

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATIK KIRMIZI ÇAMURUN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ VE
POLİSÜLFON ESASLI FARKLI KOMPOZİT MALZEMELERİN
HAZIRLANARAK GEOSENTETİK BARIYER OLARAK
KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

Halil İbrahim GÜNAYDIN

**Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Ömür ÇİMEN**

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2024**



© 2024 [Halil İbrahim GÜNAYDIN]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
2.1. Boksit Cevheri, Alüminyum Üretimi ve Kırmızı Çamur Atığı.....	5
2.2. Kırmızı Çamur Atığının Bertarafı ve Çevresel Etkiler	12
2.2.1. Kırmızı çamurun bertaraf yöntemleri	12
2.2.2. Atık barajlarında depolanan kırmızı çamur miktarı	15
2.3. Kırmızı Çamurun Yeniden Kullanımı	20
2.3.1. Yeniden kullanımın önündeki başlıca engeller	21
2.3.2. Alkalitenin azaltılması için uygulanan çeşitli nötralizasyon yöntemleri	23
2.3.3. Nötralizasyon işleminin kırmızı çamurun fiziksel özellikleri üzerine etkisi	25
2.3.4. Kırmızı Çamurdan Metallerin Geri Kazanılması	27
2.4. Kırmızı Çamurun Yeniden Kullanımı İle İlgili Yapılan Çalışmalar	28
2.4.1. Çimento, beton ve demir çelik üretiminde kullanımı ile ilgili araştırmalar.....	29
2.4.2. Yapı malzemesi olarak kullanımı ile ilgili araştırmalar	30
2.4.3. Geopolimer üretimi ile ilgili araştırmalar	31
2.4.4. Yol altı dolgusu olarak kullanımı ile ilgili araştırmalar	33
2.4.5. Geoteknik çalışmalarda kullanımı ile ilgili araştırmalar	34
2.4.6. İnşaat sektörü dışında kullanımı ile ilgili çalışmalar	36
2.5. Geosentetik Bariyerler (GBR).....	37
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	44
3.1. Kırmızı Çamurun Özelliklerinin Belirlenmesi	44
3.1.1. Kırmızı çamurun fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi	46
3.1.2. Kırmızı çamurun kimyasal ve mineralojik özelliklerinin belirlenmesi	50
3.2. Kırmızı Çamurun Nötralizasyonu	52
3.3. Geosentetik Bariyer Amaçlı Hazırlanan Kompozitlerin Üretiminde Kullanılan Malzemeler ve Cihazlar	53
3.3.1. Polisülfon (PSF)	54
3.3.2. Kırmızı çamur.....	54
3.3.3. Bentonit	55
3.3.4. Eşen kili.....	56
3.3.5. Pomza	56
3.3.6. Kimyasal malzemeler	57
3.3.7. Kimyasal cihazlar	59
3.4. Geosentetik Bariyer Amaçlı Hazırlanan Kompozitlerin Üretim Yöntemi.....	59
3.5. Hazırlanan Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması.....	66
3.5.1. Çekme özelliklerinin belirlenmesi.....	68
3.5.2. Yırtılma dayanımlarının belirlenmesi.....	70

3.6. Hazırlanan Kompozitlerin Yapısal Özelliklerinin Araştırılması.....	71
3.7. Hazırlanan Kompozitlerin Su Geçirgenliği Özelliklerinin Araştırılması.....	73
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	75
4.1. Kırmızı Çamurun Fiziksel Özellikleri	75
4.1.1. Kırmızı çamurun fiziksel özelliklerinin değerlendirilmesi.....	78
4.2. Kırmızı Çamurun Mekanik Özellikleri	84
4.3. Kırmızı Çamurun Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri.....	85
4.4. Nötralize Edilen Kırmızı Çamurun Özellikleri	89
4.5. Nötralizasyonun Kırmızı Çamurun Mühendislik Özellikleri Üzerine Etkisi	97
4.6. Kırmızı Çamurun Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği	103
4.7. Hazırlanan Kompozitlerin Mühendislik Özellikleri.....	107
4.7.1. Kompozitlerin mekanik özellikleri.....	107
4.7.2. Kompozitlerin yapısal özellikleri	115
4.7.3. Kompozitlerin su geçirgenliği özellikleri	119
4.8. Kompozitlerin Geosentetik Bariyer Amaçlı Kullanımının Değerlendirilmesi.....	120
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	123
KAYNAKLAR	127
ÖZGEÇMİŞ	143

ÖZET

Doktora Tezi

ATIK KIRMIZI ÇAMURUN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ VE POLİSÜLFON ESASLI FARKLI KOMPOZİT MALZEMELERİN HAZIRLANARAK GEOSENTETİK BARIYER OLARAK KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Halil İbrahim GÜNAYDIN

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ömür ÇİMEN

Bu çalışmada, Seydişehir Eti Alüminyum üretim tesislerinde boksit cevherinden Bayer prosesi ile alüminyum üretimi sonucu çıkan kırmızı çamur atığının fiziksel, kimyasal, mineralojik ve mekanik özellikleri deney çalışmaları ile araştırılmış olup sonuçları farklı ülkelerdeki kırmızı çamurların özellikleri ile karşılaştırılmış ve atığın inşaat alanında dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Kırmızı çamurun inşaat malzemesi olarak potansiyel kullanımı, çevresel kaygılar nedeniyle birçok soru işaretini beraberinde getirmektedir. Dolgu malzemesi olarak kullanımında, yağmur sonucu oluşacak yüksek pH'lı sızıntı suyu ile yeraltı sularını kirletebilme potansiyeli ve pH değerinin fauna ve flora için uygun olmaması gibi çeşitli sorunlar ilk akla gelenlerdir. Bu sorunlar, sadece kırmızı çamurun yeniden değerlendirilmesi değil aynı zamanda atık barajlarında depolanmasında da ortaya çıkmaktadır. Geçmişte kırmızı çamur atık barajlarında yaşanan kazalar da bunu doğrulamaktadır. Yıkılan dolgu seddesinden dağılan kırmızı çamur çok ciddi çevre problemlerine neden olmuştur. Bu nedenle kırmızı çamurun pH değerinin kabul edilebilir seviyelere düşürülerek depolanması veya yeniden kullanılması, potansiyel sorunların çözümü olabilir. Ancak, depolanmış atığın miktarı oldukça fazladır ve inşaatlarda atığın potansiyel kullanımında büyük miktarlarda malzeme gerekecektir. Bu nedenle pH'ın düşürülmesi için ucuz ve pratik yöntemlerin tercih edilmesi gerekir. Bu tez çalışmasında ayrıca bu sorunlara da cevaplar aranmıştır. Bu amaçla ucuz ve pratik bir yöntem olduğu için, kırmızı çamuru damıtılmış su ile süzerek pH değeri düşürülmüştür. pH değişiminin kırmızı çamurun özelliklerine olası etkisini belirlemek üzere, pH değeri düşürülen kırmızı çamur numuneleri ile deneyler tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Çalışmaların sonraki bölümünde taşıyıcı matris polimeri olarak polisülfon (PSF) ve katkı malzemeleri olarak kırmızı çamur, bentonit, eşen kili ve pomza kullanılarak geosentetik bariyer amaçlı çeşitli kompozitler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu polimer kompozitler hem organik polimerin hem de inorganik katkı malzemelerin avantajlarını bir arada sunabilmektedir. Polimer kompozitler, organik malzemeler gibi hafif, esnek ve iyi kalıplanabilir olmanın yanı sıra, inorganik malzemeler gibi yüksek mukavemet ve termal stabilite gibi özelliklere de sahip olabilmekle birlikte kullanılan katkının atık malzemeler olması nedeniyle atıkların değerlendirilebilmesine de imkan tanımaktadır. Bu amaçla faz inversiyon yöntemi kullanılarak hazırlanan kompozitlerin mekanik,

yapısal ve su geçirgenliği özellikleri araştırılmış ve baraj, göl, katı atık depolama alanlarında kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geoteknik, geosentetik bariyer, kompozit, kırmızı çamur, polisülfon, çekme deneyi, yırtılma deneyi, su geçirgenliği deneyi

2024, 144 sayfa



ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION OF THE GEOTECHNICAL PROPERTIES OF RED MUD WASTE AND THE PREPARATION OF DIFFERENT POLYSULFONE-BASED COMPOSITE MATERIALS FOR USE AS GEOSYNTHETIC BARRIERS

Halil İbrahim GÜNAYDIN

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Ömür ÇİMEN

In this study, the physical, chemical, mineralogical and mechanical properties of the red mud waste resulting from the production of aluminum from bauxite ore by Bayer process in Seydişehir Eti Aluminum Plant were investigated with experimental studies and the results were compared with the properties of red mud in different countries and the usability of the waste as a filling material in the construction area was evaluated. The potential use of red mud as a construction material raises many questions due to environmental concerns. The first issues that come to mind are the potential to contaminate groundwater with high pH leachate from rainfall and the pH value being unsuitable for fauna and flora. These problems arise not only in the reuse of red mud but also in its storage in tailings dams. Accidents at red mud tailings dams in the past confirm this. The red mud dispersed from the collapsed embankment caused serious environmental problems. Therefore, storage or reuse of red mud by reducing its pH to acceptable levels could be the solution to potential problems. However, the amount of waste stored is quite large and the potential use of the waste in construction will require large quantities of material. Therefore, cheap and practical methods for lowering the pH should be preferred. In this thesis, answers to these problems were also sought. For this purpose, the pH value was lowered by filtering the red mud with distilled water as it is a cheap and practical method. In order to determine the possible effect of pH change on the properties of red mud, the experiments were repeated with red mud samples with lowered pH value and the results obtained were discussed.

In the next part of the studies, various composites for geosynthetic barrier purposes were prepared using polysulfone (PSF) as carrier matrix polymer and red mud, bentonite, Eşen clay and pumice as additives. These polymer composites can offer the advantages of both organic polymer and inorganic additives together. In addition to being light, flexible and well moldable like organic materials, polymer composites can also have properties such as high strength and thermal stability like inorganic materials, as well as allowing waste to be utilized since the additives used are waste materials. For this purpose, the mechanical, structural and water permeability properties of the composites prepared using the phase inversion method were investigated and their usability in dams, lakes and solid waste storage areas was evaluated.

Keywords: Geotechnics, geosynthetic barrier, composite material, red mud, polysulfone, tensile test, tear test, water permeability test.

2024, 144 pages



TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın her aşamasında bana rehberlik eden ve değerli bilgi ve deneyimleriyle çalışmamın şekillenmesinde büyük katkı sağlayan tez danışmanım Sn. Dr. Öğr. Üyesi Ömür ÇİMEN'e içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin engin bilgi birikimi ve araştırma alanındaki derin tecrübesi, tezimin akademik olarak sağlam temellere oturmasını sağladı. Her zaman sabırla sorularımı yanıtladı, araştırma sürecinde karşılaştığım zorlukların üstesinden gelmemde bana yardımcı oldu ve teşvik edici yorumlarıyla motivasyonumu yüksek tuttu.

Çalışmaların her aşamasında değerli bilgilerini, tecrübelerini ve fikirlerini benimle paylaşan, özellikle tez çalışmasının önemli bir bölümü olan kompozitlerin hazırlanmasında verdiği desteklerden dolayı saygıdeğer hocam Sn. Prof. Dr. Esengül KIR'a teşekkürlerimi sunarım. Bana akademik yazım konusunda gösterdiği yol ve önerileri, araştırma yeteneklerimin gelişmesine büyük katkıda bulundu.

Saygıdeğer hocam Sn. Dr. Öğr. Üyesi Soner UZUNDURUKAN'a ve saygıdeğer hocam Sn. Dr. Öğr. Üyesi İbrahim YİĞİT'e verdikleri değerli önerilerle çalışmamı geliştirmeme yardımcı oldukları için teşekkürlerimi sunarım.

Atık kırmızı çamur numunesinin temin edilmesinde yardımlarını esirgemeyen Seydişehir Eti Alüminyum Genel Müdürü Sn. Mehmet Arkan'a, deneysel çalışmalar sürecinde yardım ve desteklerini aldığım Süleyman Demirel Üniversitesi'nden İnşaat Teknisyeni Sn. Erol YILMAZ'a, DSİ 13. Bölge Müdürü Sn. Özhan ERDANIŞMAN'a, DSİ 13. Bölge Müdür Yardımcısı Sn. Hicran ÇOBAN'a, DSİ 13. Bölge Müdürlüğü Kalite Kontrol ve Laboratuvar Şube Müdürü Sn. Soner AKDEMİR'e, DSİ 13. Bölge Müdürlüğünden Çevre Mühendisi Sn. Hakan YİĞİT'e ve ismini burada zikredemediğim tüm kişi ve kurumlara teşekkür ederim.

FDK-2019-7382 No'lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Bu süreçte manevi destekleriyle yanımda olan aileme, özellikle anne ve babama, sabır ve anlayışları için minnettarım. Onların desteği, bu zorlu süreçte bana güç verdi. Çocukluğumdan beri bana verdiğiniz değerli öğütler ve eğitim hayatım boyunca sağladığınız maddi ve manevi destek için sizlere sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Halil İbrahim GÜNAYDIN
ISPARTA, 2024

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Ülke bazında işletilebilir boksit rezerv dağılımı	7
Şekil 2.2. Bayer prosesinin genel akış şeması	9
Şekil 2.3. Farklı kategorilere göre atık türleri	10
Şekil 2.4. Birleşik Krallık'ta (a) Burntisland'da bir haliçin ve (b) Whinnyhall'de eski bitümlü şist madeninin kırmızı çamur ile doldurularak bertaraf edilmesi.....	13
Şekil 2.5. Kırmızı çamur atık barajı	14
Şekil 2.6. Kırmızı çamur atık yönetim eğilimi.....	16
Şekil 2.7. Seydişehir Eti Alüminyum tesislerinde 2014 yılına kadar işlenen boksit ve atılan kırmızı çamur miktarı.....	17
Şekil 2.8. Macaristan Ajka kırmızı çamur atık barajı kazası	19
Şekil 2.9. Farklı yöntemlerle nötralize edilen kırmızı çamurun SEM analiz sonuçları	26
Şekil 2.10. Kırmızı çamurun (a) yol dolgusu olarak ve (b) tuğla üretiminde kullanımı	29
Şekil 2.11. Tek tabakalı kompozit bariyer sistemi	38
Şekil 3.1. Kırmızı çamur numunesinin alındığı tesisinin konumu.....	45
Şekil 3.2. (a) Doğal ve (b) oda sıcaklığında kurutulmuş kırmızı çamur numunesi ...	46
Şekil 3.3. Kırmızı çamur oranının kompozitin çekme mukavemeti ve çekme modülü üzerindeki etkisi	61
Şekil 3.4. KÇ/PP kompozitlerinin SEM görüntüleri, (a) saf KÇ, (b) %10 KÇ/PP, (c) %20 KÇ/PP ve (d) %30 KÇ/PP kompozitleri.....	62
Şekil 3.5. Kırmızı çamur katkılı kompozitin faz inversiyon yöntemi ile üretim şeması	65
Şekil 3.6. Hazırlanan (a) KÇ/PSF GBR, (b) KB/PSF GBR, (c), EP/PSF GBR, (d) PSF GBR kompozitler	66
Şekil 3.7. Çekme testi numunesi tipi.....	69
Şekil 3.8. Numune kesme kalıbı tipi	71
Şekil 3.9. Su geçirgenliği deney düzeneği	73
Şekil 4.1. Kırmızı çamurun likit limit değerinin belirlenmesi	76
Şekil 4.2. Kırmızı çamura ait granülometri eğrisi.....	76
Şekil 4.3. Kırmızı çamurun plastisite kartındaki yeri	77
Şekil 4.4. Kırmızı çamura ait kompaksiyon eğrisi.....	78
Şekil 4.5. Kırmızı çamurda havada kuruma sonucu kristal oluşumu.....	80
Şekil 4.6. Standart sıkıştırma deneyinden elde edilen farklı zemin türleri için tipik değerler.....	83
Şekil 4.7. Kırmızı çamura ait serbest basınç grafiği	84
Şekil 4.8. Kırmızı çamura ait serbest şişme-zaman grafiği.....	85
Şekil 4.9. Kırmızı çamurun SEM görüntüleri, (a) 10.000 x, (b) 20.000 x.....	86
Şekil 4.10. Kırmızı çamurun EDS spektrumu.....	87
Şekil 4.11. Kırmızı çamurun XRD grafiği	88
Şekil 4.12. Nötralize edilmiş kırmızı çamurun likit limit değerinin belirlenmesi	89
Şekil 4.13. Nötralize edilmiş kırmızı çamurun granülometri eğrisi.....	90
Şekil 4.14. Nötralize edilmiş kırmızı çamurun plastisite kartındaki yeri.....	91
Şekil 4.15. Nötralize edilmiş kırmızı çamurun kompaksiyon eğrisi.....	91
Şekil 4.16. Nötralize edilmiş kırmızı çamurun serbest basınç grafiği	92
Şekil 4.17. Nötralize edilmiş kırmızı çamurun şişme miktarı-zaman grafiği	93

Şekil 4.18. Nötralize kırmızı çamurun SEM görüntüleri, (a) 10.000x, (b) 20.000x.....	94
Şekil 4.19. Nötralize kırmızı çamurun EDS spektrumu.....	95
Şekil 4.20. Nötralize edilmiş kırmızı çamurun XRD grafiği	96
Şekil 4.21. (a) 10.000x, (b) 20.000x yakınlaştırılmış doğal kırmızı çamur, (c) 10.000x, (d) 20.000x yakınlaştırılmış nötralize kırmızı çamurun SEM görüntüleri	97
Şekil 4.22. (a) Kırmızı çamurun, (b) nötralize edilmiş kırmızı çamurun XRD grafiği.....	99
Şekil 4.23. (a) Kırmızı çamurun ve (b) nötralize edilmiş kırmızı çamurun granülometri eğrisi.....	100
Şekil 4.24. Farklı konsantrasyonlarda alkali ile aktif edilmiş kırmızı çamurun a) kuru birim hacim ağırlığı-su muhtevası, b) 28 gün farklı kür şartlarında serbest basınç dayanım grafikleri	105
Şekil 4.25. Hazırlanan kompozitlerin çekme kuvveti-şekil değiştirme davranışı, (a) PSF GBR, (b) KÇ/PSF GBR, (c) KB/PSF GBR, (d) EP/PSF GBR	108
Şekil 4.26. Numunelerin kesit alanının çekme özelliklerine etkisi	111
Şekil 4.27. Hazırlanan kompozitlerin yırtılma kuvveti-şekil değiştirme davranışı, (a) PSF GBR, (b) KÇ/PSF GBR, (c) KB/PSF GBR, (d) EP/PSF GBR	113
Şekil 4.28. (a) PSF GBR, (b) KÇ/PSF GBR, (c) KB/PSF GBR, (d) EP/PSF GBR numunelerinin 500 kat yakınlaştırılmış SEM görüntüleri	115
Şekil 4.29. (a) PSF GBR, (b) KÇ/PSF GBR, (c) KB/PSF GBR, (d) EP/PSF GBR numunelerinin 1000 kat yakınlaştırılmış SEM görüntüleri	116
Şekil 4.30. (a) PSF GBR, (b) KÇ/PSF GBR, (c) KB/PSF GBR, (d) EP/PSF GBR numunelerin AFM görüntüleri	117
Şekil 4.31. Kompozitlerin TGA grafikleri	118
Şekil 4.32. Kompozitlerin zamana bağlı su geçirgenliği özellikleri	119

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Kullanım alanına göre boksit bileşenleri	6
Çizelge 2.2. Lateritik ve karst tipi boksitlerde bulunan başlıca mineraller.....	6
Çizelge 2.3. Al_2O_3/SiO_2 oranı ve Fe_2O_3 tenörüne göre sınıflandırma	6
Çizelge 2.4. Farklı ülkelere ait kırmızı çamurların kimyasal bileşenleri	11
Çizelge 2.5. Kırmızı çamurun genel bileşen aralıkları.....	12
Çizelge 2.6. Endüstriyel atıklardaki farklı metal içerikleri ile ilgili olumsuzluklar...	18
Çizelge 3.1. Polisülfonun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	54
Çizelge 3.2. Kırmızı çamurun kimyasal analiz sonuçları	55
Çizelge 3.3. Bentonitin fiziksel özellikleri ve kimyasal analiz sonuçları	55
Çizelge 3.4. Eşen kilinin kimyasal analiz sonuçları.....	56
Çizelge 3.5. Pomzanın kimyasal analiz sonuçları	57
Çizelge 3.6. PVP'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	57
Çizelge 3.7. NMP'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri	58
Çizelge 3.8. DMF'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri	58
Çizelge 3.9. Hazırlanan kompozitlerin karışım oranları	66
Çizelge 3.10. Çekme ve kopmada uzama deney standartları.....	68
Çizelge 3.11. Yırılma dayanımı deney standartları.....	70
Çizelge 4.1. Kırmızı çamurun tane büyüklüğü dağılımına göre belirlenen diğer özellikleri	77
Çizelge 4.2. Dünya genelinde farklı bölgelerden temin edilen kırmızı çamurların özellikleri	79
Çizelge 4.3. Kırmızı çamurun elementel bileşenleri.....	87
Çizelge 4.4. Kırmızı çamurun tane büyüklüğü dağılımına göre belirlenen diğer özellikleri	90
Çizelge 4.5. Nötralize kırmızı çamurun elementel bileşenleri.....	95
Çizelge 4.6. Kırmızı çamurun ve nötralize edilmiş kırmızı çamurun elementel bileşenleri.....	98
Çizelge 4.7. Saf ve nötralize kırmızı çamurun mühendislik özellikleri.....	101
Çizelge 4.8. Baraj ve göletlerde kullanılacak geçirimsiz dolgu malzemesinin özellikleri	103
Çizelge 4.9. Dolgu malzemesi özellikleri	103
Çizelge 4.10. Farklı nitelikteki dolgu malzemelerinin permeabilite limit değerleri.....	105
Çizelge 4.11. Hazırlanan kompozitlerin çekme dayanımı özellikleri	109
Çizelge 4.12. Hazırlanan kompozitlerin yırtılma dayanımı özellikleri.....	114
Çizelge 4.13. Kompozitlerin pürüzlülük parametreleri.....	118
Çizelge 4.14. Geomembranların dayanım özellikleri için tavsiye edilen minimum değerler	121
Çizelge 4.15. Geosentetik bariyerlerin teknik özellikleri.....	122

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
b ₁	Çekme numunesinin dar paralel kısmının genişliği
b ₂	Çekme numunesinin uçlardaki genişliği
BET	Yüzel alanı ölçümü analizi
CH	Yüksek plastisiteli kil
C _R	Süreklilik katsayısı
C _U	Üniformluk katsayısı
ÇŞB	Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
D ₅₀	Ortalama tane boyutu çapı
dk	Dakika
DMF	N-N-dimetil-formamid
DSİ	Devlet Su İşleri
DTA-TG	Isıl bozunma analizi
EP/PSF GBR	Eşen kili-pomza/polisülfon geosentetik bariyer
EPDM	Etilen propilen dien monomer
FM	No #200 elek altı malzeme miktarı
g	Gram
GBR	Geosentetik bariyer
GBR-P	Polimerik geosentetik polimer
G _s	Özgül ağırlık
h	Çekme numunesinin kalınlığı
HDPE	Yüksek yoğunluklu polietilen
iPP	İzostatik polipropilen
k	Permeabilite katsayısı
KB/PSF GBR	Karakaya bentonit/polisülfon geosentetik bariyer
KÇ	Kırmızı çamur
KÇ/PSF GBR	Kırmızı çamur/polisülfon geosentetik bariyer
L	Çekme numunesinin kulplar arasındaki başlangıç mesafesi
L ₀	Gösterge uzunluğu
L ₁	Çekme numunesinin dar paralel kenar kısmın uzunluğu
l ₃	Çekme numunesinin toplam uzunluğu
LLDPE	Lineer düşük yoğunluklu polietilen
MH	Yüksek plastisiteli silt
ML	Düşük plastisiteli silt
mL	mililitre
MW	Molekül ağırlığı
NMP	N-metil-pirolidon
PA	Poliamid
PE	Polietilen
PET	Polyester
pH	Bir çözeltinin asitlik veya alkalinite derecesini tarif eden ölçü birimi
PI	Plastisite indisi
PP	Polipropilen
PSF	Polisülfon
PSF GBR	Polisülfon geosentetik bariyer
PV	Plastik viskozite
PVC	Polivinilin
PVP	Polivinilprolidon

q_u	Serbest basınç dayanımı
r	Çekme numunesinin eğimli bölgesinin yarıçapı
rpm	Dakikadaki devir sayısı
sa	Saat
S_{BET}	Spesifik yüzey alanı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
S_I	Şişme yüzdesi
S_r	Doygunluk derecesi
s	Saniye
S_{pr}	Şişme basıncı
T_s	Yırtılma dayanımı
USCS	Birleşik zemin sınıflı sistemi
UV	Ultraviyole ışınları
W_L	Likit limit
w_{opt}	Optimum su içeriği
W_P	Plastik limit
XRD	X-ışını kırınım spektroskopisi
YP	Akma noktası
γ_{kmax}	Maksimum kuru birim hacim ağırlık
ϵ	Eksenel birim boy değişimi
σ_{ϕ}	Çekme dayanım

1. GİRİŞ

Dinamik bir kütle olan yerküre, jeolojik süreç içinde çok yavaş gelişen yüzey hareketleri sonucu devamlı bir şekil değişimi içerisinde. Yerküreyi oluşturan kayalar bu şekil değişimleri sonucu fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkilerle parçalanarak ayrılmaktadır. Ayrılan bu mineral taneleri yerçekimi, su ve rüzgar gibi erozyon etkileriyle yeryüzünün alçak bölgelerine doğru taşınarak yer değiştirmekte ve birikmektedir (Lutgens vd., 2017). Bu kayalar döngüsü sonucu biriken mineral taneleri, organik kalıntılar ile çimentolanmamış veya zayıf çimentolanmış birikintiler halinde zeminleri oluşturmaktadır. Doğal zeminler, boyutları farklı tanelerin bir karışımıdır ve taneler arası boşluklarda gazlar ve sıvılar bulunabilir. Boşluklardaki gaz ve sıvı ile zemin taneleri arasındaki kimyasal ve fiziksel etkileşim, zeminin davranışını karmaşık hale getirir ve zeminin kendine özgü nitelikler kazanmasını sağlar. Çoğu yapı malzemesi homojen ve izotropik olmasına ve lineer şekil değiştirme kanunlarına uymasına rağmen zemin malzemeleri doğal karışımlarındaki değişkenlik ve heterojen yapıları nedeniyle karmaşık mühendislik malzemeleridir (Holtz vd., 2011). Zeminler, inşaat mühendisliğinde yapıların oturduğu ve yük aktardığı taban malzemesi veya yapı malzemesi olarak iki farklı fonksiyon üstlenir. Zeminlerin bu fonksiyonlar için gerekli mekanik özelliklerini araştıran bilim dalına zemin mekaniği denir. Zemini oluşturan taneler boyutlarına göre büyükten küçüğe doğru çakıl, kum, silt ve kil olarak isimlendirilir. Zemin tanelerinin kökeni, boyutu ve şekli; zeminin kayma direnci, sıkıştırılabilirliği, taşıma gücü ve su geçirgenliği özelliklerini etkiler. Tane boyutuna göre farklı zemin sınıflandırma sistemleri vardır. Birleşik Sistem Sınıflandırma' ya göre kaba taneli zeminler çakıl ve kum, ince taneli zeminler silt ve kil olarak adlandırılır. Çakıl 2 mm'den büyük, kum 2-0,075 mm arası, silt 0,075-0,002 mm arası ve kil 0,002 mm'den küçük tanelerdir. Kil boyutundaki parçacıkların hepsi kil minerali olmayabilir. Kil mineralleri, suyla plastikleşen ve kuruyunca büzülen sulu alüminyum silikatlar ve diğer metal iyonlarıdır. Zemindeki kil mineralleri, nemli ortamda zeminin mühendislik davranışını önemli ölçüde değiştirir (Önalp, 2018).

Nüfus artışı ile yapılaşma için uygun zemin bulmak her geçen gün zorlaşmakta ve uygun olmayan zeminlerin kullanılması kaçınılmaz olmaktadır. Ayrıca bazı projelerde maliyet, zaman ve lokasyon gibi kriterler zayıf zeminlerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu gibi durumlarda geoteknik mühendisi, olası sorunların uygun

çözümlerle nasıl giderileceğini akıllıca planlamalıdır. Zayıf zeminin uygun dolgu malzemesi ile değiştirilmesi bazı projeler için bir seçenek olsa bile çoğu durumda zemin iyileştirme en ideal yöntemdir. Uygun dolgu malzemeleri sınırlı olduğu için, mevcut zemin koşullarına ve istenen kriterlere göre bir zemin iyileştirme tekniği seçmek hem israfı hem de çevre kirliliğini önlemeye yardımcı olur (Nicholson, 2014). Zemin iyileştirmenin amaçları sıkışabilirliği azaltarak oturmayı önlemek, mukavemeti artırarak stabiliteyi ve taşıma kapasitesini iyileştirmek, geçirgenliği azaltarak sıvı ve gaz akışını kısıtlamak, geçirgenliği artırarak drenajı sağlamak ve deprem kaynaklı sıvılaşmayı önlemektir (Yıldırım ve Adatepe, 2018). Bu amaçlar için farklı yöntemler mevcut olup iyileştirmenin amacı ve kapsamı; mevcut zemin ve kaya koşulları; proje bütçesi ve süresi; malzeme, ekipman ve işgücü kaynakları; çevresel, sosyal ve politik etkiler ve mühendisin deneyimine göre bir seçim yapılması gerekir (Patel, 2019). Zeminin geçirgenliği; sıvının viskozitesine, zemin gözenek büyüklüğü dağılımına, tane boyutu dağılımına, boşluk oranına, mineral parçalarının pürüzlülüğüne ve zeminin doygunluk derecesine bağlı olup zemin tane boyutu küçüldükçe ve boşluk oranı azaldıkça zeminin geçirgenliği de azalmaktadır (Önalp, 2018). Düşük geçirgenlik özelliği olan kil malzemesi doğada kolay bulunması sebebiyle, mühendislik yapılarında sıkça kullanılmaktadır. Katı atık depolama alanlarında, depolama alanının tabanı sıkıştırılmış kil şilteler ve geosentetikler ile kaplanarak geçirimsiz tabakalar oluşturulmakta ve böylece atık sızıntı sularının zemin sularına karışması kontrol altına alınmaktadır. Çimento, kireç ve kil gibi geleneksel zemin iyileştirme malzemelerine kıyasla üstün performans, pratik uygulama ve ekonomik çözümler sunan geosentetikler, ASTM (2023) standardına göre bir projenin, yapının veya sistemin ayrılmaz bir parçası olarak zemin, kaya, toprak veya diğer geoteknik mühendisliği ile ilgili malzemelerle birlikte kullanılan polimerik malzemedan üretilen düzlemsel ürünlerdir. Geotekstil, geogrid, geonet, geofoam, geomembran, geosentetik kil örtü ve geokompozitler olmak üzere çeşitli türlerde geosentetikler bulunmakta olup bu malzemeleri üstün kılan özellikler fabrikalarda standart özelliklerde üretilibilmeleri, hızlı uygulanabilmeleri, sınırlı kaynaklara alternatif olmaları, zor tasarımları mümkün kılmaları, kolay bulunabilir olmaları, teknik bilgi kaynağının yeterliliği, zemin veya diğer inşaat malzemelerine maliyet olarak rekabet edebilmeleri ve karbon ayak izlerinin geleneksel malzemelerden çok daha düşük olmasıdır (Koerner, 2012). Geosentetik malzemeler kabaca beş ana işlevi yerine getirir: i) geotekstil ve geofoam ile iki farklı türdeki zemini birbirinden ayırmak ve bu

malzemelerin birbirleri ile karışmasını önlemek, ii) geotekstil ve geogrid ile yük altında zeminleri güçlendirmek, iii) geotekstil ve çeşitli geokompozitler ile zemin sularını geçirip zemin malzemelerini tutarak filtrelemek, iv) geotekstil ve geonet ile sıvı veya gazı toplayıp taşıyarak zeminde drenajı sağlamak, v) geosentetik bariyer ve geosentetik kil örtü ile sıvı ve gaz akışını sınırlamaktır (Shukla, 2002).

