının artışı malzemenin plastisitesini düşüreceğinden numune daha gevrek hale gelerek parçalanma davranışı gösterebilmektedir. 5. çevrimde ağırlık yüzdesine dalgalanma görülmektedir. Bu durum su muhtevası değişiminin gösteren Şekil 110'dan da görüldüğü üzere 5. çevrimde eğilimi bozan bir su kaybı meydana gelmiş ve akabinde 7. çevrimde bu kayıp daha az olmuştur. Dolayısı ile bu ani değişimler malzeme üzerinde geçici rijitlik değişimleri oluşturarak denge konumuna gelene kadar dalgalanmalar oluşturmuştur şeklinde açıklanabilir. Fakat bu dalgalanmalara rağmen tüm atık oranları için artan çevrim sayısı malzemelerde ağırlık kaybını artırmıştır. Bu durum beklenen bir durum olup literatürle uyumludur (Yarbaşı, 2016).

Farklı oranlarda atık malzemesi ile stabilize edilmiş CL zeminlerinde düşük plastisite özelliğinden dolayı bu etki pek görülme de yüksek plastisiteli CH zeminlerinde her ne kadar kapalı donma-çözülme etkisine maruz kalsa da içerisinde ihtiva ettiği yüksek su muhtevasına bağlı olarak çatlak oluşumları Şekil 107'de de görüldüğü üzere oldukça belirgindir. Dolayısı ile donma-çözülme sırasında nem transfer hızı CL zemininkine göre fazla olacaktır.



Şekil 112. CH zemininin etkili katkı oranlarında çevrim sürelerine bağlı q_u değeri üzerindeki değişimleri

Şekil 112'de CH zemininin çevrim sayısına bağlı serbest basınç mukavemetindeki değişimler görülmektedir. CH zeminine ait grafiğin CL zemininden oldukça farklı olduğu görülmektedir. CL+%0E zemininde çevrim sayısının artışı ile birlikte mukavemette belirgin

artışlar görülürken CH+%0E zemininde henüz 1. çevrim ile 3. çevrim arası mukavemette bir düşüşün meydana geldiği görülmektedir. Bu çevrimler arasında Şekil 115'ten görüldüğü üzere kabin içi ağırlık kaybı artmıştır. D-Ç çevrimleri sonucu kabin içerisinde herhangi bir parçalanma olmadığından bu ağırlık kaybı su muhtevastaki azalma olarak düşünülmektedir. Zira Şekil 116'da görüldüğü üzere 3. çevrime kadar su muhtevastaki değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Kısa donma-çözülme sürelerindeki bu su muhtevastaki değişim gözenek suyunun buza dönüşmesi ile gözenek hacminde genişlemeye ve çatlak oluşumuna yol açarak numunede yeterli hidrasyonu başlatmadan numunenin fiziksel olarak zayıflamasına, dolayısı ile mukavemet kaybetmesine neden olmuştur şeklinde yorumlanabilir (Sun vd., 2025). Şekil 113'te serbest basınç deney öncesi ve sonrası resimleri verilen numunelerden 1. ve 3. çevrim numunelerindeki çatlaklara bağlı belirgin çatlak oluşumu şeklindeki fiziksel değişim, bu durumu desteklemektedir. Nitekim literatürde bu duruma benzer çalışmalar yer almaktadır. Örneğin Nan vd., (2024), az sayıda D-Ç döngüsüyle hidrasyon ürünleri tarafından oluşturulan çimentolama yapısının hasar gördüğünü ve bunun da mukavemette azalmaya yol açtığını bulmuştur.

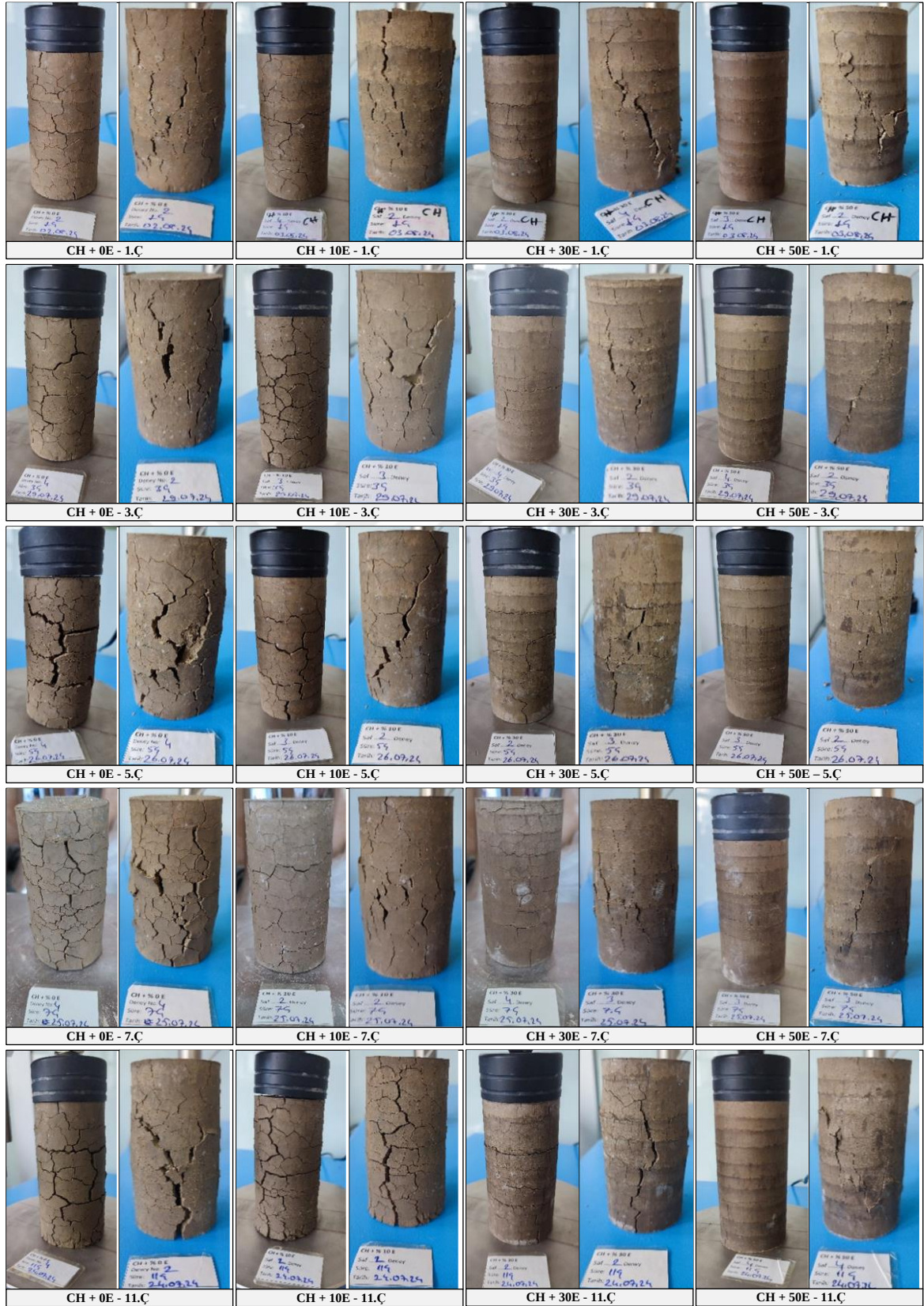
3. çevrim ile 7. çevrim arası mukavemette bir dalgalanma meydana gelmiştir. D-Ç döngüleri sırasında, sertleşmiş zemindeki hidrasyon reaksiyonları ve nem değişimleri arasında bir sinerji vardır. Özellikle, hidrasyon reaksiyonları devam eder ve gözenek yapısını dolduran ve mukavemeti artıran hidrasyon ürünleri üretir. Bu arada, nem değişimleri gözenek yapısı hasarına neden olarak mukavemet bozulmasına yol açar. Bu iki süreç aynı anda etki ederek sertleşmiş zeminde dalgalanan mukavemet değişimlerine neden olur. Dolayısı ile dalgalanma bu nedenle oluşmuş olabilir. 7. çevrim sonrası ise döngü sayısı arttıkça hidrasyon devam etmiş ve mukavemet kademeli olarak iyileşmiştir.

Ayrıca Şekil 115'te görüldüğü üzere numuneler en çok 5. çevrimde ağırlık kaybına uğramış ve en geniş çatlaklar bu çevrimde meydana gelmiştir. Şekil 115'te verilen ağırlık kaybı miktarı ve Şekil 116'da gösterilen su muhtevastaki düşüşten kaynaklanmaktadır. 5. çevrimde su muhtevastının belirgin şekilde azalmasına bağlı olarak malzeme plastisite özelliğini kaybetmiş ve buz merceklerinin D-Ç etkisi altında malzemede büzülme meydana getirerek gevrek bir davranış göstermesine neden olmuş olabilir. Ayrıca donma aşamasında nem buz kristalleri oluşturur ve çözülme sırasında zemine sızarak iyon göçünü kolaylaştırır ve çimentolu sistem içinde hidrasyon reaksiyonlarını teşvik eder. Bu süreç, gözenekleri kademeli olarak dolduran, zemin parçacıkları arasındaki bağı güçlendiren ve hem zeminin

yoğunluğunu hem de mukavemetini artıran hidratasyon ürünleri üretir (Yang vd., 2021). Bu durumlar 5. çevrimde mukavemet artışını tetiklemiş olabilir.

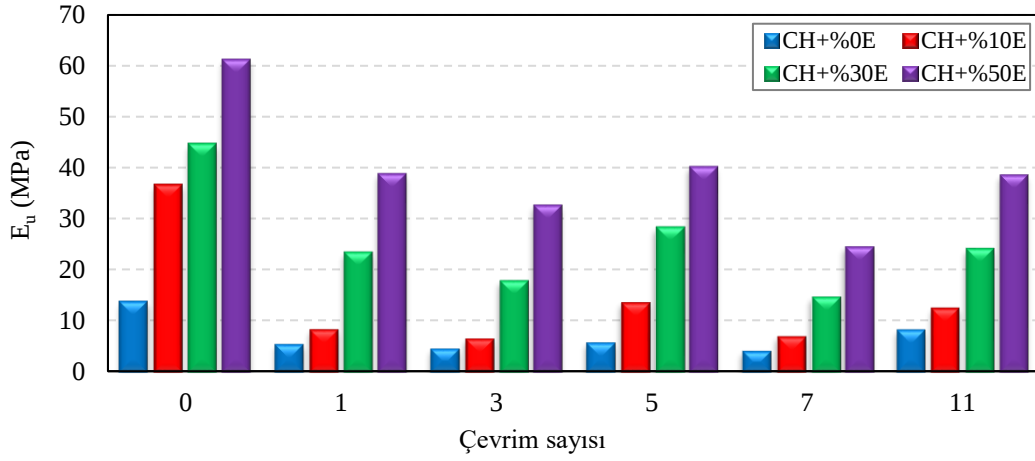
Fakat 5. çevrimdeki mukavemet artışının geçici olup, devamında numunelerin hızlı bir şekilde mukavemet kaybederek D-Ç etkisinde denge konumuna geldiği düşünülmektedir. Şekil 116'ya göre, 7. ile 11. çevrimler arasında tüm katkı oranlarında su muhtevasında bir azalma gözlenmektedir. Literatürde, su muhtevasındaki azalmanın, hidratasyon ürünlerinin gelişimini teşvik ederek mikro gözenek yapıyı sıkılaştırdığı ve bunun rijitlik parametrelerinde artışa yol açtığı belirtilmektedir (Zheng vd., 2021). Nem içeriğindeki azalma, kohezyon ve içsel sürtünme açısının artışına neden olarak malzemenin daha rijit ve gevrek davranmasını sağlamaktadır; bu da serbest basınç mukavemetinde artışa neden olmaktadır. Bu durum, 3. ve 5. çevrimler arasında meydana gelen su muhtevası düşüşüyle paralel mukavemet artışlarına benzerlik göstermektedir. Şekil 113'te verilen görsellerde, su muhtevasındaki azalmaya bağlı olarak numune üzerinde oluşan çatlaklar belirgin şekilde gözlemlenmektedir. Dolayısıyla, 3–5 ve 7–11. çevrim aralıklarındaki mukavemet artışları, su muhtevasındaki azalmanın rijitlik üzerindeki etkisiyle açıklanabilir.

Şekil 112'deki grafik incelendiğinde, her ne kadar farklı oranlarda atık malzemesine sahip CH numunelerinin çevrimler arası mukavemet değerlerinde dalgalanmalar görülse de genel eğilim olarak özellikler %50 atık oranında 1 ile 11. çevrim arasında mukavemetinin arttığı görülmektedir. Fakat %10 ile %30 atık oranı için mukavemette düşüş gözlenmektedir. Aslında bu durum literatürde şöyle açıklanmaktadır: D-Ç döngüleri sırasında nem, zemin içinde çeşitli fiziksel hallerde (örneğin, katı buz kristalleri ve sıvı su) varlığını sürdürür. D-Ç döngülerinin sayısının artmasıyla, çimentolama sistemindeki hidrasyon reaksiyonları devam eder ve hidrasyon ürünlerinde sürekli bir artışa yol açar; bu, yalnızca D-Ç döngülerinin neden olduğu gözenek genişlemesini ve kopmasını onarmakla kalmaz, aynı zamanda zemin yapısını daha da yoğunlaştırarak mukavemeti artırır. Ancak, uzun vadede hidrasyon reaksiyonu kademeli olarak zayıflar ve D-Ç döngülerinden kaynaklanan gözenek yapısı bozulması ve mukavemet kaybı devam eder ve Yang ve diğerlerinin çalışmalarında da gözlemlendiği gibi, mukavemette genel bir düşüş eğilimi görülür (Lu vd., 2025). Dolayısı ile %50 atık oranıyla artan mukavemetin artışı da kayda değer bir artış olmadığından daha ileri çevrimlerde mukavemetin kaybedileceği beklenen bir durum olarak görülebilir (Zaimoğlu vd., 2013). Bu anlamda sonuçlar literatürle uyumludur.

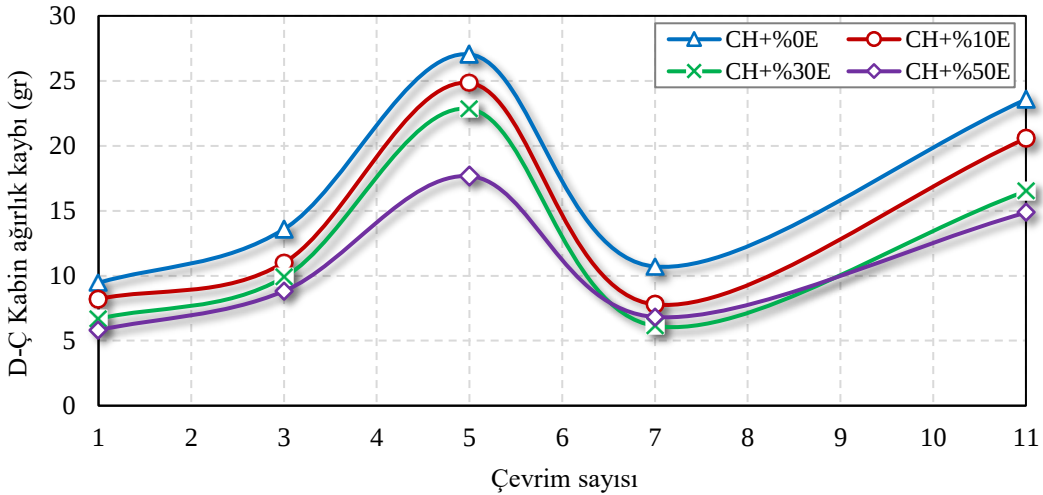


Şekil 113. CH zemini D-Ç numuneleri deney öncesi ve sonrası

Şekil 114'te verilen CH zemininin çevrim sayısına bağlı Elastisite modülündeki değişim grafiği incelendiğinde serbest basınç mukavemetini gösteren grafik ile benzer olduğu görülmektedir. Buna göre 5. çevrim tüm etkili atık oranlarında malzeme üzerinde bir mukavemet artışı meydana getirmiştir. Buna göre malzeme için en etkili çevrim sayısının 5. çevrim olduğu ve bu çevrimden sonra malzeme üzerinde beklenmedik davranışlar meydana geldiği görülmektedir. Bu duruma neden olabilecek etkenler elde edilen donma-çözülme sonrası numunelerdeki değişimleri gösteren resimler, malzeme kayıpları ve su muhtevalarındaki değişimler dikkate alınarak serbest basınç mukavemetini gösteren grafik altında yorumlandı.



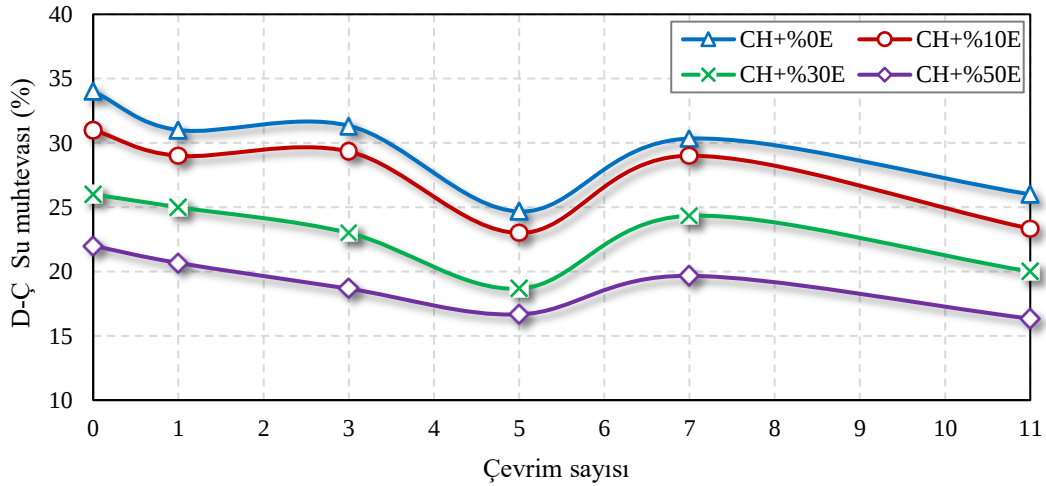
Şekil 114. CH zemininin etkili katkı oranlarında çevrim sürelerine bağlı E_u üzerindeki değişimleri



Şekil 115. Etkili katkı oranlarında hazırlanan CH zeminin D-Ç sonucu çevrim sürelerine bağlı ağırlık kayıpları

Şekil 115'te, CH zemini üzerinde gerçekleştirilen donma-çözülme çevrimleri sonucunda numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları; Şekil 116'da ise kabin içerisindeki numunelerin su muhtevasında gözlenen değişimler gösterilmiştir. Grafikte kullanılan çizgi ve semboller sırasıyla; CH+%0 E mavi renkli ve üçgen sembolü çizgi, CH+%10 E kırmızı renkli ve daire sembolü çizgi, CH+%30 E yeşil renkli ve çarpı (X) sembolü çizgi ve CH+%50 E mor renkli ve dik kare sembolü çizgi şeklindedir.

Şekil 115'te, verilen ağırlık kayıpları, numunelerin çevrim öncesinde (kabin içine yerleştirilmeden önce) ve çevrim tamamlandıktan sonra (kabin dışına alındığında) ölçülen yaş ağırlıkları arasındaki fark alınarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, Şekil 116'da verilen su muhtevastaki değişimler de, çevrim öncesinde ölçülen su muhtevası değerlerinden, çevrim sonrası (kabin çıkışı) belirlenen su muhtevası değerlerinin çıkarılmasıyla elde edilmiştir.

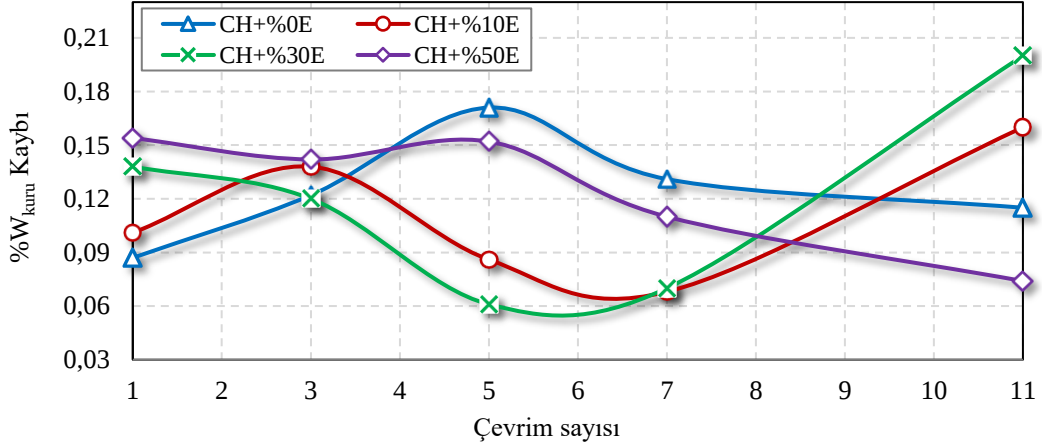


Şekil 116. Etkili katkı oranlarında hazırlanan CH zemininin D-Ç sonucu su muhtevalarındaki değişim

Şekil 115 ve 116'da verilen grafikler incelendiğinde, her iki grafiğin de benzer bir eğilim sergilediği görülmektedir. Bu durum, numunelerdeki ağırlık kayıplarının esas olarak su muhtevastaki değişimden kaynaklandığını göstermektedir. Nitekim Şekil 113'te kabinden çıkan numunelerin görsel incelemesi sonucunda, malzemede çatlak oluşumu gibi bazı fiziksel bozulmalar gözlemlenmiş olsa da, malzemenin bütünlüğünü kaybettiğine dair herhangi bir parçacık kaybı (dökülme, kopma vb.) tespit edilmemiştir. Dolayısıyla, numunelerde çevrimler sonucunda oluşan ağırlık kayıpları, fiziksel madde kaybından

ziyade, bünyelerinde meydana gelen su kaybına bağlıdır. Bu da su muhtevastaki azalmaların, ağırlık kayıplarının temel nedeni olduğunu ortaya koymaktadır.

Grafikte her ne kadar dalgalanma şekli görülse de genel eğilim, artan çevrim sayısının kabin içi ağırlık kaybını artırdığını göstermektedir. Bu anlamda bulunan bu eğilim mantıklı kabul edilebilir. Çünkü su tutma kapasite yüksek CH zemini gibi yüksek plastisiteli bir kil donma-çözülme çevrimleri sırasında yüksek su muhtevası değişimleri yaşayabilir. Dolayısı ile donacak olan su miktarının fazla oluşu hacim değişimlerini (çatlak oluşumu) fazlalaştıracak ve su miktarındaki değişimin fazla olmasına neden olacaktır. Bu değişim artan çevrim sayısında dengeye ulaşana kadar su muhtevası ağırlık kaybında dalgalanma meydana getirebilir. Örneğin grafikte 5. çevrimde meydana gelen su değişimi aynı çevrimde ağırlık kaybında da benzer değişim meydana getirmiştir. Önemli olan nokta buradaki ağırlık kayıpları, kabin içerisindeki donma çözülme döngüleri sonucu sıcaklık değişimlerinden kaynaklı su muhtevasına bağlı ağırlıklarındır. Asıl ağırlık kaybı malzemelerin serbest basınç deneyi sırasındaki kırılma durumuna bağlı kuru ağırlık kayıplarının (parça kaybı) hesaplanarak değerlendirildiği kayıplardır.



Şekil 117. D-Ç kabininden alınan CH zemininin serbest basınç deneyi sırasındaki malzeme kaybı

Şekil 117’de verilen grafik, D-Ç kabininden çıkarılarak tartılan numune ağırlıkları ile serbest basınç deneyi ile kırılan numunelerin kopan parçaları kenara alındıktan sonra kalan numune ağırlıkları kullanılarak oluşturulmuştur. Grafik incelendiğinde artan çevrim sayıları karşısında atıkların genel bir eğilim göstermediği ve düzensiz bir dağılım sergilediği görülmektedir. Bu durum şöyle açıklanabilir.

Yüksek plastisiteli CH tipi kil zemini, donma-çözülme çevrimleri sırasında özellikle atık malzeme katkısıyla stabilize edildiğinde, önemli hacim değişimlerine maruz kalmaktadır. Bu hacim değişimleri genellikle genleşme ve büzülme şeklinde gerçekleşmekte olup, numune üzerinde gözle görülür düzeyde çatlakların oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 113). Ancak bu çatlaklara rağmen, malzemenin çevrimler süresince katı malzeme kayıp yüzdesi, yani fiziksel parça kopması her zaman anlamlı bir şekilde gözlenmeyebilir.

Bu durumun temel nedeni, çatlakların çevrimler arasında oluşup sonraki yükleme veya deneyler sırasında kapanabilmesidir. Örneğin, çevrimler sonrası yapılan serbest basınç deneyi sırasında, numune uygulanan eksenel gerilme ile sıkışmaya zorlandığında, daha önce donma nedeniyle oluşmuş mikro ve makro çatlaklar birbirine yaklaşarak kapanabilir. Bu süreçte herhangi bir parçalanma ya da fiziksel dağılma gerçekleşmeyebilir. Dolayısıyla, çatlaklar mevcut olsa da deney sonrası elde edilen fiziksel malzeme kaybı düşük çıkabilir. Bu da, çevrim sayısı arttıkça çatlak sayısı veya büyüklüğü artsa bile, kütle kaybı yüzdesinde doğrusal veya anlamlı bir artışın gözlenmemesine neden olur. Dolayısı ile hacimsel anlamda gözle görülür değişim geçirmiş bir malzemenin malzeme ağırlığını belirlemek her zaman mümkün olamayabilir.

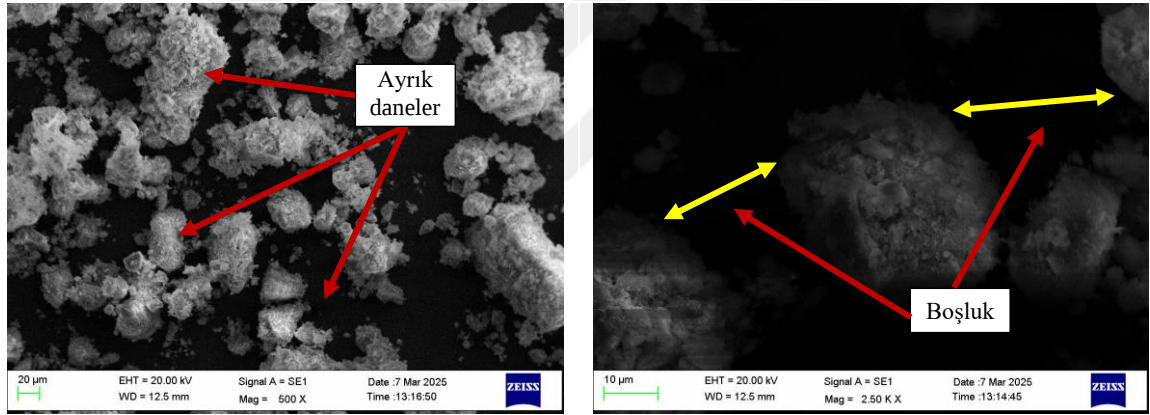
3.8. SEM Analizlerine Göre Mikro Yapı

Kil zeminler üzerinde yapılan SEM (Tarama Elektron Mikroskobu) analizi, zeminlerin mikro yapısını çok yüksek çözünürlükle incelemek için kullanılan bir tekniktir. SEM, bir zemin örneğine yoğunlaştırılmış bir elektron demeti gönderir ve bu elektronların zemin yüzeyinden geri yansıyan sinyalleri toplar. Bu şekilde, zemin hakkında detaylı bir görüntü elde edilir. SEM, kil zeminlerin mikroskobik yapısını inceleyerek, mineral bileşenleri, porozite (boşluk oranı), danelerin şekli ve büyüklüğü gibi özellikleri belirler (Ural, 2021). Bu bilgiler, zeminlerin mühendislik özelliklerini (örneğin, dayanıklılık, stabilite) anlamada önemli rol oynar. Malzemeler üzerinde ayrıca EDX analizleri yapılmıştır. Fakat EDS analizi bir noktaya rastgele odaklandığından dolayı elementlerin yüzdeleri tam olarak kıyaslanamamakla birlikte elemental dağılıma dair fikir verdiği (Kavacık ve Dölgen, 2023) için bunun yerine seçilen malzemeler üzerinde XRF analizleri gerçekleştirilmiştir.

3.8.1. Kür Mazlemelerine ait SEM Görüntüleri ve XRF Analiz Sonuçları

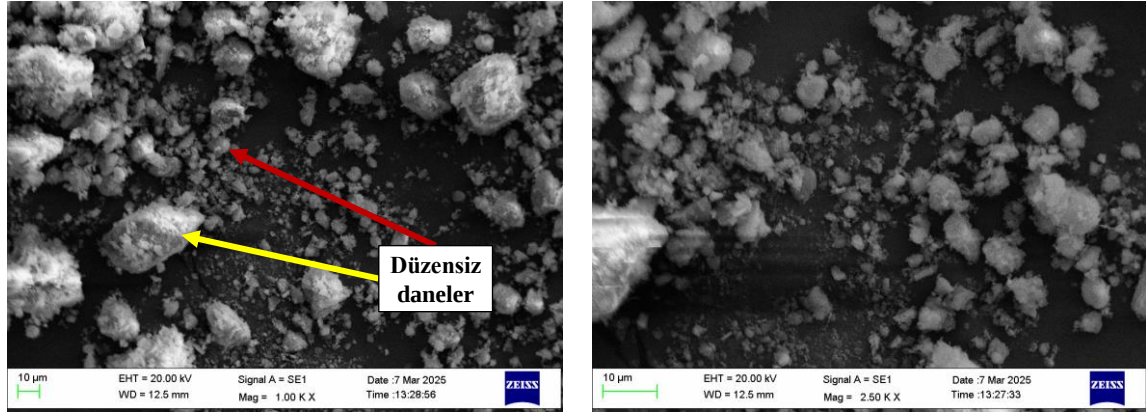
SEM ve XRF analizleri kür ve donma-çözülme deneylerinin yapıldığı malzemelerin tüm oranları için kullanılmamıştır. Kür deneyleri sonucunda elde edilen kür süresine bağlı serbest basınç mukavemet değerlerini gösteren grafik incelendiğinde CL malzemesi için anlamlı değişimlerin belli oran ve sürelerde meydana geldiği görülmektedir. Dolayısı ile yalnızca buradaki değişimlerin analizleri yapılarak analiz yükü hafifletilmiştir. Bu nedenle anlamlı değişimler CL zemini için; “CL+%0E” ve “CL+%50E” oranlarının “Anlık” ve 360 günlük (360G) kür sürelerinde, CH zemininin ise “CH+%0E” ve “CH+%50E” oranlarının “Anlık”, “15G”, “30G” ve 360 gün (360G) kür sürelerinde meydana geldiği için bu numuneler için SEM ve XRF analizlerinin yapılması yeterli olacaktır.

CL zemini için CL+%0E ve CL+%50E oranlarına ait SEM görüntüleri Şekil 118-121 aralığında ve XRF analiz sonuçları ise Tablo 22’de verilmiştir.



	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CL+%0E (Anlık)	-	0,11	17,35	73,47	0,14	5,60	1,81	0,29	-

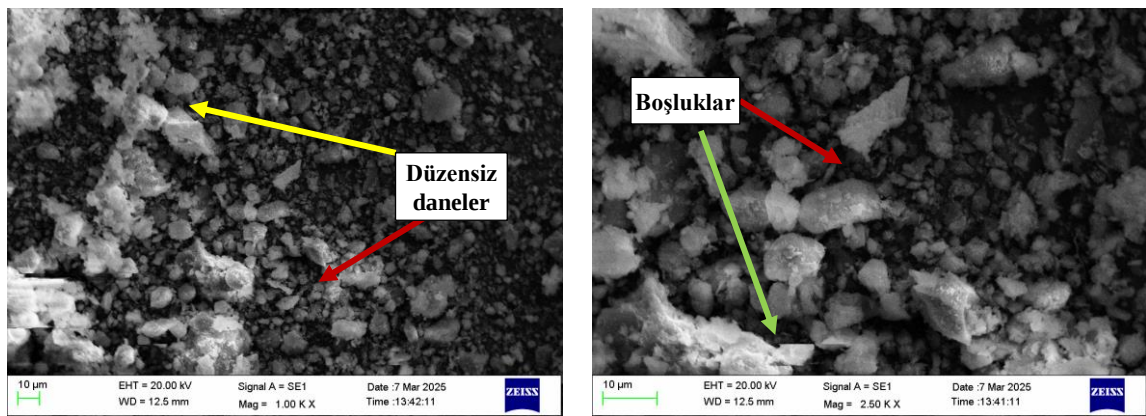
Şekil 118. CL+%0E kür malzemesinin anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları



	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CL+%0E (360G)	-	-	17,15	73,59	0,14	5,65	1,77	0,23	0,58

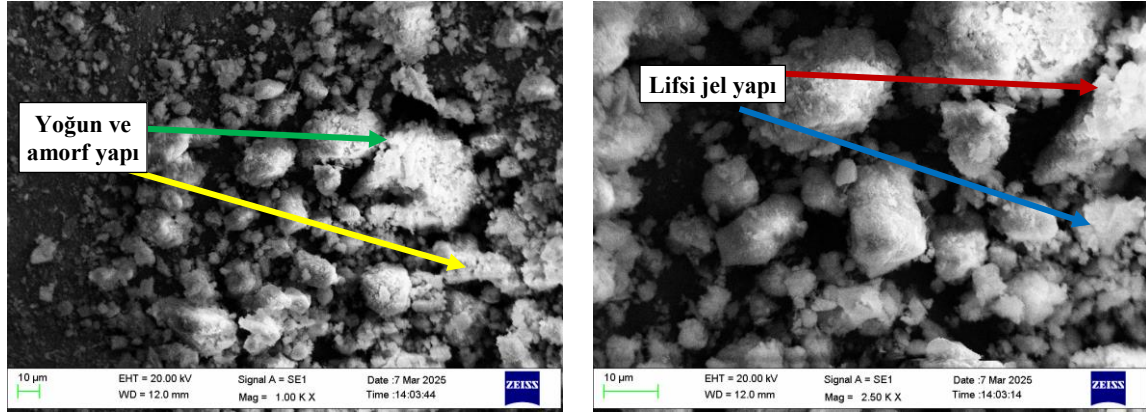
Şekil 119. CL+%0E kür malzemesinin 360 gün SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

SEM görüntüleri incelendiğinde CL+%0E malzemesinin anlık ve 360G kür sonu görüntülerinde anlamlı bir değişim gözlenmemiştir. Parçacıklar belirgin, ayrık ve genellikle düzensiz yapıdadır. Danecikler arasında boşluklar daha fazla; yani yapıda kompaktlık düşüktür (Şekil 118-119). Fakat CL+%50E malzemesinde anlık durumda ayrık daneler devam ederken (Şekil 120) 360 gün kür görüntülerinde daneler arası daha yoğun, amorf veya lifsi jel benzeri yapıların olduğu görülmektedir. Kil danelerinin çevresinin sarıldığı ve boşlukların doldurulduğu bağlanmış bir mikro yapı görülmektedir (Şekil 121).



	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CL+%50E (Anlık)	0,62	1,39	19,19	62,89	0,23	3,05	2,34	3,96	5,28

Şekil 120. CL+%50E kür malzemesinin anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları



	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CL+%50E (360G)	0,54	1,31	19,32	62,15	0,23	3,46	2,42	4,25	5,81

Şekil 121. CL+%50E kür malzemesinin 360 gün SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

Tablo 22’de verilen XRF analiz sonuçlarına bakıldığında ise en belirgin 9 adet bileşiğin yer aldığı görülmektedir. SiO₂ oranının düştüğü oranlarda Al₂O₃ bileşiğinin yüksek oranlarda olduğu görülmektedir. Özellikle SiO₂’nin %50 atık oranında düşük olması pozolanik reaksiyonun SiO₂ ile gerçekleştiğini ve mukavemetin de daha yüksek olduğunu gösterebilir.

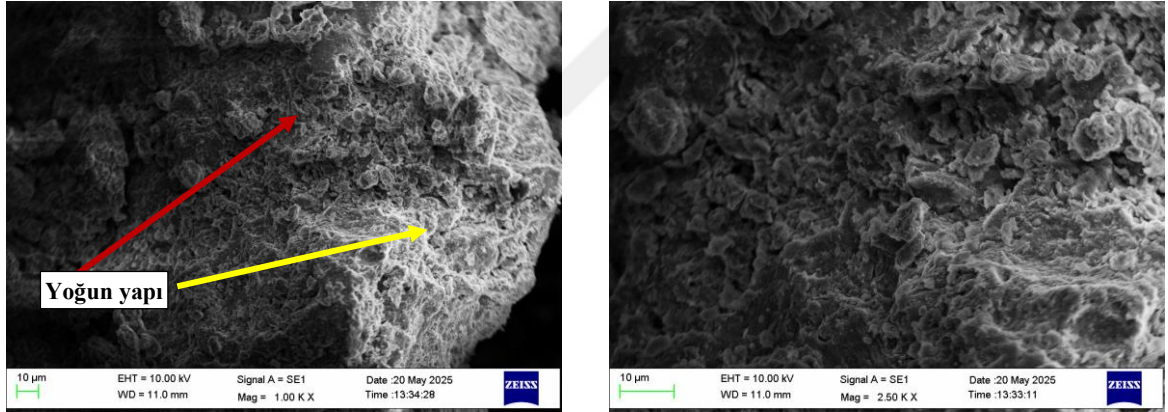
Tablo 22. Küre tabi CL zeminine ait XRF analizlerinin toplu sonuçları

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CL+ %0E (Anlık)	-	0,11	17,35	73,47	0,144	5,60	1,81	0,29	-
CL+ %0E (360G)	-	-	17,15	73,59	0,14	5,65	1,77	0,23	0,58
CL+ %50 (Anlık)	0,62	1,39	19,19	62,89	0,23	3,05	2,34	3,96	5,28
CL+ %50 (360G)	0,54	1,31	19,32	62,15	0,23	3,46	2,42	4,25	5,81

Pozolanik reaksiyon, zeminde bulunan aktif silika (SiO₂) ve alümina (Al₂O₃) minerallerinin, ortamda mevcut serbest kalsiyum (Ca²⁺) iyonları veya kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂) ile kimyasal reaksiyona girerek, yeni bağlayıcı fazlar (özellikle kalsiyum silikat hidrat - CSH ve kalsiyum alüminat hidrat - CAH) oluşturmaktadır. Dolayısı ile hangi atık oranında bileşik miktarı düşük ise pozolanik reaksiyona o bileşik girmiş diye düşünülebilir. %50 atık oranlarındaki CL malzemelerinde CaO miktarının çokluğu potansiyel olarak yüksek pozolanik reaksiyon kapasitesi anlamına gelmektedir. Dolayısı ile Şekil 120 ve

121’den de görüldüğü üzere puzolanik reaksiyona bağlı daneler arası bağlayıcılık artmış ve daneler arası boşluklar dolarak daha yoğun ve kompakt bir görüntü elde edilmiştir.

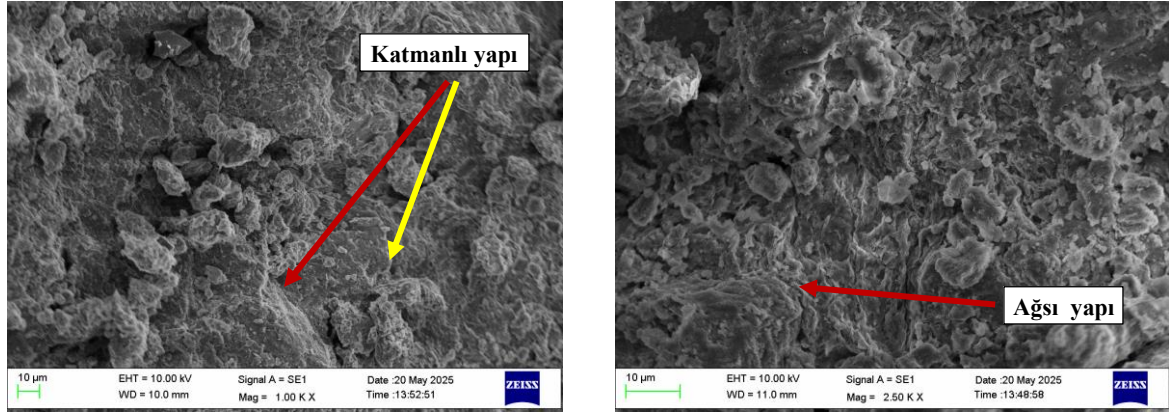
Ayrıca, CL+%50E oranında Fe_2O_3 miktarında katkısız numuneye kıyasla anlamlı bir artış gözlemlenmiştir. Literatürde, Fe_2O_3 içeren malzemelerin zemin stabilizasyonu ve donma-çözülme dayanımında önemli rol oynadığı bilinmektedir (Çetin vd., 2024; Wang vd., 2024). Demir oksitin (Fe_2O_3), çimentodaki kalsiyumla reaksiyona girerek kalsiyum alümina-ferrit (C4AF) oluşturduğu ve bu hidrasyon ürününün, SiO_2 ve Al_2O_3 kadar olmasa da mukavemet ve sertliğin artmasına katkıda bulunduğu bilinmektedir (Tikalsky vd., 2002). Şekil 97’de sunulan serbest basınç mukavemeti ve Şekil 99’da verilen Elastisite modülü grafiklerine bakıldığında, atık miktarındaki artışın mekanik dayanımda iyileşmeye neden olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, Fe_2O_3 varlığı, literatür bulgularıyla da uyumlu şekilde, mukavemet üzerinde olumlu bir etki gösterdiği anlaşılmaktadır. %50 atık oranında Fe_2O_3 oranının fazla olması puzolanik reaksiyonun azalan SiO_2 ile gerçekleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3
CH+ %0E (Anlık)	2,38	2,67	15,98	56,43	0,15	0,95	1,91	5,94	11,29

Şekil 122. CH+%0E kür malzemesinin anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

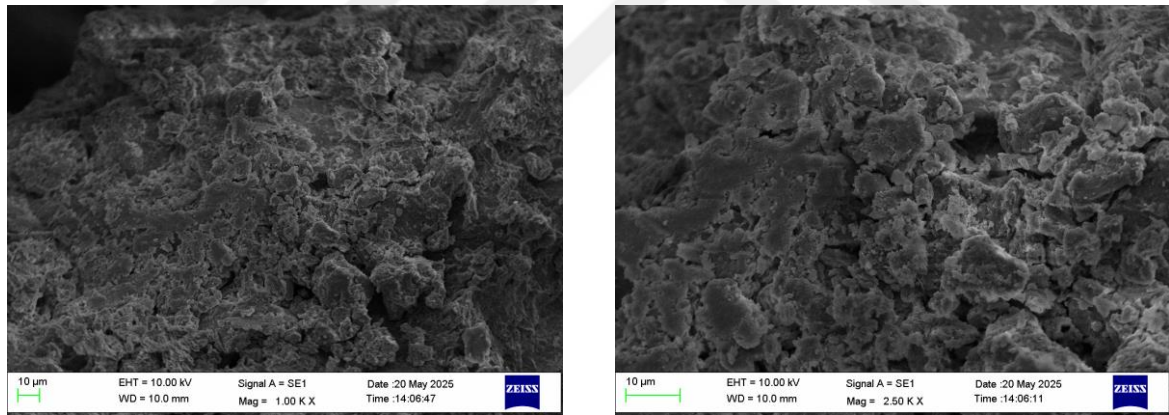
CH malzemesi için CH+%0E ve CH+%50E oranlarına ait SEM görüntüleri Şekil 122-129 aralığında ve XRF analiz sonuçları Tablo 23’te verilmiştir. SEM görüntülerine bakıldığında CL malzemesinin ayrık daneli yapısına karşın CH malzemesinin katmanlı daha yoğun ve lifli/ağsı bir forma sahip olduğu görülmektedir (Şekil 122-123).



	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CH+ %0E (15G)	2,69	2,92	16,23	57,04	0,16	0,91	1,80	5,70	10,36

Şekil 123. CH+%0E kür malzemesinin 15 gün SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

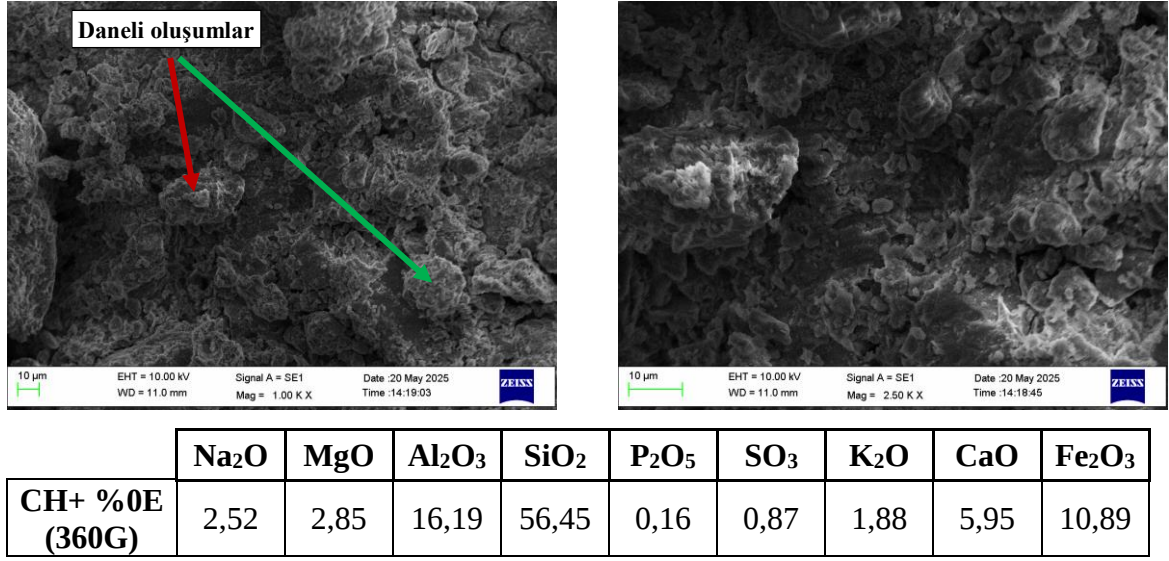
CH+%0E ve CH+%50E malzemelerine ait Şekil 125 ve 129'da verilen SEM görüntüleri incelendiğinde birbirlerinden oldukça farklı oldukları görülmektedir.



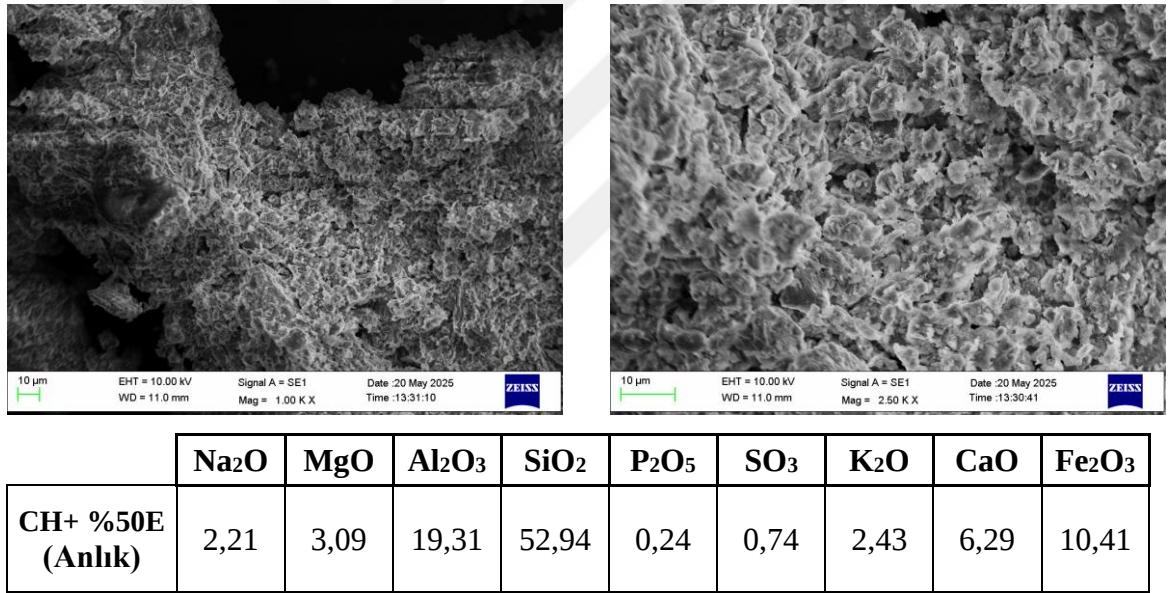
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CH+ %0E (30G)	2,64	2,91	16,48	56,98	0,16	0,86	1,78	5,78	10,35

Şekil 124. CH+%0E kür malzemesinin 30 gün SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

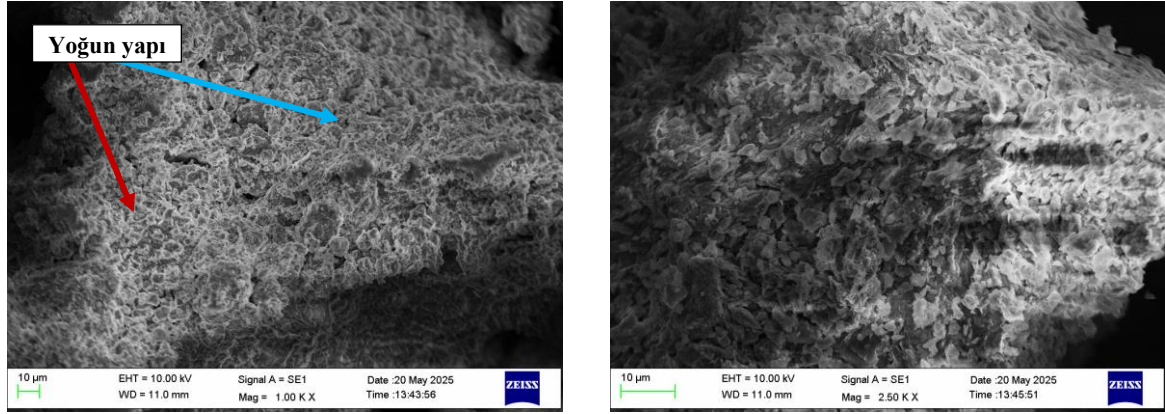
Şekil 125'te CH+%0E malzemesinin, CH+%50E malzemesine kıyasla parçalı ve çevresinde daneli oluşumlar barındırdığı görülürken, Şekil 129'da aynı kür süresine sahip CH+%50E malzemesinin daha kompakt ve bütünsel bir forma sahip olduğu görülmektedir. Artan kür süresinin, malzeme yapısı üzerinde bütünleştirici bir etki oluşturarak daha yoğun, homojen ve kompakt bir yapı meydana getirdiği gözlenmektedir.