Geosentetik bariyer, bir proje, yapı veya sistemde sıvı veya gaz geçişini kontrol etmek için diğer geoteknik mühendisliği malzemeleriyle birlikte kullanılan çok düşük geçirgenliğe sahip sentetik membran bariyeridir (ASTM, 2023). Geosentetik bariyerler, geçirgenliği düşük zeminlere ve kil şiltelerin yüzeyine serilerek ve geosentetik kil örtülere birleştirilerek gölet tabanları, maden atık barajları ve katı atık depolama tesisleri gibi geçirimsiz zemin tabakalarının oluşturulmasında kullanılmaktadır. Esnek yapıları, üstün çekme mukavemeti ve yırtılma direncine sahip olmaları sonucu kil şiltelerinde veya zeminde meydana gelen göçmeleri tolere edebilmeleri, UV ışınları ve kimyasallara karşı yüksek dayanım özellikleri ve ince sürekli polimerik tabakaları sonucu kolay uygulanabilir olmaları geosentetik bariyerlerin önemini ortaya koymakta ve geosentetik ürünler arasında en büyük pazar payına sahip olmalarına neden olmaktadır. İlk kez 20. yüzyılın başlarında hidrolik mühendisliği yapılarında sızdırmazlığı sağlamak için geliştirilen geosentetik bariyerlerin, 1950'lerde sentetik polimerlerin geliştirilmesiyle birlikte, polietilen, polivinil klorür, kauçuk gibi malzemelerden üretilen çeşitleri ortaya çıkmıştır. 1960'larda ve 1970'lerde, geosentetik bariyerlerin üretimi, kalitesi ve uygulaması konusunda standartlar ve yönetmelikler geliştirilmiştir. 1980'lerden itibaren çevre ve geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Genellikle polietilen (PE), polipropilen (PP), polivinilin (PVC), polyester (PET) ve poliamid (PA) gibi termoplastikler ve etilen propilen (EPDM) gibi termoset polimerlerden üretilen geomembranlar ayrıca bitüm esaslı da üretilmekte olup kullanım amacına uygun özellikte geomembran seçilerek kullanılmaktadır (Sharma ve Lewis, 1994; Koerner, 2012; DSİ, 2021).

Dünya nüfusunun hızla artışı ve teknolojinin ilerlemesi, endüstriyel atık miktarını ve çeşitliliğini artırarak atık yönetimi açısından yüksek maliyetler ve çevre kirliliği gibi sorunlara yol açmaktadır. Bu endüstriyel atıklardan biri olan kırmızı çamur, Bayer prosesi (boksitteki alüminyum oksitlerin kostik soda ve sıcaklık ile çözünerek alümina

dönüştürülmesi) ile alüminyum üretiminde ortaya çıkmakta ve üretim tesislerine yakın bölgelerde inşa edilen atık barajlarında çamur kıvamında depolanmaktadır. İçeriğindeki kostik soda nedeniyle potansiyel bir tehdit oluşturan bu atık, yaz mevsiminde kuruyarak rüzgarın da etkisiyle çevre kirliliğine sebep olmaktadır (Çengelöglü vd., 2001; Reddy vd., 2021). Hammadde ihtiyacının yoğun olduğu inşaat sektöründe, atıkların inşaat malzemeleri olarak değerlendirilmesi, verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından oldukça kritik bir rol oynamaktadır (Nicholson, 2014; Zorluer ve Gücek, 2016; Çimen vd., 2017).

Son yıllarda çevre ve sürdürülebilirlik konularına artan ilgi geoteknik mühendisliği alanında da karşılık bulmuştur. Birincil tükenbilir kaynaklara alternatif olabilecek atık malzemelerin bu alanda değerlendirilmesi, atık depolama alanlarından tasarruf etmek, depolama tesisi kurulum ve işletme maliyetlerini azaltmak, olası çevre kirliliğini önlemek ve inşaat maliyetlerini azaltmak gibi birçok avantaj sağlayacaktır. Bu çalışmada, kırmızı çamur atığının fiziksel, kimyasal, mekanik ve yapısal özellikleri araştırılarak baraj, gölet ve karayollarında dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiş ve ayrıca kırmızı çamur ve çeşitli malzemelerden polimer esaslı kompozitler hazırlanarak geosentetik bariyer olarak kullanımı araştırılmıştır. Çalışma 5 ana bölüm halinde hazırlanmıştır. 1. Bölümde giriş yapılmış, 2. Bölümde kaynak özetleri verilmiş, 3. Bölümde malzeme ve yöntem açıklanmıştır. 4. Bölüm araştırma bulguları ve tartışma, 5. Bölümde sonuç ve öneriler ele alınmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde boksit cevheri, Bayer prosesi ile boksit cevherinden alümina üretim yöntemi, üretim sonucu çıkan ve kırmızı çamur olarak adlandırılan boksit atığının özellikleri, depolama yöntemleri ve depolanması ile ilgili çevresel kaygılar, kırmızı çamurun yeniden değerlendirilmesi, inşaat malzemesi olarak kullanımı, geoteknik özellikleri ve ayrıca geosentetik bariyerler hakkında yayınlanmış çalışmaların genel bir incelemesi yapılmıştır.

2.1. Boksit Cevheri, Alüminyum Üretimi ve Kırmızı Çamur Atığı

2.1.1. Boksit Cevheri

Alüminyum metalinin üretiminde kullanılan boksit cevheri, dünyanın önemli maden kaynaklarından biridir. Esasında bir mineral olmayan boksit, alüminosilikat bakımından zengin çeşitli magmatik, tortul ve metamorfik kayaların ayrışması sonucu oluşan alüminyum yoğunluğudur (Ashkenazi, 2019). Bu ana kayaçlar, tropikal, subtropikal veya çok nemli ılıman iklimlerde milyonlarca yıl boyunca aşınmaya uğramıştır. Dünyadaki boksit kaynaklarının yüzde doksanı bu tropik bölgelerde yer almaktadır. Bu enlemler dışındaki boksit yatakları ise, geçmişte uzun süre aşırı aşınmaya maruz kalmış bölgelerdedir (Donoghue vd., 2014). İlk kez Fransa'nın güneyindeki Provence bölgesinde Le Baux köyü yakınlarında Fransız jeolog Pierre Berthier tarafından 1821 yılında bulunmuş ve bulunduğu köyün adından ilham alınarak "boksit" adı verilmiştir (Kalender ve Kara, 2023). Sertliği Mohs sertlik skalasına göre 1-3 arasında değişen ve yoğunluğu 2,5-3,5 g/cm³ arasında olan diyaspör, böhmit, gibsit minerallerinin bir karışımı olup genellikle demir oksitler, silis, kaolinit, diğer kil mineralleri ve TiO₂'yi belli oranlarda içermektedir. İçeriğindeki demir oksitlerin miktarına bağlı olarak rengi kırmızı, kahverengi, sarı ve gri olabilmektedir. Hematit yoğunluğu kırmızı ve daha koyu tonlar verirken demir oksit içeriğinin azalmasıyla rengi daha açık tonlar ve beyaz olabilmektedir. Tüketiminin büyük çoğunluğunu (%85-90) alümin ve alüminyum üretimi oluşturmaktadır ancak kimya ve refrakter sanayiinde, aşındırıcı ve çimento üretiminde de kullanılmaktadır. Alüminyum üretiminde kullanılacak boksitin minimum %50 Al₂O₃ ve maksimum %15 SiO₂ içermesi istenmekte olup kullanım alanlarına göre tavsiye edilen boksit

bileşen oranları Çizelge 2.1’de verilmiştir (Yıldız, 2022). Alüminyum, yaklaşık 250 farklı mineralde bulunur. Ancak, alüminyum metalinin bu minerallerden üretilmesi, boksite göre oldukça pahalı ve daha çok enerji gerektirdiği için tercih edilmemektedir (Donoghue vd., 2014).

Çizelge 2.1. Kullanım alanına göre boksit bileşenleri

İçerik	Metalürjik	Çimento	Kimyasal	Refrakter	Aşındırıcı
Al ₂ O ₃	50-55	45-55	>55	84,5	80-88
SiO ₂	0-15	<6	5-18	7,5	4-8
Fe ₂ O ₃	5-30	20-30	<2	2,5	2-5
TiO ₂	0-6	3	3	3	2-5

Boksit cevherleri, litolojik oluşumlarına göre iki şekilde sınıflandırılmaktadır. Birincisi alüminosilikat kayaçlarının aşınması ve yıkanması ile oluşan lateritik (silikat) boksitler, ikincisi karbonat kayaçların parçalanması ile meydana gelen karst boksitleridir. Bu iki tür boksitin mineralojik bileşimi Çizelge 2.2’de gösterilmektedir (Smith, 2009).

Çizelge 2.2. Lateritik ve karst tipi boksitlerde bulunan başlıca mineraller

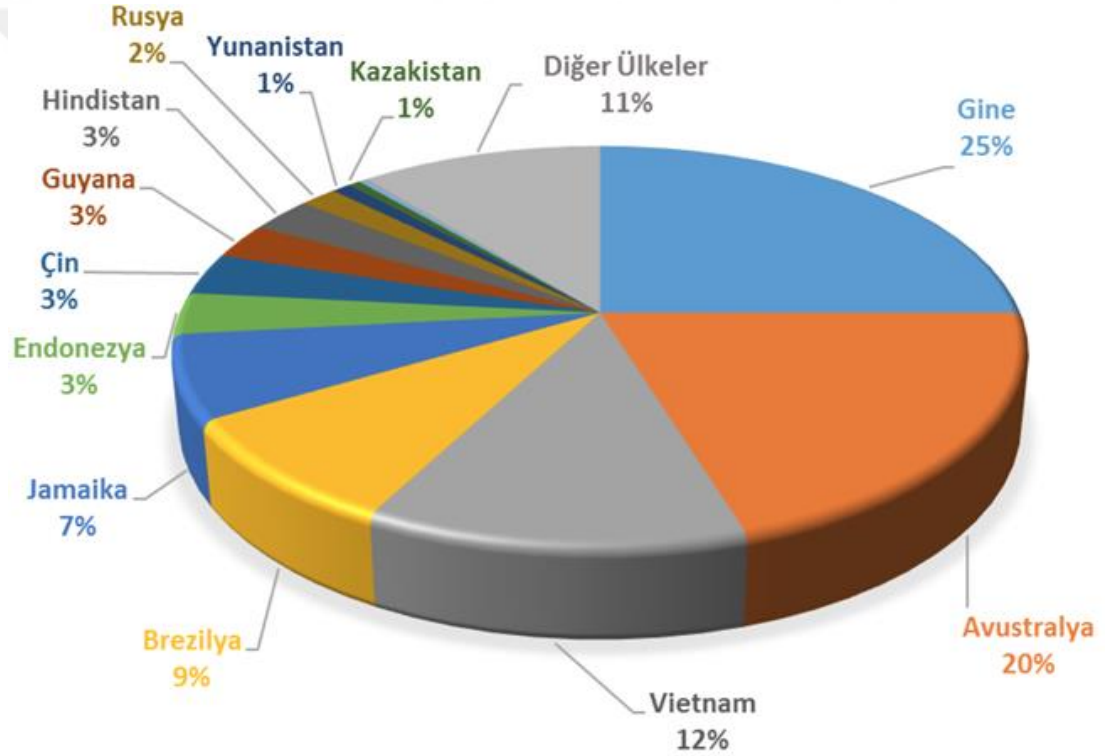
Element	Lateritik	Karst
Al ₂ O ₃	gibsit, böhmit	böhmit, diasporit
SiO ₂	kaolinit, kuvars	kaolinit, kuvars, kamosit, illit
Fe ₂ O ₃	götüt, hematit	götüt, hematit, manyetit, mahemit
TiO ₂	anataz, rutil	anataz, rutil, ilmenit
CaO	kalsit, apatit, krandalit	kalsit, apatit, krandalit

Boksit cevherlerinin bir diğer sınıflandırılma sistemi de Al₂O₃/SiO₂ oranı ve Fe₂O₃ tenörüne göre yapılan sınıflandırılmadır. Bu sınıflandırma Çizelge 2.3’te gösterilmektedir (Göral, 1999; Yıldız, 2022).

Çizelge 2.3. Al₂O₃/SiO₂ oranı ve Fe₂O₃ tenörüne göre sınıflandırma

Al ₂ O ₃ /SiO ₂ > 20	yüksek alüminalı cevher
Al ₂ O ₃ /SiO ₂ = 10-20	alüminalı cevher
Al ₂ O ₃ /SiO ₂ = 4-10	silisli cevher
Al ₂ O ₃ /SiO ₂ < 4	yüksek silisli cevher
Fe ₂ O ₃ > %25	demir içeriği yüksek cevher
Fe ₂ O ₃ = %10-25	demirli cevher
Fe ₂ O ₃ < %10	demir içeriği düşük cevher

Dünyada 55-75 milyar ton arasında boksit rezervi olduğu ve bunun yaklaşık yarısının işletilebilir nitelikte olduğu tahmin edilmektedir. Dünyanın en büyük işletilebilir boksit rezervi Batı Afrika'da bulunan ve tropikal iklimin hakim olduğu Gine'de bulunmakta ve 7,4 milyar ton olarak hesaplanmaktadır. Gine'yi, Avustralya (6 milyar ton), Vietnam (3,7 milyar ton), Brezilya (2,6 milyar ton) ve Jamaika (2 milyar ton) takip etmektedir. Bu beş ülke, dünya boksit rezervinin %70'ini (22 milyar ton) oluşturmaktadır. Diğer önemli boksit üreticileri arasında Endonezya ve Çin (1 milyar ton), Guyana (850 milyon ton), Hindistan (830 milyon ton) ve Rusya (500 milyon ton) sayılabilir. Ülke bazında işletilebilir boksit rezerv dağılımı Şekil 2.1'de gösterilmektedir (Eroğlu ve Şahiner, 2018).



Şekil 2.1. Ülke bazında işletilebilir boksit rezerv dağılımı (Eroğlu ve Şahiner, 2018)

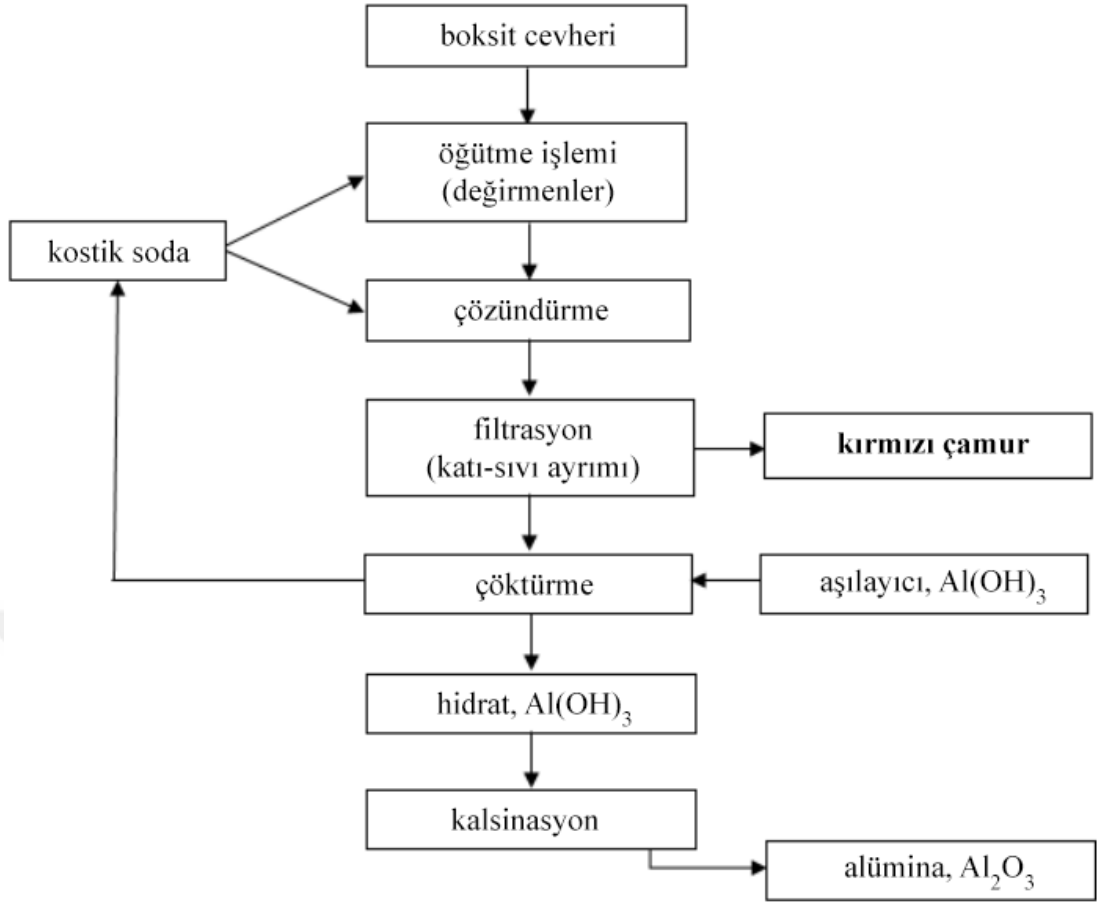
Ülkemizin yaklaşık 450-500 milyon ton boksit rezervine sahip olduğu tahmin edilmekte ve bu rezervin büyük çoğunluğu (%95) Toros kuşağı içerisinde karst tipi böhmitik ve diasporit boksit olduğu bilinmektedir. Türkiye'nin işletmeye uygun en öncelikli boksit kaynakları, Seydişehir-Akseki bölgesinde 36,5 milyon ton ve Muğla-Milas bölgesinde 17,5 milyon ton olmak üzere toplamda 54 milyon ton kadardır. Bunun yanında, Zonguldak-Kokaksu ve Tufanbeyli-Saimbeyli bölgelerindeki

kaynaklarla birlikte bu miktar 68,9 milyon tona ulaşmaktadır. Bu rakamlarla Türkiye, dünyadaki işletilebilir boksit potansiyelinin yalnızca %0,20'sine sahiptir. Ülkemizin boksit kaynaklarını kullanarak alüminyum ve alümina üretimini yapan tek tesis Eti Alüminyum A.Ş.'dir. Bu tesis, Seydişehir-Akseki boksit kaynaklarını değerlendirmek amacıyla kurulmuş olup yılda 550.000 ton boksit cevheri işleyerek 260.000 ton kalsine alümina ve 82.000 ton birincil alüminyum üretmektedir (Göral, 1999; Birinci ve Gök, 2021; Ünal, 2021)

2.1.2. Bayer prosesi ile boksitten alümina üretim yöntemi

Alümina, boksitin kimyasal işlemlerle saflaştırılmasıyla elde edilen, alüminyum oksitin (Al_2O_3) %90'dan fazlasını barındıran, alüminyumun ana üretim kaynağı olan yarı mamul bir maddedir. Al_2O_3 'ün asit ve bazlarla reaksiyona girebilmesi özelliği ile boksitten alüminanın farklı yöntemlerle (Sinter prosesi, Bayer prosesi ve birleşik proses) üretilebilmesi mümkündür. 1887 yılında Avustralyalı mühendis Karl Josef Bayer tarafından geliştirilen Bayer prosesi bu yöntemler içinde en ekonomik ve günümüzde en yaygın uygulanan alümina üretim yöntemidir (Yıldız, 2022).

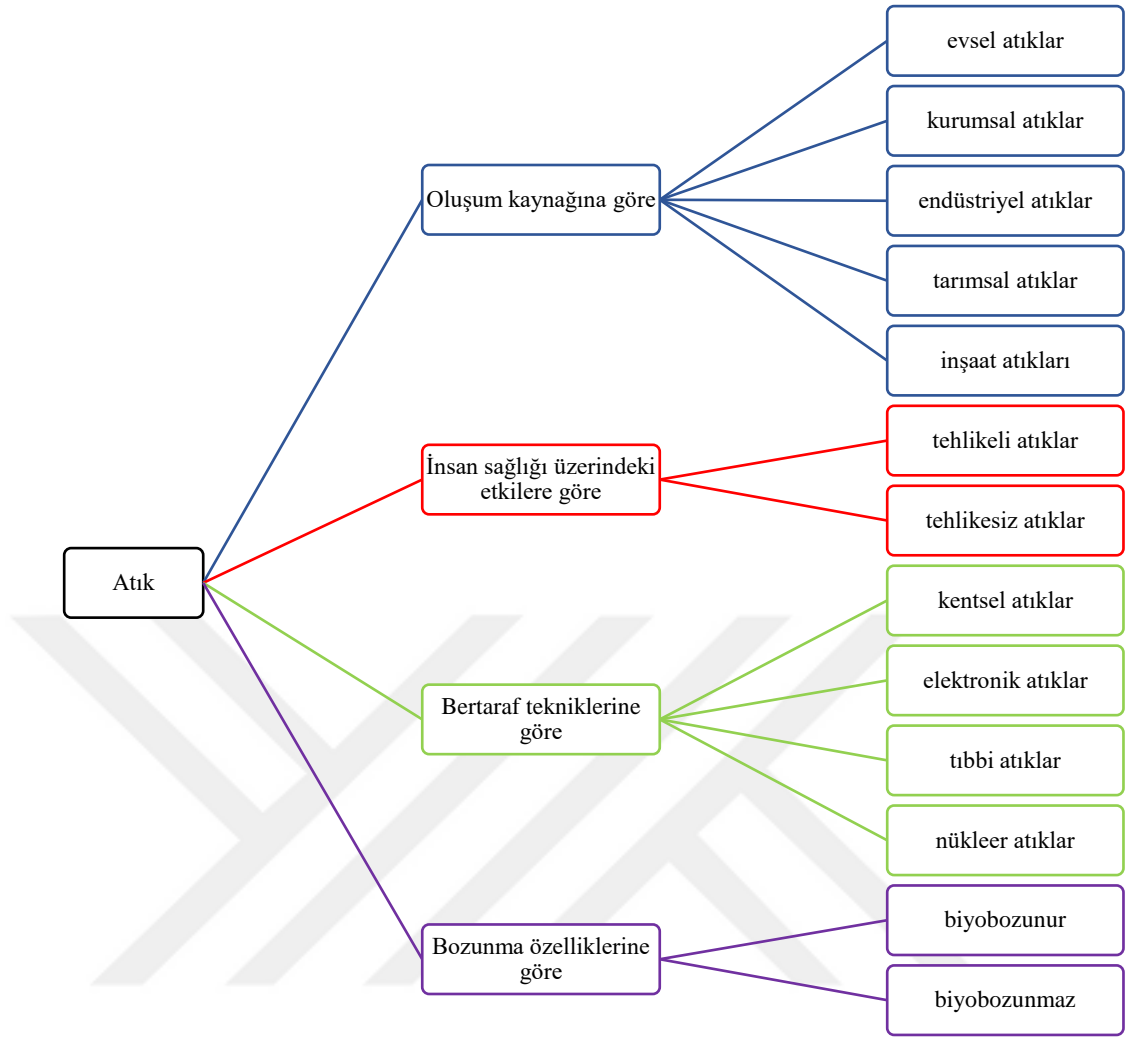
Bayer prosesinde, boksit cevherleri kırılarak uygun boyutlara getirilir ve değirmenlerde sodyum hidroksit ($NaOH$) ile öğütülerek katı-sıvı karışım haline getirilir. Bu karışım yüksek basınç ve ısı altında tepkimeye sokularak, boksit cevherindeki alüminanın hidroksit ($Al(OH)_3$) şeklinde sıvı faza geçmesi sağlanır. Tepkime sonucu elde edilen sıvı fazdaki $Al(OH)_3$ kristalizasyon işlemi ile çöktürülerek beyaz renkte hidrat $Al(OH)_3$ elde edilir. Çöktürülen $Al(OH)_3$ kristalleri akışkan yataklı fırın veya döner fırınlarda kalsine edilerek (içeriğindeki fiziksel ve kimyasal suyun atılması) kalsine alümina üretimi gerçekleştirilir. Bayer prosesinin genel akış şeması Şekil 2.2'de verilmiştir (Ünal, 2021).



Şekil 2.2. Bayer prosesinin genel akış şeması (Ünal, 2021)

2.1.3. Kırmızı çamur atığı

Kentsel nüfusun hızla artması, yaşam standartlarının yükselmesi, ekonomik büyümenin hızı ve buna bağlı olarak davranışsal yaşam tarzının değişmesi farklı olumsuzlukları beraberinde getirmiştir. Toplumdaki "kullan-at" uygulaması nedeniyle, farklı kaynaklardan ve farklı uygulamalardan gelen atık oluşumunda muazzam bir artış kaydedilmiştir. Genellikle "atık", farklı antropojenik ve/veya biyolojik faaliyetler tarafından üretilen, reddedilen, terk edilmiş kütle ve istenmeyen fazla hacimli maddelerdir (Sonjica, 2009). Üretim kaynaklarına, tehlikeli özelliklerine, bertaraf tekniklerine ve bozunma özelliklerine göre birkaç kategoriye ayrılabilirler. Farklı kategorilere göre atık türleri Şekil 2.3'de görülmektedir (Srivastava vd., 2023).



Şekil 2.3. Farklı kategorilere göre atık türleri (Srivastava vd., 2023)

Boksit cevherinden Bayer prosesi ile alümina elde edilirken demir mineralleri alkalilerle tepkimeye girmediğinden ortamda çözünmemiş katı fazlı bileşikler halinde kalmaktadır. İçeriğinde demir minerallerinin haricinde özütleme sürecinden kalan diğer safsızlıklar da bulunmaktadır. Bu kalan ve işe yaramayan kısım atık olarak nitelendirilmekte olup renginden dolayı “kırmızı çamur atığı” veya “boksit atığı” İngilizce kaynaklarda ise “red mud waste” veya “bauxite residue” olarak isimlendirilmektedir (Arslan, 2016).

Kırmızı çamurun kimyasal ve mineralojik içeriği madenin konumuna bağlı olarak boksit cevherinin türüne ve Bayer prosesinin uygulama teknolojisine bağlıdır (Khairul vd., 2019). Proses sonucunda ayrılan ve katı faza geçen sodyum alüminyum silikatlar kırmızı çamur atığının temelini oluşturur. Boksitin diğer ana bileşenleri olan demir ve titan oksitler de katı fazda kalarak kırmızı çamur atığında bulunur. Ayrıca bu ana

bileşenlerin dışında çeşitli başka metalik oksit bileşenler de bulunabilir. Bunlar arsenik, berilyum, kadmiyum, krom, bakır, galyum, kurşun, manganez, cıva, nikel, potasyum, skandiyum, toryum, uranyum, vanadyum, çinko, zirkonyum ve diğer nadir toprak elementleridir. Kırmızı çamur atığında bulunabilen metalik olmayan elementler ise fosfor, karbon ve kükürttür (Evans, 2016). Diğer ana bileşenler olan Ca ve Na, çoğunluğu ana boksit kaynağından gelmeyip alümina üretim prosesinde katkı maddesi olarak (çözünürleştirme) veya sinterleştirilecek karışımın bileşeni olarak dışarıdan eklenirler (Göral, 1999; Ünal, 2021). Dünyanın farklı bölgelerindeki boksit kaynaklarından Bayer prosesi ile alümina üretimi sonucu ortaya çıkan kırmızı çamur atıklarının kimyasal bileşenleri Çizelge 2.4’te verilmiş olup kompozisyon çeşitliliğinin oldukça geniş olduğu görülmektedir.

Çizelge 2.4. Farklı ülkelere ait kırmızı çamurların kimyasal bileşenleri

Ülke	Bölge	Kimyasal bileşenler					Kaynak
		Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Na ₂ O	
Hindistan	Nalco	21,4	21,0	12,9	15,0	10,1	Venkatesh vd. (2020)
Hindistan	Odisha	23,8	28,2	7,5	17,9	10,8	Venkatesh vd. (2020)
Hindistan	Renukoot	34,4	22,4	15,6	11,9	11,5	Agrawal vd. (2022)
Çin	Shanxi	2,8	40,7	2,0	45,7	0	Liu ve Poon (2016)
İran	Jajarm	22,2	14,0	7,2	13,0	4,2	Deihimi vd. (2018)
Kamerun	Sabal Haleo	48,6	16,4	3,8	2,8	4,2	Tsamo vd. (2017)
Gine	Boke	41,7	12,3	4,3	4,3	4,5	Shoppert vd. (2022)
Yunanistan	Agios Nikolaos	44,6	23,6	5,7	10,2	2,5	Borra vd. (2015)
Macaristan	Ajka	42,1	14,8	5,2	13,5	8,9	Gräfe vd. (2011)
Avustralya	Pinjarra	36,2	17,1	3,9	23,8	1,6	Gräfe vd. (2011)
Brezilya	Pará	29,5	22,5	4,6	17,4	12,5	Viegas vd. (2023)
Gana	Greater Accra	7,2	51,1	1,8	2,2	2,9	Dodoo-Arhin vd. (2013)
Fransa	Gardenna	52,9	15,2	8,1	5,2	2,4	Toniolo vd. (2017)
Rusya	Sverdlovsk	53,2	13,3	5,5	12,0	5,2	Shoppert vd. (2019)
Türkiye	Seydişehir	36,0	18,6	5,1	16,2	8,9	Arslan (2016)

Cevher tipinin farklı mineral bileşimleri ve tenörleri ülkelerin tercih ettiği alümina üretim yöntemini de etkilemektedir. Örneğin Hindistan, Avustralya ve Türkiye, Bayer sürecini benimserken, Çin ise sinterleme süreciyle alümina üretmektedir. Ayrıca Hindistan'da bulunan kırmızı çamurun titanyum içeriği diğer ülkelere göre daha yüksektir (Patil ve Thorat, 2022). Kırmızı çamurun genel bileşen aralıkları Çizelge 2.5'te görülmektedir (Evans, 2016; Khairul vd., 2019).

Çizelge 2.5. Kırmızı çamurun genel bileşen aralıkları

Ana Bileşenler	Aralık Değer (%)	Eser Elementler	Molar Konsanrasyon (mg/kg)	Eser Elementler	Molar Konsanrasyon (mg/kg)
Fe ₂ O ₃	5-60	U	50-60	Mn	85
Al ₂ O ₃	5-30	Ga	60-80	Y	60-150
SiO ₂	3-50	V	730	Ni	31
Na ₂ O	1-10	Zr	1230	Zn	20
CaO	2-14	Sc	60-120	Lantanitler	0,1%-1%
TiO ₂	0,3-15	Cr	497	Th	20-30

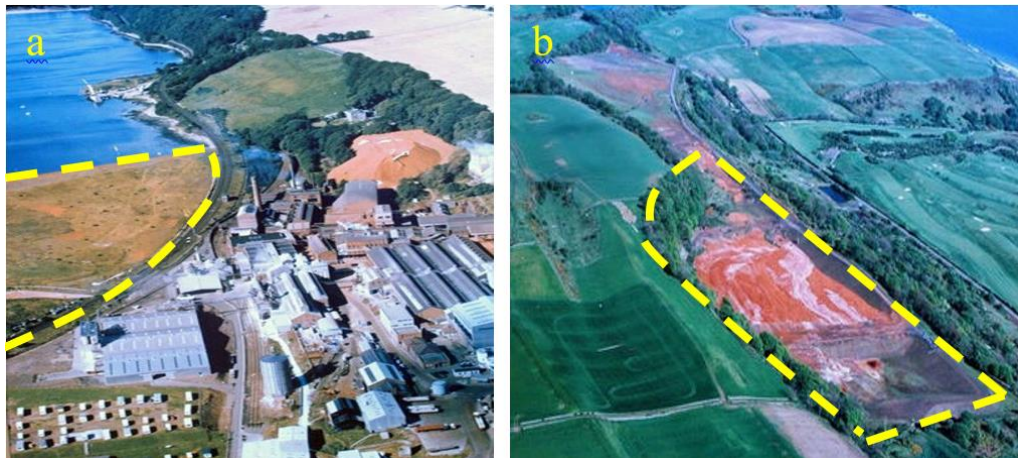
Kırmızı çamur oldukça alkali bir atık olup pH değeri boksitin kaynağına, alümina üretim teknolojisine ve hatta depolama süresine bağlı olarak 10 ila 13 arasında değişmektedir. Liu vd. (2007) yaptıkları deney çalışmalarında prostenen yeni çıkmış ve 5-10 sene beklemiş 3 farklı kırmızı çamur numunelerinin pH derecelerini sırasıyla 11.58, 10.56 ve 9.61 olarak ölçmüşler ve kırmızı çamurun pH'ının depolama süresinin artmasıyla azaldığını ve çözünür sodyumun kırmızı çamurdaki çözünür bazik kationlara hakim olduğunu ve çözünür sodyumun konsantrasyonunun da artan depolama süresi ile azaldığını açıklamışlardır.

2.2. Kırmızı Çamur Atığının Bertarafı ve Çevresel Etkiler

2.2.1. Kırmızı çamurun bertaraf yöntemleri

Kırmızı çamur atık yönetim politikaları ve depolama yöntemleri, ekosistemdeki flora ve fauna dahil olmak üzere biyolojik çeşitliliği ve yeraltı sularını korumaya yönelik adımlarla dünya genelinde zaman içinde gelişmeler göstermiştir. Bayer prosesinin ilk kullanılmaya başlandığı zamanlarda kırmızı çamur atığı, alümina üretim tesisinin çevresine veya yakındaki uygun alanlara düzensiz boşaltılmaktaydı. Ancak atık

miktarının hızla artması ile uygun arazilerin yetersiz kalması sonucu tükenmiş maden ve taş ocağı sahaları, haliçler ve deniz lagünlerinin doldurulması gibi çeşitli yöntemler uygulanmıştır. Şekil 2.4'te Birleşik Krallık Burntisland'da bir haliçin ve Whinnyhall'de eski bitümlü şist madeninin kırmızı çamur ile doldurulduğu bertaraf teknikleri görülmektedir. 1940'lardan 1970'lere kadar bazı tesisler tarafından uygulanan bir diğer bertaraf tekniği ise kırmızı çamurun deniz veya nehirlerle boşaltılmasıydı. İki Fransa'da (Gardanne ve La Barasse), biri Yunanistan'da (Distomon) ve üçü Japonya'da (Shimizu, Ehime ve Yokohama) olmak üzere en az altı tesiste, kırmızı çamur atıkları boru hatları veya gemilerle okyanustan denize boşaltılmıştır. La Barasse'de (Fransa) depolama başlangıçta sahada yapılmış daha sonra yakınlardaki bir vadiye kurulan baraja yerleştirilmiş ve ardından bir boru hattı ile denize boşaltılmıştır (Evans, 2016). Bu bertaraf yöntemleri, uygulandıkları tarihlerde atık yönetim politikalarındaki eksiklikler ve modern depolama yöntemlerinin henüz geliştirilememiş olması sebebiyle, günün şartları için düşük yatırım maliyeti ve işletme giderleri gibi bazı temel pratik avantajlar göz önünde bulundurularak tercih edilmiş olsa da, kırmızı çamurun toksik metal içeriği ve yüksek alkalitesi ekosistem için potansiyel riskler taşıdığından, zamanla devletler, çeşitli uluslararası örgütler ve bilim insanları tarafından son derece tehlikeli yöntemler olarak kabul görmüştür. 1981 UNEP/UNIDO çalıştayında kırmızı çamur atığının bertarafı ile ilgili şu sonuca varılmıştır: "Boksit atığının nehirlerle atılması kesinlikle önerilmez ve deniz yoluyla bertaraf edilmesi, bertaraf için uygun arazinin mevcut olmadığı durumlarda son çare olarak kabul edilir" (UNIDO, 1985; Power vd., 2011).



Şekil 2.4. Birleşik Krallık'ta (a) Burntisland'da bir haliçin ve (b) Whinnyhall'de eski bitümlü şist madeninin kırmızı çamur ile doldurularak bertaraf edilmesi (Evans, 2016)

Sonraki süreçte kırmızı çamur atığı, lagün tipi açık havuzlarda, çamur göllerinde veya baraj gibi çeşitli su tutma yapılarında yarı kuru veya ıslak bir bulamaç olarak bertaraf edilmeye başlanmış ve dünyanın birçok bölgesindeki alümina üretim tesislerinde yaygın bir uygulama haline gelmiştir. Ancak bu bertaraf yönteminde, bulamaç şeklindeki kırmızı çamur kolayca sızarak yer altı ve yüzey sularını kirletmekte ve toprağın bozulmasına yol açmaktadır. Yüksek tuzluluk, yüksek alkalilik, bitki besin maddesi eksikliği ve düşük organik madde içeriği gibi olumsuz özellikleri nedeniyle yeniden bitkilendirme de oldukça elverişsiz hale gelmektedir. Tüm bu faktörler bitkilerin ve diğer bitki örtüsü türlerinin büyümesini engellemektedir (Rai vd., 2017). Ayrıca yaz mevsiminde güneş ısısından dolayı kuruyan kırmızı çamur, ince taneli yapısı nedeniyle tozuyarak rüzgar ile kolayca dağılabilmekte ve yakın çevrede hava kirliliğine neden olabilmektedir. Islak bertaraf yönteminin diğer bir dezavantajı da geniş depolama alanlarına gerek duyulmasıdır. Sonuç olarak kırmızı çamurun havuzlara veya baraj alanlarına doğrudan bulamaç olarak atılmasından kaynaklanan bu risklerin en aza indirgenmesi amacıyla, küresel alümina endüstrileri son yıllarda kırmızı çamurun bertaraf problemini kuru istifleme yöntemi ile aşmaya çalışmakta ancak arıtma maliyetlerinin yüksek olması, birçok tesisin bu son teknolojiyi benimsemesine engel olmaktadır (Patil ve Thorat, 2022). Şekil 2.5'te Seydişehir Eti Alüminyum tesislerine ait kırmızı çamur atık barajı görülmektedir (Arslan, 2016).



Şekil 2.5. Kırmızı çamur atık barajı (Arslan, 2016)

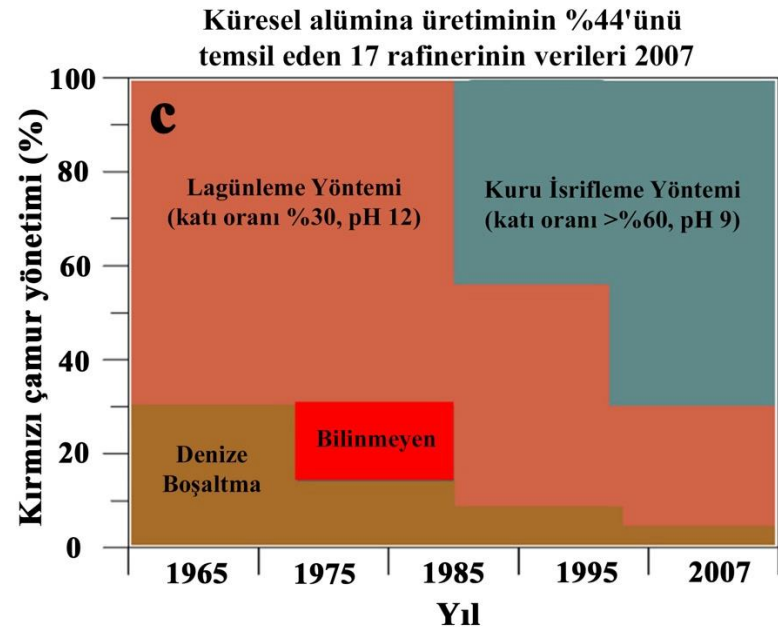
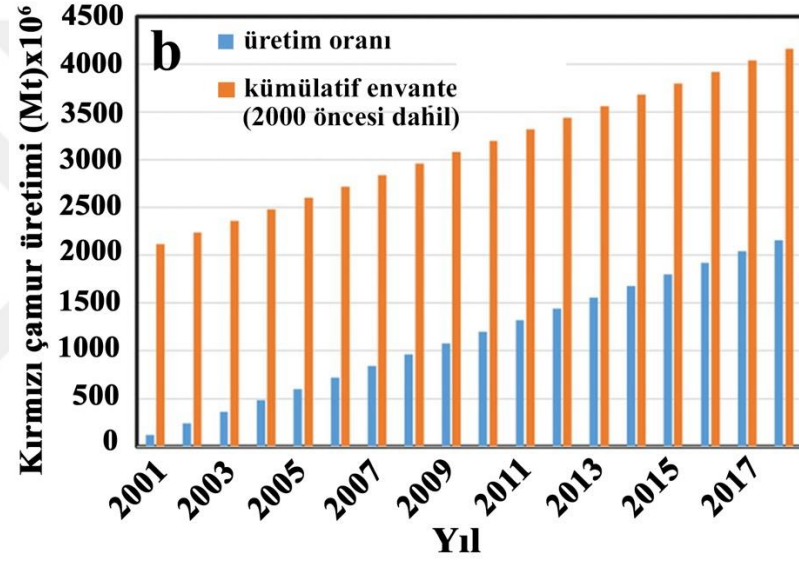
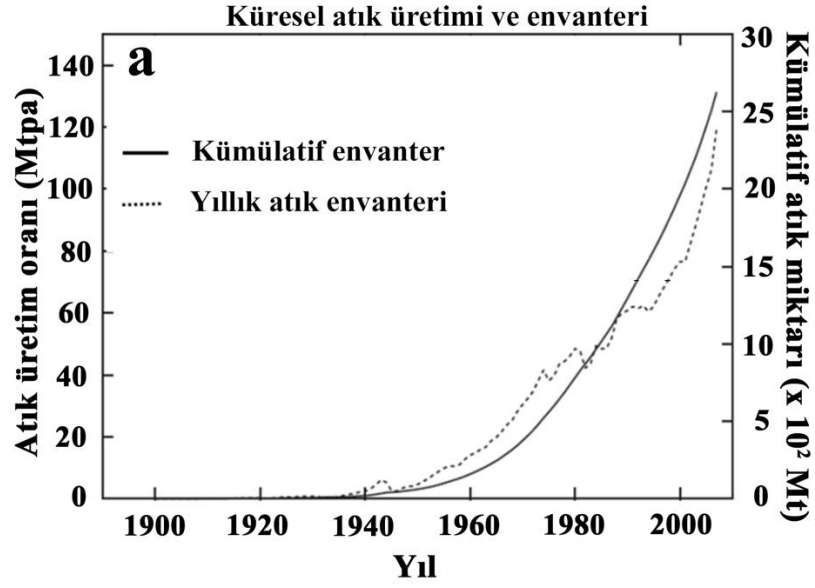
Geçtiğimiz son 30-40 yılda sıkıştırılmış kil şilteler ve geosentetik bariyer malzemeleri ile geçirimsiz zemin tabakaları oluşturularak inşa edilen modern atık depolama sahaları ve atık barajlarında kuru istifleme yöntemi ile kırmızı çamur atıkları depolanmaya başlanmıştır. Kuru istifleme yöntemi, atık depolama barajlarının tasarım ve inşaatına çeşitli drenaj ve sızıntı toplama sistemlerinin dahil edilmesi ile kırmızı

çamurdaki kostik sıvıyı yeniden kullanmak üzere tesise geri gönderen bir sistemdir. Kuru depolanan atığın çevreye ve yeraltı sularına sızma potansiyelini engellemesi ve atık hacmini azaltarak alan kazanımı sağlanması bu yöntemin başlıca avantajlarından. 1985'te alümina üretim tesislerinin yaklaşık %40'ı tarafından kullanılan kuru istifleme yöntemi 2007 yılında %70 seviyelerine yükselmiştir (Khairul vd., 2019). Diğer tüm bertaraf yöntemleri arasında kuru istifleme yöntemi, çevresel tehlikeleri önleyebilecek belirgin bir çözüm sunan en iyi bertaraf uygulaması olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, atıktaki sodanın (sodyum hidroksit) proses döngüsüne geri besleme yapılması ile net alkali tüketimine harcanan maliyeti azaltabilmektedir (Patil ve Thorat, 2022).

2.2.2. Atık barajlarında depolanan kırmızı çamur miktarı

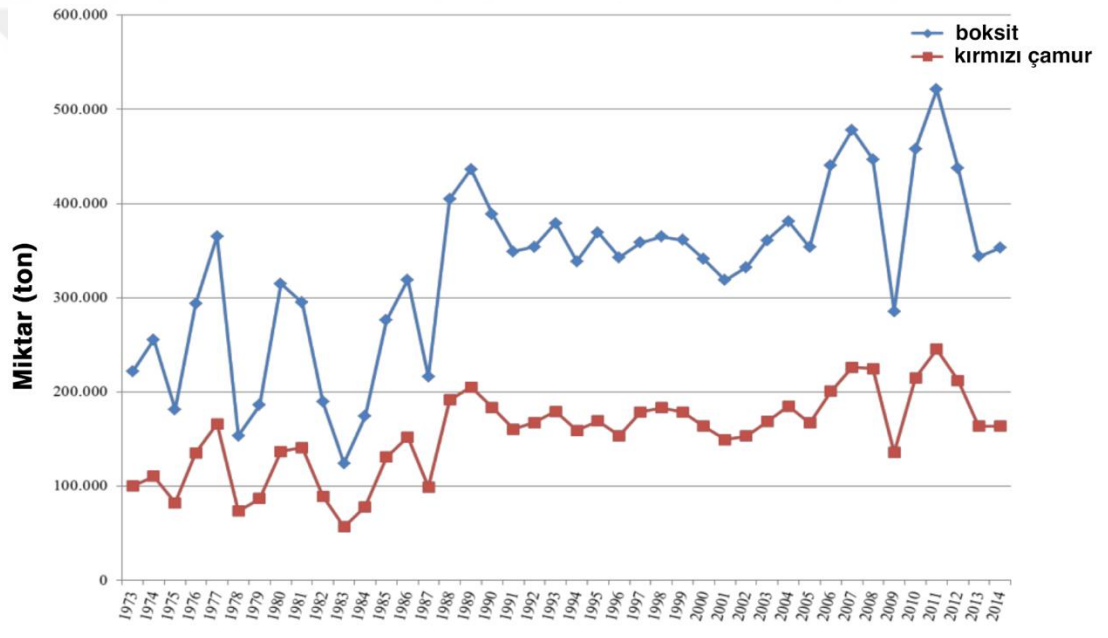
Dünya çapında yılda yaklaşık 150 milyon ton kırmızı çamur üretildiği tahmin edilmektedir. Üretilen bu atığın yalnızca küçük bir kısmı inşaat malzemelerinin (cam, çimento, seramik, beton bloklar ve tuğla) üretiminde kullanılmakta ancak büyük çoğunluğu atık rezervlerinde depolanmaktadır (Xu vd., 2019). Toplam 4,6 milyar ton kırmızı çamurun atık rezervlerinde depolandığı tahmin edilmektedir (Khanna vd., 2022).

Kırmızı çamurun atık yönetimi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır (Power vd., 2011; Evans, 2016; Archambo ve Kawatra, 2021; Patil ve Thorat, 2022). Swain vd. (2022), 2007 yılında 2,7 milyar ton olan küresel kırmızı çamur envanterinin 2014 yılında 3,5 milyar tona yükseldiğini ve 2020 yılına gelindiğinde atık miktarının 4 milyar ton tonu aştığını açıklamışlardır (Şekil 2.6a ve Şekil 2.6b). Son 50 yıldaki atık yönetim eğimine göre, özellikle son otuz yılda ıslak bertaraf yönteminin yerini kuru istifleme yönteminin aldığını ve günümüzde kırmızı çamurun %70'inden fazlasının kuru istifleme yöntemi ile depolandığını açıklamışlardır (Şekil 2.6c).



Şekil 2.6. Kırmızı çamur atık yönetim eğilimi (Swain vd., 2022)

1973 yılında faaliyete başlayan Seydişehir ETİ Alüminyum tesislerinden çıkan kırmızı çamur atığı, santrifüj pompalar vasıtasıyla 3,8 km uzunluğundaki 2 adet çelik boru hat üzerinden atık depolama barajına bulamaç halde gönderilmektedir. Şekil 2.7’de görüldüğü üzere 2014 yılına kadar yaklaşık 40 yılda toplam 14 milyon ton boksit işlenmiş ve yaklaşık 7 milyon ton kırmızı çamur, atık depolama barajına gönderilmiştir. Barajın doluluk oranı 2014 yılı verilerine göre %90-95 seviyelerindedir. Ortaya çıkan kırmızı çamur bulamaç olarak baraja gönderildiği için barajın kapasitesinin büyük kısmını sıvı hacim doldurmaktadır. Bu nedenle barajın uzun süre hizmet etmesini sağlamak amacıyla kuru istifleme yöntemlerine geçiş yapılması gerekmektedir (Arslan, 2016).



Şekil 2.7. Seydişehir Eti Alüminyum tesislerinde 2014 yılına kadar işlenen boksit ve atılan kırmızı çamur miktarı (Arslan, 2016)

2.2.3. Kırmızı çamurun depolanması ile ilgili çevresel kaygılar

Alüminyum endüstrisi için en temel sorun büyük miktarda kırmızı çamur atığının büyük alanlarda depolanmasından kaynaklı çevrede artan doğal radyoaktivite ve toksik elementlerin varlığıdır. Ayrıca yüksek alkalinite ve kostik içeriği nedeniyle, kırmızı çamur son derece aşındırıcı ve çevreye zararlıdır. Tüm bu nedenlerle kırmızı çamur, tehlikeli bir endüstriyel atık olarak görülebilir (Ozden vd., 2019). Kırmızı çamurun uzun süreli depolanması ve/veya deniz deşarjı önemli çevre sorunlarına yol

açmaktadır. Bazı ülkeler tarafından kırmızı çamurun tahliyesi için deniz boru hatları kullanılmıştır (Deady vd., 2016). Dauvin (2010) yaptığı çalışmada, Fransa Marsilya’da bulunan Barasse ve Gardanne alümina tesislerinin geçmişte kırmızı çamuru borularla deniz ortamına salınmasının günümüzde bölge ekosistemi üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Pagano vd. (2002) kırmızı çamurun deniz kestanesi embriyolarındaki toksik etkilerini araştırmışlardır.

Kırmızı çamurdan çevreye yayılabilecek toksik elementlerin miktarı, boksit cevherinin kaynağı, prosesten arta kalan kırmızı çamur miktarı, atık konsantrasyonları ve çevre koşullarında metal liçi özellikleri gibi bir dizi faktöre bağlıdır. Bu nedenle, kırmızı çamurda bulunan toksik elementlerin liç özellikleri hakkındaki bulgular, depolama, kullanım ve çevresel etki açısından anlaşılması gereken önemli bir konudur (Ozden vd., 2019). Endüstriyel atıklarda bulunan ağır metallerin sağlık açısından oluşturabileceği önemli problemler Çizelge 2.6’da gösterilmektedir (Pathak ve Srivastava, 2017).

Çizelge 2.6. Endüstriyel atıklardaki farklı metal içerikleri ile ilgili olumsuzluklar

Toksik Metaller	Sınır, ppm	Sınırın üzerinde maruz kalmanın neden olacağı problemler
Ag *	5,0	Aşırı miktarı vücutta mavi pigmentlerin oluşmasına neden olarak beyne, akciğerlere, karaciğere ve böbreğe zarar verir.
As **	5,0	Kronik etki ve cilt hastalığına, akciğer kanserine ve sinir sistemi bozukluklarına neden olur
Ba **	< 100	Beyin şişmesine, kas güçsüzlüğüne, kalpte hasara neden olur
Be **	0,75	Akciğer kanserine, berilyoza, cilt hastalıklarına neden olur
Br **	0,10	Tiroid bezi hasarı, hormonal sorunlar, cilt bozukluğu, DNA hasarı, iştih kaybına neden olur
CD **	1,0	Başta böbrek olmak üzere insan sağlığı için geri dönüşü olmayan etkiler
CN **	< 0,50	Siyanür zehirlenmesi, >2.5 ppm komaya ve ölüme neden olabilir
Cr(VI) **	5,0	Çevre için toksiktir, DNA hasarına ve kalıcı göz bozukluğuna neden olur
Hg **	0,20	Beynin, böbreğin ve fetüslerin zarar görmesi
Li *	< 10	İshal, kusma, uyuşukluk, kas güçsüzlüğü
Ni *	20,0	Alerjik reaksiyona, bronşite neden olur, akciğer fonksiyonlarını azaltır
Pb ***	5,0	Beyin, sinir sistemi, böbrek ve üreme sistemine zarar verir
Se **	1,0	Yüksek konsantrasyon selenoza neden olur
Zn **	250,0	Mide bulantısı, kusma, ağrı, kramplar ve ishal
*kritik, ** tehlikeli ve toksik, *** radyoaktif atık		

Hava kirliliği, su havzalarının zarar görmesi ve toprağın kirlenmesi, endüstriyel atıkların yanlış yönetiminden kaynaklanan sorunlardır. 1970'lerden itibaren,

kimyasalların ve endüstriyel veya radyoaktif atıkların okyanusa atılmasını önleyen çeşitli yasalar çıkarılmıştır. Bununla birlikte, yeni düzenlemelere ve sürdürülebilir yönetime özen gösterilmesine yol açan çeşitli çevresel felaketler de meydana gelmiştir (Srivastava vd., 2023). Bu felaketlerden yakın zamanda gerçekleşen en önemlisi, 2010 yılında Macaristanın Ajka kentinde kırmızı çamur atık barajında seddenin yıkılmasıyla meydana gelmiştir (Şekil 2.8). Bu meydana gelen kaza sonucu yaklaşık 1 milyon m³ kırmızı çamur 45 km²'lik bir alana dağılmış, 3 köy 2 metre yüksekliğindeki sel altında kalmış, pek çok hayvan telef olmuş, 120'den fazla kişi kimyasal yanıklarla yaralanmış ve 7 kişi hayatını kaybetmiştir (Nbcnews, 2010; Turi vd., 2013).



Şekil 2.8. Macaristan Ajka kırmızı çamur atık barajı kazası (Nbcnews, 2010)

Yaklaşık 40km²'lik alçak tarım arazisi ve nehir kıyısı sulak alanları bu felaketten etkilenmiştir ve kırmızı çamur nehirler tarafından 120 km aşağı akışa taşınmış ve sonunda Tuna nehrine ulaşarak Karadenize kadar yayılmıştır (Lockwood vd., 2015). Birçok araştırmacı bu felaketin bölgeye olan etkilerini, afet iyileştirme çalışmalarını ve iyileştirme çalışmaları sonrası bölge ekosistemindeki gelişmeleri araştırmıştır. Felaket sonrası yapılan çalışmalarda kırmızı çamurun insan sağlığı üzerine etkileri (Gelencsér vd., 2011; Magyar vd., 2024), toprak toksisitesi (Anton vd., 2012), tatlı su ve toprak ekolojisi (Klebercz vd., 2012; Rékási vd., 2013), kırmızı çamurda bulunan eser metallerin daha geniş çevredeki hareketliliği (Burke vd., 2012; Lockwood vd.,

2015) ve pH'ı düşürmek için nehirlerin ve akarsuların asit ve alçıtaşı ile iyileştirilmesinin etkileri (Renforth vd., 2012; Burke vd., 2013) rapor edilmiştir. Bánvölgyi (2018) atık barajında seddenin yıkılma sebeplerini araştırmıştır.

Ajka felaketi, küresel alümina endüstrisinde kırmızı çamurla ilişkili çevresel sorunların daha fazla gündeme gelmesini sağlamıştır. Bu olay, kırmızı çamurun yeniden değerlendirilmesi amacıyla sektör genelinde endüstri ve araştırma merkezleri arasında işbirlikçi girişimlerin başlatılmasını hızlandırmış olsa da yılda yaklaşık 150 milyon ton kırmızı çamur üretilmekte ve bunun sadece %2-3'ü verimli bir şekilde yeniden kullanılmakta veya geri dönüştürülmektedir (Mayes vd., 2016).

2.3. Kırmızı Çamurun Yeniden Kullanımı

Temel ihtiyaçlardan lüks eşyalara kadar günlük talepleri, birincil kaynakları keşfederek ya da ikincil (ömrünün sonuna gelmiş) malzemeleri kullanarak karşılamak modern çağın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Sürdürülebilir endüstriyel faaliyetleri yürütmek için iki nokta hayati önem taşır: (a) sürekli hammadde tedariki ve (b) endüstriyel faaliyetler tarafından üretilen atıkların etkili bir şekilde bertaraf edilmesi. Endüstrilerde kullanılan hammaddeler (birincil kaynak malzemeler) sınırlıdır ve endüstriyel atık olarak çıkan malzemenin depolanması ve lojistiği de endüstri için büyük bir yük oluşturmaktadır. Çevre düzenlemeleri dünya çapında daha katı hale geldikçe, endüstriyel atık bertarafı için düzenli depolama dışında sürdürülebilir çözümler geliştirilmeye başlanmıştır. Bu nedenle, geri dönüşüm, yeniden kullanım ve akıllı bertaraf tekniklerini değerlendirmek, endüstriyel atık yönetimi için sürdürülebilir bir yol olarak görülmektedir. Endüstriyel atık üretimi, işletmelerin ölçeğine bağlı olarak (küçük/orta/büyük ölçekli endüstriler için) büyük bir hacim oluşturur ve bu nedenle bunların doğru bir şekilde yönetilmesi, diğer atıklardan (bireysel düzeyde evsel atıklar, kurumsal atıklar veya inşaat atıkları) daha önemlidir. Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri, kullanım ömrü sona ermiş (atık) malzemelerin potansiyel ikincil kaynak olarak yeniden kullanımı için endüstriyel atıkların ve geri dönüşümün sürdürülebilir yönetimini vurgulamaktadır. Endüstriyel atıkların yeniden değerlendirilmesi, ülkelerin ekonomik ve sosyal kalkınmasının yanı sıra çevre kirliliğini önlemek ve sınırlı kaynak tüketimini en aza indirmek için de hayati öneme sahiptir. Tüm bu gelişmelere rağmen, endüstriyel

atıkları sürdürülebilir bir şekilde yönetmek için yapılan çalışmaların yetersiz olduğu açıktır. Bu nedenle sürdürülebilirliği sağlamak ve sınırlı kaynakların tükenmesi riskinden arınmış, çevre dostu bir toplum oluşturmak için atıkların yeniden değerlendirilmesi hakkında derinlemesine bir anlayışa ihtiyaç vardır (Srivastava vd., 2023).

Alüminyum endüstrisinde kırmızı çamur bertarafının tek alternatifi ve muhtemelen bertaraf maliyetlerinin ve potansiyel kirlilik sorunlarının azaltıldığı ve kaynak tasarrufunun başarıldığı tek çözüm, kırmızı çamurun ikincil kaynak olarak yeniden kullanımınıdır. Bu nedenle, kırmızı çamurun kullanımına yönelik yapılan çalışmalar son yıllarda giderek artan bir ilgi görmektedir. Kırmızı çamur esas olarak inşaat malzemeleri ve seramiklerin bir bileşeni veya katkı malzemesi olarak, toksik kirleticilerin adsorbanı olarak ve kirlenmiş topraklarda ağır metallerin ve metaloidlerin yerinde sabitlenmesi için bir düzenleyici olarak önerilmektedir (Rubinos ve Barral, 2013). Bununla birlikte, kırmızı çamurun yüksek alkalinitesi, güvenli ve çevreye duyarlı bir şekilde verimli kullanımının önünde önemli bir engel olmaya devam etmektedir (Rai vd., 2012).

2.3.1. Yeniden kullanımın önündeki başlıca engeller

Teknik olarak başarılı olduğu tespit edilen kullanımların ticari uygulamasını değerlendirirken, görünüşte sağlam ve ekonomik çözümlerin uygulanmasının önündeki engelleri göz önünde bulundurmamak önemlidir. Herhangi bir uygulamada kırmızı çamurun yerini alacağı malzemeler genellikle kolay bulunan ve ucuza temin edilebilen malzemeler olabilir. Bu nedenle uygulamadaki herhangi bir olumsuz özellik, değişimin önündeki potansiyel engel olacaktır. Evans (2016), kırmızı çamur için dikkate alınması gereken bazı önemli risk faktörlerini aşağıdaki gibi açıklamıştır:

Ağır metallerin sızması: Metallerin, özellikle ağır metallerin çevreye sızması, yapı ürünlerinde, tuğlalarda, yollarda, inşaatlarda, toprak kaplamada veya toprak iyileştirmede kullanılan herhangi bir malzeme için önemli bir konudur. Çözünür krom normalde en çok endişe duyulan elementtir, ancak arsenik bazı özel atıklar için de bir sorun olabilir. Bu genellikle malzemenin çok yüksek veya düşük pH değerlerine maruz kaldığında ortaya çıkan bir sorundur. Kırmızı çamurun kullanımda bir sorun olmayacağını

göstermek için yapılan uygulamaya bağlı olarak, bileşenlerin çözünürlük/ekstraksiyon testleri gerekli olabilir.

Radyoaktivite: Çoğu boksit cevheri, çok düşük seviyelerde uranyum ve toryum gibi radyoaktif elementler içermekte ve Bayer prosesi sonucu ortaya çıkan kırmızı çamur atığında bu radyoaktif elementlerin varlığı iki katına çıkmaktadır. Genel olarak, radyoaktiviteden kaynaklanan riski değerlendirmek için iki yaklaşım kullanılmaktadır: radyoaktiviteye yol açabilecek elementlerin (Ac, At, Bi, Pa, Pb, Po, Ra, Th, Tl, U) ölçümü ve ardından bir radyoaktivite değerinin hesaplanması veya doğrudan ölçüm. Dünya geneli farklı kırmızı çamur örnekleri üzerinde, radyoaktivite seviyeleri hakkında yapılan çalışmalarda, sonuçların kabul edilebilir ve yasal sınırların altında kaldığı görülmektedir.

Alkalinite: Yüksek pH, hem sağlık hem de çevre açısından belirli bir uygulamada potansiyel bir sorun olarak ortaya çıkabilir. Bir dizi standart test kriterine dayanarak, pH değeri 11,5'in üzerinde olan herhangi bir atık malzeme genellikle tehlikeli olarak kabul edilir. Nötralizasyon işleminin uygulanması, kırmızı çamurun pH'ını cilt ve göz tahrişini önleyecek bir seviyeye düşürebilir.

Nem Seviyesi: Yüksek nem seviyesi, nakliye maliyetlerini yükseltir ve nemin kurutma veya fırınlamada ile uzaklaştırılması için enerji harcanması gerektiğinden önemli bir sorun olabilmektedir. Bu nedenle kırmızı çamurun mümkün olduğunca yüksek bir katı içeriğine sahip olması avantaj olacaktır.

Taşıma Maliyetleri: Nakliye sırasında özel prosedürlerin uygulanması gerektiğinden, malzeme tehlikeli olarak sınıflandırılırsa lojistik maliyeti çok önemli ölçüde artar. Dönüşüm veya kullanım alümina rafinerisinde gerçekleştirilmezse, kırmızı çamur diğer bazı düşük maliyetli cevher, mineral veya atıklarla rekabet etmek zorunda kalacaktır. Bu nedenle nakliye maliyetlerini mümkün olduğunca düşük seviyeye indirmek çok önemlidir. Kırmızı çamurun başka bir alana pompalanması ve işlenmesi, susuzlaştırma yöntemleri ve güneş enerjisiyle kurutma gibi tüm hafifletici işlemler dikkate alınmalıdır.

2.3.2. Alkalitenin azaltılması için uygulanan çeşitli nötralizasyon yöntemleri

Kırmızı çamur, yüksek pH aralıklarına sahip kostik bir madde olması nedeniyle bertaraf alanlarının yakınında bulunan tüm yaşam ve ekosistemler için zararlıdır. Bu olumsuz özelliği, kırmızı çamurun yeniden kullanılması noktasında en büyük endişelerden biri olarak da değerlendirilmektedir. Bu nedenle kırmızı çamurun kontaminasyon riskini azaltmak son derece önemlidir ve birçok araştırma projesi kırmızı çamurun bu olumsuz etkisini azaltmanın yollarını araştırmaktadır. Bu çalışmaların çoğu kırmızı çamurun pH'ını kısmen veya tamamen nötralize etmeye yönelik yapılan araştırmalardır (Rai vd., 2017). Kırmızı çamurun pH'ını 9 veya daha az bir değere düşürmek, oluşturacağı çevresel riski önemli ölçüde azaltacaktır (Hanahan vd., 2004).