Şekil 125. CH+%0E kür malzemesinin 360 gün SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları



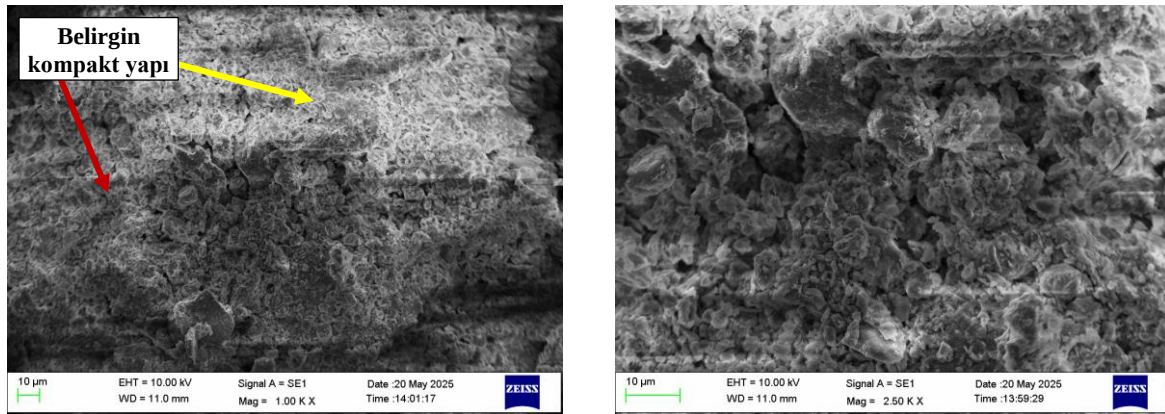
Şekil 126. CH+%50E malzemesinin anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları



	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CH+ %50E (15G)	2,18	3,09	20,10	52,72	0,24	0,82	2,49	6,35	10,31

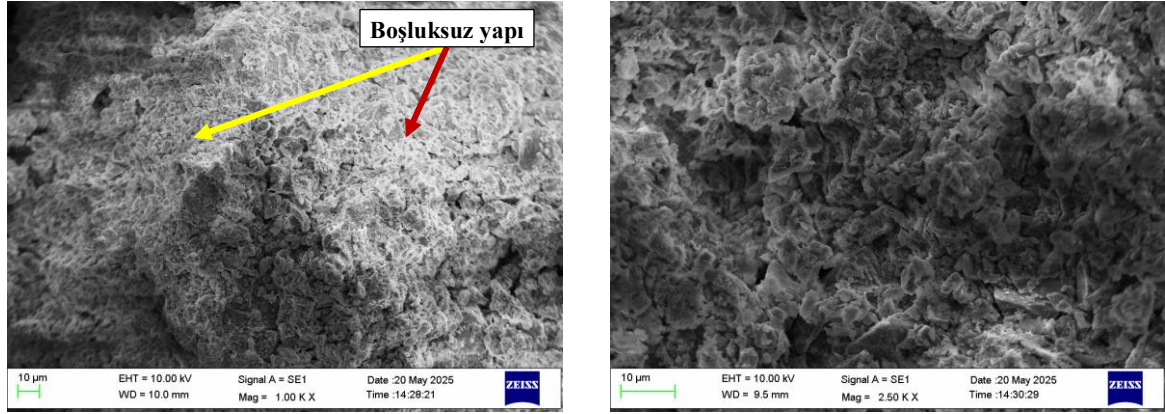
Şekil 127. CH+%50E kür malzemesinin 15 gün SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

Tablo 23'te verilen XRF analiz sonuçlarına bakıldığında en belirgin 9 adet bileşik yer almaktadır. Buna göre, CL malzemesinde olduğu gibi burada da CH+%0E ve CH+%50E malzemelerinde Al₂O₃ ve SiO₂ yüzdeleri biri artarken diğeri azalmaktadır. Bu durum puzolanik reaksiyonu işaret edebilir. Nitekim CH+%0E malzemesinde puzolanik reaksiyon Al₂O₃ ile gerçekleştiği için bu bileşik yüzdesi düşükken, CH+%50E malzemesinde ise puzolanik reaksiyon SiO₂ ile gerçekleştiği için bu yüzdeler daha düşüktür.



	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CH+ %50E (30G)	2,10	2,98	18,93	53,35	0,23	0,98	2,43	6,76	10,38

Şekil 128. CH+%50E malzemesinin 30 gün SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları



	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CH+ %50E (360G)	2,14	3,08	19,18	52,50	0,24	0,79	2,38	7,29	10,56

Şekil 129. CH+%50E kür malzemesinin 360 gün SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

Tablo 23. Küre tabi CH zeminine ait XRF analizlerinin toplu sonuçları

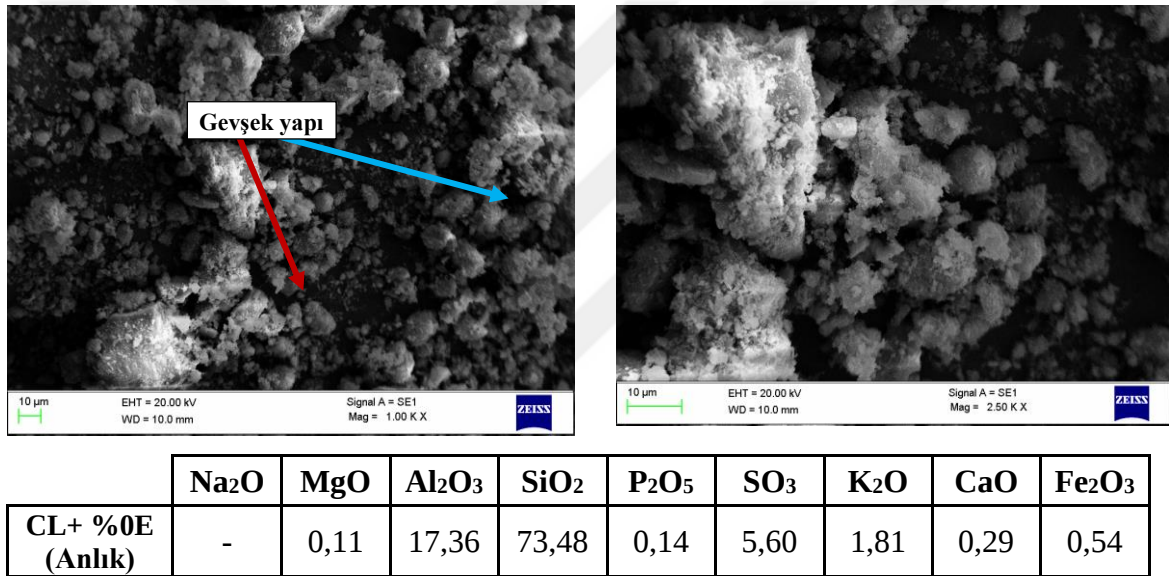
	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CH+ %0E (Anlık)	2,38	2,66	15,98	56,43	0,15	0,95	1,91	5,94	11,29
CH+ %0E (15G)	2,69	2,92	16,23	57,04	0,16	0,91	1,80	5,71	10,36
CH+ %0E (30G)	2,64	2,91	16,48	56,98	0,16	0,86	1,78	5,78	10,35
CH+ %0E (360G)	2,52	2,85	16,19	56,45	0,16	0,87	1,88	5,95	10,89
CH+ %50E (Anlık)	2,21	3,09	19,31	52,94	0,24	0,74	2,43	6,29	10,41
CH+ %50E (15G)	2,18	3,09	20,10	52,72	0,24	0,82	2,49	6,35	10,31
CH+ %50E (30G)	2,10	2,98	18,93	53,35	0,23	0,98	2,43	6,76	10,38
CH+ %50E (360G)	2,14	3,08	19,18	52,50	0,24	0,79	2,38	7,29	10,56

Bilindiği üzere Ca ile SiO₂'nin reaksiyonu, puzolanın bağlayıcı etkinliğini Al₂O₃'e oranla daha çok artırır ve daha güçlü puzolanik reaksiyon sağlar (Atkinson, vd., 1991). Dolayısı ile CH+%50E malzemesinin mukavemet değerinin CH+%0E malzemesine oranla daha yüksek olması da bu durumdan kaynaklanabilir. Ayrıca Tablo 23'te verilen XRF sonuçlarına göre CaO miktarının CH+%50E malzemesinde daha fazla olması ve kür süresine bağlı olarak miktarının artması da bu durumu desteklemektedir.

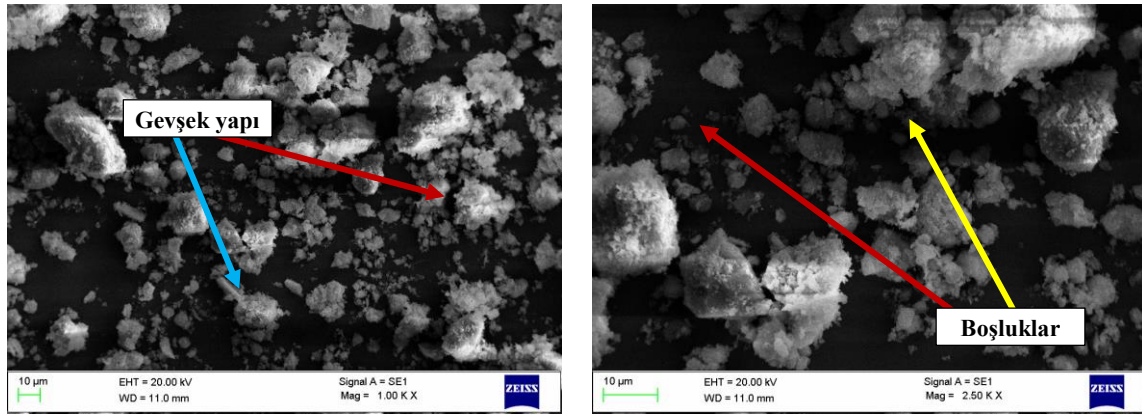
3.8.2. Donma-Çözülme Deney Mazmurelerine ait SEM Görüntüleri ve XRF Analiz Sonuçları

Donma-çözülme deneylerinde CL zemini için “CL+%0E”, “CL+%10E” ve “CL+%50E” atık oranlarında anlık, 7. ve 11. çevrim ve CH zemini için ise “CH+%0E” ve “CH+%50E” atık oranlarında anlık, 3-5-7 ve 11. çevrimlerde anlamlı değişimler meydana geldiği için SEM ve XRF analizleri seçilen bu numuneler için yapılmıştır.

CL zemini için “CL+%0E”, “CL+%10E” ve “CL+%50E” atık oranlarında anlık, 7. ve 11. çevrime ait SEM görüntüleri Şekil 130-138 aralığında ve XRF analiz sonuçları ise Tablo 24’te verilmiştir.



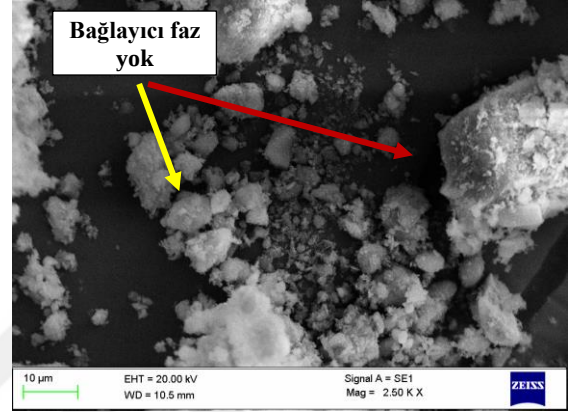
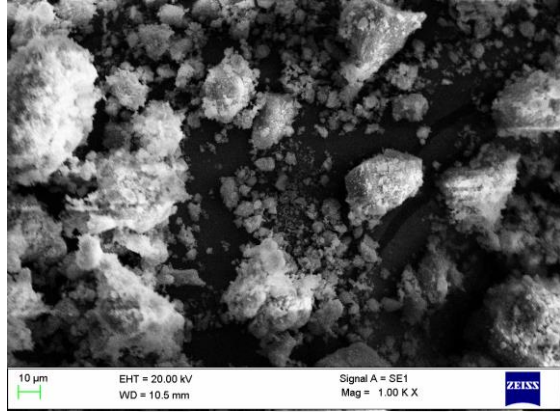
Şekil 130. CL+0E zemininin D-Ç deneyi anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları



Şekil 131. CL+%0E zemininin D-Ç deneyi 7.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

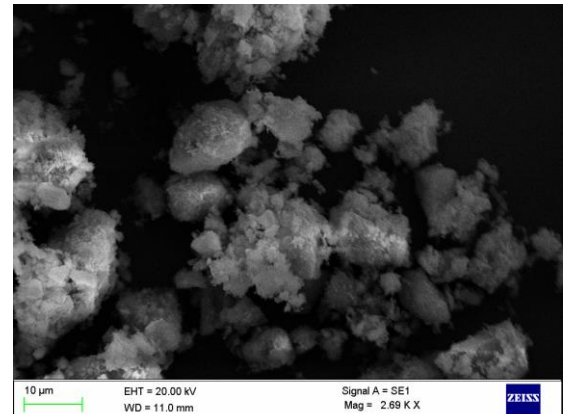
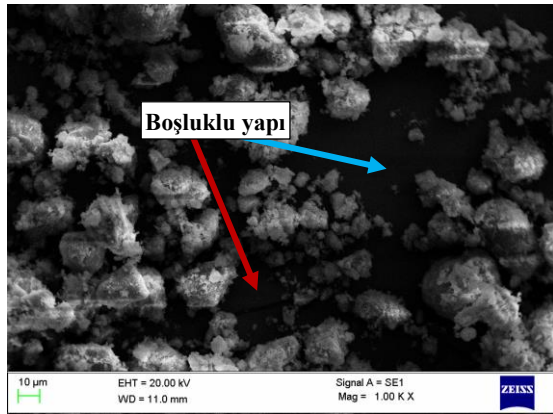
Şekil 131'in devamı

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CL+ %0E (7Ç)	0,06	0,12	17,06	73,95	0,13	5,47	1,74	0,24	0,01



	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CL+ %0E (11Ç)	0,06	0,09	17,56	73,06	0,12	5,56	1,73	0,30	0,58

Şekil 132. CL+%0E zemininin D-Ç deneyi 11.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

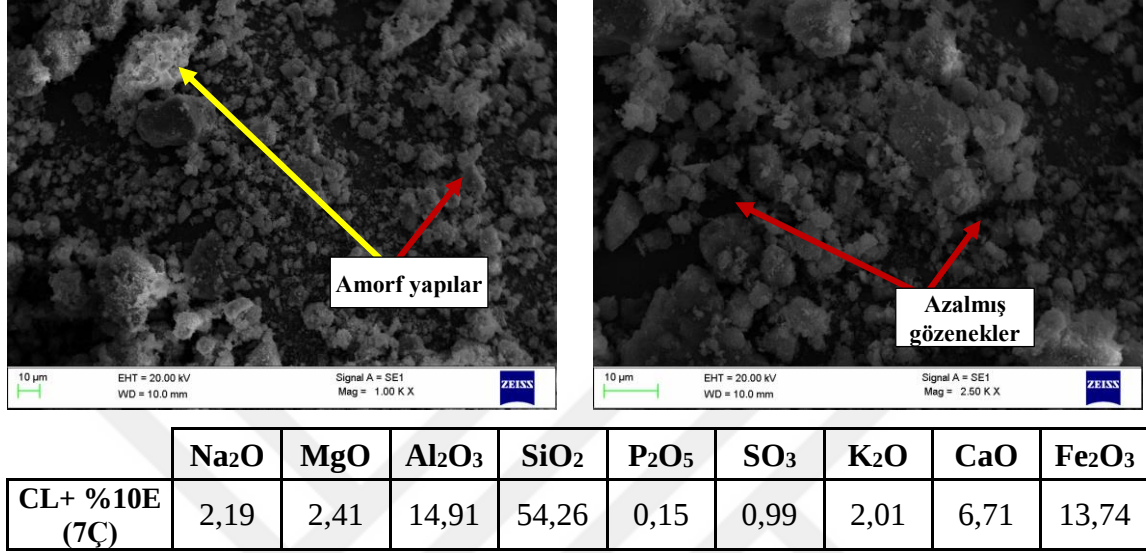


	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CL+ %10E (Anlık)	0,18	0,34	17,65	71,34	0,16	5,17	1,86	1,02	1,52

Şekil 133. CL+%10E zemininin D-Ç deneyi anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

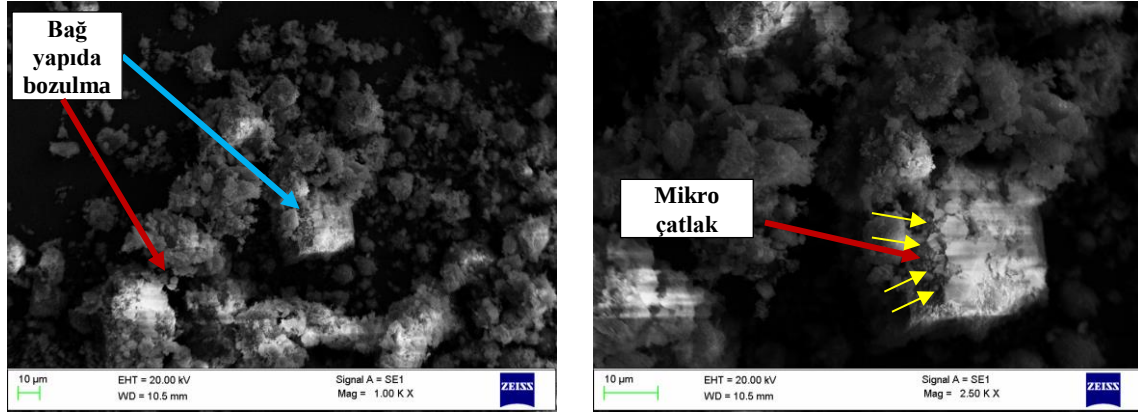
CL+%0E zeminine ait XRF analizlerinde anlık duruma göre 7 ve 11. çevrimlerde CaO, SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ oranlarının stabil kaldığı görülmektedir. Bu durum atık içermeyen

zeminin bağlayıcı faz oluşumunun sınırlı olmasına bağlanabilir. Bu durum SEM görüntülerinde belirgin boşluklara bağlı gevşek doku ve bağlayıcı faz eksikliği şeklinde görülmektedir (Şekil 131-132).



Şekil 134. CL+10E zemininin D-Ç deneyi 7.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

%10 atık durumu için anlık, 7 ve 11. çevrim analizlerine bakıldığında ise 7. çevrimde CaO miktarının (1,02 → 6,71) ve FeO₃ miktarının (1,52 → 13,74) arttığı, SiO₂ ve Al₂O₃ miktarlarının puzolanik reaksiyonlarda tüketilmesine bağlı azaldığı görülüyor. Bu da anlık durumda daneler arası boşlukların olduğu CL+%10E zemininde, 7. çevrimde yoğun puzolanik reaksiyonların başlamış olabileceğini göstermektedir. Şekil 106 incelendiğinde CL+%10E zemininin en yüksek dayanımı 7. çevrimde alması bu durumu desteklemektedir. SEM görüntülerine bakıldığında amorf, lifsi bağlayıcı yapılar oluştuğu, gözeneklerin azaldığı ve danecikler arasında köprü yapıların oluştuğu görülmektedir (Şekil 134).

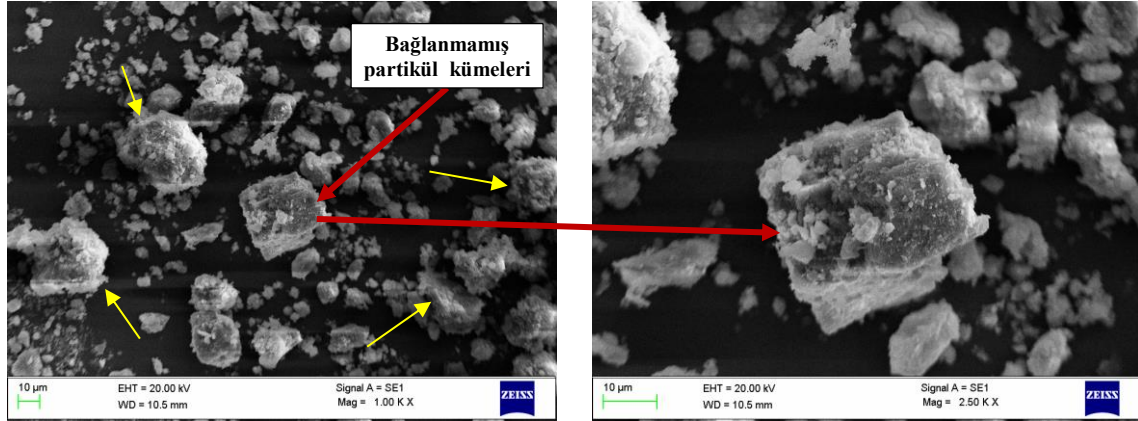


	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CL+ %10E (11Ç)	0,15	0,32	18,04	71,17	0,15	5,08	1,89	0,98	0,01

Şekil 135. CL+%10E zemininin D-Ç deneyi 11.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

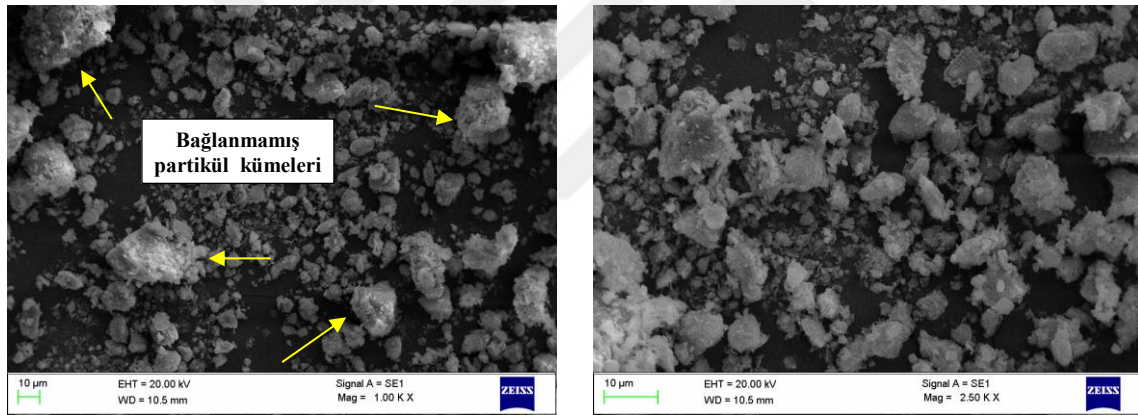
%10 atık oranı için 11. çevrimde ise CaO miktarı azalmış SiO₂ oranı ise yükselmiştir. Bu durum çevrim sayısından kaynaklı pozolanik reaksiyonun etkili olamadığı şeklinde yorumlanabilir. Şekil 106'da 11. çevrimde mukavemetim azalması bu durum ile ilişkilendirilebilir. Bu durum SEM görüntülerinde bağ yapısının bozulması, yüzeyde kırılma ve mikro çatlak şeklinde kendini göstermektedir (Şekil 135).

%50 katkı oranındaki sonuçlara bakıldığında %10 atık oranına göre CaO ve FeO₃ oranında artış SiO₂ oranında ise düşüş görülmektedir. Bu durum %50 atık oranında iyileşme olduğu yönünde yorumlanabilir. CL+%50E zemini anlık, 7 ve 11. çevrim içerisinde değerlendirilirse oranlarda fazla bir değişimin olmadığı tüm oksit içeriklerinin ve CaO miktarının sabit kaldığı görülmektedir.



	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CL+ %50E (Anlık)	0,61	1,25	18,36	62,78	0,20	3,39	2,43	4,04	5,74

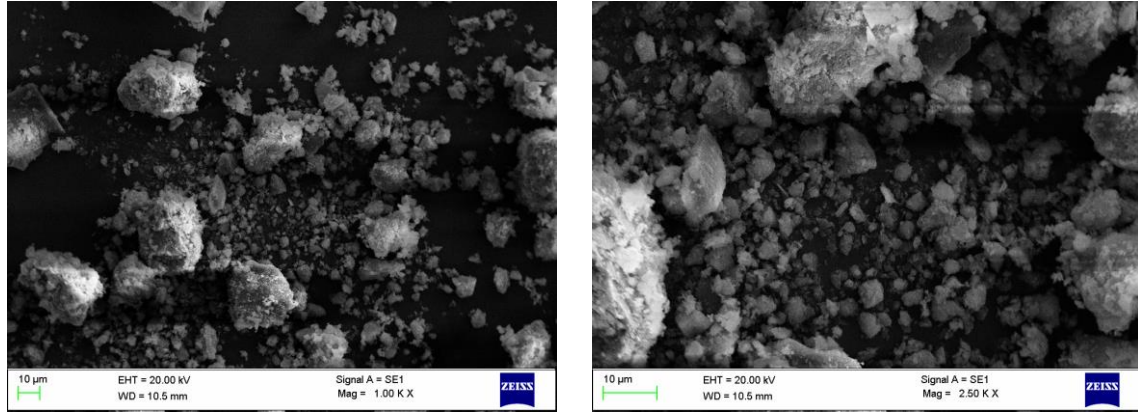
Şekil 136. CL+%50E zemininin D-Ç deneyi anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları



	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CL+ %50E (7Ç)	0,57	1,23	18,43	62,83	0,21	3,44	2,39	4,06	5,74

Şekil 137. CL+%50E zemininin D-Ç deneyi 7.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

SEM görüntülerine bakıldığında homojen olmayan, topaklanmış bölgeler ve tam bağlanmamış partikül kümeleri görülmektedir. Bu durumun atık oranının yüksek olmasına bağlı reaksiyonların doymuş olabileceğinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 137-138).

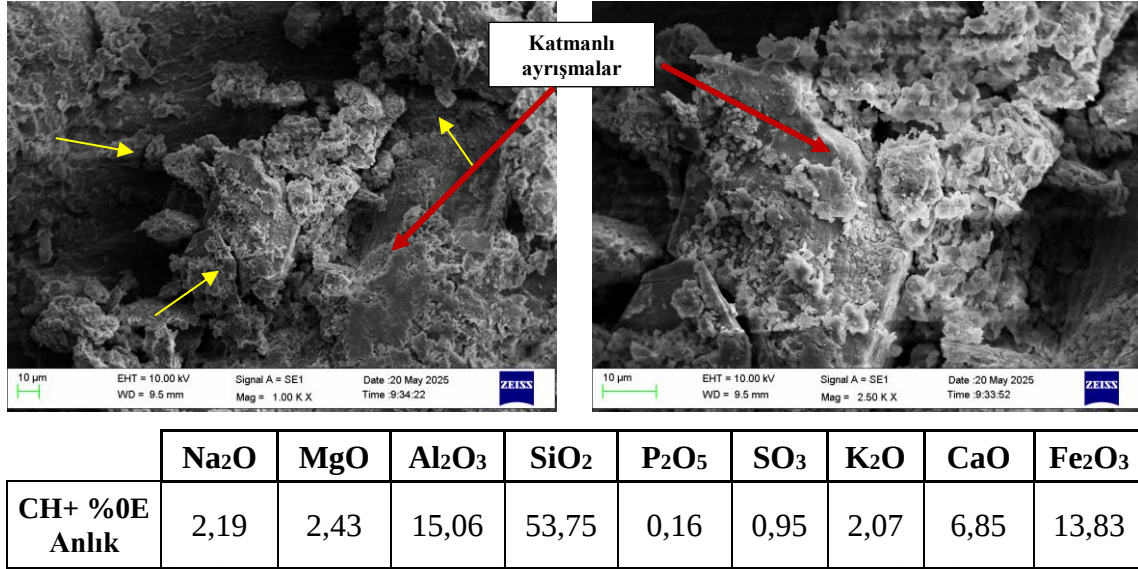


	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CL+ %50E (11Ç)	0,54	1,181	18,76	62,83	0,21	3,413	2,29	4,33	5,45

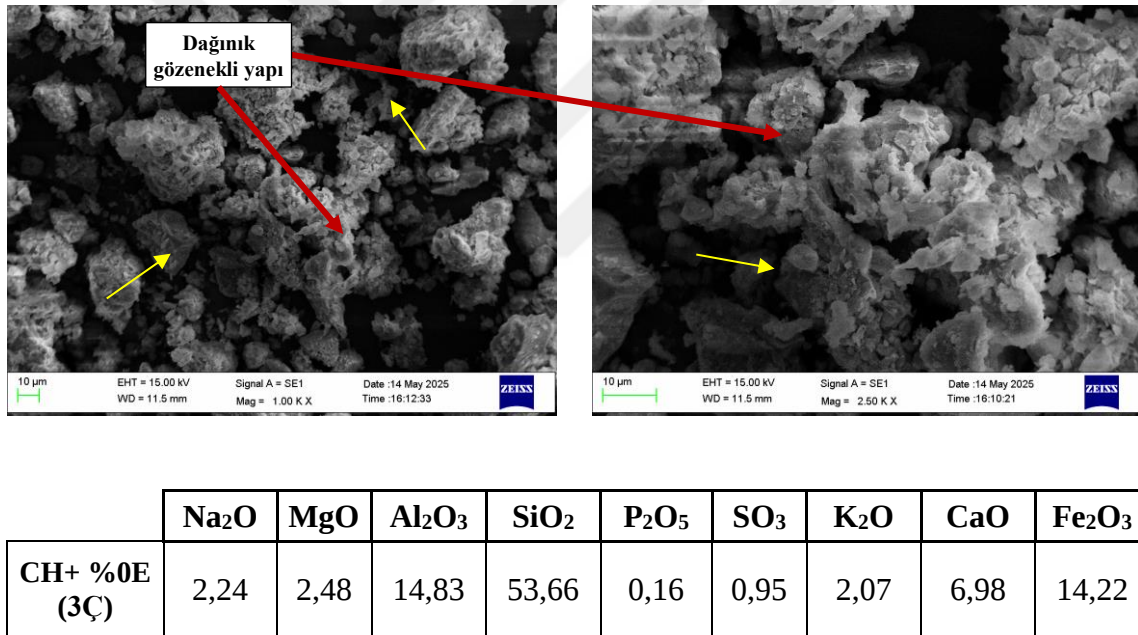
Şekil 138. CL+%50E zemininin D-Ç deneyi 11.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

Tablo 24. Donma-çözülme sonrası CL zeminine ait XRF analizlerinin toplu sonuçları

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CL+ %0E (Anlık)	-	0,11	17,36	73,48	0,14	5,60	1,81	0,29	0,54
CL+ %0E (7Ç)	0,06	0,12	17,06	73,95	0,13	5,47	1,74	0,24	0,01
CL+ %0E (11Ç)	0,06	0,09	17,56	73,06	0,12	5,55	1,73	0,30	0,58
CL+ %10E (Anlık)	0,18	0,34	17,65	71,34	0,16	5,17	1,86	1,02	1,52
CL+ %10E (7Ç)	2,19	2,41	14,91	54,26	0,15	0,99	2,01	6,71	13,74
CL+ %10E (11Ç)	0,15	0,32	18,04	71,17	0,15	5,08	1,89	0,98	0,01
CL+ %50E (Anlık)	0,61	1,25	18,36	62,78	0,20	3,39	2,43	4,04	5,74
CL+ %50E (7Ç)	0,57	1,23	18,43	62,83	0,21	3,44	2,39	4,06	5,74
CL+ %50E (11Ç)	0,54	1,18	18,76	62,83	0,21	3,41	2,29	4,33	5,45



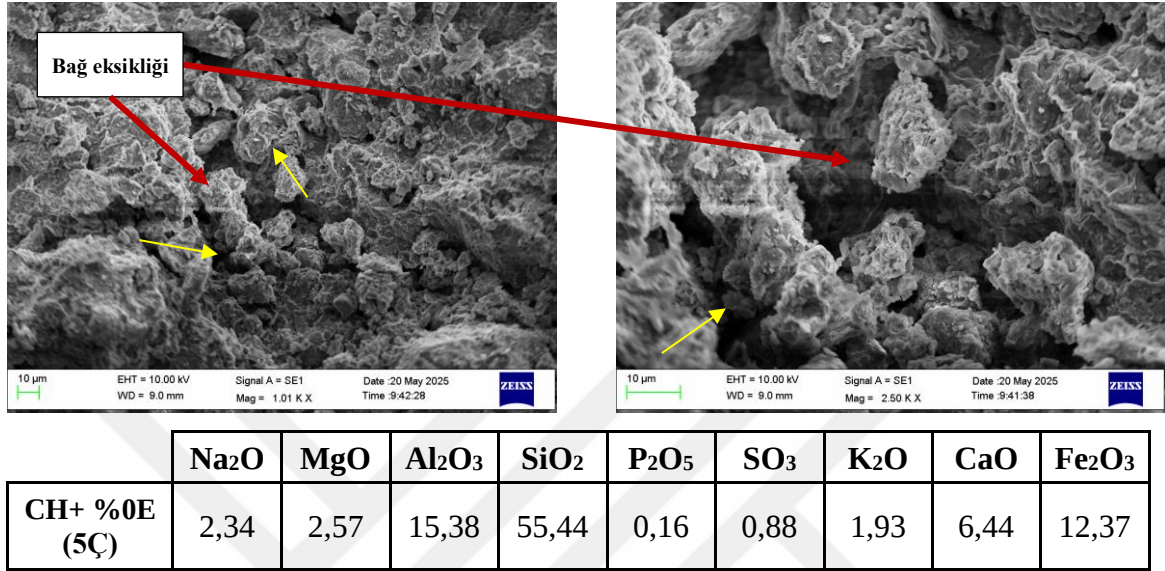
Şekil 139. CH+%0E zemininin D-Ç deneyi anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları



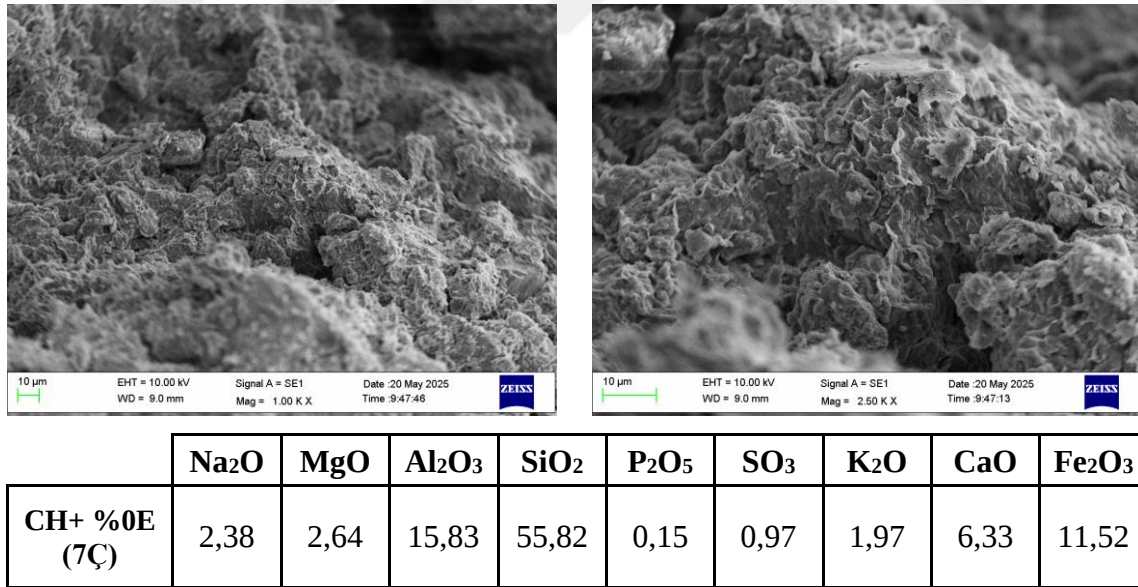
Şekil 140. CH+%0E zemininin D-Ç deneyi 3.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

CH zemini için “CH+%0E” ve “CH+%50E” atık oranlarında Anlık, 3-5-7 ve 11. çevrimlere ait SEM görüntüleri Şekil 139-148 aralığında ve XRF analiz sonuçları ise Tablo 25’te verilmiştir. Buna göre; CH+%0E atıksız kontrol grubu farklı çevrim sayılarında CaO ve SiO₂ ve Al₂O₃ miktarı sabit kalmış ve Fe₂O₃ oranı azalmıştır. Bu azalma Fe₂O₃’ün reaksiyonda kullanıldığını fakat yetersiz bağlayıcı reaksiyon nedeniyle mukavemette anlamlı bir değişim olmadığını göstermiştir. Şekil 112’de verilen serbest basınç grafiğinde anlık ve 11. çevrim arası kayda değer bir mukavemet değişiminin olmaması da bu durumu

doğrulamaktadır. Dolayısı ile SEM görüntülerine bakıldığında dağınık gözenekli yapı, kil pulları arasında belirgin bağ eksikliği ve mikro düzeyde katmanlı ayrışmaların bu durumdan kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 139-140-141).



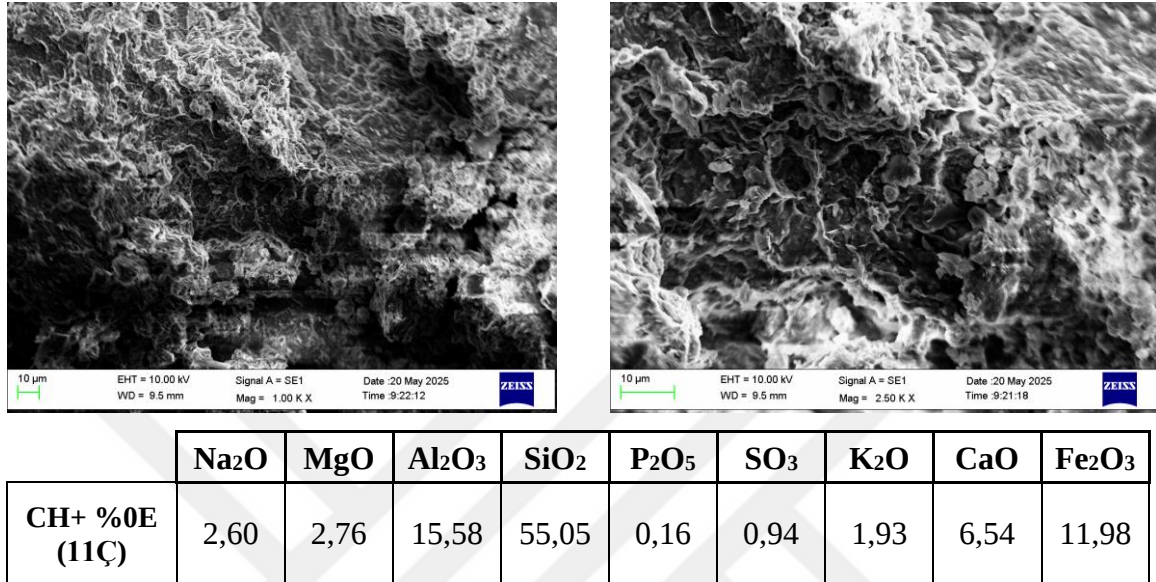
Şekil 141. CH+%0E zemininin D-Ç deneyi 5.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları



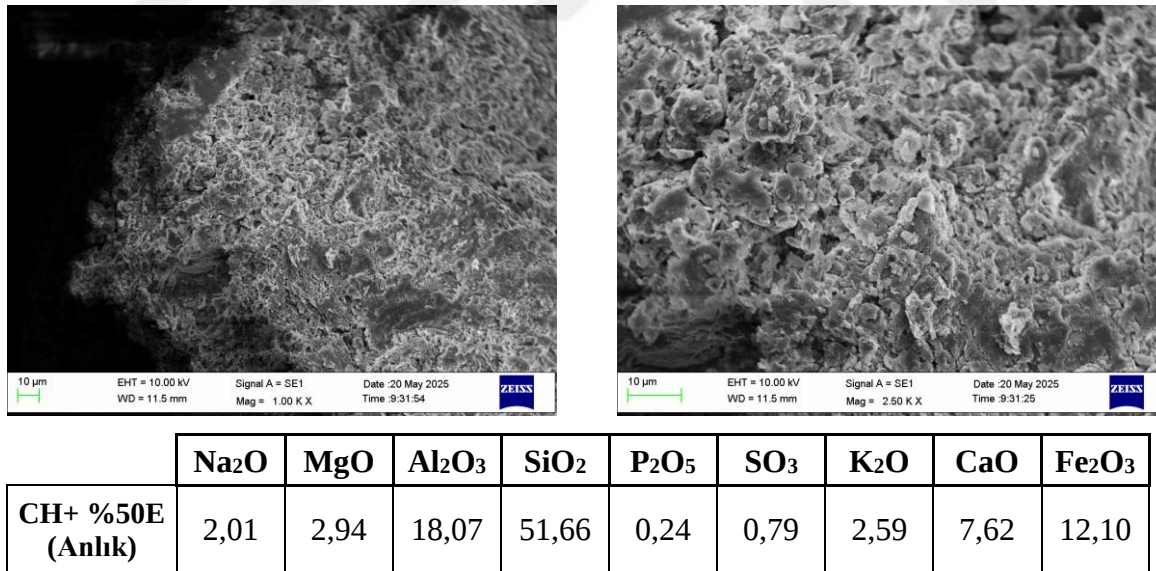
Şekil 142. CH+%0E zemininin D-Ç deneyi 7.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

Farklı çevrimlerde CH+%50E zeminine ait XRF analiz sonuçları incelendiğinde, atıksız kontrol grubuna kıyasla SiO₂ oranında bir miktar azalma, Al₂O₃ ve CaO oranlarında ise artış gözlenmiştir. Özellikle CaO varlığı, puzolanik reaksiyonların gerçekleşebilmesi açısından önemlidir. Ayrıca, CH+%50E zemininde Fe₂O₃ oranındaki çevrimler boyunca

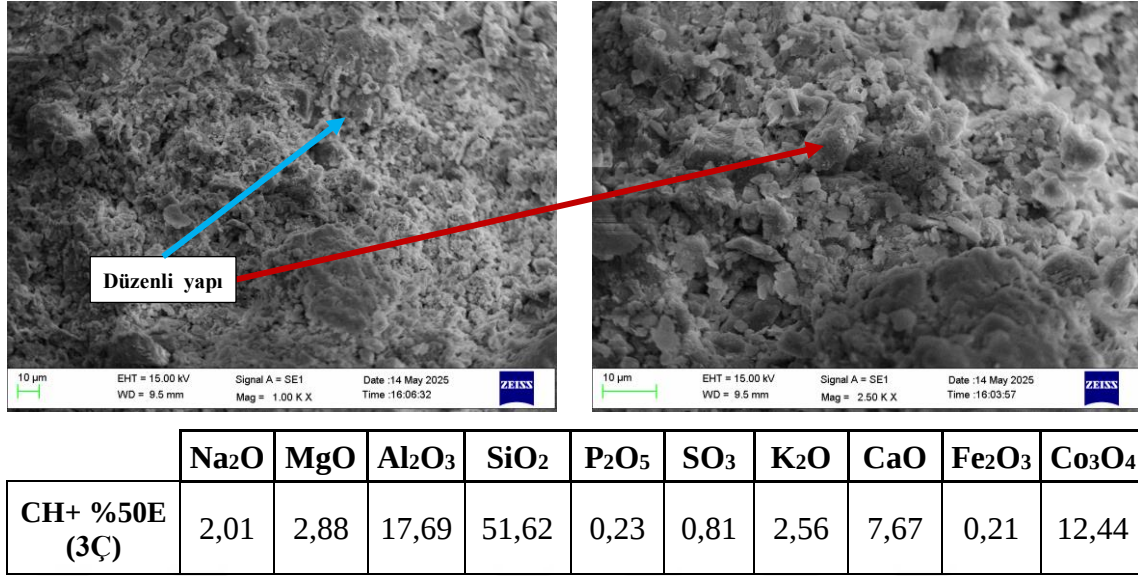
meydana gelen sert düşüş, SEM'de bazı metalik fazların çözündüğü veya ayrıştığını dolayısı ile bu bileşiğin reaksiyon sürecine aktif olarak katıldığını göstermektedir. Bu durum, artan puzolanik aktivitenin mukavemet gelişimini desteklediğini gösterebilir.



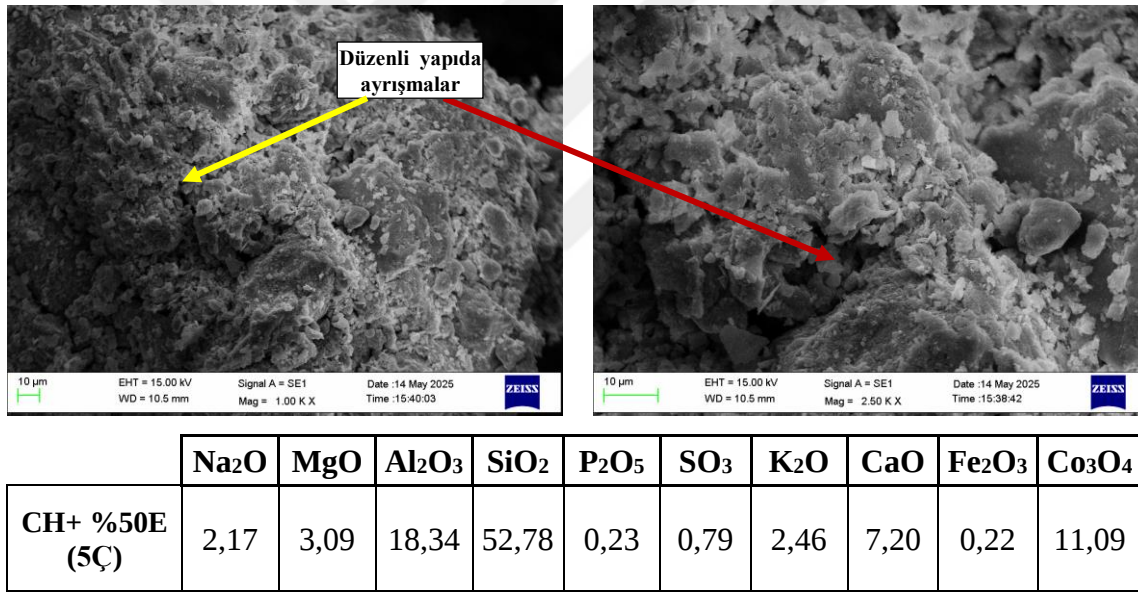
Şekil 143. CH+%0E zemininin D-Ç deneyi 11.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları



Şekil 144. CH+%50E zemininin D-Ç deneyi anlık SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

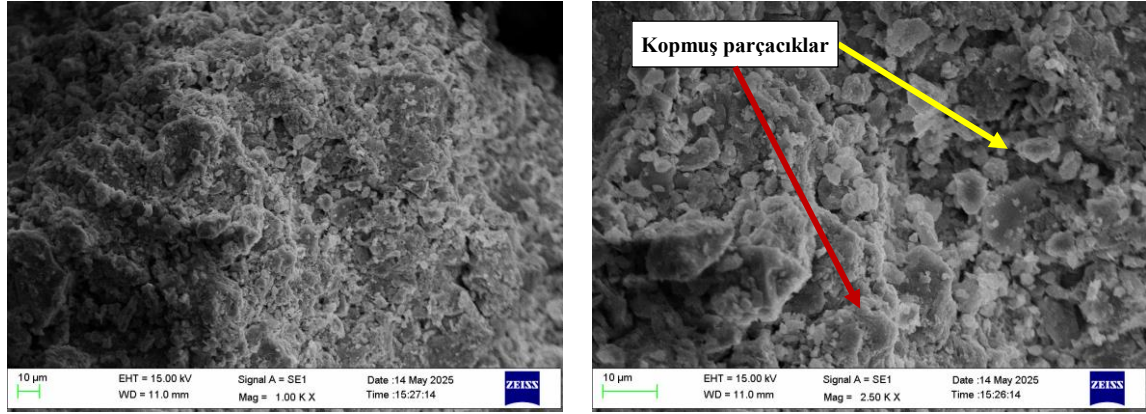


Şekil 145. CH+%50E zemininin D-Ç deneyi 3.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları



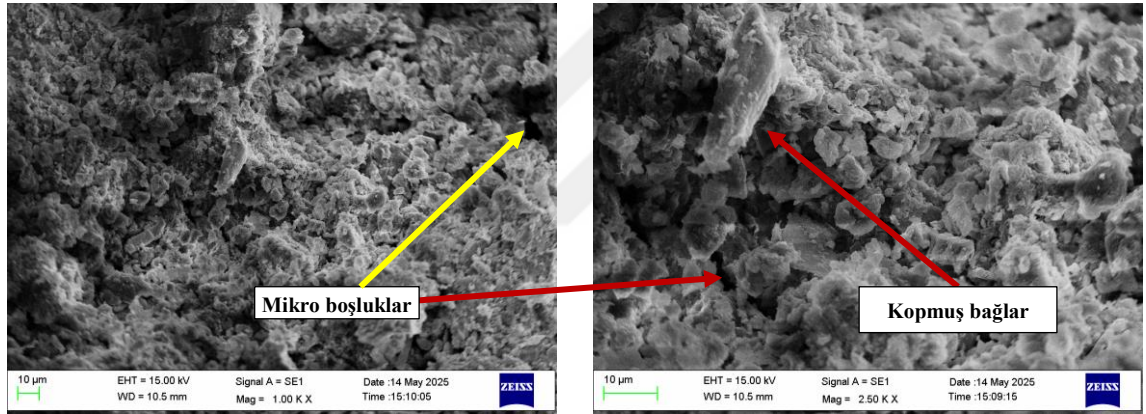
Şekil 146. CH+%50E zemininin D-Ç deneyi 5.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

SEM görüntüleri incelendiğinde, düşük çevrim sayılarında malzeme yüzeyinde bağ oluşumlarının daha düzenli ve belirgin olduğu (Şekil 145), bu durumun çevrimlerin dağıtıcı etkisinin henüz sınırlı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Co ₃ O ₄
CH+ %50E (7°C)	1,95	2,90	17,87	52,27	0,23	0,82	2,49	7,69	0,20	11,77

Şekil 147. CH+%50E zemininin D-Ç deneyi 7.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları



	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Co ₃ O ₄
CH+ %50E (11°C)	2,22	3,08	18,87	52,37	0,23	0,86	2,43	7,99	0,19	10,94

Şekil 148. CH+%50E zemininin D-Ç deneyi 11.Ç SEM görüntüleri ve XRF analiz sonuçları

Buna karşın, yüksek çevrim sayılarında bağ oluşumları yoğun olsa da, çevrime bağlı yıpranma etkileriyle birlikte yapıda kopmuş parçacıklar, çatlamış bağ köprüleri ve artan mikroyapısal boşluklar gözlenebilmektedir. Bu durum, tekrar eden çevrimlerin yapısal bütünlük üzerinde bozucu etki oluşturduğu şekline yorumlanabilir (Şekil 146-147-148).