Kırmızı çamurun nötralizasyonu için birçok farklı yöntem uygulanmaktadır (Rai vd., 2012). Bunlar asit ile muamele, termal aktivasyon, deniz suyu veya tuzlu su ile yıkama, alçı taşı ilavesi, CO₂ ayırma ve çeşitli biyoremediasyon yöntemleridir (Taneez ve Hurel, 2019).

Asit ile nötralizasyon yönteminde, kırmızı çamur HCl, HNO₃ gibi çeşitli sulu asidik çözeltilerle karıştırılmaktadır. Asit çözeltisinin konsantrasyonu, katı-sıvı karışım oranı, karıştırma süresi ve sıcaklığı, adsorbanın nihai performansını etkileyen faktörlerdir (Wang ve Liu, 2021). Asit liçi, etkili bir dealkalizasyon yöntemi olarak kabul edilebilir ve daha yüksek asit konsantrasyonlarının daha yüksek çözünme verimliliği ile sonuçlandığı konusunda genel bir anlayış da bulunmaktadır. Ancak kırmızı çamuru tamamen nötralize etmek için genellikle büyük miktarda asit gerekeceğinden nispeten maliyeti yüksek bir uygulamadır. Ayrıca yüksek konsantrasyonlu asitlerin aşındırıcı etkisini de göz önünde bulundurmak gerekmektedir (Hu vd., 2020). Bunların dışında atık asitlerin kullanımı da araştırılan yöntemlerdendir. Yeterince büyük miktarlarda atık asitin olması halinde, oldukça ucuz çözümler sağlanabilir (Rai vd., 2017).

Termal aktivasyon yönteminde, kırmızı çamur deiyonize su ile iyice yıkanır ve ardından 200, 500, 600, 700, 800, 900 ve 1000 °C gibi çeşitli sıcaklıklarda elektrikli bir fırında farklı sürelerde (1-3 saat) kalsine edilir. Isıl işlem, organik ve kararsız

bileşikleri yok eder ve suyu mineral fazlardan çıkarır (Taneez ve Hurel, 2019). Bu yöntemde sıcaklık ve kalsinasyon süresi, adsorpsiyon performansını etkileyen en önemli faktörlerdir. Bu yöntemde yüksek sıcaklıkların kullanılması büyük miktarda enerji gerektirir. Bu nedenle, enerji tüketimi açısından, genel ekonomik fayda göz önüne alınarak kırmızı çamurun nötralizasyonu için bu yöntem pek önerilmemektedir (Wang ve Liu, 2021).

Deniz suyu nötralizasyonu, kırmızı çamura deniz suyu veya diğer Ca ve Mg bakımından zengin tuzlu suların (örneğin tuz gölü tuzlu suları) eklenmesiyle, karışımın pH'ının düşürülmesi ve hidroksit, karbonat veya hidrosikarbonat minerallerinin çökmesini sağlayan bir yöntemdir. Deniz suyunun kullanımı pH'ı 8,5 ila 8,8 aralığına düşürebilir ve kırmızı çamurun yüzey alanını yaklaşık 30 m²/g'ye kadar iyileştirebilir (Hanahan vd., 2004; Rai vd., 2013) Deniz suyu nötralizasyonu, hidroksiti sistemden uzaklaştırmaz, ancak kolayca çözünür, güçlü alkali atıkları daha az çözünür zayıf alkali katılara dönüştürür. Atığın karbonat ve bikarbonat alkalinitesi, esas olarak aragonit ve kalsit oluşturmak için kalsiyum ile reaksiyona sokularak uzaklaştırılır. Deniz suyu nötralizasyonu, kırmızı çamuru kostik olmayan hale getirir, ancak asit nötralize etme kapasitesini azaltmaz. Bu, kırmızı çamurun daha fazla kimyasal işleme gerek kalmadan kullanılmasına izin verir. Ayrıca, nötralizasyon işleminden çıkan deniz suyunun, alıcı deniz ortamı üzerinde çok az olumsuz etkisinin olduğu görülmüştür (Rai vd., 2017).

Kırmızı çamur, alçı gibi çözünür bir kalsiyum kaynağı kullanılarak nötralize edilebilmektedir. %5 ila %8 oranında alçı ilavesi, hidroksil, hidroksoalüminat ve karbonat iyonlarının Ca(OH)₂, trikalsiyum alüminat (TCA), hidrokalümit ve CaCO₃ olarak çökmesini sağlayarak kırmızı çamurun pH'ını 8.5'lere kadar düşürmektedir (Gräfe vd., 2011; Burke vd., 2013; Taneez ve Hurel, 2019).

Atmosferik karbondioksit veya endüstriyel emisyonlardan kaynaklanan karbondioksit, kırmızı çamuru nötralize etmek için önemli bir asit kaynağı olabilir. Bu yöntemde gaz fazındaki CO₂ veya CO₂ içeren baca gazı, sulu bulamaçlarla köpürtülerek sulu fazda karbonik asit oluşturulmaktadır. Oluşturulan karbonik asit, kırmızı çamurun bazik bileşenleri ile tepkimeye girerek pH'ın düşürülmesi sağlanmaktadır. Karbondioksiti yakalama ve kırmızı çamurla karıştırma işlemi, atmosfere salınacak olan büyük

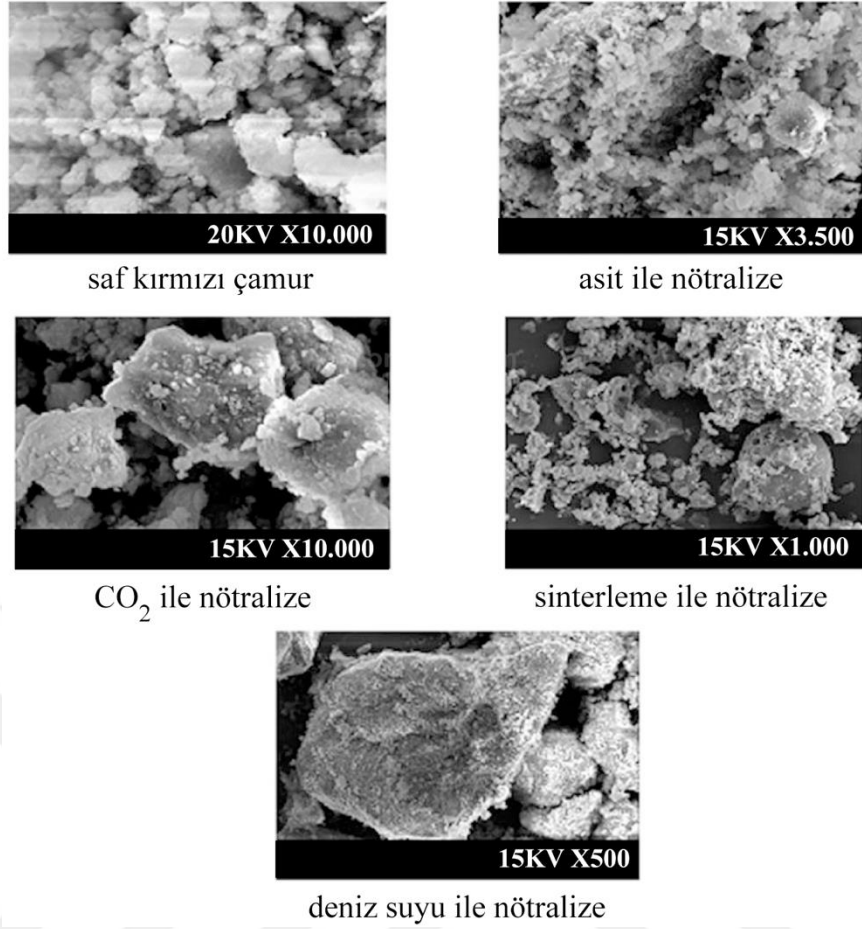
miktarlarda sera gazını da hapsedebilir (Rai vd., 2017; Tanez ve Hurel, 2019; Wang ve Liu, 2021).

Mikrobiyal nötralizasyon yönteminde, nötralizasyon için bakteriler (Bacillus, Lactobacillus, Leuconostoc, Micricoccus, Staphylococcus, Pseudomonas, Flavobacterium ve Endobacter) ve mantarlar (Aspergillus tubingensis) kullanılmaktadır. Bu yöntemde mikroorganizmalar tarafından salınan organik asitlerle kırmızı çamurun bazı bileşenlerinin tepkimeye girmesiyle sağlanmaktadır (Gräfe vd., 2011; Tanez ve Hurel, 2019)

Kırmızı çamurun dealkalizasyonu için su ile yıkama da kullanılabilir bir yöntemdir. Bu işlemde, kırmızı çamurdan sadece serbest alkali çözünür. Su ile yıkama reaktif tüketmediği için ucuzdur; ancak tekrarlanan dealkalizasyon ve uzun süreli yıkama gerektirdiği için zaman alıcıdır (Hu vd., 2020).

2.3.3. Nötralizasyon işleminin kırmızı çamurun fiziksel özellikleri üzerine etkisi

Tüm nötralizasyon yöntemleri sonucu, alümina, demir, silika, titanyum ve kalsiyumun hemen hemen aynı kaldığı, ancak kırmızı çamurdaki toplam sodyumun yaklaşık %25-30'unun azaldığı görülmektedir. Bu, serbest sodyum hidroksitinin neredeyse tamamının nötralize edildiği anlamına gelir (Rai vd., 2012). Nötralizasyon işlemi sonucu kırmızı çamurda topaklaşmanın oluşumu, Şekil 2.9'da verilen SEM analizi sonuçlarında görülmektedir (Rai vd., 2017).



Şekil 2.9. Farklı yöntemlerle nötrale edilen kırmızı çamurun SEM analiz sonuçları (Rai vd., 2017)

Şekil 2.9’da işlenmemiş kırmızı çamurun morfolojik yapısının, yaklaşık 1 mikron boyutunda dağınık ince parçacıklardan oluştuğu görülmektedir. Deniz suyu hariç tüm nötralizasyon yöntemleri sonucunda yaklaşık 10-20 mikron büyüklüğünde küçük aglomerlar gözlenmektedir. Deniz suyu nötralizasyonunda ise çok daha büyük aglomerlar görülmektedir (80-100 mikron). Altıgen morfolojik yapı, deniz suyu ile nötralizasyon işlemi sırasında oluşan çökelmiş ve sıkışmış brusit ve hidrotalsit nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Aglomerların oluşumu, kırmızı çamurun fiziksel özelliklerini iyileştirir, viskozitesini azaltır ve sonuçta kırmızı çamurun daha iyi çökmesine ve filtrelenebilme özelliğinin gelişmesine neden olur. Asitleme likörü atıkları ile nötrale edilmiş kırmızı çamurun morfolojik yapısında, alt açısız demir ve titanyum parçaları içeren topaklaşmalar görülmektedir. Bloklü, küçük ve pürüzsüz yapılar sodalittir. Aglomerlar çoğunlukla yaklaşık 10 mikron büyüklüğünde olan ve demir, alümina ve sodalit mineralleri içeren küçük parçacıklardan oluşmaktadır. SEM analizi esas olarak, kristal yapıda tıkanmış serbest sodyum hidroksitin

nötralizasyonundan kaynaklanan aglomeraların gözenekli yapısını gösterir ve bu gözenekli yapı, nötralize edilmiş kırmızı çamurun bir adsorban olarak kullanılabileceğini açıklar. Sodyum alüminosilikatların oluşumu nedeniyle şekillenen pürüzsüz bir yüzeye sahip küresel parçacıklar sinterlenmiş kırmızı çamurda görülmektedir (Rai vd., 2012; Rai vd., 2017).

2.3.4. Kırmızı Çamurdan Metallerin Geri Kazanılması

Kırmızı çamurun bünyesinde alüminyum, demir ve titanyum gibi ana bileşenlerin yanında ayrıca nadir toprak elementleri de bulunmaktadır. Kırmızı çamurdaki nadir elementlerin konsantrasyonu, boksit cevherinden yaklaşık 2 kat daha fazladır. Bu nedenle kırmızı çamurdan metallerin geri kazanılması, araştırmacıların dikkatini çeken ve oldukça başarılı çalışmaların ortaya çıktığı bir konu olmakla birlikte, son yıllarda ilginin bu elementlerin geri kazanımında ekonomik ve verimli yöntemlerin geliştirilmesine doğru kaydığı görülmektedir (Deady vd., 2016; Ünal, 2021). Kırmızı çamurdaki ana bileşenlerin kırmızı çamurdan uzaklaştırılması, depolanan toplam kırmızı çamur miktarını etkili bir şekilde azaltacaktır (Kır, 2002). Çengelöglü vd. (2001) Donnan diyaliz koşulları altında Al(III), Fe(III), Ti(IV) ve Na(I) iyonlarının yüklü polisülfonatlı membrandan taşınmasını, oda sıcaklığında HCl konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda metallerin taşınmasının HCl konsantrasyonundan etkilendiğini ve alıcı fazda H iyon konsantrasyonu ile iyon akısının arttığını açıklamışlardır.

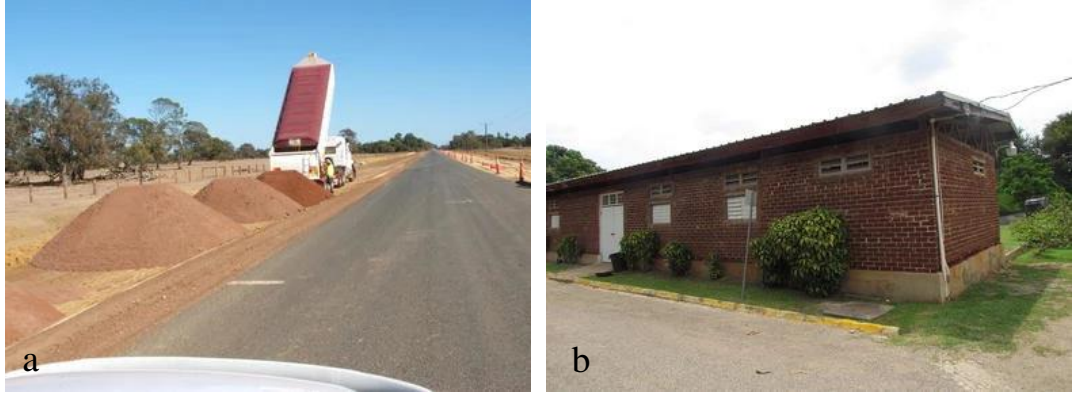
Kırmızı çamurda demir bileşeninden daha az miktarda bulunan titanyum, ekstraksiyon potansiyeli olan başka bir metaldir. Bunun nedeni, titanyumun daha zor bir üretim sürecine sahip pahalı bir metal olmasıdır. Titanyum bakımından zengin cevherler doğada demire kıyasla çok daha az bulunur, bu da kırmızı çamurdan mineral işleme yoluyla titanyum elde etmeyi daha çekici hale getirmektedir (Archambo ve Kawatra, 2021). Kır (2002) kırmızı çamur bünyesindeki demir ve titanyumun ayırmanın zor olduğunu ve bu nedenle ayırma işleminin uygulanabilir olması gerektiğini açıklamıştır. Bu amaçla yaptığı çalışmada, çözeltiye alınan kırmızı çamur bileşenlerini farklı deney şartlarında, farklı membranlarla geri kazanmayı ve ayırmayı; şelatlaştırıcıların ilavesiyle, şelatlaşmış halin farklı katyon ve anyon değiştiricilerde deneyerek şelatlaştırıcıların ayırmaya etkisini araştırmıştır. Çalışma sonucunda, şelatlaştırmanın

kırmızı çamur çözeltilisindeki metallerin ayrılmasında etkili olduğunu ve şelatlaştırılan kırmızı çamur çözeltilisinin farklı anyon değiştirici membranlarda taşınması ile, anyon değiştiriciden demirin geçtiğini ancak diğer metallerin tutulduğunu açıklamıştır.

Periyodik tabloda atom numaraları 57'den 71'e kadar olan element grubu, nadir toprak elementleri olarak kabul edilmektedir. Bu elementlerin haricinde Skandiyum ve İtiryum kimyasal özelliklerindeki benzerlikler nedeniyle bu kategoriye dahil edilmektedir. Nadir toprak elementleri birçok yeni ve gelişmekte olan teknolojiye (elektronik, tıp, teknoloji ve enerji gibi) yaygın olarak uygulanmakta ve son yıllarda üretim ve kullanımlarında büyük bir talep patlaması yaşanmaktadır. Ancak bu elementleri bulmak ve çıkarmak zor ve pahalıdır. Çünkü yer kabuğunda çok düşük oranlarda ve dağınık olarak bulunurlar. Bu elementlerin en çok olduğu yerler ise alkali magmatik oluşumlar ve aşırı ayrışma sonucu oluşan tortulardır. Kırmızı çamur, nadir toprak elementleri için umut verici bir kaynaktır. Ancak farklı kırmızı çamur kaynaklarındaki nadir toprak elementlerinin çeşidi ve miktarı değişiklik göstermektedir (Archambo ve Kawatra, 2021). Borra vd. (2015) nadir toprak elementlerinin HCl ve HNO₃ ile ekstraksiyonunu araştırdıkları çalışmada, asit tipi ve konsantrasyonu, liç süresi, sıvı-katı oranı ve sıcaklık gibi farklı parametrelerin etkisi incelemiştir.

2.4. Kırmızı Çamurun Yeniden Kullanımı İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Bir asırdan fazla süren kullanım çabalarına, 1200'den fazla patente ve yüzlerce teknik açıdan başarılı denemelere rağmen, yılda üretilen 150 milyon ton kırmızı çamurun yalnızca 4 milyon tondan azı verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Kırmızı çamurun yıllık tahmini kullanım miktarları çimento endüstrisi için 0,5-1,5 milyon ton, demir ve çelik endüstrisi için 0,2-1,5 milyon ton, yol altı dolgu tabakaları için 0,2-0,5 milyon ton ve diğer refraktör, adsorban, asit maden drenajı gibi çalışmalar için 0,3 milyon tondur. Şekil 2.10'da kırmızı çamurun çeşitli kullanım alanlarına örnekler görülmektedir (Evans, 2016).



Şekil 2.10. Kırmızı çamurun (a) yol dolgusu olarak ve (b) tuğla üretiminde kullanımı (Evans, 2016)

2.4.1. Çimento, beton ve demir çelik üretiminde kullanımı ile ilgili araştırmalar

Kırmızı çamur içeriğindeki demir ve alümina bileşenleri sayesinde, Portland çimentosu üretiminde, klinker üretimi sürecine dahil edilebilir. Çimento üretiminde kırmızı çamurun kullanılması, çimento klinkeri için doğal kaynak tasarrufu sağlamak ve nihayetinde çimento üretim maliyetini düşürmek gibi çevre ve ekonomi açısından birçok fayda sağlar. Ayrıca çimento üretiminde meydana gelen karbondioksit salınımında önemli ölçüde düşüş sağlanır (Liu ve Zhang, 2011). Wang vd. (2019) kalsifikasyon-karbonizasyon işlemi yoluyla yapılandırılmış yeni bir tür kırmızı çamurdan çimento klinkeri üretmeyi başarmışlardır. Bu ürettikleri yeni malzemenin mineral dönüşümünü, mikromorfolojisini, kimyasal bileşimini, CaO içeriğini ve çeşitli mukavemet özelliklerini araştırmışlar ve sonuçların Çin ulusal standartlarını karşıladığını rapor etmişlerdir. Yine başka bir çalışmada (Hertel vd., 2021) Fe bakımından zengin kalsiyumsülfoalüminat-ferrit çimentolarının (CSAF) üretiminde ağırlıkça %35 kırmızı çamurun kullanımı araştırılmıştır.

Bu uygulamaların haricinde, harç veya beton karışımlarında katkı malzemesi olarak kullanımı ile betonun dayanıklılık özelliklerini de iyileştirmektedir (Liu ve Zhang, 2011). Tang vd. (2019) kendiliğinden yerleşen betonun taze ve sertleşme sonrası özellikleri üzerine kırmızı çamurun etkisini inceledikleri çalışmada, betonun bileşeni olan uçucu kül yerine ikame ettikleri kırmızı çamurun oranının artması ile betonun mekanik özelliklerinde artış sağlandığını açıklamışlardır. Anirudh vd. (2021), çalışmalarında çimento harcının mekanik ve yoğunluk özelliklerine farklı oranlarda kırmızı çamur ilavesinin etkisini inceledikleri çalışmada, çimentoya %10 kırmızı

çamur eklenmesinin en iyi performansı gösterdiğini, harcın bu oranda en yüksek mukavemet değerini kazandığını ve kırmızı çamur katkılı numunelerin normal çimento harcından daha yoğun olduğunu vurgulamışlardır.

Demir cevheri kaynakları hızlı bir şekilde tüketilmekte ve bu da yüksek kaliteli demir cevheri stoklarının azalmasına yol açmaktadır. Bu nedenle mevcut eğilim düşük dereceli demir cevherlerinin kullanımına doğru kaymaktadır. Kırmızı çamur içeriğindeki demir oranı % (27-47) geleneksel demir cevherlerine kıyasla (%60 üstü) düşük olduğu için demir-çelik üretiminde rekabetçi hammadde olarak kabul edilmemektedir. Fe içeriği %65'in üzerinde olan demir cevherleri yüksek tenörlü cevherler, %62-64 orta tenörlü cevherler ve %58'in altındakiler düşük tenörlü cevherler olarak kabul edilmektedir. Ham demir cevherlerinin bilinen dünya kaynakları yaklaşık 800 milyar tondur ve bu yatakların çoğu, demir içeriği %30'dan daha az olan düşük dereceli cevherler içermektedir. Nispeten düşük konsantrasyonlarda demir içeriği ile kırmızı çamur, düşük dereceli bir demir cevheri olarak kabul edilebilir. Bununla birlikte ince parçacık boyutları, yüksek nem ve alkali içeriği ve büyük miktarlarda kırmızı çamurun uzak yerlere taşınmasının zorluğu ve nakliye maliyeti gibi önemli dezavantajları da bulunmaktadır. Bu nedenle, ticari ölçekte demir geri kazanımının, kırmızı çamur kaynağının yakınında gerçekleştirilmesi gerekir (Evans, 2016; Khanna vd., 2022).

2.4.2. Yapı malzemesi olarak kullanımı ile ilgili araştırmalar

Pişkin vd. (2013), Gürallar kiremit fabrikasında endüstriyel uygulamada kullanılan standart kiremit karışımına %2, %4 ve %6 oranında kırmızı çamur ekleyerek hazırladıkları numuneleri 900°, 940°, 980° ve 1020°C 'de sinterleyerek yeni kiremitler üretmişlerdir. Basınç deneyleri sonucunda, kırmızı çamur oranı ve sinterleme sıcaklığının artması ile kiremitlerin basınç dayanımlarının arttığını ve en yüksek basınç dayanımını %6 kırmızı çamur katkılı numunenin sağladığını rapor etmişlerdir.

Dodoo-Arthin vd. (2013) Gana kaynaklı kırmızı çamuru çeşitli oranlarda kil ile karıştırarak ve farklı sıcaklıklarda sinterleyerek çeşitli kompozit tuğlalar üretmişler ve bu yeni tuğlaların fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda mekanik dayanımın daha yüksek sinterleme sıcaklığı ile arttığını ve

üretilen tuğlaların düşük maliyetli, çevre dostu ticari tuğlalarla rekabet edebilecek potansiyele sahip olduğunu açıklamışlardır.

Xu vd. (2019) farklı kaynaklardan temin edilmiş dört farklı kırmızı çamuru ağırlıkça % 40 oranında kullanarak karo plak üretmeyi başarmışlar ve bu karo plakların mekanik özelliklerin Çin ulusal standartlar uyarınca seramik karolar için hammadde olarak kullanılmaya uygun olduğunu ve özellikle radyoaktif inceleme sonuçlarına göre, dört kırmızı çamurun, II. sınıf sivil binaların iç yüzeyi ve binaların dış yüzeyi için kullanılabilir malzemeler olduğunu açıklamışlardır.

Wang vd. (2020) kırmızı çamur, kaolin kili ve düşük sıcaklıkta mullit kristallerinin oluşumunu teşvik etmek için katalizör olarak kullandıkları AlF_3 ve V_2O_5 ile çeşitli yüzey morfolojilerine sahip seramik yer karolarını üretmeyi başarmışlar ve bu malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin, sinterleme sıcaklığı ve karışımın içeriğine göre etkisini incelemişlerdir.

Song vd. (2022) otoklav gaz beton üretiminde uçucu kül yerine kırmızı çamur kullanımını araştırdıkları çalışmalarında, farklı otoklav sıcaklıkları ve kırmızı çamur içeriklerinin, gaz beton numunelerin mukavemeti üzerine etkisini açıklamışlardır.

Carneiro vd. (2018) seramik sırları için renklendirici madde olarak araştırdıkları kırmızı çamuru farklı sıcaklıklarda sinterledikten sonra elde edilen tozları başarılı şekilde sırlara eklemiş ve hematit pigmenti için uygun bir ikame olarak sunmuşlardır.

2.4.3. Geopolimer üretimi ile ilgili araştırmalar

Geopolimerler, alkali ortamda oluşan alümino-silikat polimerleridir. Geopolimerizasyon sürecinde, alümino-silikatlar alkali çözelti içinde çözünerek serbest SiO_4 ve AlO_4 tetrahedral birimleri oluştururlar. Daha sonra bu SiO_4 ve AlO_4 tetrahedral birimler, alkali metal katyonları tarafından sağlanan yük dengesi katyonları ile değişimli olarak bağlanır ve tüm oksijen atomlarını iki dörtgen birim arasında paylaşarak monolitik geopolimer ürünlerini veren polimerik öncüller oluştururlar (Kumar ve Kumar, 2013). Geopolimerler, yüksek mukavemet, düşük geçirgenlik, yangın ve korozyon direnci gibi mükemmel özellikleri nedeniyle yoğun ilgi gören bir

tür inorganik alüminosilikat malzemelerdir. Geopolimerler ayrıca geleneksel inşaat malzemeleri için potansiyel ikame malzemeler olarak kabul edilmektedir. Geçmişte metakaolin ile alkali aktivasyon yöntemi kullanılarak üretilen geopolimerler, günümüzde uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve kırmızı çamur gibi birçok alternatif atık malzeme kullanılarak üretilmektedir (Kaya ve Soyer-Uzun, 2016). Bu nedenle kırmızı çamuru kullanabilme potansiyeline sahip gelecek vaat eden alanlardan biri de geopolimer teknolojisidir. Bu potansiyel temel olarak iki sebebe dayanmaktadır: (a) kırmızı çamurun geopolimerizasyon için arzu edilen Al_2O_3 , SiO_2 ve kostik soda gibi bileşenleri içermesi; (b) geopolimerlerin toksik maddelerin stabilizasyonu için etkili bir bağlayıcı olması nedeniyle kırmızı çamur içeriğindeki metallerin sızmasını engelleyen çevreci yaklaşımları taşımasıdır (Geng vd., 2016).

Li vd. (2019) kırmızı çamur bazlı geopolimer malzemeler (RGM) hazırlamak için belediye katı atık yakma uçucu külü (MSWIFA) ve kırmızı çamuru kullandıkları çalışmada kırmızı çamuru aktive etmek için yeni bir yöntem (mekanik aktivasyon) önermişlerdir. Çalışmalar sonucunda, mekanik aktivasyonun sadece kırmızı çamuru etkili bir şekilde aktive etmekle kalmayıp, aynı zamanda MSWIFA ve kırmızı çamurun reaksiyonunu da etkili bir şekilde iyileştirdiğini ve donma-çözülme döngüleri, basınç deneyi sonuçları ayrıca RGM'nin uzun vadeli stabiliteye sahip olduğunu ve özelliklerin uçucu kül tuğlalarının gereksinimlerini karşıladığını açıklamışlardır.

Singh vd. (2020) kırmızı çamur esaslı geopolimer tuğlaların strüktürel uygulamalar için kullanılmasının fizibilitesini değerlendirdiği çalışmada, granül yüksek fırın cürufunu döküm tuğlalarda kumun kısmi ikamesi olarak kullanmışlar ve üretilen tuğlaların mekanik özelliklerine göre optimum kırmızı çamur yüzdesini %30 olarak belirlemişlerdir.

Wang vd. (2022) yeraltı mühendisliği inşaatında zemin enjeksiyon malzemesi olarak kullanılan kırmızı çamur esaslı geopolimer harcın özelliklerini geliştirmek için, harcı polipropilen, cam ve bazalt lifleri ile güçlendirmeyi amaçladıkları çalışmada, liflerin geopolimer harçlar üzerindeki etkilerini incelemiş ve sonucunda kırmızı çamur esaslı derzlerin akma gerilmesinin lif içeriği ile arttığını belirlemişlerdir. Polipropilen, cam ve bazalt liflerinin eklenmesi, harçların mekanik mukavemetini sırasıyla %27,5, %32,6 ve %27,3 oranında ve eğilme mukavemetini sırasıyla %16,07, %30,35 ve

%35,36 oranında artırmıştır. Ayrıca, tüm elyaf takviyeli kırmızı çamur bazlı harçlar, daha yüksek elastik modül ve düşük gözeneklilik sergilemiştir. Derzlerin mikroyapısal analizi, lifler ve geopolimerik bağlayıcı arasında etkili bir arayüzey bağı olduğunu ortaya çıkarmıştır.

2.4.4. Yol altı dolgusu olarak kullanımı ile ilgili araştırmalar

Mukiza vd. (2019) çalışmalarında kırmızı çamurun yol inşasında yol alt zemin malzemesi, yol temel malzemesi veya zayıf alt zeminler için potansiyel bir stabilizatör olarak kullanılmasını gözden geçirmişlerdir. Çalışma sonucunda kırmızı çamurun fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin bu amaçlar için kullanılabilir olduğunu vurgulamışlardır.

Nigam vd. (2023) kırmızı çamurun yol altyapısında alt temel ve temel dolgu malzemesi olarak potansiyel uygulamasını araştırdıkları çalışmada öncelikle kırmızı çamurun temel geoteknik özellikleri belirlenmiş ve sonrasında özelliklerini iyileştirmek için %3 ila %9 aralığında çimento ile stabilize edilmiştir. Stabilize kırmızı çamurun basınç ve dayanıklılık özelliklerini belirlemişlerdir. Deneyler sonucunda kırmızı çamurun ince taneli silt boyutunda bir malzeme olduğunu ve geoteknik özelliklerinin geleneksel siltli zemine benzediğini açıklamıştır. Dayanıklılık özellikleri, çimento ile stabilize edilmiş kırmızı çamurun yol altyapısının alt tabaka ve temel tabakalarının inşası için uygun olduğu rapor edilmiştir.

Samantasinghar ve Singh (2023) çalışmalarında karayolları için bir yapı malzemesi olarak uygunluğunu değerlendirmek üzere öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu ile işlenmiş kırmızı çamurun fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerini incelemişlerdir. Geopolimerizasyon sürecini hızlandırmak için ek dozlarda alkali aktivatör kullanılmış ve geopolimerizasyon ürünlerinin tanımlanması için mineralojik ve mikroyapısal analizler yapılmıştır. En yüksek mukavemeti yakalamak üzere optimum cüruf ve alkali dozunu bulmak için bir optimizasyon tekniği uygulanmıştır. Stabilize edilmiş kırmızı çamurun dayanıklılığı, söndürme sıvısı altında değerlendirilmiştir. Majör ve eser elementlerin seviyelerini incelemek için kaynak malzemeler ve stabilize malzemeler üzerinde sızıntı suyu analizleri yapılmıştır. Kırmızı çamurda bulunan alkalinin cüruf ilavesi ile geopolimerizasyon reaksiyonunu başlatabildiği gözlenmiştir. Stabilize

kırmızı çamurun iyi bir mukavemete sahip olduğu, stabilizasyondan sonra alkalitenin azaldığı ve ağır metallerin geopolimerik reaksiyon ürünleri tarafından kapsülendiği açıklanmıştır.

2.4.5. Geoteknik çalışmalarda kullanımı ile ilgili araştırmalar

Literatürde kırmızı çamurun geoteknik alanda kullanımı ile ilgili yapılan çalışmaların çoğu, kırmızı çamurun bazı iyileştirme işlemlerinden geçirilmesi ile çevreye olumsuz etkilere neden olmayan potansiyel bir geoteknik malzeme olarak kullanılabilceğini göstermektedir. Boksit kaynağına göre özelliklerinde bazı değişiklikler sergilemesine rağmen kırmızı çamur genellikle ince taneli yapısı, diğer doğal ve atık malzemelere kıyasla düşük büzülme davranışı sergilemesi, zayıf kristalli veya amorf fazların varlığı sonucu kısmi puzolanik malzeme davranışı sergilemesi ve kuma yakın sürtünme açısına sahip olması gibi özellikleri ile bilinmektedir (Reddy vd., 2021).

Kalkan (2006) kırmızı çamurun katkı olarak doğal kil şiltelerin geoteknik özellikleri üzerine etkilerini incelemiştir. Çalışmanın temel amaçları: (a) geoteknik alanda kırmızı çamur için farklı kullanım alanları geliştirmek, (b) kil şiltenin modifikasyonu için yeni bir yan ürün geliştirmek, (c) kırmızı çamurun kompozit kil şiltelerin basınç dayanımı, hidrolik iletkenlik ve şişme yüzdesi üzerindeki etkilerini belirlemek. Bu amaçlara ulaşmak için, doğal kil malzemeye farklı içeriklere sahip kırmızı çamur ve çimento-kırmızı çamur katkıları ekleyerek geoteknik özelliklerini araştırmış ve deneyler sonucunda, kırmızı çamurun geoteknik uygulamalarda amaçlanan hedefleri başarıyla sağladığını açıklamıştır.

Sridevi vd. (2019) şişen zeminlerin stabilizasyonunda kırmızı çamur ve kirecin etkisini incelemişler ve kırmızı çamurun yanı sıra kırmızı çamur-uçucu külün zeminin geoteknik özelliklerini iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Acharya (2020) şişme özelliği yüksek zayıf zeminlerin kırmızı çamur ile güçlendirilmesi üzerine yaptığı çalışmada, farklı yüzdelerde zemin-kırmızı çamur karışımları için kompaksiyon serbest basınç ve CBR deneyleri ile kırmızı çamurun şişen zemin davranışı üzerindeki etkisini incelemiş ve kırmızı çamurun kaldırım alt temelleri için ve binaların altında temel destekleyici katman olarak kullanılabilceğini açıklamıştır. Bandopadhyay ve Giri (2023) kırmızı çamur ve fosfojips ile CH sınıfı zemin malzemesini ML sınıfı zemin malzemesine

dönüştürmeyi başarmışlardır. Optimum katkı oranında, maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevastaki artışın nedenini kırmızı çamurun metal içeriğe sahip olması; zemin sınıfının CH'den ML'ye dönüşmesini ise kırmızı çamurun silt parçacıklarının varlığı sebep gösterilmiştir. Ayrıca zeminin şişme özelliğinin iyileştiği, CBR değerinin yükseldiği ve hidrolük iletkenliğinin yaklaşık 40 kat azaldığı ve sonuç olarak stabilize edilmiş zeminin dolgu malzemesi olarak kullanılabileceğini açıklamışlardır.

Aswathy vd. (2019) farklı oranlarda kırmızı çamur, kireç ve kil ile yaptıkları kompaksiyon, CBR ve serbest basınç deneyleri sonucu kırmızı çamur ve kirecin killerin davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda %15 oranında kırmızı çamur katkılı kil zeminin en yüksek maksimum kuru yoğunluk, serbest basınç mukavemeti ve CBR değerlerini sağladığı ancak %2 kireç ilavesi ile %20 kırmızı çamur katkılı kil zeminin, %15 kırmızı çamur katkılı kil zeminden daha yüksek mukavemet gösterdiğini ve sonuçta kirecin varlığı ile daha fazla zeminin kırmızı çamurla değiştirilebildiğini belirtmişlerdir.

Çağlar (2019) stabilizatör olarak atık kırmızı çamur ve atık uçucu kül kullanarak laboratuvar koşullarında hazırladığı kaolinit ve bentonit karışımı ile hazırladığı şişme özelliği yüksek zemin malzemesi üzerindeki etkisini incelemiştir. Stabilizatör olarak kullandığı kırmızı çamur ve uçucu külün şişen zemin üzerinde etkisini karşılaştırmak amacıyla, katkıları zemine farklı yüzdelerde eklemiştir. Hazırladığı numuneler üzerinde yaptığı bir dizi deney çalışmaları ile numunelerin şişme yüzdeleri, şişme oranları, drenajsız kayma mukavemetleri ve çekme mukavemetlerini değerlendirmiştir. Deneyler sonucunda kırmızı çamur, uçucu kül ve çimento ilavesi ile hazırlanan bir numunenin drenajsız kesme dayanımı değerinin 4 katına çıktığını, şişme potansiyelinin 3 kat azaldığını ve şişme oranının ise 4 kat azaldığını belirlemiştir. Çalışma sonucunda, kullanılan stabilizatörlerin şişen zeminler üzerinde oldukça etkili olduğunu belirtmiştir.

Singh vd. (2023) çalışmalarında alkali ile aktive olan kırmızı çamurun atık havuzu dolgularının inşası için dolgu malzemesi olarak uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive edilen kırmızı çamurun mekanik performansını incelemek için bir dizi serbest basınç dayanımı ve doğrudan kesme testi

gerçekleştirmişlerdir. Bunu yaparken NaOH konsantrasyonlarının, kürlenme koşullarının ve kürlenme süresinin etkisini de incelemişlerdir. Ayrıca, stabilize edilmiş kırmızı çamur numunelerinin aşırı çevre ve hava koşullarına karşı direncini incelemek için dayanıklılık testlerini gerçekleştirmişlerdir. Son olarak, alkali ile aktive edilmiş kırmızı çamurun dolgu malzemesi olarak etkinliğini, bir atık havuzu modeli üzerinde gerçekleştirilen sayısal analiz ile incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre stabilize işleminin, kırmızı çamurun basınç dayanımı, etkin sürtünme açısı ve kohezyon özelliklerini ciddi oranda yükselttiğini ve hava koşullarına karşı dayanıklılığını arttırdığını açıklamışlardır. Sayısal analiz sonuçlarına göre atık havuzunun inşası için alkali aktif kırmızı çamur kullanımının güvenlik değerleri üzerinde önemli bir artış sağladığını ve malzemenin kullanım açısından uygun olduğunu rapor etmişlerdir.

2.4.6. İnşaat sektörü dışında kullanımı ile ilgili çalışmalar

Son yıllarda birçok araştırmacı kırmızı çamuru adsorban bir malzeme olarak kullanmaya odaklanmıştır. Liang vd. (2014) çalışmalarında kırmızı çamur kullanarak florürü uzaklaştırmayı araştırmışlardır. Bu amaçla kırmızı çamuru hidroklorik, nitrik ve sülfürik asit ile aktive etmişlerdir. Asitlenen kırmızı çamur, sodyum ve alüminyumun çözeltilere salınmasının yanı sıra sodalit ve kankrinit fazlarının ayrışmasına neden olmuştur. Bu mineral fazların çözünmesi, florürün adsorpsiyonu için erişilebilir olan mevcut demir ve alüminyum oksit/hidroksit bölgelerinin miktarını arttırmıştır. Çalışmalar sonucunda florürün uzaklaştırılmasının, kırmızı çamur yüzeyindeki demir ve alüminyum oksit/hidroksitlerin yüküne bağlı olduğu ve kırmızı çamur kullanılarak sulu çözeltilerden florürün uzaklaştırılması için düşük ve tutarlı bir pH'a sahip olmanın önemli olduğunu açıklamışlardır. Deihimi vd. (2018) çalışmalarında kırmızı çamuru dört farklı şekilde (deniz suyu, Bauxsol asit, amonyak ve setrimonyum bromür ile aktive edilmiş Bauxsol asit) modifiye etmiş ve ferrisiyanür gideriminde kullanmışlardır. Sonuç olarak setrimonyum bromür ile aktive edilmiş Bauxsol asitin en yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Membran teknolojisinde kırmızı çamurun kullanımı ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Kazak vd. (2016) sulu çözeltilerden florürün uzaklaştırılması amacı ile faz ters çevirme yöntemini kullanarak kırmızı çamuru polisülfon matrisi ile kapsüllemiş ve nihayetinde kompozit kapsüller elde etmişlerdir. Başka bir çalışmada

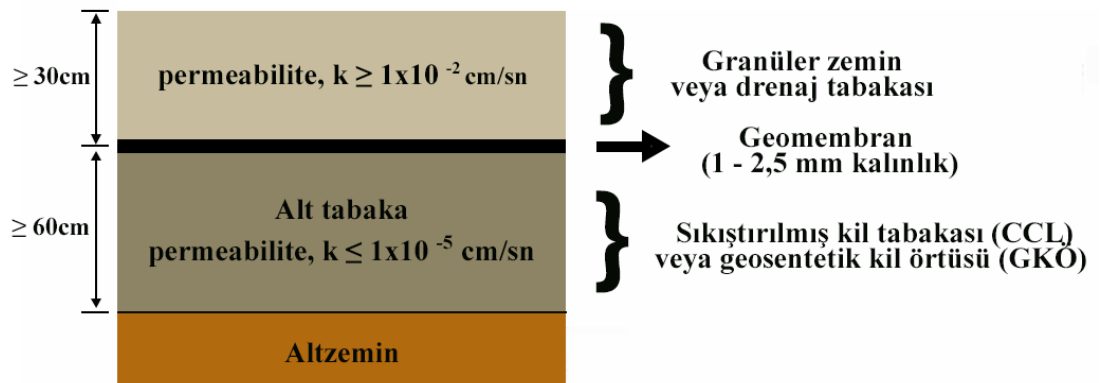
Kazak vd. (2020) kırmızı çamur katkı polisülfon boncukların pirolizi yoluyla manyetik gözenekli karbon boncuklar hazırlamış ve sudan çeşitli yağların emilim performanslarını incelemişlerdir. Çalışma sonucu, geliştirilen ürünün hidrofobik yüzeyi ve makro gözenekli yapısı sayesinde çeşitli yağları sudan başarıyla emilimini sağladığı açıklanmıştır.

Kırmızı çamur ile polimerlerden kompozit malzemelerin üretildiği birçok çalışma bulunmaktadır. Ding vd. (2022) çalışmalarında kırmızı çamur ile PVC kompozitleri ürettikleri çalışmada, kırmızı çamur yüzeyini titanat bağlayıcı ajan ile modifiye etmiş ve kırmızı çamurun karışım oranının ve kırmızı çamurun modifiye edilmesinin kompozitin performansı üzerindeki etkisini mekanik dayanım, reolojik davranış ve termal kararlılık açısından değerlendirmiş ve sonuç olarak, kırmızı çamurun PVC kompozitlerinin termal kararlılığını artırdığını ancak, kırmızı çamur oranının artması ile plastikleştirme süresi ve denge torkunun da arttığını, işleme performansının azaldığını reoloji eğrileri üzerinden açıklamışlardır. Ayrıca modifiye kırmızı çamurlu kompozitlerin mekanik dayanım ve termal kararlılıklarının daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Wu vd. (2023) kırmızı çamurun reçine kompozitlere dahil edilmesinin kompozitin özellikleri üzerindeki etkisini araştırmış ve sonucunda uygun şekilde işlenmiş kırmızı çamurun reçine kompozitlerinin mekanik, termal ve aşınma özelliklerini, kimyasal ve su direncini, sönümlenme ve radyasyondan korunma özelliklerini ve elektriksel iletkenliğini iyileştirebileceğini deneysel çalışmalarla belirlemişlerdir. Reçine kompozitlerin üretim maliyetlerini azaltmak için kırmızı çamurun geleneksel bir dolgu maddesi olarak kullanılabilmesini ve plastik ürünlerde uygulamaların yaygınlaşmasıyla birlikte metalurji endüstrisinden kaynaklanan atık miktarları ve karbondioksit emisyonlarını azaltabileceğini açıklamışlardır.

2.5. Geosentetik Bariyerler (GBR)

21. yüzyılın başlarında, GBR ve geosentetik kil örtüler (GKÖ) dahil olmak üzere geosentetik geçirimsizlik malzemeleri belediye katı atık depolama alanları ve maden atık depolama alanlarından gelen sıvı ve gazların çevreye ve zemine geçişini önlemenin birincil yolu olarak sanayileşmiş ülkelerde yer edinmiştir. Teknik özelliklerinde görülen başarılı sonuçlar, üretimlerinin yaygınlaşması ve ülkelerin ilgili standartlarında yaptıkları güncellemeler sayesinde artık bu malzemeler gelişmekte

olan ülkelerde de oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle son on yılda yapılan çalışmalarla, GBR sistemlerinin hem etkinliği hem de dayanıklılığı hakkında önemli bilgi birikimi sağlanmıştır. Bu bilgiler, uygun şekilde tasarlanmış ve tekniğine göre inşa edilmiş GBR sistemlerinin güvenle on yıllar boyunca kullanılabilmesi ve hatta yüzlerce yıl boyunca bütünlüklerini korumalarının mümkün olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, performanslarına ilişkin saha verileri yirmi ila otuz yılla sınırlıdır ve daha uzun süreler boyunca malzemedeki beklenen performans bu saha verileri ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilen dayanıklılık deneylerinin ekstrapolasyonu ile belirlenmektedir. Sanayileşmiş ülkelerde atıkların karada bertarafında bu malzemelerin kullanımı, düşük geçirgenliğe sahip zemin tabakası üzerine GBR'lerin serilmesiyle oluşan tek veya çift kompozit tabaka sistemleri ile standart uygulama haline gelmiştir. GBR'ler atıklardaki sıvı ve gazların taşınmasına karşı birincil bariyer görevi oluştururken, alttaki düşük geçirgenliğe sahip zemin tabakası ise GBR'lerde oluşabilecek kusurlar yoluyla taşınmayı azaltmak için yedek bariyer görevi sağlamaktadır (Şekil 2.11). Son yıllarda geçirimsiz bariyer sistemlerinin inşasında sıkıştırılmış düşük geçirgenlikli zemin tabakalarının yerini GKÖ'ler almaktadır. GKÖ'ler de çoğunlukla geosentetik bariyerlerle birlikte kullanılmaktadır. Ayrıca kompozit bariyer tabakalarının üzerinde yüksek geçirgenliğe sahip drenaj tabakası adı verilen sıvı toplama katmanı oluşturulmakta ve böylece geçirimsiz tabaka üzerindeki sıvı basıncının azaltılması sağlanmaktadır (Kavazanjian Jr vd., 2006).



Şekil 2.11. Tek tabakalı kompozit bariyer sistemi (Kavazanjian Jr vd., 2006)

GBR'ler nispeten ince süreklili polimerik tabakalardan yapılır ancak aynı zamanda geotekstillere asfalt, elastomer veya polimer spreyle emprenye edilmesiyle veya çok katmanlı bitümlü geokompozitler şeklinde de üretilmektedir. Ancak açık ara en

yaygın olanlar polimerik geosentetik bariyerlerdir (GBR-P). GBR-P'lerin üretiminde en yaygın kullanılan polimer grubu ise termoplastiklerdir. Termoplastikler özelliklerinde önemli bir değişiklik olmaksızın ısıtıldığında yumuşayan ve esnek hale gelen, soğutulduğunda orijinal özelliklerine geri dönen malzemelerdir. Bu sayede ekstrüzyon gibi termal yöntemlerle kolayca kaynak birleşimi yapılabilmektedir (Koerner, 2012). GBR-P'lerin üretiminde genellikle düşük ve yüksek yoğunluklu polietilen (PE) veya polipropilen (PP), etilen-propilen kopolimeri (EPM) veya polietilen-etilen-vinil asetat kopolimeri (PE/EVA) gibi poliolefin bazlı polimerler kullanılmaktadır (Robertson, 2013).

GBR'ler baraj ve katı atık depolama alanları gibi uzun süre hizmet vermesi beklenen yapılarda birincil amaç olan geçirimsizliği sağlayan malzemelerdir. Bu nedenle GBR'lerden kaynaklı bir problem yaşanması halinde telafisi olmayacak kazalar meydana gelebileceği için çeşitli maruziyetler altındaki dayanım kapasiteleri ve kullanım ömürlerinin yüksek olması beklenmektedir (Özcan, 2019). GBR'lerle ilgili kaygılar, farklı mekanik ve kimyasal zorlamalara maruz kalması halinde bütünlüğü ve dayanıklılığı üzerinde oluşabilecek deformasyonlardan kaynaklanmaktadır. Aşırı yük gerilmeleri sonucu kısa vadede ezilme ve delinme; biriken katı, sıvı ve gaz miktarının artmasıyla oluşan çekme gerilmesi sonucu ise yırtılma meydana gelmektedir. Bünyesindeki antioksidanın uzun vadede tükenmesi sonucu ise elastik özelliğini kaybederek gevrekleşir (Kavazanjian Jr vd., 2006). Bu nedenle GBR'lerin belirli temel özellikleri uzun vadede sağlaması beklenmektedir. Avrupa Birliği ve ülkemizde GBR'lerle ilgili yasal mevzuat ve çeşitli standartlar bulunmaktadır. AB ülkeleri ve Türkiye'de üretilen ve pazara sunulan GBR'lerin Avrupa Komisyonunca hazırlanan Yapı Malzemeleri Yönetmeliği (305/2011) ve uyumlaştırılmış standartlara uygun olması gerekmektedir. GBR üreticileri üretim yerlerini ve ürünlerini Yapı Malzemeleri Yönetmeliği (305/2011) ve ilgili uyumlaştırılmış standartlar çerçevesinde belgelendirmek zorundadır. Yapı Malzemeleri Yönetmeliği kapsamında GBR konusundaki uyumlaştırılmış çeşitli standartlar bulunmaktadır. Bu standartlarda ürünün kapsamı, kullanım yeri, ürünlere ait temel özellikler ve deney yöntemlerine atıf ve ürünlerin belgelendirilmesinde kullanılan fabrika üretim kontrolü ile ilgili gerekli detaylar yer almaktadır. Uyumlaştırılmış standartların içerisinde yer alan temel özellikler şunlardır: kopma-uzama oranı, yırtılma, yoğunluk, sertlik, yüksek ortam sıcaklığı, ultraviyole ışınlarına maruziyeti, tekrarlı mekanik gerilme etkisi ve ağır

metaller gibi muhtemel kimyasal etkiler nedeniyle hızlandırılmış oksidasyon (yaşlandırma) etkisi ve dehidroklorinasyon sonucunda oluşan plastikleştirici kaybidir (Özcan, 2019). Koerner (2012) GBR'leri fiziksel, mekanik ve dayanım özellikleri olmak üzere üç başlık altında değerlendirmiştir. Fiziksel özellikler kalınlık, yoğunluk, erime noktası, birim alan kütlesi ve su buharı geçirgenliğidir. Mekanik özellikler çekmede uzama-kopma, kaynak bölgesinde çekme, yırtılma, darbe, delinme, arayüz kesme ve gerilim çatlamasıdır. Dayanım özellikleri ise UV dayanımı, radyoaktif, biyolojik ve kimyasal bozunma, termal bozunma ve oksidasyon etkisidir.

Literatürde GBR'lerle ilgili çalışmalar genellikle GBR'lerin hızlandırılmış yaşlandırma maruziyetinin GBR'lerin permormasına olası etkisi ve çalışma alanındaki kullanım ömürlerinin tespit edilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır.

Robertson (2013) çalışmasında farklı üreticiden temin ettiği, kalınlıkları 2 ila 3,2 mm arasında değişen dört farklı PE esaslı ticari GBR-P'lerin oksidasyon direncini belirlemek üzere bir dizi otoklav deneyleri ve geleneksel fırın deneyleri yapmıştır. Yaşlandırılma sonrası GBR-P'lerin mekanik dayanımlarını çekme deneyleri ile, stabilizatörün kalan aktivitesini ise OIT yöntemini kullanılarak araştırmıştır. Her iki hızlandırılmış yaşlanma yöntemlerinin sonuçlarını ayrıntılı olarak tartışmış ve karşılaştırmıştır. Farklı sıcaklıklarda (60, 70 ve 80 °C gibi) ve 50 bar oksijen basıncında yapılan otoklav testlerine dayanarak ve ek olarak 80 °C ve 10 ve 20 bar oksijen basıncında yapılan iki ölçümle, bir GBR-P ürününün beklenen hizmet süresinin değerlendirilmesi için modifiye edilmiş bir Arrhenius ekstrapolasyonunu kullanmıştır. Çalışma sonucunda otoklav test yönteminin, PE bazlı GBR-P ürünlerinin termal-oksidatif stabilitesini araştırmak için uygun olduğunu ve yaşlandırmanın geleneksel fırın testlerine kıyasla çok daha kısa sürelerde yapılabildiğini açıklamıştır.

Rowe vd. (2020)'de farklı üreticilerden temin ettikleri 5 adet 2 mm kalınlıkta yüzeyi pürüzlü HDPE esaslı GBR'lerin kullanım ömürlerini belirlemek amacıyla belediye katı atık sızıntısı (L3) ve düşük seviyeli radyoaktif atık sızıntılarını (L7 ve L9) temsil eden iki simüle edilmiş sızıntı sıvısı hazırlamış ve GBR'leri bu sızıntı sıvılarına 9-16 ay boyunca ve farklı sıcaklık aralıklarında daldırarak maruz bırakmışlardır. GBR'lerin aynı nominal reçineden yapılmış olmalarına rağmen, başlangıç özellikleri ve antioksidan tükenme hızları arasında önemli farkların olduğunu açıklamışlardır. 10 °C

ve L3 sızıntısında beş ürünün antioksidan tükenme süresinin 125 ila 2000 yıl arasında değiştiğini, L7 ve L9 sızıntılarında antioksidan tükenmesinin, L3 sızıntısına benzer veya daha yavaş olduğunu, 9-16 aylık izleme süresince geleneksel termal-oksidatif bozuluma dair herhangi bir kanıt bulunamadığı ancak fiziksel yaşlanmaya bağlı olarak gerinim çatlaması direncinde önemli bir azalma görüldüğünü ve bu değerlerin başlangıç değerinin %30 ila %70'i arasında değiştiğini açıklamışlardır. Sonuç olarak beş ürün arasından ikisinin gereken tasarım ömründen çok daha uzun bir hizmet ömrüne sahip olduğunu rapor etmişlerdir.

Koerner ve Koerner (2017) beş farklı GBR'nin kullanım ömrünü araştırdıkları çalışmada, inkübasyon amacıyla ultraviyole floresan tüp ayırma cihazlarını kullanmış ve her malzemeyi 80, 70 ve 60 °C'de %50 mukavemet ve uzama kaybı meydana gelene kadar inkübe etmişlerdir. Verileri laboratuvar yarılanma ömrü değerleri üzerinden 20°C ortam sıcaklığı için tahmin etmiş ve GBR'lerin 47 ila 97 yıl arasında kullanım ömrü olduğunu açıklamışlardır.

Abdelaal vd. (2023) beş farklı GBR-P'nin pH'ı 0,5 ve 13,5 olan sentetik madencilik çözeltilerinde yaşlandırma testleri ile dayanıklılığını incelemişlerdir. Araştırmacılar, iki yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), iki düşük yoğunluklu lineer polietilen (LLDPE) ve bir karışık polietilen (BPO) GBR-P'yi 85 °C sıcaklıkta 4.5–6.5 yıl boyunca inkübasyona tabi tutmuşlardır. Bulgularda, yüksek pH çözeltisinde beş numunenin, düşük pH çözeltisine kıyasla daha hızlı bir şekilde bozunduğunu ve pH 0,5 çözeltisinde, HDPE'lerden biri ve BPO numunelerin, antioksidanlarının tükenmesi sırasında veya öncesinde polimer bozunması sergilediğini açıklamışlardır. pH 13,5'te ise beş numuneden dördünün, nominal başarısızlık noktasına kadar kavramsal üç aşamalı bozunma modelini takip ettiğini, ancak bu numunelerin uzun vadeli performansı ile reçine türleri veya başlangıç özellikleri arasında bir korelasyonun olmadığını ifade etmişlerdir. Buna örnek olarak, incelenen LLDPE'lerden birinin, yüksek yoğunluklu diğer numuneleri geride bıraktığını ancak diğer LLDPE'nin iyi bir performans göstermediğini ve sonuç olarak, belirli bir uygulama için uygun GBR-P'nin seçiminde yaşlandırma deneyleri yapılırken, uygulama sahasını yansıtan çözeltinin kullanımının daha doğru sonuçlar vereceğini açıklamışlardır. Yine Abdelaal ve Rowe (2023)'de yaptıkları çalışma sonucunda yüksek pH çözeltilerinin düşük pH çözeltilerine kıyasla GBR'yi daha fazla bozunmaya uğrattığını açıklamışlardır.

Çalışmalarında yedi farklı düşük pH ve üç yüksek pH simüle edilmiş madencilik çözeltilisine daldırılan 1,5 mm kalınlığındaki HDPE geomembranın fiziksel ve mekanik özelliklerindeki bozunmayı, 3 yıl boyunca 95 ila 40 °C arasındaki sıcaklıklarda incelemişlerdir.

Literatürde ayrıca GBR-zemin, GBR-beton ve GBR-geosentetik malzemelerinin arayüz davranışları üzerine çalışmalar bulunmaktadır.

Ari ve Akbulut (2021) kum-GBR ara yüzünün kayma davranışını ayırık elemanlar yöntemi kullanılarak mikro ölçekte incelemişlerdir. Bu amaçla, farklı yüzey şekillerine sahip üç kum numune ve farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip üç GBR'nin arayüz kesme özelliklerini simüle ederek incelemiş ve görüntü işleme teknikleri ile gerçekçi parçacık şekli ve yüzey pürüzlülüğünü sağlayarak simüle edilmiş arayüzlerin sürtünme katsayısını kalibre etmek için laboratuvar arayüz testlerinin kayma gerinim-gerilme ilişkileri kullanmışlardır. Parçacık tepkisinin evrimi, yer değiştirme, gözeneklilik, parçacık teması ve anizotropi mekanizmalarını gözlemleyerek arayüzlerin mikro ölçekli tepkilerinin parçacık şekli ve yüzey pürüzlülüğü parametreleri ile değişkenlik gösterdiğini açıklamışlardır.

Feng ve Lu (2016) geotekstil (GT)/GBR ve kil/GBR arayüzlerinin çeşitli normal gerilmeler altında tekrarlanan kesme davranışlarını araştırmak için geleneksel kesme testlerinden farklı yeni bir test yöntemi kullandıkları çalışmada, artan kesme sürelerinin hem GT/GBR hem de kil/GBR arayüzlerinin maksimum kesme mukavemetlerini azalttığını açıklamışlardır. Ek olarak, geleneksel ve tekrarlanan kesme testlerinden elde edilen mukavemet parametrelerini, tipik bir katı atık depolama sahasının analizi için kullanmışlardır.

Feng vd. (2018) GBR ve kum arasındaki arayüz doğrudan kesme testini, ayırık elemanlar yöntemini kullanarak üç boyutlu simülasyonlar ile yapmışlardır. GBR yüzeyinin pürüzlülüğünü simüle etmek için bir örtüşme tekniği oluşturmuş ve simülasyon sonucunun, gerilme-gerinim ilişkisi, arayüz kesme mukavemeti, kesme bandının kalınlığı gibi yayınlanmış deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğunu açıklamışlardır. Sonuç olarak bu yöntemin, parçacık yer değiştirmesi, boşluk oranı ve gerilme durumu, parçacıklar arası temasların sayısı ve kesme işlemi sırasında temas

kuvvetinin dağılımı, büyüklüğü ve yönü dahil olmak üzere GBR ve kum arasındaki mikro-mekanik etkileşimleri araştırmak için pratik bir araç olduğunu belirtmişlerdir.

Cen vd. (2018) GBR arayüzlerinin kesme davranışlarını incelemek için büyük ölçekli bir kompozit kesme test cihazı geliştirilmiştir. Testlerde biri düz diğeri dokulu olmak üzere iki HDPE GBR, arayüz kesme özellikleri üzerinde GBR dokusunun etkisini değerlendirmek için kullanılmış ve doğrudan kesme testleri, GBR/zemin, GBR/geotekstil ve GBR/beton arayüzleri için gerçekleştirilmiştir. Test verilerine dayanarak GBR arayüzlerinin sürtünme açılarını Mohr–Coulomb kriterine göre hesaplamışlardır. Çalışmalar sonucunda elde edilen verileri, önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmış ve yeni kompozit kesme cihazının güvenilir olduğunu açıklamışlardır.

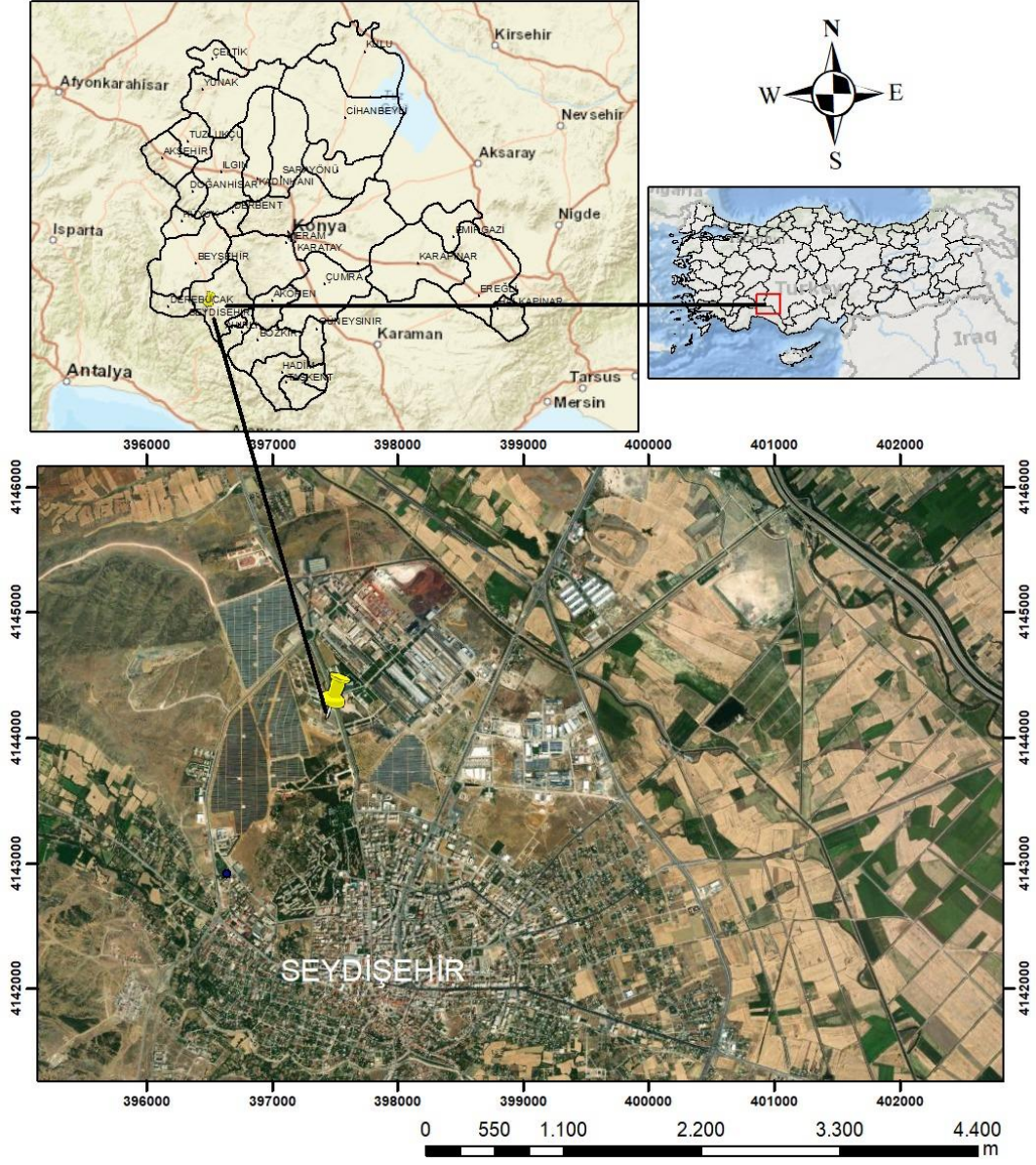
Bhowmik vd. (2018) Hindistan'ın Pencap eyaletindeki bir termik santralde meydana gelen gölet sedde yıkılmasının nedenlerini araştırdıkları vaka çalışmasında, arıza nedenlerini tespit etmek için sızıntı ve şev stabilite analizleri yapmışlardır. Yapılan analizler sonucu, sahadaki bariyer tabakasında tek kat GBR-P kullanımının yetersiz olduğunu, GBR-P'nin mutlaka kil veya geosentetik kil örtü ile desteklenmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde, öncelikle Seydişehir Eti Alüminyum tesisinden temin edilen kırmızı çamur atığı ve bu atığın özelliklerini belirlemek üzere yapılan fiziksel, mekanik, kimyasal ve mineralojik deneyler tanıtılmaktadır. Bu deneyler ayrıca damıtılmış su ile süzdürülerek nötralize edilmiş kırmızı çamur atığı için de tekrarlanmıştır. Sonrasında geosentetik bariyer amacıyla üretilen, katkı olarak kırmızı çamur, karakaya bentonit, eşen kili ve pomzanın kullanıldığı polisülfon (PSF) tabanlı kompozitlerin üretiminde kullanılan malzemeler ve cihazlar, kompozit üretim yöntemi ve üretilen kompozitlerin mekanik ve yapısal özelliklerini belirlemede kullanılan deney yöntemleri açıklanmıştır.