Tablo 25. Donma-çözülme sonrası CH zeminine ait XRF analizlerinin toplu sonuçları

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
CH+ %0E (Anlık)	2,19	2,43	15,07	53,76	0,16	0,95	2,07	6,85	13,83
CH+ %0E (3Ç)	2,24	2,48	14,83	53,66	0,16	0,95	2,07	6,98	14,22
CH+ %0E (5Ç)	2,34	2,57	15,38	55,44	0,16	0,88	1,93	6,44	12,37
CH+ %0E (7Ç)	2,38	2,64	15,83	55,82	0,15	0,97	1,97	6,33	11,52
CH+ %0E (11Ç)	2,60	2,76	15,58	55,05	0,16	0,94	1,93	6,54	11,98
CH+ %50E (Anlık)	2,01	2,94	18,07	51,659	0,24	0,79	2,59	7,62	12,10
CH+ %50E (3Ç)	2,01	2,88	17,69	51,62	0,23	0,81	2,56	7,67	0,21
CH+ %50E (5Ç)	2,17	3,09	18,34	52,78	0,23	0,79	2,46	7,20	0,22
CH+ %50E (7Ç)	1,95	2,90	17,87	52,27	0,23	0,82	2,49	7,69	0,20
CH+ %50E (11Ç)	2,22	3,08	18,87	52,37	0,23	0,86	2,43	7,99	0,19

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, içme suyu arıtma tesislerinden elde edilen atık çamurların killi zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilirliği kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Trabzon ilinin farklı bölgelerinde bulunan Esiroğlu (AÇ-1), Derecik (AÇ-2) ve Akçaabat (AÇ-3) içme suyu arıtma tesislerinden temin edilen atık çamur numunelerinin fiziksel, mekanik, kimyasal ve mineralojik özellikleri laboratuvar ortamında detaylı analizlere tabi tutulmuştur. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, Esiroğlu tesisine ait AÇ-1 numunesinin diğer atık çamurlara kıyasla zemin stabilizasyonu açısından daha uygun özellikler sergilediği belirlenmiş ve ileri düzey deneyler bu numune ile devam ettirilmiştir. Belirlenen katkı oranlarında hazırlanan AÇ-1 numunelerine farklı kür süreleri uygulanmış ve donma-çözülme dayanımları çeşitli çevrimlerde test edilmiştir. Ayrıca, bu deneyler kapsamında numunelerin mikro yapısal değişimleri Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve XRF analizleriyle incelenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda atık çamurların zemin stabilizasyonundaki etkinliği ve uzun vadeli performansı değerlendirilmiş, çalışmanın temel bulguları ve sonuçları aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Kaolen, Bentonit ve atık çamurların (AÇ-1, AÇ-2, AÇ-3) mineral bileşimleri XRD analizi ile belirlenmiş olup, Kaolen %52 Kaolinit, Bentonit %53,7 Albit, AÇ-1 %39,5 düşük Albit, AÇ-2 %34,2 düşük Kuvars ve AÇ-3 %65,9 Kaolinit minerali içermektedir.
- Kaolen, Bentonit ve atık çamur malzemelerinin (AÇ-1, AÇ-2, AÇ-3) kimyasal bileşimleri XRF analizi ile belirlenmiş olup, sonuçlara göre tüm numunelerde SiO_2 ve Al_2O_3 bileşiklerinin oranları yüksek çıkmıştır. Özellikle puzolanik reaksiyon için önemli olan CaO bileşiği ise en %14,16 gibi yüksek oranla AÇ-1 numunesinde tespit edilmiştir.
- Kaolen, Bentonit ve atık çamur malzemeleri (AÇ-1, AÇ-2, AÇ-3) Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre sınıflandırılmış ve buna göre Kaolen malzemesi CL, Bentonit malzemesi CH, AÇ-1 ve AÇ-2 malzemesi ML ve AÇ-3 malzemesi ise SM olarak isimlendirilmiştir.

- CL, CH ve atık çamur numuneleri (AÇ-1, AÇ-2, AÇ-3) üzerinde gerçekleştirilen Standart Proktor deneyleri sonucunda, en düşük maksimum kuru birim hacim ağırlığı AÇ-3 numunesinde, en yüksek değer ise AÇ-1 numunesinde elde edilmiştir.
- CL, CH ve atık çamur numuneleri (AÇ-1, AÇ-2, AÇ-3) üzerinde gerçekleştirilen konsolidasyon deneyleri sonucunda, CH numunesinin sıkışma indisi (C_c), yeniden sıkışma indisi (C_r), şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerinin diğer tüm numunelere kıyasla belirgin şekilde yüksek olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık, atık çamur numunelerine ait söz konusu parametreler düşük seviyelerde olup, birbirine oldukça yakın sonuçlar vermiştir.
- Atık çamur numunelerinin CL ve CH sınıfı zeminler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla farklı katkı oranları (%0, 5, 10, 20, 30 ve %50) içeren karışımlar hazırlanmış ve sonuçta, atık çamur oranının artmasıyla birlikte CL sınıfı malzemenin ML sınıfına, CH sınıfı malzemenin ise MH sınıfına dönüştüğü görülmüştür. Bu nedenle ileri deneylerde etkili atık oranı olarak %0, 10, 30 ve %50 değerleri kullanılmıştır.
- Etkili atık oranlarıyla hazırlanan karışımlarda, CL malzemesinin maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) %50 atık oranında %27,5 artarken; CH malzemesinde ise aynı parametre %50 atık oranında %22,1 oranında artmıştır.
- Etkili atık oranlarıyla hazırlanan karışımların konsolidasyon deney sonuçları incelendiğinde, hem CL hem de CH zeminlerinde atık oranının artmasıyla sıkışma indisi, yeniden sıkışma indisi, şişme basıncı ve şişme yüzdesi parametrelerinde genel bir azalma gözlenmiştir.
- Etkili atık oranlarıyla hazırlanan karışımlarda gerçekleştirilen serbest basınç deneyleri sonucunda, atık oranının artışıyla CL zemininin serbest basınç mukavemet değeri %50 atık oranıyla %188 artarken, CH malzemesinin mukavemeti ise aynı oranlarda %120 yükselmiştir.
- Etkili atık oranlarıyla hazırlanan karışımlar, 0, 7, 15, 30, 60 ve 360 günlük kür sürelerine tabi tutulmuş ve sonrasında serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, CL ve CH zemininin tümü için kür süresinin artışı, hem serbest basınç dayanımı (q_u) hem de Elastisite Modülü (E_u) açısından tüm karışımlarda olumlu yönde bir gelişim sağlamıştır. Aynı şekilde malzeme kayıp yüzdeleri açısından değerlendirildiğinde; her iki malzeme içinde %0 ila %10 atık oranlarında kür süresi arttıkça sınırlı bir artış gözlenmesine karşın %30 ve %50 atık oranlarında kür süresine bağlı olarak kayıp yüzdesinde belirgin artışlar meydana gelmiştir.

- Etkili atık oranlarıyla hazırlanan karışımlar, 0, 1, 3, 5, 7 ve 11 çevrimlik donma-çözülme döngülerine tabi tutulmuş ve ardından serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. CL malzemesi için çevrim sayısının artışı, 7. çevrimden sonra mukavemette kısmi azalmaya neden olsa da genel olarak hem serbest basınç dayanımı (q_u) hem de Elastisite Modülü (E_u) değerini artırmıştır. CH zemininde ise çevrim sayıları malzeme davranışını farklı şekillerde etkilemiş; özellikle %50 atık oranında çevrim sayısındaki artış dayanımı artırırken, diğer katkı oranlarında sınırlı ya da düzensiz değişimler gözlenmiştir. Malzeme kayıpları açısından değerlendirildiğinde, CL malzemesinde çevrim sayısının artması ağırlık kaybı oranını artırmıştır. CH malzemesinde ise çevrim sayısına bağlı olarak kabin içi su muhtevastaki dalgalanmaların malzeme bütünlüğü üzerinde oluşturduğu etkiler nedeniyle kayıp yüzdelерinde düzensiz bir dağılım ortaya çıkmıştır.
- CL ve CH zemin türleri üzerinde kür süresinin etkisi için gerçekleştirilen SEM görüntüleri ve XRF analizleri, atık çamur katkısının mikro yapı üzerindeki olumlu etkilerini ortaya koymuştur. SEM görüntülerinde, artan atık oranıyla birlikte malzeme yapısının daha yoğun, lifli ve bağlayıcı bir doku kazandığı gözlemlenmiştir. XRF analiz sonuçları ise özellikle %50 atık katkısı durumunda CaO içeriğinde belirgin bir artış olduğunu göstermiş, bu durum katkı malzemesinin puzolanik özellik sergilediğini ve bağlayıcı reaksiyonların oluşumunu desteklediğini ortaya koymuştur.
- CL ve CH zemin türleri üzerinde D-Ç etkisi için gerçekleştirilen SEM görüntüleri ve XRF analizlerine göre, CL zemininde XRF ve SEM analizleri, bağlayıcı faz oluşumunun atık oranı ve çevrim sayısına bağlı olduğunu göstermiştir. %10 atıkla 7. çevrimde en yüksek mukavemet ve belirgin bağ yapıları elde edilmiştir. CH zemininde ise %0 atık oranıyla sınırlı bağlayıcı oluşmuş, mukavemet düşük kalmıştır. %50 atık oranında ise CaO ve Al_2O_3 artışı, Fe_2O_3 azalımıyla birlikte puzolanik aktivitenin güçlendiği ve bağ yapılarının yoğunlaştığı gözlenmiştir. Ancak yüksek çevrimlerde çatlak ve gözeneklilik artışı, yapısal bozulmaya işaret etmektedir.

Bu bağlamda, elde edilen veriler, söz konusu atıkların çevre dostu ve ekonomik bir alternatif olarak kullanılması konusunda önemli sonuçlar ortaya koymuş, Esiroğlu içme suyu arıtma tesisine ait atık çamurunun, stabilizasyon amaçlı kullanımda zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmede etkin ve sürdürülebilir bir katkı malzemesi olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir.

5. ÖNERİLER

İçme suyu arıtma çamurlarının zemin stabilizasyonunda kullanımına yönelik gerçekleştirilen bu Doktora tez çalışması, malzemenin fiziksel, kimyasal, minerolojik ve mekanik özellikleri ve zemin mekaniği performansı açısından umut verici sonuçlar ortaya koymuştur. Ancak sürecin optimizasyonu, uzun dönemli davranışın incelenmesi ve standartların geliştirilmesi gibi konularda ileri çalışmalara gereksinim bulunmaktadır. Bu doğrultuda, aşağıda belirtilen önerilerin araştırmacılar için yol gösterici olması hedeflenmiştir.

- Arıtma çamur atık oranları daha düşük seviyelerden başlanabilir.
- Kür süreleri artırılarak uzun dönem mekanik davranışlar gözlemlenebilir.
- Donma-çözülme döngüleri farklı sıcaklıklarda ve sürelerde gerçekleştirilerek mekanik davranışlar izlenebilir.
- Farklı katkı maddesi ile birlikte daha efektif (verimli) hale getirilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Abdelkader, H. A., Hussein, M. M., & Ye, H. (2021). Influence of waste marble dust on the improvement of expansive clay soils. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1), 3192122.
- Abo-El-Enein, S. A., Shebl, A., & El-Dahab, S. A. (2017). Drinking water treatment sludge as an efficient adsorbent for heavy metals removal. *Applied Clay Science*, 146, 343-349.
- Agyin-Birikorang, S., & O'Connor, G. A. (2007). Lability of drinking water treatment residuals (WTR) immobilized phosphorus: Aging and pH effects. *Journal of environmental quality*, 36(4), 1076-1085.
- Agyin-Birikorang, S., & O'Connor, G. A. (2009). Aging effects on reactivity of an aluminum-based drinking-water treatment residual as a soil amendment. *Science of the total environment*, 407(2), 826-834.
- Ağar, Ü. (1977). Demirözü (Bayburt) ve Köse (Kelkit) bölgesinin jeolojisi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, İstanbul, 59s.
- Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, M. (2018). Investigating calcined filter backwash solids as supplementary cementitious material for recycling in construction practices. *Construction and Building Materials*, 175, 664-671.
- Ahmadi, S., Ghasemzadeh, H., & Changizi, F. (2021a). Effects of A low-carbon emission additive on mechanical properties of fine-grained soil under freeze-thaw cycles. *Journal of Cleaner Production*, 304, 127157.
- Ahmadi, S., Ghasemzadeh, H., & Changizi, F. (2021b). Effects of thermal cycles on microstructural and functional properties of nano treated clayey soil. *Engineering Geology*, 280, 105929.
- Akat, H., Altunlu, H., Demirkan, G. Ç., Saraçoğlu, Ö. A., & Yokaş, İ. (2017). Kesme Gül Yetiştiriciliğinde Arıtma Çamuru Uygulamalarının Bitki Gelişimi, Çiçeklenme ve Kalite Üzerine Etkisi. *Journal of Agriculture Faculty of Ege University*, 54(3), 327-332.
- Alam, M., Lal, C., & Anand N. (2021). Stabilization of Sandy Soil by Use of Phosphogypsum and Marble Dust. *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (www.jetir.org)*, ISSN:2349-5162, 8(6), 133-136.
- Ali, M. A., & Shankar, R. (1992). Dispersive soils in earth dams and embankments. *Indian Geotechnical Journal*, 22(3), 211–223.
- Ali, M. H., Aljanabi, K. R. M., & Mustafa, A. S. (2024). Investigating the Potential of Water Treatment Sludge for Improvement of the Geotechnical Properties of Gypseous Soil. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 31(3), 80-92.

- Alpaslan, M. N., Dölgen, D., Boyacıoğlu, H., & Sarptaş, H. (2010). İçme suyundan kimyasal yöntemlerle arsenik giderimi. *Su Kirlenmesi Kontrolü Dergisi*, 20(1), 15-25.
- Al-Rawashdeh, M., Alzoubi, A., Hanandeh, S., Yousef, I., & Al-Nawaiseh, M. (2022). Performance of mortar incorporating heat-treated drinking water treatment sludge as a silica-sand replacement. *Civil Engineering Journal*, 8(8), 1639-1652. Doi: 10.28991/CEJ-2022-08-08-08
- Al Tahmazi, T. (2017). Characteristics and mechanisms of phosphorus removal by dewatered water treatment sludges and the recovery (Doctoral dissertation, Cardiff University). <https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/105255>
- Alzoubi, A. E., Ghunimat, D. M., Al-Rawashdeh, M., & Hanandeh, S. (2021). The potential of using water purification wastes as fine aggregates in concrete mixes: an initial study. *Australian Journal of Civil Engineering*, 19(2), 148–154. doi:10.1080/14488353.2020.1835148
- Amini, P., & Söğüt, Z. (2012). *Stenotaphrum Secundatum* (Walter) Kuntze İle Kurulu Çim Alanlarda Kapak Malzemesi Olarak İçme Suyu Arıtma Çamuru Kullanımı.
- Amiri, M., Asakereh, A., Farokhdell, A., & Atash poosh, H. (2024). Enhancing marl soil stability: nanosilica's role in mitigating ettringite formation. *International Journal of Geo-Engineering*, 15(1), 19.
- Anderson, M., Biggs, A., & Winters, C. (2003). Use of Two Blended Water Industry By-Product Wastes as a Composite Substitute for Traditional Raw Materials Used in Clay Brick Manufacture, Recycling and Reuse of Waste Materials. Thomas Telford Publishing, pp. 417–426.
- Andersland, O. B., & Ladanyi, B. (2003). *Frozen ground engineering*. John Wiley ve Sons.
- Andrade, G. C., Jiménez Orihuela, A., Chalco Hihui, A., Tejada Meza, K., Pacheco, C. R., & Terán Hilaes, R. (2024). Environmental sustainability of the removal of alpaca fiber dye using a thermally modified sludge from a drinking water treatment facility. *Sustainability*, 16(18), 7876. <https://doi.org/10.3390/su16187876>
- Angelova, I., Ivanov, I., Venelinov, T., & Lazarova, S. (2019). Occurrence of aluminium in urban water supply and sewerage systems. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 19(5.1), 501-508.
- Angın, Z., & Angın, A. (2005). *Şişen Killerin Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi*. Geoteknik Sempozyumu, Adana.
- Ara, S., Uddin, M. S., & Showkat, M. N. H. (2021). Correlation of compression index with index properties of soil samples from several places in Chattogram, Bangladesh. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 8(2), 752-755.
- Aras, A., & Kristaly, F. (2019). α -Cristobalite formation in ceramic tile and sewage pipe bodies derived from Westerwald ball clay and its effect on elastic-properties. *Applied Clay Science*, 178, 105126.

- Arenson, L. U., Azmatch, T. F., Sego, D. C., & Biggar, K. W. (2008). A new hypothesis on ice lens formation in frost-susceptible soils. In *Proceedings of the ninth international conference on permafrost* (Vol. 1, pp. 59-64). Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, Alaska.
- Arslan, G., & Atakol, O. (2005). Şehir İçme Suyu Arıtma Tesislerinde Çamur Atıklarının Değerlendirme Yollarının Araştırılması. *Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi*, 1(25), 73-78.
- Aoyama, K., Ogawa, S., & Fukuda, M. (1985). Temperature dependencies of mechanical properties of soils subjected to freezing and thawing. In *International symposium on ground freezing*. 4 (pp. 217-222).
- Arora, H. S., & Scott, J. B. (1974). Chemical stabilization of landslides by ion exchange. *California Geology*, 27(5).
- ASTM C 51. (2023). *Standard Terminology Relating to Lime and Limestone (as Used by the Industry)*
- Atkinson, A., Hearne, J. A., & Knights, C. F. (1991). Thermodynamic modelling and aqueous chemistry in the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ system. In *Materials Research Society Symposium Proceedings* (Vol. 212, pp. 395-402). <https://doi.org/10.1557/PROC-212-395>
- Awab, H., Paramalingam, P. T., & Yusoff, A. R. M. (2012). Characterization of alum sludge for reuse and disposal. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 8(4).
- Ayan, E. (2009). *Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Uygulamadan Örnekler*, İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Aydin, F., Karsli, O., & Chen, B. (2008). Petrogenesis of the Neogene alkaline volcanics with implications for post collisional lithospheric thinning of the Eastern Pontides, NE Türkiye. *Lithos*, 104, 249-266.
- Aydin, F. (2014). Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Macka subvolcanic intrusions: Implications on the Late Cretaceous magmatic and geodynamic evolution of the eastern part of the Sakarya Zone, NE Türkiye, *Int. Geol. Rev.*, 56/10, 1246-1275.
- Aydin, F., Oğuz-Saka, S., Şen, C., Dokuz, A., Aiglsperger, T., Uysal, İ., Kandemir, R., Karsli, O., Sarı, B., & Başer, R. (2020). Temporal, geochemical and geodynamic evolution of the Late Cretaceous subduction zone volcanism in the eastern Sakarya Zone, NE Türkiye: implications for mantle-crust interaction in an arc setting, *Journal of Asian Earth Science*, 192, 1-23.
- Alyıldız, İ. S. (2003). *Isparta-Dereboğazı tüflerinde donma-çözülme periyotlarının fiziko-mekanik davranışlarına etkisi* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi).

- Azmatch, T. F., Arenson, L. U., Sego, D. C., & Biggar, K. W. (2008). Measuring ice lens growth and development of soil strains during frost penetration using particle image velocimetry (GeoPIV). In *Proceedings of the ninth international conference on permafrost* (Vol. 1, pp. 89-94). Institute of Northern Engineering, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, Alaska.
- Azmatch, T. F., Sego, D. C., Arenson, L. U., & Biggar, K. W. (2012). New ice lens initiation condition for frost heave in fine-grained soils. *Cold Regions Science and Technology*, 82, 8-13.
- Babatunde, A.O., Zhao, Y.Q., Burke, A.M., Morris, M.A., & Hanrahan, J.P. (2009). Characterization of aluminium-based water treatment residual for potential phosphorus removal in engineered wetlands. *Environ. Pollut.* 157, 2830–2836. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.04.016>
- Babatunde, A.O., Zhao, Y.Q., & Zhao, X.H. (2010). Alum sludge-based constructed wetland system for enhanced removal of P and OM from wastewater: concept, design and performance analysis. *Bioresour. Technol.* 101, 6576–6579.
- Babatunde, A. O., Kumar, J. L., & Zhao, Y. (2011). Constructed wetlands using aluminium-based drinking water treatment sludge as P-removing substrate: should aluminium release be a concern?. *Journal of Environmental Monitoring*, 13(6), 1775-1783.
- Baghoth, S. A., Sharma, S. K., & Amy, G. L. (2011). Tracking natural organic matter (NOM) in a drinking water treatment plant using fluorescence excitation–emission matrices and PARAFAC. *Water research*, 45(2), 797-809.
- Bağrıaçık, B., & Güner, E. D. (2020). Endüstriyel atık katkılı kum zeminlerin geçirimsizlik davranışının araştırılması. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 6(1), 137-145.
- Bakıroğlu, G. (2024). İçme Suyu Arıtma Çamuru ve Yumurta Kabuğundan Isı Yalıtım Tuğlası Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Bartın.
- Balkaya, M. (2019). İçme Suyu Arıtma Çamurlarının Geoteknik Özellikleri ve Faydalı Kullanım Alanları. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 2(1), 11-19.
- Bai, L., Wang, C., Huang, C., He, L., & Pei, Y. (2014). Reuse of drinking water treatment residuals as a substrate in constructed wetlands for sewage tertiary treatment. *Ecological Engineering*, 70, 295-303. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.015>
- Barakwan, R. A., Hardina, T. T., Trihadiningrum, Y., & Bagastyo, A. Y. (2019). Recovery of alum from Surabaya water treatment sludge using electrolysis with carbon-silver electrodes. *Journal of Ecological Engineering*, 20(7), 126-133. <https://doi.org/10.12911/22998993/109861>
- Başer, O. (2009). Stabilization of Expansive Soils Using Waste Marble Dust. Master Thesis, Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Civil Engineering, Ankara.

- Bayraktar, M. O. (2003). Düşük kapasiteli killerin Trabzon İçme Suyu Arıtma Tesisi (T.İ.A.T.) atık çamuru kullanılarak stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 131s, Trabzon.
- Bektaş, O., Şen. C, Atıcı, Y., & Köprübaşı, N. (1999). Migration of the Upper Cretaceous subduction-related volcanism towards the back-arc basin of the Eastern Pontide magmatic arc (NE Türkiye), *Geological Journal*, 34, 95-106.
- Benalia, A., Derbal, K., Panico, A., & Pirozzi, F. (2018). Use of acorn leaves as a natural coagulant in a drinking water treatment plant. *Water*, 11(1), 57. <https://doi.org/10.3390/w11010057>
- Benlalla, A., Elmoussaouiti, M., Cherkaoui, M., Ait Hsain, L., & Assafi, M. (2015). Characterization and valorization of drinking water sludges applied to agricultural spreading. *J. Mater. Environ. Sci*, 6(6), 1692. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:73672555>
- Benlalla, A., Elmoussaouiti, M., Dahhou, M., & Assafi, M. (2015). Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. *Appl. Clay Sci.* 118, 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.09.012>
- Bernard, J. H., & Rost, R. (1992). *Encyklopedický přehled minerálů*. 1. vyd. Praha: Academia, 1992. 704 s. ISBN 80-200-0360-6. S. 375–376.
- Beuselinck, L., Govers, G., Poesen, J., Degraer, G., & Froyen, L. (1998). Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method. *Catena*, 32(3-4), 193-208.
- Beskow, G. (1991). Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads.
- Bibi, S., Farooqi, A., Hussain, K., & Haider, N. (2015). Evaluation of industrial based adsorbents for simultaneous removal of arsenic and fluoride from drinking water. *Journal of Cleaner Production*, 87, 882-896. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.030>
- Binal, A. (1996). Aksaray-Ihlara vadisindeki volkanosedimanter kayalarda görülen duyarsızlık mekanizmalarının araştırılması (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Bohórquez González, K., Pacheco, E., Guzmán, A., Avila Pereira, Y., Cano Cuadro, H., & Valencia, J. A. F. (2020). Use of sludge ash from drinking water treatment plant in hydraulic mortars. *Materials Today Communications*, 23, 100930. doi:10.1016/j.mtcomm.2020.100930.
- Boscov, M. E., Tsugawa, J. K., & Montalvan, E. L. (2021). Beneficial use of water treatment sludge in geotechnical applications as a sustainable alternative to preserve natural soils. *Sustainability*, 13(17), 9848.
- Brown, S. L., Compton, H., & Basta, N. T. (2007). Field test of in situ soil amendments at the Tar Creek National Priorities List Superfund Site. *Journal of environmental quality*, 36(6), 1627-1634.