3.1. Kırmızı Çamurun Özelliklerinin Belirlenmesi

Çalışmalarda kullanılan kırmızı çamur numunesi, Konya ilinin Seydişehir ilçesindeki Seydişehir Eti Alüminyum tesislerinden tedarik edilmiştir (Şekil 3.1). Deneyler için kullanılan numuneler, laboratuvara getirildikten sonra büyük kaplara konulmuş ve iyice karıştırılmıştır. Daha sonra oda sıcaklığında kurutulan numunelerden, çeyrekleme yöntemi (TS, 2006) ile deneyler için gerekli miktarda malzemeler alınmıştır (Şekil 3.2a-b).





Şekil 3.2. (a) Doğal ve (b) oda sıcaklığında kurutulmuş kırmızı çamur numunesi

Kırmızı çamurun fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla;

- Kıvam limitleri,
- Özgül ağırlık,
- Tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi (elek analizi ve hidrometre),
- Standart kompaksiyon,
- Düşen seviyeli geçirgenlik,
- Serbest basınç,
- Serbest şişme,

Kimyasal ve mineralojik özelliklerini belirlemek amacıyla;

- Taramalı elektron mikroskobu (SEM-EDS),
- X-ışını kırınım (XRD) spektroskopisi,
- Yüzel alanı ölçümü (BET) analizleri yapılmış ve yöntemleri sırasıyla aşağıda verilmiştir.

3.1.1. Kırmızı çamurun fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Kırmızı çamurun fiziksel özellikleri belirlemek amacıyla yapılan pH tayini, özgül ağırlık (piknometre), kıvam limitleri, tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi (elek analizi ve hidrometre), standart sıkıştırma (kompaksiyon) ve düşen seviyeli geçirgenlik (permeabilite) deney yöntemleri ile mekanik özellikleri belirlemek

amacıyla yapılan serbest basınç ve serbest şişme deney yöntemleri bu bölümde açıklanmıştır.

pH tayini

Kırmızı çamur numunesinin pH değerini belirlemek için 20 g kuru kırmızı çamur numuneye 50 mL saf su eklenerek hazırlanan süspansiyon 30 dk 180 rpm'de homojen karıştırılmış, kaba filtre kağıdında süzülerek WTW Inolab pH 720 model cihaz ile pH değeri belirlenmiştir.

Özgül ağırlık deneyi

Kırmızı çamurun özgül ağırlığı, TS (2006) standardına uygun olarak piknometre yöntemiyle belirlenmiştir. No 40 elek ile elenen yeterli miktarda numune etüvde kurutulmuş ve sonrasında oda sıcaklığında soğutulmuştur. Bu numuneden bir miktar alınarak piknometre şişesine konulmuş ve tartılmıştır. Piknometre şişesine havası alınmış damıtık su, şişenin üçte birini dolduracak kadar eklenmiş ve desikatöre konularak numune içindeki hava kabarcıkları vakumla alınmıştır. Hava kabarcıkları alındıktan sonra şişe kapağı açılarak şişenin tamamına su ilave edilerek ağırlığı tartılmış ve bir süre beklenerek termometre ile sıcaklık ölçülmüştür. Deney üç kez tekrar edilerek malzemenin özgül ağırlık değeri (G_S) Denklem 3.1'de verilen bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$G_S = \frac{W_S}{(W_1 + W_S) - W_2} \quad (3.1)$$

Burada,

W_1 taşma seviyesine kadar damıtık su eklenmiş piknometre kabının ağırlığı, (g),

W_S deneyde kullanılan kuru numunenin ağırlığı, (g),

W_2 vakumlama işlemi sonrası taşma seviyesine kadar damıtık su eklenmiş piknometre kabının ağırlığını, (g) temsil etmektedir.

Kıvam limitleri deneyleri

Kırmızı çamurun likit limiti, plastik limiti ve plastisite indisi özellikleri, TS (2006) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılacak yeterli miktarda numune No 40 elekten elenerek hazır edilmiştir.

Likit limit, malzemenin plastik durumdan akıcı hale dönüştüğü andaki su muhtevasıdır. Likit limit değerinin belirlenmesi için Casagrande yöntemi kullanılmıştır. Hesaplama için hazırlanan grafikte, yarı logaritmik yatay eksendeki düşüş sayılarına karşılık gelen aritmetik düşey eksendeki su muhtevaları işaretlenmiştir. Bu noktalardan geçen en uygun doğru çizilerek grafik üzerinde 25 düşüş sayısına karşılık gelen su muhtevası değeri likit limit değeri (W_L) olarak tespit edilmiştir.

Plastik limit, malzemenin plastik özelliğini kaybederek yarı katı hale dönüştüğü andaki su muhtevasıdır. Bu değeri belirlemek için, numunenin el ayası ile plaka arasında hareket ettirilerek 3 mm çapında uzun silindirik çubuk şeklini alması ve bu şekli aldığı anda çubukta çatlama ve malzemenin kopmalarının meydana gelmesi gözlenmiştir. Silindir çubukta çatlama ve kopmalar gözlenince numunelerin kopan parçaları alınarak su muhtevaları ölçülmüş ve ortalama su muhtevası değeri plastik limit (W_P) olarak belirlenmiştir. Malzemenin plastisite indisi ise (P_I) Denklem 3.2’de verilen bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$P_I = W_L - W_P \quad (3.2)$$

Tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi deneyi

Kırmızı çamurun tane büyüklüğü dağılımı, TS (2006) standardına uygun eleme ve hidrometre yöntemi ile belirlenmiştir. Çeyrekleme yöntemi ile hazırlanan numuneden alınan yeterli miktarda malzeme, etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar 105°C’de kurutulmuştur. Daha sonra numuneler, standartta belirtilen eleklerde sırasıyla elenmiş ve her elek üzerinde kalan numune tartılarak kaydedilmiştir. No 200 elekten geçen numuneler için hidrometre deneyi (ıslak analiz) 2 kez tekrarlanmıştır. Deney sonuçları yarı logaritmik grafik üzerine işlenerek granülometri eğrisi elde edilmiştir.

Standart kompaksiyon deneyi

Kırmızı çamurun maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax}) ve optimum su muhtevası (W_{opt}) değerlerini bulmak için TS (2006) standardına uygun olarak standart kompaksiyon (sıkıştırma) deneyi yapılmıştır. No 4 elekten elenen numunelere, 2,5 kg tokmak ile 30,5 cm’den serbest düşüş ile mekanik sıkıştırma gerçekleştirilmiştir. Zemin

malzemelerinin artan su içeriklerine göre kuru birim hacim ağırlıkları önce artmakta, bir bölgede maksimum değere ulaşmakta ve sonra azalmaktadır. Kuru birim hacim ağırlığının maksimum olduğu andaki su içeriği optimum su muhtevası değeridir. Deney en az beş değer verecek şekilde tekrarlanmış ve sonuçlar grafik üzerinde kompaksiyon eğrisi çizilerek belirlenmiştir.

Düşen seviyeli geçirgenlik deneyi

Standart sıkıştırma deneyi sonucu elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerlerine göre hazırlanan numuneler ile TS (2007) standardına uygun olarak düşen seviyeli geçirgenlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan numune No 4 elek ile elenerek elde edilmiştir. Deney sonucunda geçirgenlik katsayıları Denklem 3.3'te verilen bağıntı ile hesaplanmış olup sonuçlar m/sn olarak verilmiştir.

$$k = 2,3 \frac{aL}{At} \log \left(\frac{H_0}{H_0 - \Delta H} \right) \quad (3.3)$$

Burada,

a su seviyesi düşüşünün izlendiği cam tüpün kesit alanı, (cm²),

L sıkıştırılan numune yüksekliği, (cm),

A silindirik kalıbın kesit alanı, (cm²),

t deney süresi, (s),

H₀ kalıbın üstündeki su çıkış deliği ile su seviye göstergesinin sıfır noktası arasındaki düşey mesafe, (cm),

ΔH t deney süresi sonunda cam tüpteki düşüş miktarını, (cm) temsil etmektedir.

Serbest basınç deneyi

Standart sıkıştırma deneyi sonucu elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerlerine göre hazırlanan kırmızı çamur numuneler ile ASTM (2016) standardına uygun serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Numuneler 38 mm çapında ve 76 mm yüksekliğinde silindir biçiminde hazırlanmış ve 0,5 mm/dk hız ile tek eksenli yük altında kırılmıştır. Deney 3 kez tekrarlanarak ortalama serbest basınç değeri belirlenmiştir.

Serbest şişme deneyi

Standart sıkıştırma deneyi sonucu elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerlerine göre hazırlanan kırmızı çamur numuneler ile 17 mm yüksekliğinde 71,5 mm çapındaki ödometre ringine yerleştirilerek sıkıştırılmış ve ASTM (2008) Metot A'ya uygun olarak bir boyutlu serbest şişme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu metoda göre serbest koşullarda şişme tamamlanana kadar beklenmiş ve deformasyon saatinden ölçüm alınmıştır. Deformasyon saatinde değişiklik olmadığı durumdaki deformasyon miktarı kaydedilmiştir. Numunenin serbest şişme yüzdesi Denklem 3.4'te verilen bağıntı ile hesaplanmıştır.

$$S = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (3.4)$$

Burada,

S serbest şişme yüzdesini, (%),

ΔH numunede meydana gelen şişme miktarını, (mm),

H_0 numunenin ilk yüksekliğini, (mm) temsil etmektedir.

Serbest şişme basıncının belirlenmesi için deformasyonu sönmüleyecek şekilde küçük miktarlarda yüklemeler uygulanmış ve toplam deformasyonu geri döndürecek yüklemeye şişme basıncı olarak kaydedilmiştir. Her yük kademesinde en az 24 saat beklenmiştir.

3.1.2. Kırmızı çamurun kimyasal ve mineralojik özelliklerinin belirlenmesi

Kırmızı çamurun kimyasal, mineralojik ve yapısal özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan SEM, XRD ve BET yüzey alanı analizlerinin uygulama yöntemleri bu bölümde açıklanmıştır.

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri

SEM analizi, numune yüzeyini elektron demeti ile taramak suretiyle görüntü oluşturan bir elektron mikroskobu çeşididir. Elektronlar numunedeki atomlarla çarpışarak numune yüzeyinin yapısı ve özelliği hakkında ipuçları veren çeşitli sinyaller yayılır. Bu sinyaller uygun dedektörler tarafından alınarak bilgisayar ekranına yansıtılır ve görüntü elde edilir. SEM analizi ile numunelerin şekli, boyutu ve morfolojisi

araştırılabilir. Ayrıca EDS sistemi ile numunelerin element dağılımları da belirlenebilir. SEM analizi için numunelerin iletken, kuru ve yüksek vakum koşullarına dayanıklı olması gerekir (Goldstein vd., 2017).

Kırmızı çamurun SEM ve EDS analizleri Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (SDÜ YETEM), Malzeme Karakterizasyon Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Analizler FEI QUANTA FEG 250 cihazı ile yapılmıştır.

X-ışını kırınım (XRD) spektroskopisi

X-ray difraksiyon veya XRD analizi olarak da bilinen bu yöntem, malzemelerin kristal yapısını ve faz bileşimini belirlemek için X-ışınlarının kırınımını ölçen bir yöntemdir. X-ışınları numuneye gönderildiğinde, numunedeki atomlarla saçılır ve karakteristik bir kırınım deseni oluşturur. Bu desen, numunenin kristal örgüsü, tane büyüklüğü, yönelme ve element dağılımı gibi özellikleri hakkında bilgi verir. XRD analizi, numuneyi tahrip etmeden, çok küçük miktarlarda bile analiz yapabilme avantajına sahiptir (Epp, 2016).

Kırmızı çamurun XRD analizleri Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (SDÜ YETEM), Malzeme Karakterizasyon Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Analizler BRUKER D8 ADVANCE WIN-TWIN cihazı ile yapılmıştır. Analiz oda sıcaklığında, $5^{\circ} \leq 2\theta \leq 85^{\circ}$ aralığında, $0,05^{\circ}$ adım genişliğinde ve her adımda 0,1 saniye tarama hızıyla, 1.54060 Å dalga boyuna sahip Cu-K α radyasyonu ile gerçekleştirilmiştir

Yüzel alanı ölçümü (BET) analizi

Yüzel alanı ölçümü (BET) analizi, katı veya toz malzemelerin yüzey alanı ve gözenek boyut dağılımı gibi fiziksel özelliklerini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. BET, Brunauer, Emmett ve Teller tarafından geliştirilen bir teoriye dayanır. Bu teori, numunenin yüzeyinin tek bir moleküler tabaka ile kaplanması için gerekli olan gaz miktarını hesaplamayı sağlar (Naderi, 2015).

Kırmızı çamurun tüm yüzey alanı ölçümü analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (AKÜ TUAM), MICROMERITICS

GEMINI VII 2390t cihazı ile yapılmıştır. Analizde sıvı azot ortamında azot gazı adsorpsiyonu tekniği kullanılmıştır. Cihaz, numuneyi analiz tüpüne yerleştirmiş ve azot gazı ile temas ettirmiştir. Gazın basıncı ve sıcaklığı değiştirilerek, numunenin yüzeyine adsorplanan gaz miktarı ölçülmüştür. Bu verilerden, numunenin yüzey alanı (m^2/g) ve gözenek boyut dağılımı hesaplanmıştır.

3.2. Kırmızı Çamurun Nötralizasyonu

Kırmızı çamurun inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımı, özellikle zemin iyileştirme alanında, atığın azaltılması açısından önemli bir yöntemdir. Ancak, kırmızı çamurun çevre şartlarına uygun bir pH seviyesine indirilmesi için gereken nötralizasyon işlemleri bazı zorluklar ve maliyetleri beraberinde getirebilmektedir. Bu zorluklar genellikle şunlardır:

- Asit ile muamelede kırmızı çamuru tamamen nötralize etmek için büyük miktarda reaktif gerekeceğinden nispeten pahalı olacaktır ve proses suyu akışındaki yabancı madde miktarını (sülfürik asit kullanımında sülfat, hidroklorik asit kullanımında klorür gibi) artırabilir (Kirwan vd., 2013).
- Termal aktivasyon yöntemlerinde, yüksek dereceli fırınlar kullanılacağı için enerji tüketimi de oldukça yüksek olacaktır (Smiljanić vd., 2011).
- Alçı taşı ilavesi ve deniz suyu ile yıkama nispeten daha uygun yöntemler olarak değerlendirilebilir. Ancak bu kaynakların tedarik edilmesi de maliyet açısından çekinceler oluşturabilir (Rai vd., 2013).

Kırmızı çamurun geoteknik özelliklerinin araştırılması ve dolgu malzemesi olarak kullanımı üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Kalkan, 2006; Deelwal vd., 2014; Ma vd., 2022). Ancak alkalilik veya nötrleştirmenin, kırmızı çamurun geoteknik (sıkışma, konsolidasyon, hidrolik iletkenlik, kayma mukavemeti vb.) ve çevre geotekniği (sızıntı, pH geri tepmesi, çökme vb.) özellikleri üzerindeki etkisini araştıran çalışmalar oldukça sınırlıdır (Reddy vd., 2021). Gore (2015), kırmızı çamurun pH seviyesini düşürmek için farklı yöntemlerin etkilerinin araştırılması gerektiğini iki nedenle açıklamıştır: (1) kırmızı çamurun pH'ını nötralize edecek en uygun yöntemi belirlemek; (2) yöntem farklılıklarının kırmızı çamurun geoteknik özellikleri üzerinde olası etkilerini belirlemek.

Literatür kaynaklarında kırmızı çamurun alkalitesinin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışmaya rastlanılmıştır. Bu çalışmada Panda vd. (2017) biyoremediasyon tekniği (süt atığı ürünü, şeker melası ve pirinç suyu gibi ucuz karbonhidrat zengini besin kaynaklarından oluşan bakteri mikroplarını kullanarak) ile kırmızı çamuru nötralize etmeyi başarmış ve pH'ı 10,06'dan 7,5'e düşürdüklerini rapor etmişlerdir. Nötralize edilmiş kırmızı çamurun morfolojik, mineralojik ve geoteknik özelliklerini saf kırmızı çamurun özellikleriyle karşılaştırıldığında, nötralize edilmiş kırmızı çamurun özelliklerinde olumlu bir gelişme sağlandığı ve kırmızı çamurun dolgu malzemesi için daha uygun hale geldiği açıklanmıştır.

Kırmızı çamurun pH'ını 9 veya daha az bir değere düşürmek, oluşturacağı çevresel riski önemli ölçüde azaltacaktır (Hanahan vd., 2004). Nötralizasyon çalışmalarında genellikle 9 veya daha düşük pH değerleri tercih edilmektedir (Gore, 2015).

Kırmızı çamurun verimli ve pratik kullanımı için en ideal sektör inşaat ve özellikle de geoteknik mühendisliği alanıdır. Geoteknik uygulamalarda, endüstriyel atık malzemelerin büyük miktarlarda değerlendirilmesi sağlanabilir. Ancak, kırmızı çamurun yüksek alkali yapısı, bu kullanımı kısıtlayan bir faktördür. Bu nedenle, kırmızı çamurun alkaliliğinin azaltılması ve bunun kırmızı çamurun özellikleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Alkalitenin kırmızı çamurun özellikleri üzerine etkisi, bu tez çalışmasının ayrıca bir inceleme konusudur. Bu amaçla kırmızı çamurun alkalitesinin azaltılması için malzeme damıtılmış su ile süzdürülerek pH değeri 10,65'ten 9,35'e düşürülerek nötralize edilmiş ve işlem sonrası özellikleri araştırılarak olası değişimler araştırılmıştır.

3.3. Geosentetik Bariyer Amaçlı Hazırlanan Kompozitlerin Üretiminde Kullanılan Malzemeler ve Cihazlar

Geosentetik bariyer amaçlı hazırlanan kompozitlerin üretiminde, taşıyıcı polimer olarak polisülfon (PSF), katkı malzemeleri olarak kırmızı çamur atığı, bentonit, eşen kili, pomza ve döküm çözeltisi için çeşitli kimyasal malzemeler kullanılmıştır. Bu bölümde hazırlanan kompozitlerin üretiminde kullanılan malzemeler ve cihazlar tanıtılmıştır.

3.3.1. Polisülfon (PSF)

Termoplastik ailesinin bir üyesi olan PSF, amorf moleküler yapıya sahip yarı saydam bej renkli bir polimerdir. Termal stabilitesi, yüksek camı geçiş sıcaklığı, kimyasal direnci, üstün mekanik mukavemeti ve oksidasyona karşı direnci nedeniyle membran teknolojisinde popülerdir. Yüksek termal direnci, eter bağları ve difenilen sülfon grubuyla elde edilir. Polimer zincirindeki güçlü karbon ve aromatik halkaları ile kükürt ve oksijen bağları, moleküler bozunma direnci sağlar. Bu mükemmel özellikleri nedeniyle ultrafiltrasyon, ters ozmos, sıvı ve gaz ayırma gibi birçok membran prosesinde ve ayrıca elektrik-elektronik, medikal, otomotiv, havacılık, gıda gibi değişik endüstrilerde kullanılmaktadır (Hergenrother, 2003; Alkan, 2014; Yu vd., 2019).

Kullanılan PSF, Acros Organics firmasından temin edilmiş olup özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Polisülfonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Formül	(C ₂₇ -H ₂₂ -O ₄ S) _n
Yoğunluk	1,24 g/mL
Fiziksel yapı	Topak
Çözünürlük	Suda çözünmez
Kurutmada kütle kaybı	< % 1
Kırılma indisi	1,633
Molekül ağırlığı (M.W.)	60.000

3.3.2. Kırmızı çamur

Kullanılan kırmızı çamur Konya ili Seydişehir ilçesi Seydişehir Eti Alüminyum tesislerinden tedarik edilmiştir. Tesisten temin edilen güncel kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kırmızı çamurun kimyasal analiz sonuçları

Oksitler	Ağırlık (%)	Oksitler	Ağırlık (%)
SiO ₂	13,870	NiO	0,031
Fe ₂ O ₃	27,910	MnO	0,012
Al ₂ O ₃	21,980	SrO	0,005
TiO ₂	3,170	Nb ₂ O ₅	0,010
CaO	13,670	CuO	0,003
Na ₂ O	6,000	ZnO	0,003
K ₂ O	0,186	MoO ₃	0,004
V ₂ O ₅	0,085	As ₂ O ₃	0,009
SO ₃	0,458	BaO	0,009
P ₂ O ₅	0,081	PbO	0,004
MgO	0,385	Cl	0,026
Cr ₂ O ₃	0,060	A.Za (LOI)	11,16
ZrO ₂	0,052		

3.3.3. Bentonit

Bentonit, montmorillonit grubunun bir üyesi olan ve %500 veya daha fazla likit limit değerine sahip olan bir kil mineralidir. Volkanik kül, tüf ve lavların kimyasal olarak ayrışması veya bozunması sonucu oluşan bentonit, alüminyum ve magnezyum bakımından zengindir. Bentonit, Ca, Na ve Na-Ca montmorillonitlerden meydana gelir ve oluşum şekillerine göre üç çeşit bentonit vardır. Bu bentonitlerin ticari olarak en önemlisi sodyum bentonittir. Bentonitlerin jeolojik özellikleri, oluşumlarına bağlı olarak değişiklik gösterir (MTA, 2012; Todaro vd., 2023).

Karakaya Bentonit Sanayi ve Ticaret A.Ş.' den temin edilen doğal sodyum bentonitin likit limiti %640, plastik limiti %28, plastisite indisi %612, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1,12 g/cm³ ve optimum su muhtevası %48, özgül ağırlığı 2,69, tek eksenli serbest basınç değeri 1,87 kg/cm² olup diğer fiziksel özellikleri ve kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.3'de verilmiştir (Dereli, 2013).

Çizelge 3.3. Bentonitin fiziksel özellikleri ve kimyasal analiz sonuçları

Fiziksel Özellikler		Kimyasal Analiz	
Nem (%)	8,00	SiO ₂	61,28
Elek Analizi (200 mesh, %)	1,24	Al ₂ O ₃	17,79
Viskozite (600 rpm)	46,00	Fe ₂ O ₃	3,01
Plastik Viskozite (PV)	15,60	CaO	4,54
YP (yieldpoint/plastic)	0,40	NaO	2,70
Filtrasyon hacmi	11,20	MgO	2,10
		K ₂ O	1,24

3.3.4. Eşen kili

Muğla ili, Fethiye ilçesi, Eşen Barajı kil sahasından temin edilen Eşen kili numunesinin likit limiti %112, plastik limiti %33, plastisite indisi %79, özgül ağırlığı 2,70, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1,24 g/cm³ ve optimum su muhtevası %43 olarak bulunmuştur. Buna göre eşen kili, birleşik zemin sınıflama sistemine (TS, 2000) göre CH (yüksek plastisiteli kil) sınıfına girmektedir (Çimen vd., 2017). XRD analizlerine göre Eşen kili mineralleri çokluk sırasına göre Simektit, Serpantin, Kuvars, Kalsit, Amorf Silika olarak belirlenmiştir. Ayrıca içerisinde eser miktarda Amfibol, Feldispat, Klorit grubu mineraller de bulunmaktadır (Kalay, 2010). Eşen kilinin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Eşen kilinin kimyasal analiz sonuçları

Oksitler	Ağırlık (%)
SiO ₂	47,10
Fe ₂ O ₃	16,60
MgO	17,40
Al ₂ O ₃	4,30
CaO	2,80
K ₂ O	0,30
TiO ₂	0,20
MnO	0,10
Na ₂ O	<0,10
P ₂ O ₅	<0,10
A.Za (LOI)	9,85

3.3.5. Pomza

Isparta Bims Blok fabrikasından temin edilen pomza (Gelincik pomzası) numunesinin özgül ağırlığı 2,35, maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1,18 g/cm³ ve optimum su muhtevası %29’dur. XRD analizlerine göre pomzanın mineralleri çokluk sırasına göre Feldispat, Opal-CT, Kuvars, Mika Grubu mineral, Amfibol Grubu mineraller olarak belirlenmiştir (Kalay, 2010). Pomzanın kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Pomzanın kimyasal analiz sonuçları

Oksitler	Ağırlık (%)
SiO ₂	60,90
Fe ₂ O ₃	3,20
MgO	1,10
Al ₂ O ₃	17,10
CaO	3,00
K ₂ O	5,00
TiO ₂	0,30
MnO	0,10
Na ₂ O	5,30
P ₂ O ₅	0,20
A.Za (LOI)	2,80

3.3.6. Kimyasal malzemeler

Polivinilpirolidon (PVP)

PVP, PSF ile homojen bir karışım oluşturabilmesi ve organik çözücülerdeki yüksek çözünürlüğü nedeniyle (molekül kütlesi düşük olanlar su ortamında da çözünebilmektedir), faz inversiyonu yöntemiyle üretilen PSF membranların hazırlanmasında sıkça kullanılan ve çapraz bağlayıcı olarak işlev gören yaygın bir bileşendir. PVP'nin yüksek moleküler ağırlığı ve solvent dışı özellikleri, kararlı bir ikili çözeltiye termodinamik ve reolojik özellikler kazandırmaktadır. Bu da PVP'nin önemli bir avantajıdır. Ayrıca, PVP, faz inversiyonu yöntemiyle üretilen membranlarda makro gözenek oluşumunu baskılayan bir madde olarak bilinmektedir (Wienk vd., 1996; Yeo vd., 2000; Han ve Nam, 2002).

Döküm çözeltilerinin hazırlanmasında kullanılan PVP, Alfa Aesar firmasından temin edilmiş olup özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. PVP'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Formül	(C ₆ H ₉ NO) _n
Yoğunluk	1,24 g/mL
Çözünürlük	Suda çözünmez
Fiziksel yapı	Toz
Su içeriği	< % 5
Molekül ağırlığı (M.W.)	1.300.000

N-metil pirolidon (NMP)

Organik bir çözücü olan NMP, polimerler, boya maddeleri, ilaçlar, pestisitler ve diğer kimyasalların üretiminde kullanılır. Membran üretiminde de önemli bir rol oynayan NMP, PSF gibi membran yapımında kullanılan polimerler için kullanılan yaygın apolar bir çözücüdür. NMP, membranların performansını etkileyen birçok faktörü iyileştirirken, mekanik dayanımını ve termal kararlılığını da artırır (Han ve Nam, 2002).

Döküm çözeltilerinin hazırlanmasında kullanılan NMP, Chemsolute firmasından temin edilmiş olup özellikleri Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. NMP’nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Formül	(C ₅ H ₉ NO)
Yoğunluk	1,03 g/mL
Molekül ağırlığı	99,13 g/mol
Çözünürlük	Suda ve çoğu organik çözüde çözünür
Kaynama noktası	202°C
Erime noktası	-24°C

N-N-dimetil-formamid (DMF)

Kimya endüstrisinde oldukça sık kullanılan bir çözücü olan DMF, aprotik bir çözücü olarak kullanılır ve kimyasal reaksiyonlarda katalist, polimer ve reçine çözücüsü, elektrolit çözücüsü, ekstraksiyonlarda solvent, üretimde ham madde ve kristalizasyonlarda çözücü olarak kullanılır. DMF, polar çözücülerle yüksek derecede uyumludur ve PSF membranlar gibi malzemelerle kullanıldığında önemli bir avantaj sağlar (Li ve McHugh, 2004; Das vd., 2006).

Döküm çözeltilerinin hazırlanmasında kullanılan DMF, Merck firmasından temin edilmiş olup özellikleri Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. DMF’nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Formül	(C ₃ H ₇ NO)
Yoğunluk	0,944 g/cm ³
Molekül ağırlığı	73,09 g/mol
pH	7,0

3.3.7. Kimyasal cihazlar

Analitik terazi

Kütle ölçümleri, Radwag AS 220/C/2 marka model analitik terazi kullanılarak yapılmıştır. Bu terazi, 220 g maksimum kapasiteye ve 0,1 mg okunabilirliğe sahiptir. Terazi, dış ortam koşullarından etkilenmemek için otomatik olarak ayarlanmaktadır. Terazi, GLP ve GMP standartlarına uygun olarak seviye kontrolü yapmakta ve sapmalar hakkında bilgi vermektedir.

Manyetik karıştırıcı

Isıtma ve karıştırma işlemleri, Thermo Fisher Scientific markasının Barnstead Cimarec model manyetik karıştırıcısı kullanılarak yapılmıştır. Bu cihaz, ısıtma yüzeyi 50°C'nin (122°F) üzerinde olduğunda yanıklardan korumak için Hot Top uyarı sistemi ile donatılmıştır. Cihaz, yavaş hızlı karıştırma, tutarlı hız kontrolü ve güçlü manyetik bağlantı için Stir-Trac teknolojisini kullanır. Cihaz, yüksek wattlı bir ısıtma elemanına ve büyük, hassas, kolay okunabilen bir dijital ekrana sahiptir.

Ultrasonik su banyosu

Kompozitlerin hazırlanması aşamasında katkı maddelerinin DMF içinde homojen olarak çözünmesi, Bandelin Sonorex marka ultrasonik banyo kullanılarak yapılmıştır. Cihaz, yoğun kavitasyon kabarcıkları ile manyetik karıştırıcılarda çözünmesi zor olan maddelerin daha kolay bir şekilde çözünmesinde ve malzemelerin daha kolay temizlenmesinde kullanılmaktadır. Cihazda, kolay kullanım için bir döner kolu kontrolü bulunmaktadır. Ultrasonik alanda ayakta dalgalara engel olmak ve özellikle eşit temizlik sağlamak için tam otomatik SweepTec fonksiyonu bulunmaktadır.

3.4. Geosentetik Bariyer Amaçlı Hazırlanan Kompozitlerin Üretim Yöntemi

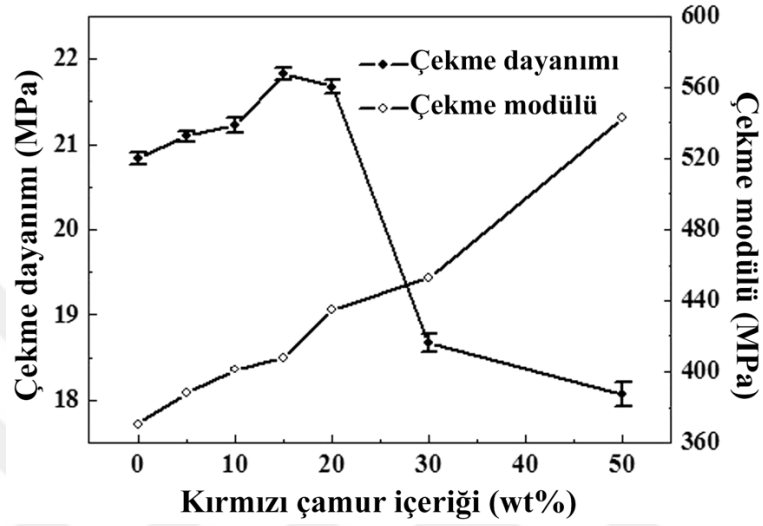
Polimer esaslı malzemeler, piyasaya sunulmadan önce kendilerine çeşitli fiziksel, elektriksel, kimyasal, termal ve mekanik özellikler kazandırmak için katkı ve dolgu maddeleri ile işlenmektedir. Bu işlemin amacı, polimerlerin performansını ve fonksiyonelliğini artırmak ve aynı zamanda malzemenin maliyetini önemli ölçüde düşürmektir (Yaşar, 2001). Özellikle endüstriyel atıkların bu malzemelerde dolgu maddesi olarak kullanılması, hem atık yönetimi hem de çevre koruma açısından

sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır (Yurtseven vd., 2013). Polimer esaslı geosentetik ürünler, kendi adını aldıkları saf polimer reçinesi dışında, farklı amaçlar için farklı katkı ve dolgu maddeleri eklenerek üretilmektedir. Bu maddeler, partikül veya sıvı formda olabilmekte ve toplam oranı formülasyona bağlı olarak önemli ölçüde (%1-50) değişebilmektedir. Bu katkı maddeleri, polimer matris ile ne kadar uyumlu olduklarına bağlı olarak, tek fazlı veya çok fazlı karışımlar oluşturabilir. Uyumluluk parametreleri veya çözünürlük indeksi ile belirlenen faz yapısı malzemenin fiziksel, kimyasal, mekanik, termal, elektriksel ve optik özelliklerini etkiler. Tek fazlı karışımlarda, malzemenin her noktası aynı özelliklere sahiptir. Çok fazlı karışımlarda ise, katkı maddeleri polimer matris içinde parçacıklı veya lifli şekiller oluşturur. Bu şekiller, malzemenin dokusunu veya yüzeyini belirler ve malzemenin esnekliğini, dayanıklılığını veya görünümünü değiştirebilir (Koerner, 2012; Ingold, 2013). Kullanılan katkı maddeleri arasında karbon siyahları, antioksidanlar, plastikleştiriciler, renklendiriciler, kalsiyum karbonat, metalik tozlar ve pullar, kil, talk ve mika gibi silikat mineralleri, kuvars, diyatumlu toprak ve novakülit gibi silika mineralleri, alümina, biyositler ve diğer sentetik polimerler gibi metalik oksitler ve lifli katkı maddeleri bulunmaktadır (Sarsby, 2006; Wiewel ve Lamoree, 2016).

Termoplastiklerin özelliklerini geliştirmek için, inorganik dolgu maddeleri eklenerek polimer kompozitler hazırlanabilir. Bu polimer kompozitler, termoplastiklerin sahip olmadığı yüksek mukavemet, ısı direnci, elektriksel iletkenlik gibi özelliklere sahip olabilir. İnorganik dolgu maddeleri, metal, mineral veya oksit gibi organik olmayan bileşiklerden oluşur. Bu dolgu maddelerinin polimer kompozitler üzerindeki etkisi, parçacık boyutu, şekli, agrega boyutu, yüzey özellikleri ve dağılım derecesi gibi faktörlere bağlıdır. Nano ölçekte hazırlanan polimer kompozitler hem organik hem de inorganik malzemelerin avantajlarını bir arada sunar. Bu polimer kompozitler, organik malzemeler gibi hafif, esnek ve iyi kalıplanabilir olmanın yanı sıra, inorganik malzemeler gibi yüksek mukavemet, ısı stabilitesi ve kimyasal direnç gibi özelliklere de sahiptir (Bhat vd., 2011).

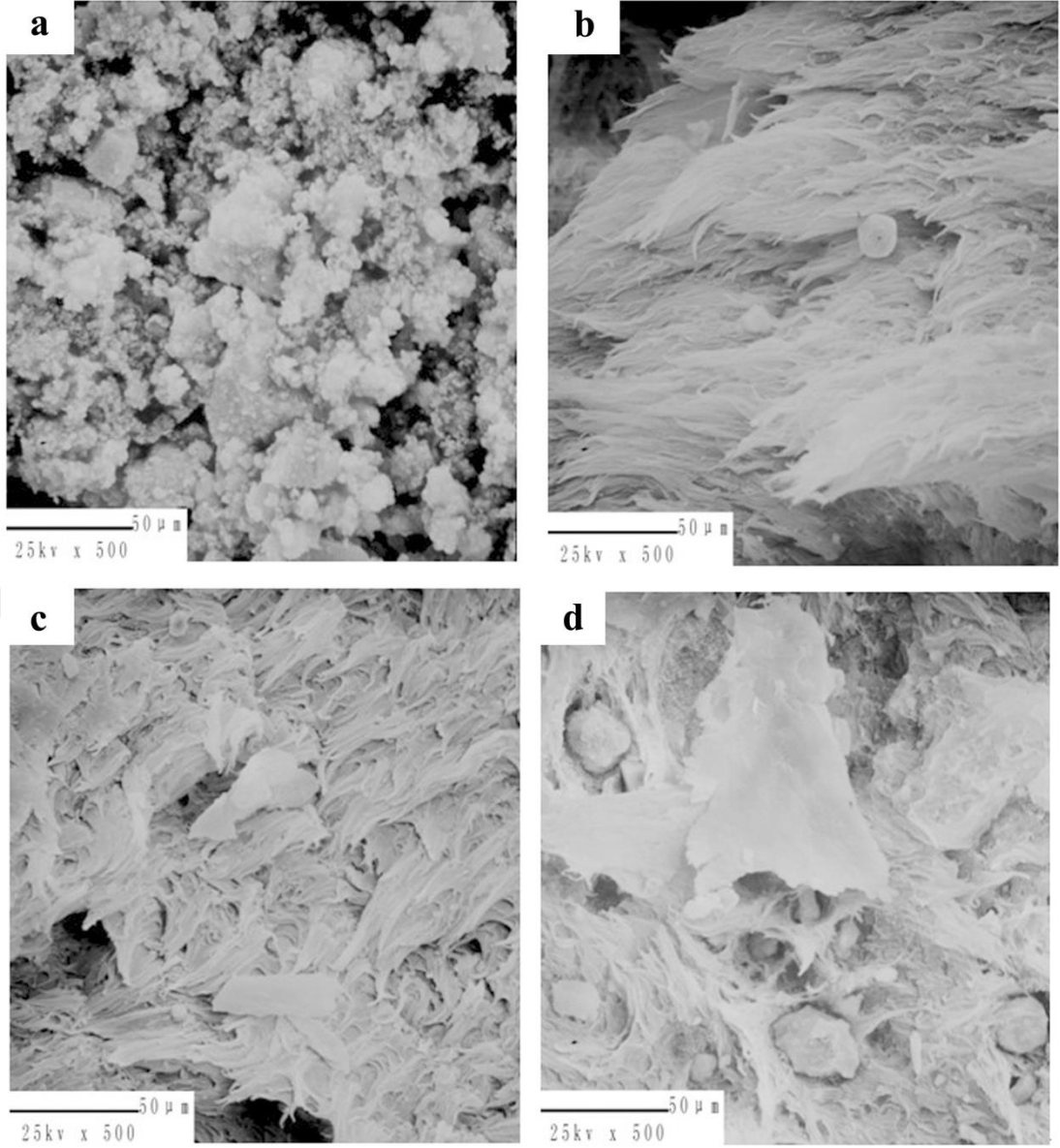
Kırmızı çamurun, polimerlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için inorganik dolgu maddesi olarak termoplastik ve termoset matrislere başarıyla entegre edildiği çeşitli çalışmalar rapor edilmiştir. Zhang vd. (2011) maksimum %50'ye kadar farklı karışım oranlarında hazırlamış oldukları kırmızı çamur/polipropilen (PP) kompozitlerin

mekanik ve termal davranışlarını araştırmışlardır. PP matrisine kırmızı çamur ilavesinin kompozitlerin çekme mukavemeti ve modülüne olumlu etkidiği ve çekme mukavemetinin ağırlıkça %15 kırmızı çamur oranında maksimum değere ulaştığı, daha fazla kırmızı çamur içeriğinde ise çekme mukavemetinin büyük ölçüde azaldığını açıklamışlardır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Kırmızı çamur oranının kompozitin çekme mukavemeti ve çekme modülü üzerindeki etkisi (Zhang vd., 2011)

Kırmızı çamur içeriğindeki parçacıkların ortalama tane boyutu yaklaşık 4 μm olsa da Şekil 3.4a'dan boyut dağılımının heterojen olduğu ve 50 μm kadar büyük parçacıkların bulunduğu görülmektedir. Bunun nedeni, kırmızı çamurun düşük nem altında bile topaklanma eğiliminde olmasıdır. Kırmızı çamurun ağırlıkça %15 olduğu kompozitte çekme mukavemeti en yüksek değere ulaşmış olsa da ağırlıkça %10 kırmızı çamur içeriğinde topaklanmanın en az olduğu ve kırmızı çamurun PP matrisine daha homojen dağıldığı Şekil 3.4b'de görülmektedir. Kırmızı çamur oranının %30'a yükseltilmesi, Şekil 3.4d'de görüldüğü üzere aşırı topaklanma, heterojen dağılım ve sonuç olarak çekme mukavemetinin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, kırmızı çamurun nispeten küçük oranlarda polimer matrisine dahil edilmesi, kompozitin mukavemetini ve yapısını iyileştirmede daha etkili sonuçlar ortaya koymaktadır (Zhang vd., 2011).



Şekil 3.4. KÇ/PP kompozitlerinin SEM görüntüleri, (a) saf KÇ, (b) %10 KÇ/PP, (c) %20 KÇ/PP ve (d) %30 KÇ/PP kompozitleri (Zhang vd., 2011)

Akıncı vd. (2008) izotatik polipropilen (iPP) matrisine farklı oranlarda kırmızı çamur ilavesinin, iPP'nin çekme mukavemeti-uzama oranı üzerine etkisini inceledikleri çalışmada, kırmızı çamur oranı arttıkça, gerilme mukavemeti ve kopma uzaması değerlerinin düştüğünü ancak %10 kırmızı çamur oranında gerilme mukavemeti ve kopma uzamasının diğer oranlara kıyasla daha yüksek kaldığını açıklamışlardır. Literatürdeki farklı çalışmalarda da (Mareri vd., 1998; Parija vd., 2000; González vd., 2002; Panda ve Behera, 2017; Liu vd., 2018; Ding vd., 2022; Wu vd., 2023) benzer sonuçlar görülmüştür. Bu çalışmada da farklı karışım oranları ile yapılan ön deneme çalışmaları sonucunda optimum katkı oranının %10-15 aralığında olduğu

gözlemlenmiş ve bu aralığın orta değeri olan %12,5 çalışmalarda katkı oranı olarak tercih edilmiştir.

Kompozitlerin üretiminde taşıyıcı matris polimeri olarak PSF'nin tercih edilmesinin üç temel nedeni aşağıda açıklanmaktadır:

1. PSF'nin mekanik ve termal özelliklerinin üstünlüğü,
2. Kompozitlerin üretiminde kullanılan faz inversiyon yönteminin deneme çalışmalarında başarılı sonuçlar vermesi,
3. Membran alanında oldukça çalışılan bir polimer olan PSF'nin, inşaat alanında geosentetiklerde daha önce denenmemiş olmasıdır.

Deneme çalışmaları sırasında PSF kullanımının gözlemlenen olumlu etkileri aşağıda açıklanmaktadır:

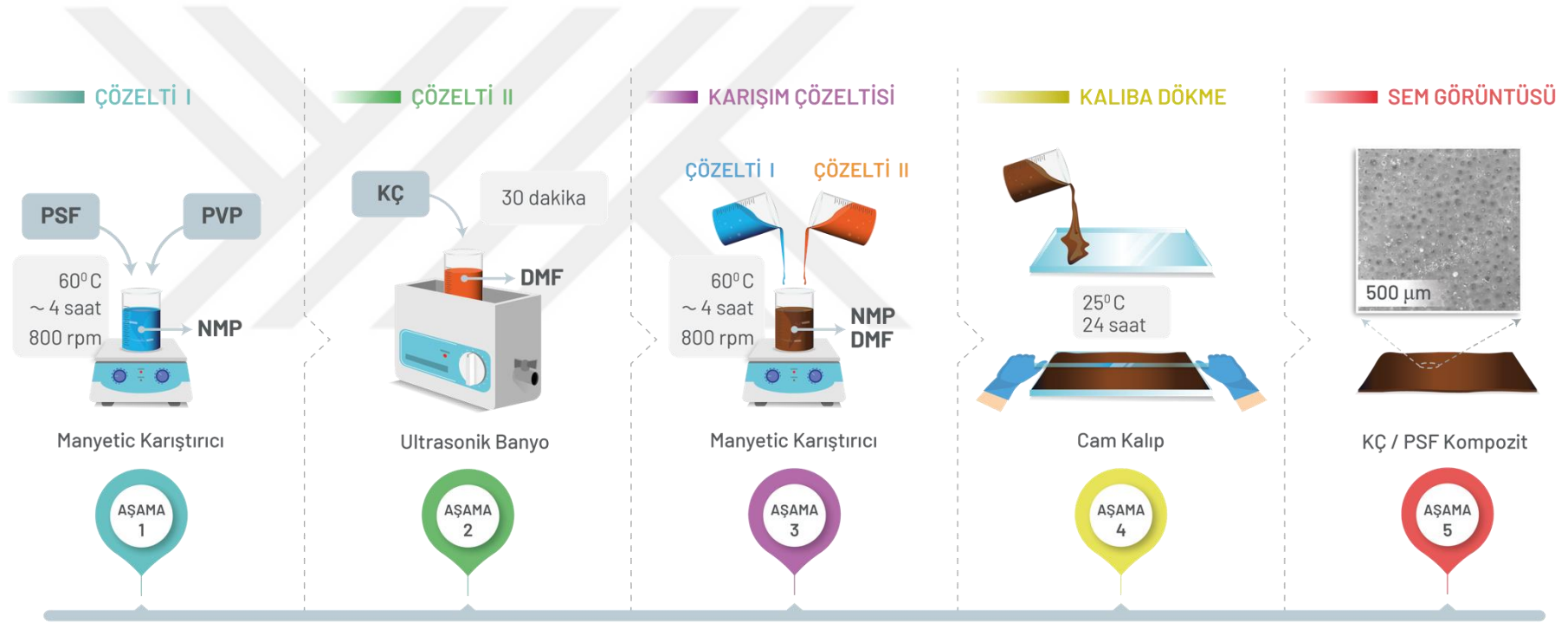
- Matrise eklenen katkı malzemeleri ile kolayca homojen çözeltiler oluşturabilmektedir. Buradan PSF'nin faz inversiyon yöntemiyle oldukça uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.
- Katılaştıran kompozitlerin biçim ve dokusunun kusursuz olduğu gözlemlenmiştir. PSF'nin viskozitesi, dökümden kaynaklı yüzey dalgalanmalarına rağmen, çözeltinin plate üzerinde istenilen şekli almasını ve yeterince düzgün ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olmasını sağlamıştır.
- Ön deneme çalışmalarında beklenmeyen herhangi bir sorunla karşılaşılmamıştır.

Faz inversiyon yöntemi ile kompozitlerin üretimi

Geosentetik bariyer amaçlı hazırlanan kompozitler, Zhang vd. (2013)'nin çalışmalarında rapor ettiği faz inversiyon yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Zhang vd. (2013) polisülfon ultrafiltrasyon membranlarını gümüş parçacıkları ile modifiye etmiş ve membranları faz inversiyon tekniği ile iki adımda hazırlamıştır. İlk adımda, gümüş nitratın indirgenmesi yoluyla DMF içinde gümüş parçacıkları oluşturmuş, ikinci adımda ise gümüş parçacıkları içeren DMF çözeltisini PSF ve PVP içeren NMP çözeltisi ile karıştırmış ve elde edilen polimer çözeltisini cam plakaya dökerek ince

membran filmini elde etmiştir. Daha sonra, membran filmini su banyosuna daldırılarak faz inversiyonunu gerçekleştirmiştir.

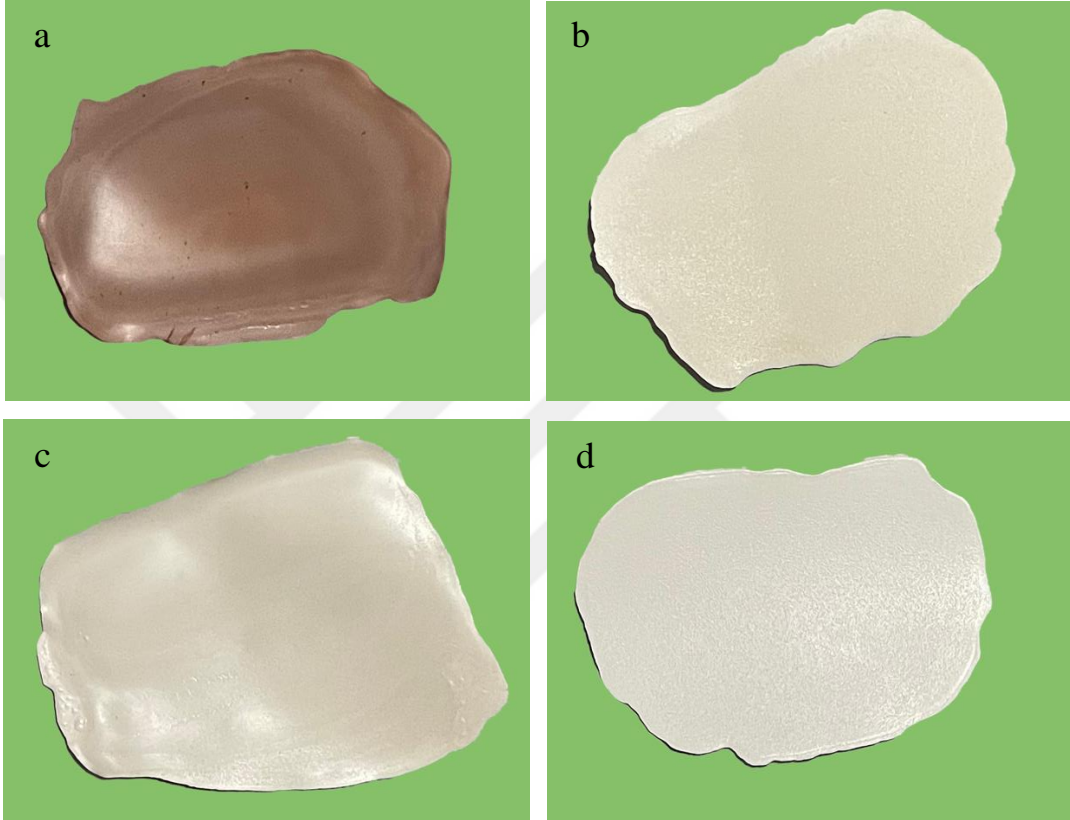
Kompozitleri hazırlamak için, 16 g PSF, 60 mL NMP içinde 800 rpm ve 60°C'de homojen bir çözelti haline gelene kadar çözündürülmüştür. Daha sonra, 4,0 g PVP, PSF çözeltisine eklenmiş ve karışım 30 dakika homojenize edilerek birinci çözelti karışımı hazırlanmıştır. Ardından, ikinci çözelti karışımı, 2,0 g katkı malzemesinin 36 mL DMF çözeltisi içinde 30 dakika ultrasonik homojenizatör kullanılarak çözündürülmesi yoluyla elde edilmiştir. İkinci çözelti hazırlandıktan sonra, ilk çözeltiliye eklenmiş ve manyetik karıştırıcı ile yaklaşık 1 saat 60°C'de tamamen homojen olana kadar karıştırılmıştır. Hazırlanan bu karışım çözeltisi, ultrasonik homojenizatörde 1 saat boyunca gazdan arındırıldıktan sonra cam plakaya dökülerek 25°C'de 24 saat havada kurutulmuştur. 24 saat sonra, cam plaka 25°C'deki su banyosuna daldırılarak faz inversiyonu tamamlanmış ve katı kompozitlerin üretimi tamamlanmıştır. Son olarak NMP'yi gidermek için malzeme damıtılmış su ile yıkanmıştır. Üretilen kompozitler, karakterizasyon deneylerinde kullanılmak üzere damıtılmış su içerisinde bekletilmiştir. Kırmızı çamur katkılı kompozitin üretim şeması Şekil 3.5'te verilmiştir. Katkısız referans numune, ikinci çözelti karışımına herhangi bir katkı ilave edilmeden aynı yöntemle üretilmiştir. İkinci çözelti sadece PVP ve DMF içerirken, ilk çözelti PSF ve NMP içermektedir. Diğer katkıları ile hazırlanan kompozitler de aynı yöntem kullanılarak üretilmiştir. Kompozitlerin üretiminde kullanılan katkıları ve karışım oranları Çizelge 3.9'da, hazırlanan kompozitlerin fotoğrafları ise Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.5. Kırmızı çamur katkılı kompozitin faz inversiyon yöntemi ile üretim şeması

Çizelge 3.9. Hazırlanan kompozitlerin karışım oranları

Numune Kodu	Polisülfon (%)	Kırmızı çamur (%)	Karakaya bentonit (%)	Eşen kili (%)	Pomza (%)
KÇ/PSF GBR	87,5	12,5	-	-	-
KB/PSF GBR	87,5	-	12,5	-	-
EP/PSF GBR	87,5	-	-	11,25	1,25
PSF GBR	100	-	-	-	-



Şekil 3.6. Hazırlanan (a) KÇ/PSF GBR, (b) KB/PSF GBR, (c), EP/PSF GBR, (d) PSF GBR kompozitler

3.5. Hazırlanan Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

Geosentetik bariyerler üretim, taşıma, depolama, yerleştirme, kaynak, gerdirme, sabitleme, kaplama, işletme veya bakım aşamalarında basınç, çekme, kesme, yırtılma, delinme, sürtünme, darbe ve titreşim gibi çeşitli mekanik zorlamalara maruz kalabilmektedirler. Bu mekanik etkiler, geosentetik bariyerlerin hasar görmesine, yıpranmasına, delinmesine ve sızdırmasına neden olabilir ve geosentetik bariyerlerin ömrünü ve güvenilirliğini tehlikeye atabilir (Luciani vd., 2020; Garrido vd., 2021). Bu nedenle, geosentetik bariyerlerin mekanik etkilere karşı belli standartları taşımaları ve

gerekli mekanik dirence sahip olmaları gerekir. Geosentetik bariyerlerin standartları, uluslararası veya ulusal kuruluşlar tarafından belirlenir. Bu standartlar, geosentetik bariyerlerin üretim, test, uygulama ve bakım aşamalarında kalite kontrolünü sağlamak için kullanılır. Geosentetik bariyerlerin mekanik direnci, malzemenin gerilme, basınç, eğilme, yırtılma, delinme, kayma, çatlama, yaşlanma ve diğer davranışlarını tanımlayan fiziksel büyüklüklerdir (Rupal vd., 2020; DSİ, 2021; ASTM, 2023).

Geosentetik bariyerler, kullanım süresi boyunca çeşitli çevresel etkilere de maruz kalmaktadır. Bu çevresel etkiler, geosentetik bariyerlerin özelliklerini ve performansını işletme süresi boyunca etkileyebilir. Literatürde bu etkiler aşağıdaki gibi açıklanmaktadır (Rowe vd., 2010; Koerner, 2012; Ingold, 2013; Luciani vd., 2020):

- Sıcaklık: Geosentetik bariyerler, farklı iklim koşullarında sıcaklık değişimlerine maruz kalabilirler. Sıcaklık değişimleri, geosentetik bariyerlerin genleşme, büzülme, gevşeme ve elastik özelliğini yitirip sertleşmesine ve çatlamasına neden olabilir.
- Güneş ışığı: Güneş ışığının ultraviyole (UV) radyasyonuna maruz kalan geosentetik bariyerlerde kimyasal bozunma, oksidasyon, fotodegradasyon, renk değişimi veya yüzey hasarı oluşabilir.
- Kimyasal maddeler: Geosentetik bariyerler toprak, su, atık veya diğer malzemelerle temas halindeyken kimyasal maddelere maruz kalabilirler. Kimyasal maddeler, geosentetik bariyerlerin kimyasal yapısını bozabilir, çözünmeye, şişmeye, çatlamaya veya delinmeye neden olabilir.
- Biyolojik ajanlar: Geosentetik bariyerler, mikroorganizma, bitki, hayvan veya diğer canlılarla temas halindeyken biyolojik ajanlara maruz kalabilirler. Biyolojik ajanlar, geosentetik bariyerlerin kimyasal yapısını bozabilir, biyodegradasyona, yüzey aşınmasına ve delinmeye neden olabilir.

Bu çalışmada geosentetik bariyer amaçlı hazırlanan kompozitler üzerinde gerçekleştirilen mekanik deney yöntemleri aşağıda açıklanmaktadır.

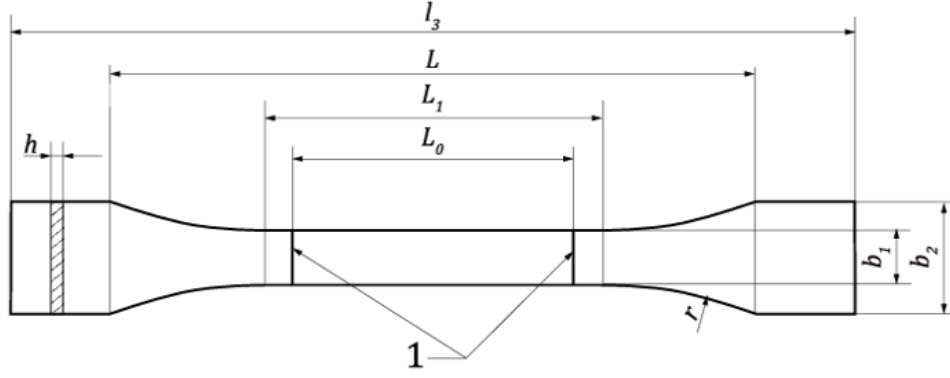
3.5.1. Çekme özelliklerinin belirlenmesi

Çekme deneyi, malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için yapılan deney yöntemlerinden bir tanesidir. Çekme deneyi sonucunda, malzemelerin mekanik özelliklerini gösteren akma, çekme ve kopma mukavemeti; akma, çekme, kopma uzama değerleri, elastiklik modülü vb. birçok parametre elde edilebilmektedir (TS, 2012).

Hazırlanan kompozitlerin çekme dayanımlarını ve kopma anında uzama oranlarını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen deneyler Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı Yapı Malzemeleri Laboratuvarı Şube Müdürlüğünde INSTRON marka universal test cihazı ile Çizelge 3.10'da verilen standartlar ve deney şartlarında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyinde hazırlanan kaşık tipi numunelerin geometrisi Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.10. Çekme ve kopmada uzama deney standartları

Deney Standardı	TS EN ISO 527-1 (TS, 2012)			
Deney Numunesi Tipi	TS EN ISO 527-3 Tip 5 (5 adet) (TS, 2019)			
Şartlandırma	(23±2) °C de, % (50±5) bağıl nemde en az 16 saat			
Çekme Cihazı / Temaslı Ekstensometre	Sınıf 0.5 (TS, 2018) (ISO, 2018) / Sınıf 0.5 (TS, 2013) (ISO, 2012)			
Çekme Uzaması Ölçer Tipi / Kavrama Cihazı Tipi	Temaslı ekstensometre / Yandan sıkımalı çene			
Kavrama Mesafesi L/ Ölçme Uzunluğu L ₀ / Hız	(80±5) mm / 25 mm / 100 mm/dakika			
Numune	KÇ/PSF GBR	KB/PSF GBR	EP/PSF GBR	PSF GBR
Deney Ortamı Sıcaklığı (°C)	23,1	23,1	23,1	23,1
Deney Ortamı Nemi (%)	46	46	46	46



- 1 ölçü işaretleri,
 b_1 dar paralel kısmın genişliği $10 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$
 b_2 uçlardaki genişlik: $20 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$
 h kalınlık $\leq 1 \text{ mm}$
 L_0 gösterge uzunluğu $50 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$
 L_1 dar paralel kenar kısmın uzunluğu $60 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$
 L kulplar arasındaki başlangıç mesafesi $115 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$
 l_3 toplam uzunluk $\geq 150 \text{ mm}$
 r yarıçap $\geq 60 \text{ mm}$ (tavsiye edilen $60 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$)

Şekil 3.7. Çekme testi numunesi tipi

Deney sonucunda çekme dayanımı Denklem 3.5'te verilen bağıntı ile, uzama oranı ise Denklem 3.6'da verilen bağıntı ile hesaplanmıştır. Uzama değeri malzemenin koptuğu andaki uzama miktarı olup sonuçlar yüzde (%) ile gösterilmektedir.

$$\sigma_{\zeta} = \frac{F_{\max}}{t \times w} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{L_1 - L_0}{L_0} \right) \times 100 \quad (3.6)$$

Burada,

- σ_{ζ} çekme dayanımı, (N/mm^2),
 F_{\max} kuvvet-uzama eğrisinden belirlenen maksimum kuvveti, (N),
 t numunenin dar bölgesinin kalınlığı, (mm),
 w numunenin dar bölgesinin genişliği, (mm),
 ε uzama oranı (%),
 L_0 numunenin çekme öncesi boyu, (mm)
 L_1 numunenin çekme sonrası boyunu (mm) temsil etmektedir.

3.5.2. Yırtılma dayanımlarının belirlenmesi

Hazırlanan kompozitlerin yırtılma dayanımları, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı Yapı Malzemeleri Laboratuvarı Şube Müdürlüğünde INSTRON marka üniversal test cihazı ile Çizelge 3.11’de verilen standartlarda gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.11. Yırtılma dayanımı deney standartları

Deney Standardı	TS (2018)			
Deney Numunesi Tipi	Metod B Şekil-2 açılı-çentiksiz deney parçası			
Numune	KÇ/PSF GBR	KB/PSF GBR	EP/PSF GBR	PSF GBR
Deney Ortamı Sıcaklığı (°C)	23,1	23,1	23,1	23,1

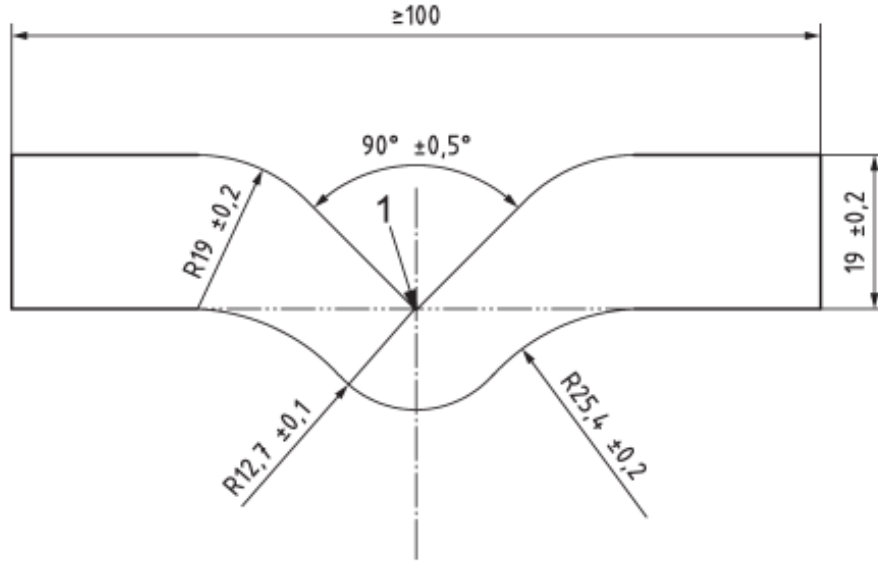
Yırtılma mukavemetini belirlemek için Çizelge 3.11’de belirtilen Metod B’ye göre deney numuneleri, bir açı oluşturacak şekilde bükülmüş ve bir ucu çeneler arasında tutulmuştur. Numuneler, açı noktasından başlayarak 500 ± 50 mm/dk’lık hızla yırtılmaya zorlanarak kopma anına kadar uzatılmış ve yırtılma kuvveti ölçülmüştür. Açılı deney numuneleri çentiksiz ve numuneleri kesmek için kullanılan kalıp Şekil 3.8’de gösterilen boyutlara sahiptir. Numuneler, deney sırasında sabit bir ilerleme hızında yırtılmaya zorlanmış ve yırtılma kuvveti kaydedilmiştir. Yırtılma mukavemeti, yırtılma kuvvetinin test parçasının kalınlığına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Her numune için beş deney parçası deneye tabi tutulmuş ve ortalama değer belirlenmiştir. Deney sonucunda yırtılma mukavemeti Denklem 3.7’de verilen bağıntı ile hesaplanmış olup sonuçlar N/mm olarak verilmiştir.

$$T_s = \frac{F}{d} \quad (3.7)$$

Burada,

F maksimum kuvveti, (N),

d numunenin ortalama kalınlığını, (mm) temsil etmektedir.