- Bronfenbrener, L., & Bronfenbrener, R. (2010). Modeling frost heave in freezing soils. *Cold Regions Science and Technology*, 61(1), 43-64.
- Bugbee, G.J., & C.R. Frink. (1985). Alum sludge as a soil amendment: Effects on soil properties and plant growth. Bull. 823. Connecticut Agric. Exp. Stn., New Haven, CT.
- Buurman, P., Pape, T., & Muggler, C. C. (1997). Laser grain-size determination in soil genetic studies 1. Practical problems. *Soil science*, 162(3), 211-218.
- Callahan, M.P., Kleinman, P.J.A., Sharpley, A., & Stout, W.L (2002). Assessing the efficacy of alternative phosphorus sorbing soil amendments. *Soil Sci.* 167, 539–547.
- Camacho, F. P., Sousa, V. S., Bergamasco, R., & Teixeira, M. R. (2017). The use of *Moringa oleifera* as a natural coagulant in surface water treatment. *Chemical Engineering Journal*, 313, 226-237. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.12.031>
- Camacho, J., Wee, H. Y., Kramer, T. A., & Autenrieth, R. (2009). Arsenic stabilization on water treatment residuals by calcium addition. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1-3), 599-603.
- Cameron, K.C., Di, H.J., & McLaren, R.G. (1997). Is soil an appropriate dumping ground for our wastes? *Aust. J. Soil Res.* 35(5), 995–1035.
- Caporale, A. G., Punamiya, P., Pigna, M., Violante, A., & Sarkar, D. (2013). Effect of particle size of drinking-water treatment residuals on the sorption of arsenic in the presence of competing ions. *Journal of Hazardous Materials*, 260, 644–651.
- Castro-Jiménez, C. C., Saldarriaga-Molina, J. C., García, E. F., Torres-Palma, R. A., & Acelas, N. (2025). Azithromycin removal from water via adsorption on drinking water sludge-derived materials: Kinetics and isotherms studies. *PloS one*, 20(1), e0316487. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0316487>.
- Cerqueira, M. B., Guilherme, J. R., Caldas, S. S., Martins, M. L., Zanella, R., & Primel, E. G. (2014). Evaluation of the QuEChERS method for the extraction of pharmaceuticals and personal care products from drinking-water treatment sludge with determination by UPLC-ESI-MS/MS. *Chemosphere*, 107, 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.026>
- CFEM. (2006). Canadian foundation engineering manual, 4th Edition, Canadian Geotechnical Society, Canada
- Changmai, M., Pasawan, M., & Purkait, M. K. (2018). A hybrid method for the removal of fluoride from drinking water: parametric study and cost estimation. *Separation and Purification Technology*, 206, 140-148. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.05.061>
- Changizi, F., Ghasemzadeh, H., & Ahmadi, S. (2022). Evaluation of strength properties of clay treated by nano-SiO₂ subjected to freeze–thaw cycles. *Road Mater. Pavement Des.* 23 (6), 1221–1238.

- Chappell, A. (1998). Dispersing sandy soil for the measurement of particle size distributions using optical laser diffraction. *Catena*, 31(4), 271-281.
- Chen, H., Ma, X., & Dai, H. (2010). Reuse of water purification sludge as raw material in cement production. *Cement and Concrete Composites*, 32(6), 436-439. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.02.009>.
- Chiang, Y.W., Ghyselbrecht, K., Santos, R.M., Martens, J.A., Swennen, R., Cappuyns, V., & Meesschaert, B. (2012). Adsorption of multi-heavy metals onto water treatment residuals: sorption capacities and applications. *Chem. Eng. J.* 200-202, 405–415.
- Choo, G., & Oh, J. E. (2020). Seasonal occurrence and removal of organophosphate esters in conventional and advanced drinking water treatment plants. *Water Research*, 186, 116359. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116359>
- Codling, E. E., Chaney, R. L., & Mulchi, C. L. (2002). Biomass yield and phosphorus availability to wheat grown on highphosphorus soils amended with phosphate inactivating resi-dues. I. Drinking water treatment residue. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33,1039–1060.
- Codling, E. E., & Dao, T. H. (2007). Short-term effect of lime, phosphorus, and iron amendments on water-extractable lead and arsenic in orchard soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 38(7-8), 903-919.
- Coduto, D. P., Yeung, M. C. R., & Kitch, W. A. (2016). *Geotechnical Engineering: Principles and Practices* (2nd ed.). Pearson Education.
- Couto, C. F., Lange, L. C., & Amaral, M. C. (2019). Occurrence, fate and removal of pharmaceutically active compounds (PhACs) in water and wastewater treatment plants—A review. *Journal of Water Process Engineering*, 32, 100927. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100927>
- Craig, R.F., (1997). *Soil Mechanics*, 6th Edition, Spon Press, London.
- Cremades, L.V., Cusidó, J.A., & Arteaga, F. (2018). Recycling of sludge from drinking water treatment as ceramic material for the manufacture of tiles. *Journal of Cleaner Production*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:158151080>.
- Çetin, S. (2023). İçme Suyu Arıtma Çamuru Atığının Seramik Duvar Karosu Üretiminde Kullanım Potansiyeli. *International Journal of Engineering Research and Development*, 15(2), 665-670.
- Çetin, M. Y., Bağrıaçık, B., Annagür, H. M., & Topoliński, S. (2024). Improvement of Geotechnical Properties of Clayey Soil Using Biopolymer and Ferrochromium Slag Additives. *Polymers*, 16(10), 1306.
- Çevre, Ş., & Bakanlığı, İ. D. (2022, Temmuz 28). Arıtılmış atıksuların yeniden kullanım oranında yüzde 4 olan yıl sonu hedefi aşıldı. <https://csb.gov.tr/aritilmis-atiksularin-yeniden-kullanim-oraninda-yuzde-4-olan-yil-sonu-hedefi-asildi-bakanlik-faaliyetleri-34168>

- Çiftçi, G. (2003). Şişen zeminlerin Trabzon İçme Suyu Arıtma Tesisi atık çamuru ile stabilizasyonu, Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yükseköğretim Kurulu, Ulusal Tez Merkezi.
- Çoban, Ö., Dalkılıç, S., Sancak, E., & Taş, H. H. (2019). Bazı Yapay Taş Kâgir Birimlerde Donma-Çözülmenin Aşınma Kaybına Direncine Ve Kapileriteye Etkisinin Araştırılması. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 5(2), 1-10.
- Çokça, E., & Toktaş, F. (2002) Dispersif Bir Kilin C- Tipi Uçucu Kül ile Stabilizasyonu, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi, S. 659-668.
- Dassanayake, K. B., Jayasinghe, G. Y., Surapaneni, A., & Hetherington, C. (2015). A review on alum sludge reuse with special reference to agricultural applications and future challenges. *Waste Manage.*, 38, 321–335.
- Day, R. W. (2010). *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook*. McGraw-Hill.
- Dayton, E.A., & Basta, N.T. (2001). Characterization of drinking water treatment residuals for use as a soil substitute, *Water Environ. Res.* 73(1), 52–57.
- Dayton, E.A., & Basta, N.T. (2005). Use of drinking water treatment residuals as a potential best management practice to reduce phosphorus risk index scores. *J. Environ. Qual.* 34, 2112–2117.
- Dermatas, D., & Meng, X. (2003). Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils. *Engineering geology*, 70(3-4), 377-394.
- Duan, W., Zhuge, Y., Pham, P. N., Liu, Y., & Kitipornchai, S. (2022). A ternary blended binder incorporating alum sludge to efficiently resist alkali-silica reaction of recycled glass aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 349, 131415. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131415>
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ). (2020). Türkiye'nin su gerçeği. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. <https://www.dsi.gov.tr>
- Dvorak, B. I., & Schuerman, B. (2021). Drinking Water: Iron and Manganese. Department of Civil and Environmental Engineering: Faculty Publications. 339. <https://digitalcommons.unl.edu/civilengfacpub/339>.
- El-Didamony, H., Khalil, K.A., & Heikal, M. (2014). Physico-chemical and surface characteristics of some granulated slag-fired drinking water sludge composite cement pastes. *Housing and Building National Research Center Journal* 10, 73–81.
- Elkhatib, E., Mahdy, A., Sherif, F., & Hamadeen, H. (2015a). Evaluation of a novel water treatment residual nanoparticles as a sorbent for arsenic removal. *Journal of Nanomaterials*.
- Elliot, H. A., & Singer, L. M. (1988). Effect of water treatment sludge on growth and elemental composition of tomato shoots. *Commun. Soil Sci. Plant Anal*, 19(3), 345-354.

- Elliot, H. A., & Dempsey, B. A. (1991). Agronomic effects of land application of water treatment sludges. *Journal-American Water Works Association*, 83(4), 126-131.
- Elliott, H. A., O'connor, G. A., & Brinton, S. (2002). Phosphorus leaching from biosolids-amended sandy soils. *Journal of Environmental Quality*, 31(2), 681-689.
- Eltwati, A., Elkaseh, A., & Tarhuni, F. (2020). Engineering Properties of Clayey Soil Stabilized with Waste Granite Dust. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 29. 750-757.
- Eshel, G., Levy, G. J., Mingelgrin, U., & Singer, M. J. (2004). Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 68(3), 736-743.
- European Commission (EEA), (2020). Water reuse in the EU: Legislative framework and potential. <https://environment.ec.europa.eu/>
- Exley, C. (2017). Aluminum should now be considered a primary etiological factor in Alzheimer's disease. *Journal of Alzheimer's disease reports*, 1(1), 23-25.
- Fakhrabadi, A., Choobbasti, A. J., & Kutanaei, S. S. (2025). Durability evaluation of clayey sandy soil stabilized with copper-slag-based geopolymer under freezing–thawing cycles. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 18(1), 256-273.
- Fell, R., Macgregor, P., & Stapledon, D. (1992). *Geotechnical engineering of embankment dams*, Balkema, Rotterdam, 675.
- Formanek, G. E., McCool, D. K., & Papendick, R. I. (1984). Freeze-thaw and consolidation effects on strength of a wet silt loam. *Transactions of the ASAE*, 27(6), 1749-1752.
- Frias, M., de la Villa, R. V., García, R., Sánchez de Rojas, M. I., & Baloa, T. A. (2013). Mineralogical evolution of kaolen-based drinking water treatment waste for use as pozzolanic material. The effect of activation temperature. *Journal of the American Ceramic Society*, 96(10), 3188-3195.
- Frías, M., De La Villa, R. V., De Soto, I., García, R., & Baloa, T. A. (2014). Influence of activated drinking-water treatment waste on binary cement-based composite behavior: Characterization and properties. *Composites Part B: Engineering*, 60, 14-20.
- Fu, J., Lee, W. N., Coleman, C., Nowack, K., Carter, J., & Huang, C. H. (2019). Removal of pharmaceuticals and personal care products by two-stage biofiltration for drinking water treatment. *Science of the Total Environment*, 664, 240-248. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.026>
- Fu, J. F., Zhao, Y. Q., Razali, M., & Bruen, M. (2008). Response surface optimization of phosphorus species adsorption onto powdered alum sludge. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 43(9), 1100-1107.
- Gallimore, L. E., Basta, N. T., Storm, D. E., Payton, M. E., Huhnke, R. H., & Smolen, M. D. (1999). Water treatment residual to reduce nutrients in surface runoff from

agricultural land (Vol. 28, No. 5, pp. 1474-1478). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.

- Gao, J., Zhao, J., Zhang, J., Li, Q., Gao, J., Cai, M., & Zhang, J. (2020). Preparation of a new low-cost substrate prepared from drinking water treatment sludge (DWTS)/bentonite/zeolite/fly ash for rapid phosphorus removal in constructed wetlands. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121110. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121110>
- Gao, Y., Yan, C., Wei, R., Zhang, W., Shen, J., Wang, M., Gao, B., & Yang, L. (2019). Photovoltaic electrolysis improves nitrogen and phosphorus removals of biochar-amended constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 138, 71-78.
- Georgantas, D. A., & Grigoropoulou, H. P. (2005). Phosphorus removal from synthetic and municipal wastewater using spent alum sludge. *Water science and technology*, 52(10-11), 525-532.
- Gheller, M. B., Sérgio Gomes, M. C., Ramires, T. G., Boina, R. F., & Defendi, R. O. (2022). Aranha, A. C. R., ve Sgorlon, J. G. Water Treatment Sludge as a Cement Substitute in Concrete Manufacturing: Evaluation of Sludge Heat Treatment, Concrete Properties and Solidification/Stabilization. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4087301>
- Gilpin, R. (1980). A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils. *Water Resources Research*, 16(5), 918-930.
- Godoy, L. G. G. de, Rohden, A. B., Garcez, M. R., Da Dalt, S., & Bonan Gomes, L. (2020). Production of supplementary cementitious material as a sustainable management strategy for water treatment sludge waste. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00329. doi:10.1016/j.cscm.2020.e00329.
- González, K. B., Pacheco, E., Guzmán, A., Pereira, Y. A., Cuadro, H. C., & Valencia, J. A. (2020). Use of sludge ash from drinking water treatment plant in hydraulic mortars. *Materials Today Communications*, 23, 100930. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100930>
- Gualdrón, G. C. B., Angarita, Á. M. M., Cuervo, C. P. G., & Reyes, C. A. R. (2019). Structural characterization of post-consumption sludge as aggregates in construction materials. *Respuestas*, 24(1), 14-19. <https://doi.org/10.22463/0122820X.1793>
- Guchi, E. (2015). Review on slow sand filtration in removing microbial contamination and particles from drinking water. *American Journal of Food and Nutrition*, 3(2), 47-55. 10.12691/ajfn-3-2-3.
- Gülay, M. (2002). İçmesuyu arıtma tesislerinden çıkan çamur atıklarının değerlendirilmesi. Yüksek lisans Tezi (basılmamış). Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Güner, E. D., & Bağrıaçık, B. (2021). İçme suyu arıtma tesisi çamuru ile iyileştirilmiş zeminlerde cbr değerlerinin araştırılması. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(15), 359-368.

- Güner, E. D. (2022). Experimental investigation of the feasibility of using drinking water treatment plant sludge in the improvement of sandy soils. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 24(5), 1923-1933.
- Güven, İ. H. (1993). Doğu Pontidler'in 1/250.000 Ölçekli kompilasyonu, M.T.A. Genel Müdürlüğü, Ankara, 98s.
- Güven, İ. H. (1998). Doğu Pontidler'in 1/100.000 ölçekli açın-sama nitelikli Türkiye jeoloji haritaları, No: 58, M.T.A. Genel Müdürlüğü, Ankara, 12s.
- Grim, R. E. (1962). Applied clay mineralogy. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, 84(4), 533-533.
- Hacısalıhoğlu, N. (2008). Farklı Sıcaklıklarda Aktifleştirilmiş İçme Suyu Arıtma Çamurunun Çimentoda Kullanılabilirliğini Araştırılması (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon).
- Haeri, S. M., Hosseini, S. M., Toll, D. G., & Yasrebi, S. S. (2005). The behaviour of an artificially cemented sandy gravel. *Geotechnical ve Geological Engineering*, 23, 537-560.
- Hagemann, S. E., Gastaldini, A. L. G., Cocco, M., Jahn, S. L., & Terra, L. M. (2019). Synergic effects of the substitution of Portland cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: Technical and economic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 214, 916-926.
- Haider, M. O., Roszilah, H., Siti Rozaimah, S. A., & Noorhisham, T. K. (2012). Effects of Alum Sludge as Cement Partial Replacement on the Mechanical Properties of High-Performance Concrete. In *Conference (ITC 2012)*. Kuala Lumpur: Faculty of Engineering and Built Environment Universiti Kebangsaan Malaysia (pp. 105-112).
- Hall, M. R., Najim, K. B., & Dehdezi, P. K. (2012). Soil stabilisation and earth construction: materials, properties and techniques. In *Modern earth buildings* (pp. 222-255). Woodhead Publishing.
- Hamdy, D.B. (2022). A sustainable approach for improving the behavior of collapsible soil using marble dust. *Innov. Infrastruct. Solut.* 7, 260. doi:10.1007/s41062-022-00859-z.
- Hameedi, M. K., Al Omari, R. R., & Fattah, M. Y. (2020). Compression and creep indices of organic clayey soil. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 671, No. 1, p. 012035). IOP Publishing.
- Hamood, A., Khatib, J. M., & Williams, C. (2017). The effectiveness of using Raw Sewage Sludge (RSS) as a water replacement in cement mortar mixes containing Unprocessed Fly Ash (u-FA). *Construction and Building Materials*, 147, 27-34.
- Harlan, R. L. (1973). Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil. *Water Resources Research*, 9(5), 1314-1323.

- Heil, D. M., & Barbarick, K. A. (1989). Water treatment sludge influence on the growth of sorghum-sudangrass (Vol. 18, No. 3, pp. 292-298). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Hernández-Carrillo, G., Durán-Herrera, A., & Tagnit-Hamou, A. (2022). Effect of limestone and quartz fillers in UHPC with calcined clay. *Materials*, 15(21), 7711.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (1981). An introduction to geotechnical engineering (Vol. 733). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-hall.
- Houben H., & Guillaud H. (1996). *Earth Construction – A Comprehensive Guide: Second Edition*, intermediate Technology Publications, London.
- Hossner, L. R., Freeouf, J. A., & Folsom, B. L. (1973). Solution phosphorus concentration and growth of rice (*Oryza sativa* L.) in flooded soils. *Soil Science Society of America Journal*, 37(3), 405-408.
- Hou, Q., Meng, P., Pei, H., Hu, W., & Chen, Y. (2018). Phosphorus adsorption characteristics of alum sludge: Adsorption capacity and the forms of phosphorus retained in alum sludge. *Materials Letters*, 229, 31-35.
- Hovsepyan, A., & Bonzongo, J. C. J. (2009). Aluminum drinking water treatment residuals (Al-WTRs) as sorbent for mercury: Implications for soil remediation. *Journal of hazardous materials*, 164(1), 73-80.
- Hu, Y. S., Zhao, Y. Q., & Sorohan, B. (2011). Removal of glyphosate from aqueous environment by adsorption using water industrial residual. *Desalination*, 271(1-3), 150-156.
- Huang, S. H., & Chiswell, B. (2000). Phosphate removal from wastewater using spent alum sludge. *Water Science and Technology*, 42(3-4), 295-300.
- Huang, C., Pan, J. R., Sun, K. D., & Liaw, C. T. (2001). Reuse of water treatment plant sludge and dam sediment in brick-making. *Water Science and Technology*, 44(10), 273-277.
- Huang, C., Pan, J. R., & Liu, Y. (2005). Mixing water treatment residual with excavation waste soil in brick and artificial aggregate making. *Journal of environmental engineering*, 131(2), 272-277.
- Huang, C. H., & Wang, S. Y. (2013). Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate. *Construction and Building Materials*, 43, 174-183.
- Rodríguez, N. H., Martínez-Ramírez, S., Blanco-Varela, M. T., Guillem, M., Puig, J., Larrotcha, E., & Flores, J. (2011). Evaluation of spray-dried sludge from drinking water treatment plants as a prime material for clinker manufacture. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 267-275.

- İbrahim, N. M., Rahim, N. L., Amat, R. C., Salehuddin, S., & Ariffin, N. A. (2012). Determination of plasticity index and compression index of soil at Perlis. *Apcbee Procedia*, 4, 94-98.
- İbrahim, M. M., Mahmoud, E. K., & Ibrahim, D. A. (2015). Effects of vermicompost and water treatment residuals on soil physical properties and wheat yield. *International Agrophysics*, 29, 157–164.
- Ippolito, J.A., & Barbarick, K.A. (2006). Phosphorus extraction methods for water treatment residual-amended soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 37:859–870.
- Ippolito, J.A., Barbarick, K.A., Heil, D.M., Chandler, J.P., & Redente, E.F. (2003). Phosphorus retention mechanisms of a water treatment residual. *J. Environ. Qual.* 32:1857–1864.
- Ippolito, J. A., Barbarick, K. A., Stromberger, M. E., Paschke, M. W., & Brobst, R. B. (2009a). Water treatment residuals and biosolids long-term co-applications effects to semi-arid grassland soils and vegetation. *Soil Science Society of America Journal*, 73(6), 1880-1889.
- Ippolito, J. A., Scheckel, K. G., & Barbarick, K. A. (2009b). Selenium adsorption to aluminum-based water treatment residuals. *Journal of colloid and interface science*, 338(1), 48-55.
- Ismaeel, E. K., & Tayeb, A. M. (2020). Optimisation for enhancing sludge dewaterability using different conditioners. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 16(1), 19-29. <https://doi.org/10.1680/jenes.20.00022>
- Jain, V. K., Dixit, M., & Chitra, R. (2015). Correlation of plasticity index and compression index of soil. *International Journal of Innovations in Engineering and Technology (IJJET)*, 5(3), 263-270.
- Jain, A. K., & Jha, A. K. (2020). Geotechnical behaviour and micro-analyses of expansive soil amended with marble dust. *Soils and Foundations*, 60(4), 737-751.
- James, J., David, E. P. B. G., Nagarathinam, M., Thaniyarasu, M. K., & Madhu, J. (2018). Pozzolcinic benefit of fly ash and steel slag blends in the development of uniaxial compressive strength of lime stabilized soil. *Revista Facultad de Ingenieria*, 27(49), 7-21.
- Jassim, S. A., Limoges, R. G., & El-Cheikh, H. (2016). Bacteriophage biocontrol in wastewater treatment. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32(4), 70.
- Jia, F., Su, J., & Song, S. (2015). Can natural muscovite be expanded?. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 471, 19-25.
- Jing, F., Hui, B., Yudan, X., Rui, Z., Puli, Z., Duo, B., Zeng, D., Wei, L., & Xuebin, L. (2020). Recycling of iron and aluminum from drinking water treatment sludge for synthesis of a magnetic composite material (ALCS-Fe-Al) to remove fluoride from drinking water. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100456.

- Johnson, T. C., Cole, D. M., & Chamberlain, E. J. (1979). Effect of freeze—thaw cycles on resilient properties of fine-grained soils. *Engineering geology*, 13(1-4), 247-276.
- Joudieh, Z., Cuisinier, O., Abdallah, A., & Masrouri, F. (2024). Artificial Ground Freezing—On the Soil Deformations during Freeze–Thaw Cycles. *Geotechnics*, 4(3), 718-741.
- Jung, K. W., Hwang, M. J., Park, D. S., & Ahn, K. H. (2016). Comprehensive reuse of drinking water treatment residuals in coagulation and adsorption processes. *Journal of environmental management*, 181, 425-434. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.041>.
- Kabir, F., & Chowdhury, S. (2017). Arsenic removal methods for drinking water in the developing countries: technological developments and research needs. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 24102-24120. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0240-7>
- Kaish, A. B. M. A., Odimegwu, T. C., Zakaria, I., Abood, M. M., & Nahar, L. (2021). Properties of concrete incorporating alum sludge in different conditions as partial replacement of fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 284, 122669. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122669>
- Kalinski, M. E., & Hippley, B. T. (2005). The effect of water content and cement content on the strength of portland cement-stabilized compacted fly ash. *Fuel*, 84(14-15), 1812-1819.
- Kan, C. C., Yeh, C. W., Lin, S. S., Chen, I. P., & Hsien, K. J. (2018). Removal of algae via coagulation with magnetic $MnFe_2O_4$ recycled from drinking-water treatment sludge. In 2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI) (pp. 770-773). IEEE. 10.1109/ICASI.2018.8394374.
- Katrivesis, F. K., Karela, A. D., Papadakis, V. G., & Paraskeva, C. A. (2019). Revisiting of coagulation-flocculation processes in the production of potable water. *Journal of Water Process Engineering*, 27, 193-204. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.12.007>
- Karslı, O., Dokuz, A., Uysal, I., Aydin, F., Bin, C., Kandemir, R., & Wijbrans, R.J. (2010). Relative contributions of crust and mantle to generation of Campanian high-K calc-alkaline I-type granitoids in a subduction setting, with special reference to the Harşit pluton, Eastern Türkiye, *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 160, 467-487.
- Kavacık, B., & Dölgen, D. (2023). Isıl işlem ile modifiye edilmiş arıtma çamuru kullanılarak sabit yataklı kolonda arsenik ve antimon giderimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(1), 629-638.
- Keeley, J., Jarvis, P., & Judd, S. J. (2014). Coagulant recovery from water treatment residuals: a review of applicable technologies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44, 2675–2719.
- Keeley, J., Jarvis, P., Smith, A. D., & Judd, S. J. (2016). Coagulant recovery and reuse for drinking water treatment. *Water research*, 88, 502-509. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.10.038>

- Ketin, İ. (1966). Türkiye'nin tektonik birlikleri, M.T.A. Yayını, Ankara, 66s.
- Khadse, G. K., Patni, P. M., & Labhasetwar, P. K. (2015). Removal of iron and manganese from drinking water supply. *Sustainable Water Resources Management*, 1(2), 157-165.
- Khan, M. I., Abbas, Y. M., & Fares, G. (2023). Enhancing Cementitious Concrete Durability and Mechanical Properties through Silica Fume and Micro-Quartz. *Sustainability*, 15(22), 15913.
- Kırkoğlu, M. S. (1990). Endüstriyel Hammaddeler. İ T Ü Kütüphanesi, 187s., İstanbul.
- Kim, J.G., Kim, J.H., Moon, H., Chon, C., & Ahn, J.S. (2003). Removal capacity of water plant alum sludge for phosphorus in aqueous solution, *Chem. Speciation Bioavail.* 14, 67–73.
- Kim, Y.-S., Kim, D.-H., Yang, J.-S., & Baek, K. (2012). Adsorption characteristics of As (III) and As (V) on alumsludge from water purification facilities. *Separation Science and Technology*, 47, 2211–2217.
- Kizinievič, O., Žurauskienė, R., Kizinievič, V., & Žurauskas, R. (2013). Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. *Construction and Building Materials*, 41, 464–473. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.12.041.
- Kizinievič, O., Žurauskienė, R., Kizinievič, V., Yakovlev, G., & Bur'yanov, A. (2016). Use of sludge from drinking water purification in the production of effective ceramic articles. *Glass and Ceramics*, 73, 58-61. <https://doi.org/10.1007/s10717-016-9825-8>
- Kizinievič, O., & Kizinievič, V. (2017). Utilisation of drinking water treatment sludge for the manufacturing of ceramic products. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 251. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012018>
- Kizinievič, O., Kizinievič, V., Boris, R., Girskas, G., & Malaiškienė, J. (2018). Eco-efficient recycling of drinking water treatment sludge and glass waste: development of ceramic bricks. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20, 1228-1238. <https://doi.org/10.1007/S10163-017-0688-Z>
- Klaveren, V., & William, R. (1987). Hydraulic erosion resistance of thawing soils. Washington State University.
- Kluczka, J., Zołotajkin, M., Ciba, J., & Staroń, M. (2017). Assessment of aluminum bioavailability in alum sludge for agricultural utilization. *Environmental monitoring and assessment*, 189, 1-8.
- Knodel, P. C. (1991). Characteristics and problems of dispersive clay soils (Vol. 9). US Bureau of Reclamation, Materials Engineering Branch, R-91-09, 17p. 1991.
- Koley, S., Singh, G. D., Khwairakpam, M., & Kalamdhad, A. S. (2025). Closing the loop: A circular economy approach to drinking water treatment sludge management. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(2), 116110. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116110>

- Konrad, J. M., & Morgenstern, N. R. (1980). A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 17(4), 473-486.
- Konert, M., & Vandenberghe, J. E. F. (1997). Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology*, 44(3), 523-535.
- Kurt, İ., Özkan, M., Karslı, Ş., Çolak, T., & Topçu, T. (2006). Doğu Karadeniz Bölgesi'nin jeodinamik ve metalojenik evrimi (Keşap, Giresun-Çarşıbaşı, Trabzon-Torul, Gümüşhane arasının jeolojisi), MTA Genel Müdürlüğü, Rapor No: 10875.
- Laib, S., Rezzaz-Yazid, H., & Sadaoui, Z. (2022). Comparative study on removal of textile dyes in aqueous medium by adsorption using modified drinking water treatment sludge. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(5), 6085-6098. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05950-8>
- Laky, D., & Takó, S. (2013). Biological ammonia removal field studies for drinking water treatment. *Water Science and Technology: Water Supply*, 13(4), 1130-1137. <https://doi.org/10.2166/ws.2013.101>
- Lambe, T.W., (1960). "The Character and Identification of Expansive Soils. Soil PVC Meter", Federal Housing Administration, Technical Studies Program, FHA 701.
- Leader, J. W., Dunne, E. J., & Reddy, K. R. (2008). Phosphorus sorbing materials: sorption dynamics and physicochemical characteristics. *Journal of environmental quality*, 37(1), 174-181.
- Lee, W., Bohra, N. C., Altschaeffl, A. G., & White, T. D. (1995). Resilient modulus of cohesive soils and the effect of freeze-thaw. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(4), 559-568.
- Li, S. Q., Gao, L. X., & Chai, S. X. (2012). Significance and interaction of factors on mechanical properties of frozen soil. *Rock Soil Mech*, 33(4), 1173-1177.
- Li, X., Cui, J., & Pei, Y. (2018). Granulation of drinking water treatment residuals as applicable media for phosphorus removal. *Journal of environmental management*, 213, 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.056>
- Li, S., He, H., Tao, Q., Zhu, J., Tan, W., Ji, S., Yang, Y., & Zhang, C. (2020). Kaolinization of 2: 1 type clay minerals with different swelling properties. *American Mineralogist*, 105(5), 687-696.
- Lim, S., Jeon, W., Lee, J., Lee, K., & Kim, N. (2002). Engineering properties of water/wastewater-treatment sludge modified by hydrated lime, fly ash and loess. *Water Research*, 36(17), 4177-4184. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00150-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00150-1)
- Lin, L., Xu, X., Papelis, C., Cath, T. Y., & Xu, P. (2014). Sorption of metals and metalloids from reverse osmosis concentrate on drinking water treatment solids. *Separation and Purification Technology*, 134, 37-45.

- Little, D. N., & Nair, S. (2009). Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials.
- Liu, J., Chang, D., & Yu, Q. (2016). Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand. *Engineering Geology*, 210, 23-32.
- Liu, P., Chen, R. P., Wu, K., & Kang, X. (2020). Effects of drying-wetting cycles on the mechanical behavior of reconstituted granite-residual soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(8), 04020199.
- Liu, Y., Zhuge, Y., Chow, C. W., Keegan, A., Li, D., Pham, P. N., Huang, J., & Siddique, R. (2020a). Utilization of drinking water treatment sludge in concrete paving blocks: Microstructural analysis, durability and leaching properties. *Journal of environmental management*, 262, 110352. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110352>
- Liu, Y., Zhuge, Y., Chow, C. W., Keegan, A., Li, D., Pham, P. N., Huang, J., & Siddique, R. (2020b). Properties and microstructure of concrete blocks incorporating drinking water treatment sludge exposed to early-age carbonation curing. *Journal of Cleaner Production*, 261, 121257. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121257>
- Liu, Y., Zhuge, Y., Chow, C. W., Keegan, A., Pham, P. N., Li, D., Oh, J., & Siddique, R. (2021). The potential use of drinking water sludge ash as supplementary cementitious material in the manufacture of concrete blocks. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105291. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105291>.
- Loizeau, J. L., Arbouille, D., Santiago, S., & Vernet, J. P. (1994). Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyser for use with sediments. *Sedimentology*, 41(2), 353-361.
- Lu, R., Yang, J., & Wu, Y. (2025). Study on the Influence of Clay Content on the Freeze–Thaw Characteristics and Mechanisms of Solidified Low-Liquid-Limit Clay. *Applied Sciences*, 15(6), 3005.
- Ma, W., Xu, X. Z., & Zhang, L. X. (1999). Influence of frost and thaw cycles on shear strength of lime silt. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 21(2), 158-160.
- Madison, R., McDowell, L., O'Connor, G., Wilkinson, N., Davis, P., Adesogan, A. T., Felix, T. L., & Brennan, M. (2009). Effects of aluminum from water-treatment-residual applications to pastures on mineral status of grazing cattle and mineral concentrations of forages. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40, 3077–3103.
- Mahdy, A. M., Elkhatib, E. A., & Fathi, N. O. (2007). Drinking water treatment residuals as an amendment to alkaline soils: Effects on the growth of corn and phosphorus extractability. *International Journal of Environmental Science ve Technology*, 4, 489-496.
- Mahdi, A., Nalbantoglu, Z. (2021) Performance of Using Waste Marble Dust for the Improvement of Loose Sand in Deep Soil Mixing. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 47. 1-14. doi:10.1007/s13369-021-06252-9.

- Mahdy, A. M., Elkhatab, E. A., & Fathi, N. O. (2008). Drinking water treatment residuals as an amendment to alkaline soils: Effects on bioaccumulation of heavy metals and aluminum in corn plants. *Plant Soil and Environment*, 54(6), 234.
- Makris, K. C., Harris, W. G., O'Conno, G. A., & Obreza, T. A. (2004). Phosphorus immobilization in micropores of drinking-water treatment residuals: Implications for long-term stability. *Environmental science ve technology*, 38(24), 6590-6596. <https://doi.org/10.1021/es049161j>
- Makris, K. C., Harris, W. G., O'Connor, G. A., Obreza, T. A., & Elliott, H. A. (2005). Physicochemical properties related to long-term phosphorus retention by drinking-water treatment residuals. *Environmental science ve technology*, 39(11), 4280-4289.
- Makris, K. C., Sarkar, D., & Datta, R. (2006a). Aluminum-based drinking-water treatment residuals: A novel sorbent for perchlorate removal. *Environmental Pollution*, 140(1), 9-12.
- Makris, K. C., Sarkar, D., & Datta, R. (2006b). Evaluating a drinking-water waste by-product as a novel sorbent for arsenic. *Chemosphere*, 64(5), 730-741.
- Makris, K. C., Salazar, J., Quazi, S., Andra, S. S., Sarkar, D., Bach, S. B., & Datta, R. (2008). Controlling the fate of roxarsone and inorganic arsenic in poultry litter. *Journal of Environmental Quality*, 37, 963-971.
- Manda, B. K., Worrell, E., & Patel, M. K. (2014). Innovative membrane filtration system for micropollutant removal from drinking water—prospective environmental LCA and its integration in business decisions. *Journal of cleaner production*, 72, 153-166. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.045>
- Matilainen, A., Vepsäläinen, M., & Sillanpää, M. (2010). Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. *Advances in colloid and interface science*, 159(2), 189-197.
- Maurice, D., Lightsey, S., Hamrick, E., & Cox, J. (1998). Alum sludge and zeolite as components of broiler litter. *Journal of Applied Poultry Research*, 7, 263-267.
- Mazzutti, E. A., Klamt, R. A., & Faro, V. P. (2023). Study of the hydro-mechanical behavior of a stabilized soil with water treatment plant sludge for application in sanitary landfills. *Soils and Rocks*, 46, e2023011222.
- McCave, I. N., Bryant, R. J., Cook, H. F., & Coughanowr, C. A. (1986). Evaluation of a laser-diffraction-size analyzer for use with natural sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 56(4).
- MGM. (2024). Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Resmi İstatistikler. Erişim Adresi: <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=parametrelerinTurkiyeAnalizi>.
- Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2025). Trabzon ili sıcaklık ve yağış istatistikleri. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=TRABZON>

- Miller, R. D. (1972). Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils. *Highway Research Record*, 393(1), 1-11.
- Mirza, A., King, A., Troakes, C., & Exley, C. (2017). Aluminium in brain tissue in familial Alzheimer's disease. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 40, 30-36.
- Moodley, M., & Hughes, J. C. (2006). The effects of a polyacrylamide-derived water treatment residue on the hydraulic conductivity, water retention and evaporation of four contrasting South African soils and implications for land disposal. *Water science and technology*, 54(5), 227-234.
- Monteiro, S. N., Alexandre, J., Margem, J. I., Sánchez, R., & Vieira, C. M. F. (2008). Incorporation of sludge waste from water treatment plant into red ceramic. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1281-1287.
- Mortula, M., Bard, S. M., Walsh, M. E., & Gagnon, G. A. (2009). Aluminum toxicity and ecological risk assessment of dried alum residual into surface water disposal. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(1), 127-136.
- Mouratib, R., Achiou, B., El Krati, M., Younssi, S. A., & Tahiri, S. (2020). Low-cost ceramic membrane made from alumina-and silica-rich water treatment sludge and its application to wastewater filtration. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(15), 5942-5950. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.07.050>
- Muggler, C. C., Pape, T., & Buurman, P. (1997). Laser grain-size determination in soil genetic studies 2. Clay content, clay formation, and aggregation in some Brazilian Oxisols. *Soil Science*, 162(3), 219-228.
- Muisa, N., Nhapi, I., Ruziwa, W., & Manyuchi, M. M. (2020). Utilization of alum sludge as adsorbent for phosphorus removal in municipal wastewater: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 35, 101187. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101187>
- Murray, M. R. (2002). Is laser particle size determination possible for carbonate-rich lake sediments? *Journal of Paleolimnology*, 27, 173-183.
- Nagar, R., Sarkar, D., Makris, K. C., & Datta, R. (2010). Effect of solution chemistry on arsenic sorption by Fe-and Al-based drinking-water treatment residuals. *Chemosphere*, 78(8), 1028-1035.
- Nair, A. T., & Ahammed, M. M. (2015). The reuse of water treatment sludge as a coagulant for post-treatment of UASB reactor treating urban wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 96, 272-281.
- Nan, J., Chang, D., Liu, J., Chen, H., Lee, J. S., & Kim, S. Y. (2024). Investigation on the microstructural characteristics of lime-stabilized soil after freeze–thaw cycles. *Transportation Geotechnics*, 44, 101175.
- Nandakumar, S., Pipil, H., Ray, S., & Haritash, A. K. (2019). Removal of phosphorous and nitrogen from wastewater in *Brachiaria*-based constructed wetland. *Chemosphere*, 233, 216-222.

- Nayeri, D., & Mousavi, S. A. (2020). Treatment of highly turbid water in disaster conditions using coagulation-flocculation process: modeling and optimization. *Water Quality Research Journal*, 55(4), 358-369.
- Nayeri, D., & Mousavi, S. A. (2022). A comprehensive review on the coagulant recovery and reuse from drinking water treatment sludge. *Journal of environmental management*, 319, 115649. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115649>
- Newcombe, G., Ho, L., & Neto, J. C. (2021). Controlling cyanotoxin occurrence: Drinking-water treatment. In *Toxic Cyanobacteria in Water* (pp. 591-639). CRC Press.
- Nicholson, P. G. (2014). *Soil improvement and ground modification methods*. Butterworth-Heinemann.
- Novak, J. M., & Watts, D. W. (2004). Increasing the phosphorus sorption capacity of southeastern Coastal Plain soils using water treatment residuals. *Soil Science*, 169(3), 206-214.
- Novak, J. M., Szogi, A. A., Watts, D. W., & Busscher, W. J. (2007). Water treatment residuals amended soils release Mn, Na, S, and C. *Soil science*, 172(12), 992-1000.
- Nowasell, Q. C., & Kevern, J. T. (2015). Using Drinking Water Treatment Waste as Low-Cost Internal Curing Agent for Concrete. *ACI Materials Journal*, 112(1).
- O'Connor, G. A., Elliott, H. A., & Lu, P. (2002). Characterizing water treatment residuals phosphorus retention. *Annual Proceedings Soil and Crop Science Society of Florida*, 61, 67-73.
- O'Connor, R., O'Connor, M., Irgolic, K., Sabrsula, J., Gürleyük, H., Brunette, R., Howard, C., Garcia, J., Brien, J., Brien, J. & Brien, J. (2005). Transformations, air transport, and human impact of arsenic from poultry litter. *Environmental Forensics*, 6(1), 83-89.
- Ociński, D., Jacukowicz-Sobala, I., Mazur, P., Raczyk, J., & Kociolek-Balawejder, E. (2016b). Water treatment residuals containing iron and manganese oxides for arsenic removal from water—characterization of physicochemical properties and adsorption studies. *Chemical Engineering Journal*, 294, 210–221.
- Oğuz-Saka S., Aydin, F., Karsli O., Dokuz A., Aiglsperger T., Miggins D.P., Sen C., Kandemir, R., Sarı, B., & Koppers A.A.P. (2023). Two-stage bimodal volcanism in a Late Cretaceous arc/back-arc setting, NE Türkiye: Constraints from volcano-stratigraphy, zircon U-Pb and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology and whole-rock elemental and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry, *Lithos*, 440-441, 1-26.
- Okay, A.I., & Tüysüz, O., (1999). Tethyan sutures of northern Türkiye, In: Durand, B., Jovile, L., Horva, T.H.F., Seranne, M., (eds) *The Mediterranean Basin: Tertiary Extension within the Alpine Orogen*, Geological Society, London, Spec. Pub., 156, 475-515.
- Okuda, T., Nishijima, W., Sugimoto, M., Saka, N., Nakai, S., Tanabe, K., Ito, J., Takenaka, K., & Okada, M. (2014). Removal of coagulant aluminum from water treatment

residuals by acid. Water research, 60, 75-81.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.04.041>

- Oladeji, O. O., O'Connor, G. A., Sartain, J. B., & Nair, V. D. (2007). Controlled application rate of water treatment residual for agronomic and environmental benefits. *Journal of Environmental Quality*, 36(6), 1715-1724.
- Oladeji, O. O., O'Connor, G. A., & Brinton, S. R. (2008). Surfaceapplied water treatment residuals affect bioavailable phos-phorus losses in Florida sands. *Journal of EnvironmentalManagement*, 88,1593–1600.
- Oladeji, O. O., Sartain, J. B., & O'Connor, G. A. (2009). Land application of aluminum water treatment residual: Aluminum phytoavailability and forage yield. *Communications in soil science and plant analysis*, 40(9-10), 1483-1498.
- Oliver, I. W., Grant, C. D., & Murray, R. S. (2011). Assessing effects of aerobic and anaerobic conditions on phosphorus sorption and retention capacity of water treatment residuals. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 960-966.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.016>
- Orange County Water District (OCWD). (2021). Groundwater Replenishment System.
<https://www.ocwd.com/gwrs/>
- Osinubi, K. J., & Eberemu, A. O. (2006). Effect of bagasse ash on the strength of stabilized lateritic soil. In *Proceedings of 5th Nigerian material congress*, Abuja (pp. 15-18).
- Sivrikaya, O. (2021). İnşaat mühendisliğinde temel inşaatı 2: Kazıklı temeller, zeminlerin iyileştirilmesi, yapıların tasarımı ve inşası (1. baskı). Birsen Yayınevi.
- Owaid, H. M., Hamid, R., & Taha, M. R. (2014). Influence of thermally activated alum sludge ash on the engineering properties of multiple-blended binders concretes. *Construction and Building Materials*, 61, 216-229.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.014>
- Owen, P. G. (2002). Water-Treatment Works' Sludge Management. *Water and Environment Journal*, 16(4), 282-285.
- Ozairi, N., Mousavi, S. A., Samadi, M. T., Seidmohammadi, A., & Nayeri, D. (2020). Removal of fluoride from water using coagulation–flocculation process: a comparative study. *Desalination and Water Treatment*, 180, 265-270.
- Önalp, A. (1983). İnşaat Mühendisleri Geoteknik Bilgisi; cilt 1,2 KTÜ yayını, Trabzon
- Özaydın, K., (2012). Zeminlerin İyileştirilmesi, 4-5 Ekim, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği, Ondördüncü Ulusal Kongresi, İstanbul, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Özbek, Z. (2023). Şanlıurfa İlinde Arıtılan İçme Suyu Tesisinde Elde Edilen Çamurların (Toprakların) Bazı Fiziksel, Kimyasal Ve Mineralojik Özellikler (Doctoral Dissertation).

- Özaydın, K. (2000). Zemin Mekaniği. Birsen Yayınevi Ltd. Şti., İstanbul, 261s.
- Özdemir, A., & Özdemir, M., (2006). Zayıf Zeminlerin İyileştirilmesi ve Son Yıllarda Yaygın Olarak Uygulanan Bazı Zemin İyileştirme Yöntemleri, Sondaj Dünyası Dergisi,3, 34-38.
- Özdemir, K. (2016). İçme Suyu Kaynaklarında Konvansiyonel Arıtma yöntemi ile Arsenik Giderimi. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 6(1), 195-202.
- Özsayar, T., Pelin, S., & Gedikoğlu, A. (1981). Doğu Pontidlerde Kretase. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yerbilimleri Dergisi, Jeoloji, 1, 65-114.
- Öztürk, N., Şentürk, H., Gündoğdu, A., & Duran, C. (2020). İçme Suyu Arıtma Tesisi Atık Çamuru Üzerine Metilen Mavisi Adsorpsiyonu Ve Yapay Sinir Ağları İle Modellenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 25(2), 1083-1104.
- Pabst, W., Kuneš, K., Havrda, J., & Gregorová, E. (2000). A note on particle size analyses of kaolens and clays. Journal of the European Ceramic Society, 20(9), 1429-1437.
- Pan, J. R., Huang, C., & Lin, S. (2004). Reuse of fresh water sludge in cement making. Water Science and Technology, 50(9), 183-188.
- Park, S. G., Yahata, H., Kurosawa, K., & Shin, H. T. (2010). Physical and chemical properties of water treatment residue and the characteristics of red pepper growth by using it. Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University, 55, 117-122.
- Park, T., Ampunan, V., Lee, S., & Chung, E. (2016). Chemical behavior of different species of phosphorus in coagulation. Chemosphere, 144, 2264-2269.
- Patel, A. (2019). Geotechnical investigations and improvement of ground conditions. Woodhead Publishing.
- Pelin, S. (1977). Alucra (Giresun) güneydoğu yöresinin petrol olanakları bakımından incelenmesi, Doçentlik Tezi, KTÜ Yer Bilimleri Fakültesi, No: 13, Trabzon, 115s.
- Penn, C. J., & Sims, J. T. (2002). Phosphorus forms in biosolids-amended soils and losses in runoff: Effects of wastewater treatment process. Journal of Environmental Quality, 31(4), 1349-1361.
- Peters, J. M., & Basta, N. T. (1996). Reduction of excessive bioavailable phosphorus in soils by using municipal and industrial wastes (Vol. 25, No. 6, pp. 1236-1241). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
- Plakas, K. V., Sklari, S. D., Yiankakis, D. A., Sideropoulos, G. T., Zaspalis, V. T., & Karabelas, A. J. (2016). Removal of organic micropollutants from drinking water by a novel electro-Fenton filter: Pilot-scale studies. Water research, 91, 183-194. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.013>

- Pramanik, B. K., Pramanik, S. K., & Suja, F. (2016). Removal of arsenic and iron removal from drinking water using coagulation and biological treatment. *Journal of Water and Health*, 14(1), 90-96. <https://doi.org/10.2166/wh.2015.159>.
- Pradeep, G., & Vinu, T. (2015). Effect of organic matter on the geotechnical properties of soil and impact of lime-salt stabilization in strength improvement of organic soil. *International Journal of Engineering Research ve Technology (IJERT)*, 3(29), 1-6.
- Poyraz, T. (2019). “Bilecik ili Söğüt ilçesi ve civarındaki killerin mühendislik özellikleri ve endüstriyel açıdan kullanımının değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Public Utilities Board (PUB), (2020). NEWater. Singapore’s National Water Agency. <https://www.pub.gov.sg/watersupply/fournationaltaps/newater>
- Radfard, M., Yunesian, M., Nabizadeh, R., Biglari, H., Nazmara, S., Hadi, M., Yousefi, N., Yousefi, M., Abbasnia, A., & Mahvi, A. H. (2019). Drinking water quality and arsenic health risk assessment in Sistan and Baluchestan, Southeastern Province, Iran. Human and ecological risk assessment: An International Journal. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1458210>.
- Rahman, Z. A., Suhaimi, A. S. M., Idris, W. M. R., & Lihan, T. (2021). Development and mechanical properties of low fired bricks from drinking water sludge and fly ash. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 880, No. 1, p. 012042). IOP Publishing. DOI 10.1088/1755-1315/880/1/012042.
- Razali, M., Zhao, Y. Q., & Bruen, M. (2007). Effectiveness of a drinking-water treatment sludge in removing different phosphorus species from aqueous solution. *Separation and Purification Technology*, 55(3), 300-306.
- Rengasamy, P., Oades, J. M., & Hancock, T. W. (1980). Improvement of soil structure and plant growth by addition of alum sludge. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 11(6), 533-545.
- Rodrigues, L. P., & Holanda, J. N. F. (2015). Recycling of Water Treatment Plant Waste for Production of Soil-Cement Bricks. *Procedia Materials Science*, 8, 197–202. doi:10.1016/j.mspro.2015.04.064.
- Rodríguez, N. H., Ramírez, S. M., Varela, M. B., Guillem, M., Puig, J., Larrotcha, E., & Flores, J. (2010). Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludge: characterization and technological behaviour of cement mortars with atomized sludge additions. *Cement and Concrete Research*, 40(5), 778-786. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.11.012>.
- Rodríguez, N.H., Martínez-Ramírez, S., Blanco-Varela, M.T., Guillem, M.C., Puig, J.B., Larrotcha, E., & Flores, J.G. (2011). Evaluation of spray-dried sludge from drinking water treatment plants as a prime material for clinker manufacture. *Cement ve Concrete Composites*, 33, 267-275. DOI:10.1016/J.CEMCONCOMP.2010.10.020.

- Rosadi, M. Y., Yamada, T., Hudori, H., Tamaoki, H., & Li, F. (2020). Characterization of dissolved organic matter extracted from water treatment sludge. *Water Supply*, 20(6), 2194-2205. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.120>.
- Roy, M., & Couillard, D. (1998). Metal leaching following sludge application to a deciduous forest soil. *Water Research*, 32(5), 1642-1652.
- Rozhkovskaya, A., Rajapakse, J., & Millar, G. J. (2021). Optimisation of zeolite LTA synthesis from alum sludge and the influence of the sludge source. *Journal of Environmental Sciences*, 99, 130-142. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.06.019>.
- Sağlam, A. (1985). *Dolgu Barajlar Yönünden Zemin Mekaniği Semineri* (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ), Ed.). Adana.
- Sarabia, A., Sanchez, J., & Sanchez, J. V. (2019). Effect of the incorporation of residual sludge from water treatment on the technological properties of ceramic bodies: A review. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1388, No. 1, p. 012018). IOP Publishing.
- Sarkar, D., Makris, K. C., Vandanapu, V., & Datta, R. (2007a). Arsenic immobilization in soils amended with drinking-water treatment residuals. *Environmental pollution*, 146(2), 414-419.
- Sarkar, D., Quazi, S., Makris, K. C., Datta, R., & Khairum, A. (2007b). Arsenic bioaccessibility in a soil amended with drinking-water treatment residuals in the presence of phosphorus fertilizer. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 53, 329-336.
- Scalize, P., Albuquerque, A., & Di Bernardo, L. (2021). Impact of alum water treatment residues on the methanogenic activity in the digestion of primary domestic wastewater sludge. *Sustainability*, 13(16), 8783. <https://doi.org/10.3390/su13168783>.
- Shen, M., Song, B., Zhu, Y., Zeng, G., Zhang, Y., Yang, W. X., Chen, M., & Yi, H. (2020). Removal of microplastics via drinking water treatment: Current knowledge and future directions. *Chemosphere*, 251, 126612. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126612>
- Sherard, J. L., Decker, R. S., & Ryker, N. L. (1976). Pinhole test for identifying dispersive soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 102(GT1), 69–85.
- Shi, X., Yang, P., Li, L., Geng, X., Liu, X., & Zhao, J. (2024). Strength and microscopic pore structure characterization of cement-fly ash stabilized organic soil under freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 420, 135635.
- Silveira, M. L., Driscoll, J. L., Silveira, C. P., Graetz, D. A., Sollenberger, L. E., & Vendramini, J. (2013). Land application of aluminum water treatment residual to Bahiagrass pastures: soil and forage responses. *Agronomy Journal*, 105, 796–802.

- Simonsen, E., Janoo, V. C., & Isacsson, U. (2002). Resilient properties of unbound road materials during seasonal frost conditions. *Journal of Cold Regions Engineering*, 16(1), 28-50.
- Simeonidis, K., Kaprara, E., Samaras, T., Angelakeris, M., Pliatsikas, N., Vourlias, G., Mitrakas, M., & Andritsos, N. (2015). Optimizing magnetic nanoparticles for drinking water technology: the case of Cr (VI). *Science of the Total Environment*, 535, 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.033>.
- Siswoyo, E., Mihara, Y., & Tanaka, S. (2014). Determination of key components and adsorption capacity of a low cost adsorbent based on sludge of drinking water treatment plant to adsorb cadmium ion in water. *Applied Clay Science*, 97, 146-152.
- Sivrikaya, O., Uysal, F., Yorulmaz, A., & Aydin, K. (2020). The Efficiency of Waste Marble Powder in the Stabilization of Fine-Grained Soils in Terms of Volume Changes. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 45. doi:10.1007/s13369-020-04768-0.
- Solanki, A., & Sharma, J. (2020). Enhancing the Properties of Dune Sand Using Marble Dust, *Proceedings of Indian Geotechnical Conference 2020 At: IGC 2020 Andhra University, Visakhapatnam*.
- Sotero-Santos, R. B., Rocha, O., & Povinelli, J. (2005). Evaluation of water treatment sludges toxicity using the Daphnia bioassay. *Water Research*, 39(16), 3909-3917.
- Stănciuc, M., & Dogaru, I. (2024). by Montmorillonite Presence. *Recent Advances in Montmorillonite*, 69.
- Sun, W. J., Zhang, Z. F., Kong, X. W., Tang, Q. T., Xiao, Y., Leung, A. K., & Yu, C. (2025). Strength evolution mechanism of solid-waste binder solidified sludge soil under drying-wetting/freezing-thawing cycles. *Transportation Geotechnics*, 51, 101518.
- Szlag, D. C., Sinclair, J. L., Southwell, B., & Westrick, J. A. (2015). Cyanobacteria and cyanotoxins occurrence and removal from five high-risk conventional treatment drinking water plants. *Toxins*, 7(6), 2198-2220. <https://doi.org/10.3390/toxins7062198>.
- Szymonik, A., Lach, J., & Malińska, K. (2017). Fate and removal of pharmaceuticals and illegal drugs present in drinking water and wastewater. *Ecological Chemistry and Engineering*, 24(1), 65. DOI: <https://doi.org/10.1515/eces-2017-0006>.
- Şahin, U., Angin, I., & Kiziloglu, F. M. (2008). Effect of freezing and thawing processes on some physical properties of saline-sodic soils mixed with sewage sludge or fly ash. *Soil and Tillage Research*, 99(2), 254-260.
- Şengöz, T. E. (2006). “Killerin Kullanım Alanları, Killerin Mühendislik Özellikleri ve İmara Esas Jeolojik-Geoteknik Etüt Çalışmalarında Killerin Önemi” Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü.
- Şenol, A., Edil, T. B., & Shafique, M. S. B. (2004). Laboratory Evaluation Of Stabilization Of Soft Subgrades By Class C Fly Ash. In *15th Southeast Asian Geotechnical Society Conference*.

- Taber S. Frost'un kabarması. *J Jeoloji*. 1929;37(5):428-461.
- Takao, T. W., Bardini, V. S., de Jesus, A. D., Marchiori, L., Albuquerque, A., & Fiore, F. A. (2024). Beneficial Use of Water Treatment Sludge with Stabilizers for Application in Road Pavements. *Sustainability*, 16(13), 5333. <https://doi.org/10.3390/su16135333>.
- Tan, J., Xu, B., Yang, M., & Yi, Y. (2025). Treatment of drinking water sludge through co-calcination with calcium carbide residue. *Journal of Water Process Engineering*, 70, 106929. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.106929>.
- Tantawy, M. A. (2015). Characterization and pozzolanic properties of calcined alum sludge. *Materials Research Bulletin*, 61, 415-421. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2014.10.042>.
- T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (ÇŞİDB) (2013). İçme suyu arıtma tesisleri teknik usuller tebliği. *Resmî Gazete* (Sayı: 28703, 20 Şubat 2013). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/02/20130220-5.html>
- Teixeira, S., Santos, G., Souza, A., Alessio, P., Souza, S., & Souza, N. (2011). The effect of incorporation of a Brazilian watertreatment plant sludge on the properties of ceramic materials. *Applied Clay Science*, 53, 561–565.
- Tetteh, E.K., & Rathilal, S. (2019). Application of organic coagulants in water and wastewater treatment. *Org. Polym.*
- Thin, P. H., Tuan, H. A., Bien, D. C., & Ha, N. H. (2017). Research on correlation between compression index (Cc) and other properties of soil for geotechnical design in Coastal regions of Viet Nam and Cambodia. *MOJ Civ. Eng*, 2(3), 97-101.
- Thompson, M. R., & Robnett, Q. L. (1970). Second Air Force Stabilization Conference."Kirtland Air Force Base, February.
- TİÇDR. (2021). Trabzon İli 2020 Yılı Çevre Durum Raporu, Trabzon Valiliği, Çevre Şehircilik İl Müdürlüğü, Tarbzon.
- Tikal'sky, P. J., Roy, D., Scheetz, B., & Krize, T. (2002). Redefining cement characteristics for sulfate-resistant Portland cement. *Cement and concrete research*, 32(8), 1239-1246.
- Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (1985). *Soil fertility and fertilizers*. 4th ed. Macmillan, pp. 754-pp, New York.
- TİSKİ, (2012). Atasu Barajı Projesi teknik özellikler. TİSKİ. <https://www.tiski.gov.tr/icerik/detay.aspx?Id=1363>
- TİSKİ. (2023a). Tranzon İçmesuyu ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü. Erişim Adresi: <https://www.tiski.gov.tr/icerik/detay.aspx?Id=13>.
- TİSKİ. (2023b). Tranzon İçmesuyu ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü. Erişim Adresi: <https://www.tiski.gov.tr/icerik/detay.aspx?Id=3468>.

- TİSKİ. (2023c). Tranzon İçmesuyu ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü. Erişim Adresi: <https://www.tiski.gov.tr/icerik/detay.aspx?Id=3467>.
- Titshall, L. W., ve Hughes, J. C. (2005). Characterisation of some South African water treatment residues and implications for land application. *Water Sa*, 31(3), 299-308.
- TM, A. (1994). *Soil Stabilization For Pavements*.
- TS 1900-1 (2006). İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri. Bölüm-1, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- TS 1900-2. (2006). İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri. Bölüm-2, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Tokyay, M., & Erdoğan, K. (2003). Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar, Araştırmaların Gözden Geçirilmesi Raporu. TÇMB Yayını.
- Tomljenovic, L. (2011). Aluminum and Alzheimer's disease: after a century of controversy, is there a plausible link?. *Journal of Alzheimer's disease*, 23(4), 567-598.
- Torres, P., Hernández, D., & Paredes, D. (2012b). Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos Productive use of sludge from a drinking water treatment plant for manufacturing ceramic bricks.
- Torres, P., Hernández, D., & Paredes, D. (2012a). Productive use of sludge from a drinking water treatment plant for manufacturing ceramic bricks. *Revista ingeniería de Construcción*, 27(3), 145-154. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732012000300003>.
- Tosun, H. (1995). Importance of dispersive soils for earthfill dams an a research on control tests adopted in Turkey. In *Symposium on Research and Development in the Field of Dams* (pp. 7-9).
- Tumluer G. (2006). Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti", Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Adana.
- Tunç, A. (2001). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 840s.
- Tunç, A. (2002). *Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları*. Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 912s.
- Uçar, G. (1997). Şehir İçmesuyu arıtma tesislerinde çamur atıklarının değerlendirme yollarının araştırılması, Master's thesis, Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Uğur, F. A. (2005). Kil Minerallerinin Radyoaktif Maddeleri Tutma Özelliklerinin, Kilin Yapısına ve İşlem Koşullarına Bağlılığının İncelenmesi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Ural, N. (2021). The significance of scanning electron microscopy (SEM) analysis on the microstructure of improved clay: An overview. *Open Geosciences*, 13(1), 197-218.

- US EPA. (2016). Water treatment optimization for cyanotoxins.
- Uzuner, B., A. (1995). Temel Mühendisliğine Giriş”, Derya kitabevi, Trabzon.
- Üçüncü, O., & Gülay, M. (2003). İçme Suyu Arıtma Tesisi Alüm Çamurunun Puzolanik Malzeme Olarak Kullanımı Üzerine Bir Araştırma.
- Ünal, M., Karaca, A., Çetin Camcı, S., & Çelik, A. (2011). İçme suyu tesisi arıtma çamurunun arpa zambacı (*freesia spp.*) bitkisi gelişimi ve bazı toprak özellikleri üzerine etkileri. Selçuk Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi, 25(2), 46-56.
- Ünver, E. (2015). Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül ile İyileştirilmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Geoteknik Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/> veri tabanından ulaşılmıştır (tez no: 620843).
- Üstün, G., & Tırpancı, A. (2015). Gri suyun arıtımı ve yeniden kullanımı. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 20(2), 119-139.
- Van Alstyne, R., McDowell, L. R., Davis, P. A., Wilkinson, N. S., & O'Connor, G. A. (2007). Effects of an aluminum-water treatment residual on performance and mineral status of feeder lambs. Small Ruminant Research, 73(1-3), 77-86.
- Verlicchi P., & Masotti L. (2000). Tarımda içme suyu arıtma tesisleri çamurlarının yeniden kullanımı: sorunlar, bakış açıları ve sınırlamalar, www.sswm.info/.../VERLICCHI.
- Verrelli, D. I., Dixon, D. R., & Scales, P. J. (2009). Effect of coagulation conditions on the dewatering properties of sludges produced in drinking water treatment. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 348(1-3), 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2009.06.013>.
- Verrelli, D.I., Dixon, D.R., & Scales, P.J. (2010). Assessing dewatering performance of drinking water treatment sludges. Water research, 44 5, 1542-52. DOI:10.1016/j.watres.2009.10.036.
- Vicenzi, J., Bernardes, A. M., & Bergmann, C. P. (2005). Evaluation of alum sludge as raw material for ceramic prod-ucts. Industrial Ceramics, 25,7–16.
- Vinod, P., & Bindu, J. (2010). Compression index of highly plastic clays—an empirical correlation. Indian Geotechnical Journal, 40(3), 174-180.
- Vitton, S. J., & Sadler, L. Y. (1997). Particle-size analysis of soils using laser light scattering and X-ray absorption technology. Geotechnical Testing Journal, 20(1), 63-73.
- Wagner, D. J., Elliott, H. A., Brandt, R. C., & Jaiswal, D. (2008). Managing biosolids runoff phosphorus using buffer strips enhanced with drinking water treatment residuals. Journal of environmental quality, 37(4), 1567-1574.
- Wang, D. Y., Ma, W., Niu, Y. H., Chang, X. X., & Wen, Z. (2007). Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai–Tibet clay. Cold regions science and technology, 48(1), 34-43.

- Wang, C., Guo, W., Tian, B., Pei, Y., & Zhang, K. (2011). Characteristics and kinetics of phosphate adsorption on dewatered ferric-alum residuals. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 46(14), 1632-1639.
- Wang, C., Liu, J., & Pei, Y. (2013). Effect of hydrogen sulfide on phosphorus lability in lake sediments amended with drinking water treatment residuals. *Chemosphere*, 91(9), 1344-1348.
- Wang-hong, A. Y., & Kirkpatrick, R. J. (1989). Hydrothermal reaction of albite and a sodium aluminosilicate glass: A solid-state NMR study. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 53(4), 805-819.
- Wang, S., Gao, Y., & Liu, K. (2024). Mechanical Properties and Sulfate Freeze–Thaw Resistance of Calcium Carbonate Whisker-Reinforced Iron Ore Tailings Concrete. *Buildings*, 14(4), 1004.
- Wang, H., Ding, Y., Ren, G., Cao, X., & Wei, W. (2025). Stabilization of soft soils with Al^{3+} , Fe^{3+} , and Si^{4+} modified cementitious materials: Comparison, simulation, and stabilization mechanisms. *Science of The Total Environment*, 990, 179910.
- Wen, Aydin, & Duzgoren-Aydin (2002). A comparative study of particle size analyses by sieve-hydrometer and laser diffraction methods. *Geotechnical Testing Journal*, 25(4), 434-442.
- WHO/UNICEF Joint Water Supply, & Sanitation Monitoring Programme. (2014). Progress on drinking water and sanitation: 2014 update. World Health Organization.
- Wilson, W., Rivera-Torres, J. M., Sorelli, L., Durán-Herrera, A., & Tagnit-Hamou, A. (2017). The micromechanical signature of high-volume natural pozzolan concrete by combined statistical nanoindentation and SEM-EDS analyses. *Cement and Concrete Research*, 91, 1-12.
- Wolff, E., Schwabe, W. K., & Conceição, S. V. (2015). Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. *Journal of Cleaner Production*, 96, 282-289.
- Wong, L. C., & Haug, M. D. (1991). Cyclical closed-system freeze–thaw permeability testing of soil liner and cover materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(6), 784-793.
- Woolson, E. A. (1975). Persistence and chemical distribution of arsanilic acid in three soils. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 23(4), 677-681.
- Wu, C. H., Lin, C. F., & Horng, P. Y. (2004). Adsorption of copper and lead ions onto regenerated sludge from a water treatment plant. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 39(1), 237-252.
- Wu, H. F., Wang, J. P., Duan, E. G., Feng, Y. F., Wan, Z. Y., Wu, Y. X., & Lu, Y. Q. (2019). Study on the preparation of granular alum sludge adsorbent for phosphorus removal. *Water Science and Technology*, 79(12), 2378-2386. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.241>.

- Wurzer, M., Wiedenmann, A., & Botzenhart, K. (1995). Microbiological quality of residues from drinking water preparation. *Water Science and Technology*, 31(5-6), 75-79.
- Xia, D. (2006). Frost heave studies using digital photographic technique. University of Alberta, Edmonton, AB, Canada (Doctoral dissertation, MSc Thesis).
- Xiao, T., Wang, H., Wang, X., Wu, H., Yuan, S., Dai, X., & Dong, B. (2023). New strategy of drinking water sludge as conditioner to enhance waste activated sludge dewaterability: collaborative disposal. *Water Research*, 233, 119761. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119761>.
- Xie, N., Yi, L., Li, J., Wang, W., Gu, T., Ma, M. G., Wang S., & Liu, S. (2024). A green synthesis strategy toward calcined calcium-aluminum layered double hydroxide with sludge as aluminum source for efficient removal of phosphate from water. *Surfaces and Interfaces*, 46, 104075. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.104075>.
- Xu, H., Shen, K., Ding, T., Cui, J., Ding, M., & Lu, C. (2016). Dewatering of drinking water treatment sludge using the Fenton-like process induced by electro-osmosis. *Chemical Engineering Journal*, 293, 207-215. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.02.025>.
- Yalçın, M., (1997). Çevresel Kirlilik Şartlarının Bentonit Kilinin Şişme Büzülme Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Yang, Y., Zhao, Y. Q., Babatunde, A. O., Wang, L., Ren, Y. X., & Han, Y. (2006). Characteristics and mechanisms of phosphate adsorption on dewatered alum sludge. *Separation and Purification Technology*, 51(2), 193-200.
- Yang, Y., Tomlinson, D., Kennedy, S., & Zhao, Y. Q. (2006a). Dewatered alum sludge: a potential adsorbent for phosphorus removal. *Water Science and Technology*, 54(5), 207-213.
- Yang, Y., Zhao, Y. Q., Babatunde, A. O., Wang, L., Ren, Y. X., & Han, Y. (2006b). Characteristics and mechanisms of phosphate adsorption on dewatered alum sludge. *Separation and Purification Technology*, 51(2), 193-200.
- Yang, L., Wei, J., Zhang, Y., Wang, J., & Wang, D. (2014). Reuse of acid coagulant-recovered drinking waterworks sludge residual to remove phosphorus from wastewater. *Applied Surface Science*, 305, 337-346. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.03.081>.
- Yang, Z., Chang, J., Wang, Y., Li, X., & Li, S. (2021). Effects of long-term freeze-thaw cycles on the properties of stabilized/solidified lead-zinc-cadmium composite-contaminated soil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(11), 6114.
- Yang, T., Chu, C., Zhang, Y., Zhang, Z., & Wan, J. (2025). Molecular Dynamics Simulation of Clay Mineral–Water Interfaces: Temperature-Dependent Structural, Dynamical, and Mechanical Properties. *Water*, 17(3), 347.

- Yarbaşı, N. (2016). Atık lastik parçaları ile güçlendirilmiş killi zeminlerin donma-çözülme davranışı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(6), 559-562.
- Yao, L., Li, G., Dang, Z., He, Z., Zhou, C., & Yang, B. (2009). Arsenic speciation in turnip as affected by application of chicken manure bearing roxarsone and its metabolites. Plant and Soil, 316, 117-124.
- Yıldız, S., & Karakuş, C. B. (2022). İçme Suyu Arıtma Çamuruna Çinkonun Adsorpsiyonu. Teknik Meslek Yüksekokulları Akademik Araştırma Dergisi, 1(1), 22-26.
- Yılmaz, S., & Özgen, S., (1993). Hammadde dane boyutunun vitrifiye seramik malzemelerinin reolojik ve fiziksel özelliklerine etkisi. VI. Ulusal Kil Semp. (Kil 1993) (pp.141-151). İstanbul, Türkiye.
- Yılmaz, S. G. (1994). Kılıçlı (Şile-İstanbul) killerin jeokimyasal mineralojik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 190s., İstanbul. (Doctoral dissertation).
- Yılmaz A. A. (1998). Kil mineralleri, Özellikleri ve Kullanım Alanları, İ. Ü. Maden Müh. Bölümü Bitirme Ödevi. 70s.
- Yong, R. N., Boosinsuk, P., & YIN, C. P. (1985). Alteration of soil behaviour after cyclic freezing and thawing. In International symposium on ground freezing. 4 (pp. 187-195).
- Yüksekdağ, M., Gökpınar, S., & Yelmen, B. (2020). Atıksu arıtma tesislerinde arıtma çamurları ve bertaraf uygulamaları. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (18), 895-904.
- Zaimoğlu, A. Ş., Hattatoğlu, F., & Akbulut, R. K. (2013). Yüke maruz ince daneli zeminlerin donma-çözülme davranışı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(3), 117-120.
- Zheng, S., Liu, T., Jiang, G., Fang, C., Qu, B., Gao, P., Li, L., & Feng, Y. (2021). Effects of water-to-cement ratio on pore structure evolution and strength development of cement slurry based on HYMOSTRUC3D and micro-CT. Applied Sciences, 11(7), 3063.
- Zhang, H., Liu, X., Ma, J., Lin, C., Qi, C., Li, X., Zhou Z., & Fan, G. (2018). Activation of peroxymonosulfate using drinking water treatment residuals for the degradation of atrazine. Journal of Hazardous Materials, 344, 1220-1228. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.11.038>.
- Zhang, Z., Sarkar, D., Datta, R., & Deng, Y. (2021). Adsorption of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) by aluminum-based drinking water treatment residuals. Journal of Hazardous Materials Letters, 2, 100034. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2021.100034>.
- Zhang, X., Ye, P., Fujii, M., & Kondo, G. (2024). The application of freeze-thaw cycle treatment on landfill sludge: Impact on physicochemical properties and physical-mechanical characteristics. Journal of Cleaner Production, 468, 143106.

- Zhao, Y. Q., Zhao, X. H., & Babatunde, A. O. (2009). Use of dewatered alum sludge as main substrate in treatment reed bed receiving agricultural wastewater: long-term trial. *Bioresource technology*, 100(2), 644-648.
- Zhou, Y. F., & Haynes, R. J. (2011). Removal of Pb (II), Cr (III) and Cr (VI) from aqueous solutions using alum-derived water treatment sludge. *Water, Air, ve Soil Pollution*, 215, 631-643.
- Zhao, J., Li, A., & Wang, H. (2022). Study on the feasibility and stability of drinking water treatment sludge (DWTS)@ zeolite to remove phosphorus from constructed wetlands. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108713.
- Zhou, X., Liu, D., Bu, H., Deng, L., Liu, H., Yuan, P., Du, P., & Song, H. (2018). XRD-based quantitative analysis of clay minerals using reference intensity ratios, mineral intensity factors, Rietveld, and full pattern summation methods: A critical review. *Solid Earth Sciences*, 3(1), 16-29. <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2017.12.002>.
- Ziyanak, Ö. (2016). İçme suları arıtma çamurları kullanılarak bor gideriminin optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- Zorluer, İ., Usta, M. (2003). Zeminlerin Atık Mermer Tozu İle İyileştirilmesi, Türkiye IV. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 305-311, Afyon.

ÖZGEÇMİŞ

Kemal AYDIN, ilköğrenimini Ankara Selçuklu İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimini 2008 yılında Ankara Hurin Yavuzalp Lisesi'nde tamamladı. 2010-2011 öğretim yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2014 yılında bu bölümden mezun oldu ve aynı yıl Yapı Denetim firmasında mühendis olarak görev yaptı. 2016 yılında aynı üniversitede İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tezli yüksek lisans programına başladı. 2018 yılında "Mermer Toz Atıkları İle Stabilize Edilmiş Kilin Donma-Çözülme Davranışının Ve Kür Sürelerinin Tek Eksenli Basınç Değeri Üzerinde Etkilerinin Araştırılması" başlıklı yüksek lisans tezini sunmasının ardından doktora eğitimine başladı. 2019 Trabzon Avrasya Üniversitesinde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başlayarak ve bu tarihte Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne yatay geçiş yaparak Doktora öğrenimine burada devam etmektedir. Doktora öğrenimi devam ederken 2021 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversite Alaplı Meslek Yüksekokulu Öğretim Görevlisi sınavını kazanmış ve aynı yıl evlenerek görevini burada devam ettirmiştir.