Şekil 3.8. Numune kesme kalıbı tipi

3.6. Hazırlanan Kompozitlerin Yapısal Özelliklerinin Araştırılması

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri

Kompozitlerin yüzey morfolojileri Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (SDÜ YETEM), Malzeme Karakterizasyon Laboratuvarında (FEG-SEM) FEI QUANTA FEG 250 model Alan Emisyon Tabancası Taramalı elektron mikroskobu ile gözlemlenmiştir. Ayrıca element analizleri de (SEM-EDS) yapılmıştır.

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) analizleri

AFM analizi, malzemelerin yüzey morfolojilerini atomik kuvvet mikroskobu ile üç boyutlu incelemek için kullanılan bir yöntemdir. AFM cihazı, yüzey ile temas halinde olan veya çok yakınında bulunan bir uç ile donatılmıştır. Uçun yüzey ile etkileşimi sırasında oluşan kuvvet, bir manivela tarafından algılanır. Bu kuvvet, yüzeyin şeklini, sertliğini, yapışkanlığını, elektriksel iletkenliğini, manyetik özelliklerini ve diğer parametreleri tespit etmek için kullanılabilir. AFM analizi, organik, inorganik ve nano malzemelerin karakterizasyonunda uygulanabilir bir yöntemdir (Ateş, 2018).

Kompozitlerin yüzey özellikleri, Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (SDÜ YETEM), Malzeme Karakterizasyon Laboratuvarındaki ez-AFM Nanomagnetics cihazı ile üç boyutlu

olarak ölçülmüştür. Bu cihaz, nanometre seviyesinde çözünürlüğe sahip olup optik yöntemlerden en az 1000 kat daha duyarlıdır ve yüzey şeklinin yanı sıra profilometre modu ile malzemelerin kaplama kalınlıklarını da belirleyebilmektedir. Yüzeyin topografyası ve 3 boyutlu görüntüsü, nanometreden mikrona kadar kantitatif bir şekilde tespit edilebilmektedir. Ölçümler, ucun yüzeye dokunmadığı tapping modunda yapılmıştır. Tarama alanı 25 µm × 25 µm olarak ayarlanmıştır.

Isıl bozunma (DTA-TG) analizleri

DTA-TG analizi, bir numunenin kütesinin, sıcaklığın veya zamanın bir fonksiyonu olarak nasıl değiştiğini belirleyen bir tekniktir. Bu analiz, bir numuneyi ısıtan veya soğutan bir fırın ve numunenin kütesini hassas bir şekilde tartan bir denge içerir. Numunenin kütesi, sıcaklık veya zaman ile kayıt altına alınır. Numunenin kütesindeki değişim, numunenin termal davranışı (ısıtma veya soğutma sırasında nasıl tepki verdiği), uçucu maddeleri (ısıtma sırasında uçan veya buharlaşan maddeler), ayrışma sıcaklığı (numunenin kimyasal olarak bozulmaya başladığı sıcaklık), kül miktarı (numunenin tamamen yandıktan sonra kalan madde miktarı), karbon nanotüplerdeki metal kalıntıları (karbon nanotüplerin içindeki veya üzerindeki metal parçacıkları) gibi özellikleri hakkında bilgi sağlar. Bu analizde, bir numunenin kütesi, kontrol edilen bir atmosferde, lineer olarak artan veya azalan sıcaklığa bağlı olarak kaydedilir. Kütlenin veya kütle yüzdesinin zamanla değişimi, termogram veya termal bozunma eğrisi olarak adlandırılan bir grafikte gösterilir (Earnest, 1984). Termogravimetrik yöntemde, sıcaklık değişiminin, analitin kütesini etkilemesi gerekir. Bu nedenle, termogravimetrik yöntemler, ağırlıklı olarak bozunma ve yükseltgenme reaksiyonları ile buharlaşma, süblimleşme ve desorpsiyon gibi fiziksel süreçlerle ilgilidir (Skoog vd., 2017).

Hazırlanan kompozitlerin ısıl bozunma davranışları Netzsch Sta 449 F3-Jupiter model termogravimetrik analizör ile 30-1400°C sıcaklık aralığında, argon atmosferinde ve 0.001-30°K/dk ısıtma hızında ölçülmüştür.

X-ışını kırınım (XRD) spektroskopisi

Hazırlanan kompozitlerin XRD analizleri Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (SDÜ YETEM), Malzeme Karakterizasyon Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Analizler BRUKER D8

ADVANCE WIN-TWIN cihazı ile belirlenmiştir. Kırınım deseni, $\lambda=1,54060$ dalga boyundaki Cu-K α ışması ile oda sıcaklığında, $5^{\circ}\leq 2\theta\leq 85^{\circ}$ aralığında, $0,05^{\circ}$ 'lik adım genişliği ve her adımda 0,1 saniye tarama hızı ile elde edilmiştir.

3.7. Hazırlanan Kompozitlerin Su Geçirgenliği Özelliklerinin Araştırılması

Hazırlanan kompozitlerin su geçirgenliği özelliklerini belirlemek amacıyla, TS EN 14150 standardına uygun deney düzeneği bu çalışma için tasarlanmıştır (Şekil 3.9). Deney düzeneği, kompozit numunenin her iki yüzeyine farklı su basınçları uygulanarak (akış yukarı basınç 150 kPa, akış aşağı basınç 50 kPa), fark basıncın 100 kPa'ya sabitlenmesi sonucu, kompozitin birim alanından geçen suyun hacminin zamana bağlı ölçülmesi prensibi ile çalışmaktadır.



Şekil 3.9. Su geçirgenliği deney düzeneği

Şekil 3.9'dan görüldüğü üzere test edilecek numune, alüminyum malzemeden 2 parça olarak (üst plaka ve alt plaka) hazırlanmış test hücreğine sızdırmaz şekilde yerleştirilmektedir. Akış aşağı ve akış yukarı basınçları izleyebilmek amacıyla test

düzeneğinin giriş ve çıkışına birer manometre teçhiz edilmiştir. Akış aşağı tarafı atmosfere açık, şeffaf, 5 metre su sütunu ile basınçlandırılmış ve 5 metreden sonra numuneden sızacak suyun milimetrik ölçülebilmesini sağlayan bir ölçüm düzeneği hazırlanmıştır. Akış yukarı tarafı ise sürekli 150 kPa'da çalışan bir su kaynağına bağlanmıştır. Deneylede çeşme suyu kullanılmaktadır.

Deneye başlanmadan önce test numunesi, hücrenin üst ve alt plakaları arasına sızdırmaz bir şekilde yerleştirilmiş ve sıkıştırılmıştır. Sonrasında deney hücresi basınçsız su ile doldurulmuş ve 1 saat beklenmiştir. Devamında akış aşağı ve akış yukarı hücrelerin basıncı 50 kPa basınca yükseltilmiş ve 1 saat daha beklenmiştir. Ardından kontrollü olarak akış yukarı basıncı 150 kPa'ya yükseltilmiş ve kronometre çalıştırılmış, akış aşağı kısmındaki ölçüm düzeneğinde zamana bağlı olarak su yüksekliği mm cinsinden 5 dk aralıklarla kaydedilmiştir. Deney sonunda birim alandan geçen suyun hacmi, zamana bağlı olarak aşağıdaki Denklem 3.8'de verilen bağıntı ile hesaplanmış olup sonuçlar $m^3/m^2/gün$ cinsinden verilmiştir. Deneyle her malzeme için 3 kez tekrarlanmış ve sonuçlar ortalama değerlerle verilmiştir.

$$q = \frac{Q}{A} \quad (3.8)$$

Burada,

Q numuneden geçen suyun hacmini, (m^3),

A Test numunesi alanını, (m^2) temsil etmektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Kırmızı çamurun fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri, üretim prosesinde bulunan boksit cevherinin doğasına bağlı olduğu gibi ayrıca cevher işleme sürecine, boksit kalıntısının bertaraf ve depolama yöntemine ve depolama sahasından alınan numunenin yaşına da bağlıdır. Aynı depolama alanından farklı zamanlarda alınan numunelerin sonuçlarında farklılıklar görülebilmektedir (Villar, 2009). Bu bölümde öncelikle Türkiye'nin cevherden alüminyum elde eden entegre alüminyum fabrikası, Seydişehir Eti Alüminyum tesislerinden alınan kırmızı çamur numunesinin fiziksel, kimyasal, mineralojik ve mekanik özellikleri, deney çalışmalarıyla belirlenmiş ve sonuçlar dünya genelinde farklı kaynaklardan temin edilen kırmızı çamur numuneleri ile yapılan önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Sonrasında alkalitesinin azaltılması amacıyla damıtılmış su ile süzdürülerek pH değeri düşürülen (nötralize edilen) kırmızı çamurun özellikleri de aynı deney çalışmaları ile belirlenmiş ve sonuçlar kırmızı çamurun doğal haliyle karşılaştırılarak nötralizasyon işleminin kırmızı çamurun özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca özellikleri belirlenen kırmızı çamurun inşaatlarda dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Sonrasında polisülfon (PSF) ve katkı malzemeleri (kırmızı çamur, bentonit, eşen kili ve pomza) ile hazırlanan kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ve yapısal karakterizasyonları araştırılmış ve bu malzemelerin katı atık depolama alanları, göletler gibi çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında geosentetik bariyer malzemeleri olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

4.1. Kırmızı Çamurun Fiziksel Özellikleri

pH tayini

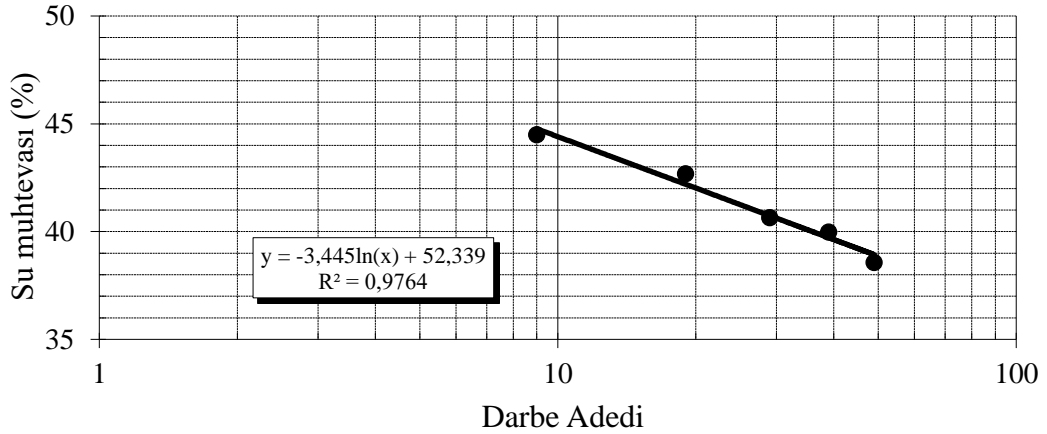
Kırmızı çamurun pH değeri 10,65 olarak belirlenmiştir.

Özgül ağırlık deneyi

Kırmızı çamurun özgül ağırlığı, piknometre yöntemine göre yapılmış olup özgül ağırlık (Gs) 2,87 olarak bulunmuştur.

Kıvam limitleri deneyleri

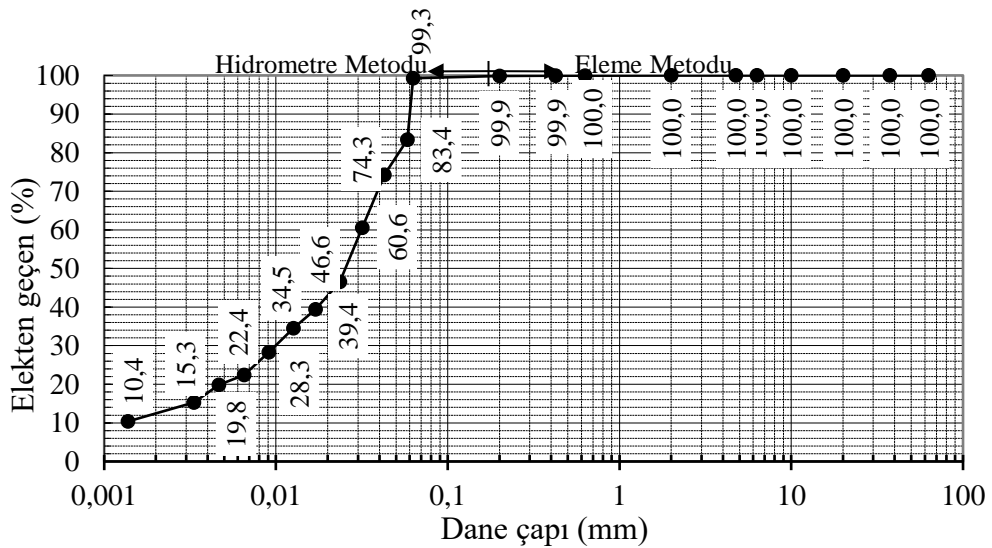
Kırmızı çamurun kıvam özelliklerini belirlemek üzere yapılan deneyler sonucunda likit limiti 41, plastik limiti 30, plastisite indisi 11 olarak belirlenmiştir. Casagrande yöntemi ile belirlenen likit limit değerinin yarı logaritmik grafik ile gösterimi Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Kırmızı çamurun likit limit değerinin belirlenmesi

Tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi deneyi

Kırmızı çamurun tane büyüklüğü dağılımını belirlemek için sırayla elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılmış ve kırmızı çamura ait granülometri eğrisi Şekil 4.2’de verilmiştir.



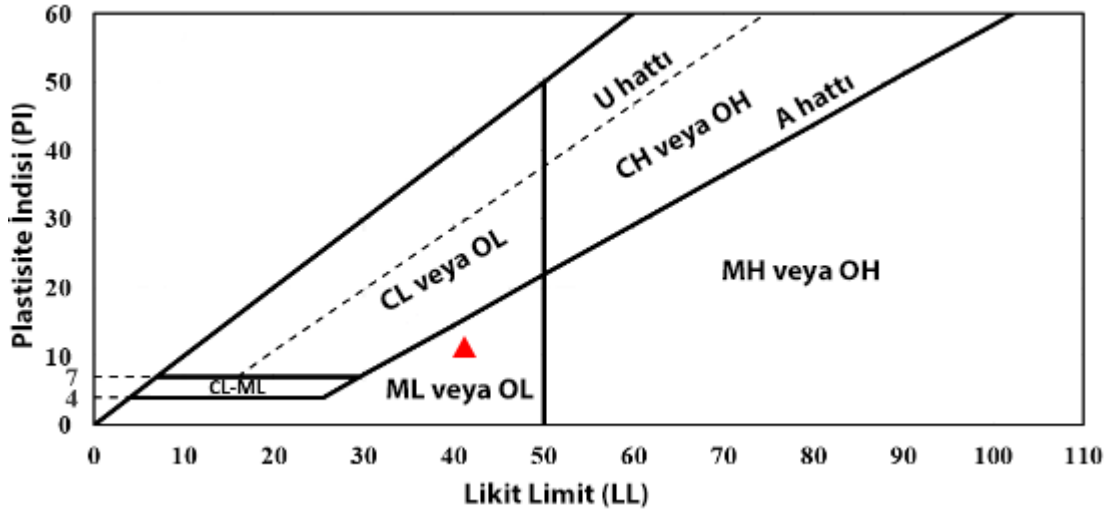
Şekil 4.2. Kırmızı çamura ait granülometri eğrisi

Kırmızı çamurun tane büyüklüğü dağılımına bakıldığında %99,3'ü 63 µm'yi geçen silt ve kil boyutundadır. Kil boyutundaki tane oranı %12, silt boyutundaki tane oranı %87,3, kum boyutundaki tane oranı ise %0,7'dir. Ortalama parçacık boyutu çapı (D_{50}) 25 µm olarak görülmektedir. Tane büyüklüğü dağılımı deneylerine göre belirlenen diğer özellikler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Kırmızı çamurun tane büyüklüğü dağılımına göre belirlenen diğer özellikleri

Özellik	Değer
D_{10} (mm)	0,0013
D_{30} (mm)	0,0100
D_{60} (mm)	0,0314
Uniformluk katsayısı, $C_u = D_{60}/D_{10}$	24,10
Süreklilik katsayısı, $C_r = (D_{30}D_{30})/(D_{60}D_{10})$	2,60

Bu çalışmada özellikleri araştırılan Seydişehir kırmızı çamurunun plastisite kartındaki yeri Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Sonuç olarak birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre düşük plastisiteli inorganik silt zemin (ML) olarak sınıflandırılmıştır.

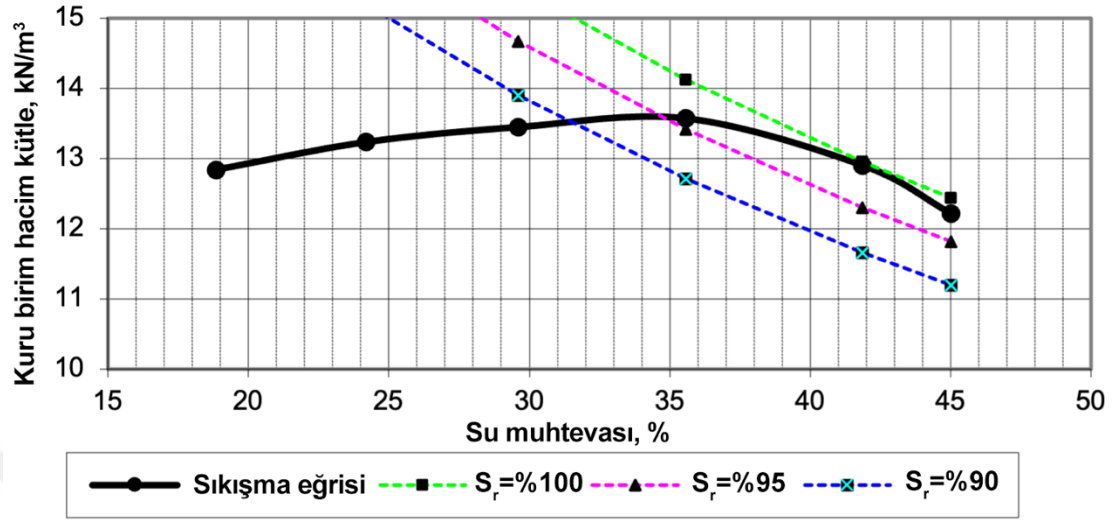


Şekil 4.3. Kırmızı çamurun plastisite kartındaki yeri

Standart sıkıştırma deneyi

Kırmızı çamurun maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax}) ve optimum su muhtevası (w_{opt}) değerlerini bulmak için yapılan standart proktor deneyi sonucunda

elde edilen kompaksiyon eğrisi Şekil 4.4'te verilmiş olup γ_{kmax} ve w_{opt} değerleri sırayla $13,6 \text{ kN/m}^3$ ve %33,6 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.4. Kırmızı çamura ait kompaksiyon eğrisi

Düşen seviyeli geçirgenlik deneyi

Standart sıkıştırma deneyi sonucu elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerlerine göre hazırlanmış numune üzerinde düşen seviyeli geçirgenlik deneyleri gerçekleştirilmiş ve kırmızı çamurun permeabilite katsayısı $7,24 \times 10^{-6} \text{ cm/sn}$ olarak belirlenmiştir.

4.1.1. Kırmızı çamurun fiziksel özelliklerinin değerlendirilmesi

Seydişehir Eti Alüminyum tesislerinden temin edilen kırmızı çamurun belirlenen fiziksel özellikleri, dünya genelindeki farklı kırmızı çamur çalışmaları ile birlikte özet halinde Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Dünya genelinde farklı bölgelerden temin edilen kırmızı çamurların özellikleri

Bölge	Türkiye	Hindistan				Brezilya	İspanya	Çin	Avustralya
Temin Edilen Tesis	Seydişehir Eti Alüminyum	National Alumimum Corporation (NALCO)		Vedanta Company		Samarco Mineraçao SA	ALCOA-San Cibrao	-	Queensland Alumina Limited
Lokasyon	Seydişehir, Konya, Türkiye	Damanjodi, Odisha, Hindistan		Lanjhigarh, Odisha, Hindistan		Minas Gerais, Brezilya	Lugo, İspanya	Liulin, Shanxi, Çin	Gladstone, Queenslan, Avustralya
pH	10,65	-	10,04	11,03	-	14	10,02	-	12
Gs	2,87	3,05	3,45	3,30	3,40	3,60	3,44	2,77	3,00
WL (%)	41	41	25	29	33	34	39	64	47
WP (%)	30	36	19	23	24	27	31	42	32
PI (%)	11	5	6	6	9	7	8	22	15
USCS	ML	ML	ML	ML	ML	ML	ML	MH	ML
γ_{kmax} (kN/m³)	13,6	-	18,3	17,8	20,0	-	16,9	-	17,6
Wopt (%)	33,6	-	22,6	23,0	20,0	-	28,1	-	29,5
k (cm/sn)	7,24 x 10 ⁻⁶	-	5,13 x 10 ⁻⁸	0,50 x 10 ⁻⁷	-	-	2,10 x 10 ⁻⁷	4,50 x 10 ⁻⁶	-
Kaynak	Bu çalışma	(Reddy ve Rao, 2017)	(Panda vd., 2017)	(Samantasinghar ve Singh, 2023)	(Nigam vd., 2023)	(Villar, 2009)	(Rubinos vd., 2015)	(Li vd., 2018)	(Olaya vd., 2017)

pH'in değerlendirilmesi

Kırmızı amurun yüksek pH'ı, inşaat mühendisliği projelerinde yeniden kullanım potansiyeli önünde kısıtlayıcı bir engel olması nedeniyle oldukça önemli ve göz önünde bulundurulması gereken bir parametredir (Reddy vd., 2021). Çizelge 4.2'den görüldüğü üzere farklı rafineriler arasında pH derecesi değişkenlik göstermekle birlikte tamamı 10 üzerinde olup doğal ince taneli zemin malzemelerine kıyasla (7,5-8,5) oldukça baziktir (Abedi Koupai vd., 2020; Işık vd., 2020). Kırmızı amur, aynı depolama havuzunda farklı pH davranışı (zamana ve alındığı bölgeye bağlı olarak) gösterebilmektedir. Başlangıçta bulamaç halindeki kırmızı çamurun pH'ı 13,1-13,2'iken havada kurumaya maruz kalan kırmızı çamurun pH'ı zamanla 10,5-11,0 seviyelerine azalmaktadır (Grfe vd., 2011). Havada kuruma sonrası pH'ın azalması, havadaki karbon dioksit ile boksit kalıntısında tipik olarak bulunan elementler arasında meydana gelen karbonatlaşma reaksiyonlarından kaynaklanmaktadır. Kostik sıvının malzemedен buharlaşması sırasında askıdaki tuzlar kuruyarak sodyum karbonat kristalleşmesine neden olur (Gore, 2015). Çalışmalarda oda sıcaklığında kurumaya bırakılan numunelerde beyaz kristal oluşumları gözlemlenmiştir (şekil 4.5).



şekil 4.5. Kırmızı çamurda havada kuruma sonucu kristal oluşumu

Özgül ağırlığın değerlendirilmesi

Çizelge 4.2’de dünya genelindeki farklı kaynaklardan temin edilmiş kırmızı çamurların özgül ağırlıklarının 2,70-3,60 aralığında değiştiği görülmektedir. Doğal zemin malzemelerinin özgül ağırlıkları (2,65-2,80) (Dereli, 2013; Çimen vd., 2017; Çimen vd., 2021) ile karşılaştırıldığında, kırmızı çamurun özgül ağırlığının nispeten daha yüksek olduğu görülmektedir. Kırmızı çamurun özgül ağırlıkları incelenirken göz önünde bulundurulması gereken, kırmızı çamuru oluşturan ana bileşenlerin özgül ağırlıklarıdır: demir oksit (hematit) 4,8-5,2, alüminyum oksit 3,4-4,0, silis kumu 2,6 ve titanyum oksit ise 3,9-4,2 ağırlığındadır. Bu sonuçlar, malzemeyi oluşturan bu minerallerin yüzdeleri ile birleştirildiğinde, kırmızı çamurun benzer ince taneli zeminlere kıyasla daha yüksek özgül ağırlıklarına sahip olmasının nedeni olabilir (Das vd., 2015; Gore, 2015).

Kıvam özelliklerinin değerlendirilmesi

Kıvam limitleri ile ilgili genel bir anlayış, kil minerallerinden oluşan ince taneli zeminlerin plastisik davranış göstereceği, kıvam derecesinin ise içinde bulunan kil minerallerinin türü ve miktarına bağlı olduğudur (Önalp, 2018). Çizelge 4.2’de verilen kıvam verilerine göre, bu çalışmada incelenen kırmızı çamurun ve önceki çalışmalarda farklı kaynaklarından temin edilerek incelenmiş kırmızı çamurların W_L değerleri %25-64, W_P değerleri %19-42, PI değerleri %5-22 aralığında olup, tipik kil minerallerine göre PI değeri oldukça düşüktür. Bu sonuçlara göre kırmızı çamur atığı çok az-düşük plastisiteli olarak sınıflandırılabilir (Burmister, 1949). Kil zemin malzemeleri ile kıyaslandığında plastik özellikleri oldukça düşüktür (Dereli, 2013; Çimen vd., 2017; Çimen vd., 2021).

Kırmızı çamurun bileşenlerinde kil minerali bulunmadığı halde plastik davranış göstermesi, kilden silt boyutuna kadar değişen ince tane boyutlarının yanı sıra hidroksi sodalit, kankrinit, goetit ve hematit minerallerinin elektrik yüklü parçacıklarıdır (Newson vd., 2006). Çizelge 4.2’de kırmızı çamurun konumuna ve kökenine bağlı olarak kıvam limitlerinde belirgin bir değişkenlik açıkça görülmektedir. Bu değişkenlik, boksit cevherinin kimyasal ve mineralojik bileşimlerinin farklılığına, proses yöntemine ve elektrik yüklü parçacıkların oranları ve oksit bileşiminin oranlarındaki farklılığa da bağlı olabilir (Reddy vd., 2021).

Tane büyüklüğü dağılımının değerlendirilmesi

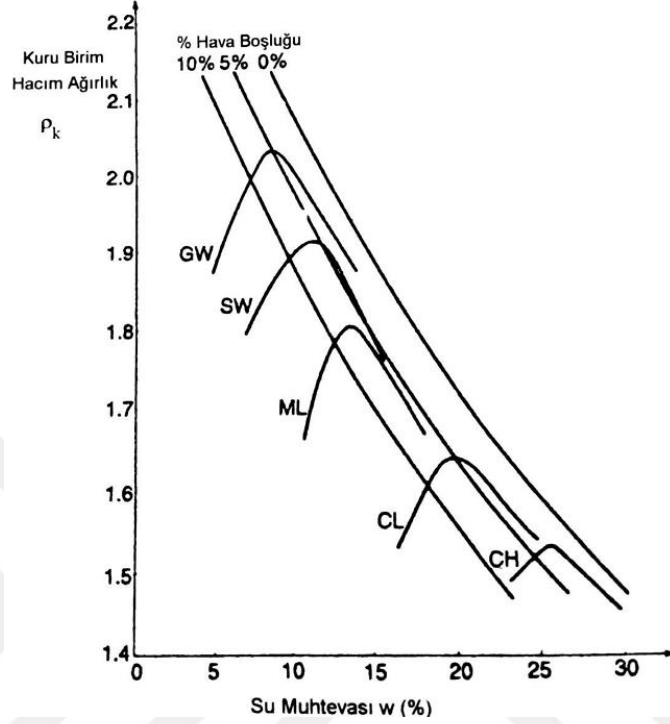
Çizelge 4.2’de görüldüğü üzere, dünya genelindeki farklı tesislerden alınmış kırmızı çamurun birleşik zemin sınıflama sistemine göre neredeyse tamamı ML (düşük plastisiteli silt) olarak belirlenmiş, sadece bir çalışmada Çin’in Shanxi eyaletindeki tesisten alınan kırmızı çamur MH (yüksek plastisiteli silt) olarak rapor edilmiştir.

Madencilik ve endüstriyel atıkların parçacık boyutu, cevherin mineralojisi ve bunların çıkarılması ve işlenmesinde kullanılan endüstriyel teknikle yakından ilişkilidir. Bu özellikler bölgeden bölgeye, hatta aynı bölgedeki farklı tesislerde dahi değişkenlik gösterdiğinden, bu tip malzemeler için standart bir granülometrik eğriyi tanımlamak neredeyse imkansızdır. Endüstriyel proseste atıkların çökme hızını hızlandırmak için uygulanabilecek flokülantlar gibi kimyasal maddelerin miktarını düzenleyen herhangi bir standart bulunmamaktadır. Bu nedenle, aynı cevher kaynağından ve aynı endüstriyel prosesten elde edilen maden ve endüstriyel atıklar arasında bile tane boyutu farklılıklarına rastlamak yaygındır. Depolama alanına çamur halinde fırlatılan atığın içindeki büyük parçacıkların segregasyona uğraması da muhtemeldir. Sonuç olarak depolama alanının bazı yerlerinde daha iri malzeme dağılımı yoğunlaşabilirken, bir başka bölgesinde daha ince dağılım görülebilir. Tüm bu hususlar, bu atıkların geoteknik davranışını tahmin etmek için kılavuz olarak tek bir tane boyutu dağılım eğrisine sahip olmanın imkansızlığını göstermektedir (Villar, 2009). Rubinos vd. (2015), kırmızı çamurun tane boyutu dağılımı analizinde silt ve kil boyutundaki tane oranının fazlalığından dolayı, bu malzemenin geçirimsiz bariyer malzemesi olarak değerlendirebilme potansiyeline sahip olduğunu açıklamışlardır.

Kompaksiyon özelliklerinin değerlendirilmesi

Kırmızı çamurun standart kompaksiyon deneyine göre maksimum kuru birim hacim ağırlığı 13,6 ila 20,0 kN/m³ aralığında, optimum su muhtevası %20,0 ila 33,6 aralığındadır (Çizelge 4.2). Kırmızı çamurun kompaksiyon verileri, standart ve modifiye proktor altında sıkıştırılan kırmızı çamur numunelerinin düşük plastisiteye sahip ince taneli bir zemin malzemesi gibi davrandığını göstermektedir. Kırmızı çamur, benzer özelliklere sahip tipik ince taneli zeminlere (Şekil 4.6) kıyasla daha düşük maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve yüksek nem içeriğinde sıkışmaktadır. Bu özellik kırmızı çamur tanelerinin köşeli ve daha az ayrılmış taneler olmasından ve kil tanelerinin plaka şeklindeki yapısının daha yüksek sıkışma özelliği

sağlayabilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca kırmızı çamurun yüksek pH'ı, mineralojik yapısı ve diğer kimyasal özellikleri de sıkıştırma özelliği üzerinde etkili olabilir (Gore, 2015; Önalp, 2018).



Şekil 4.6. Standart sıkıştırma deneyinden elde edilen farklı zemin türleri için tipik değerler (Önalp, 2018)

Standart kompaksiyon ile sıkıştırılan kırmızı çamurun kompaksiyon eğrileri çoğunlukla yüksek plastisiteli ince taneli zeminler için tipik olan aralıkta yer almaktadır ancak USCS'ye göre ML sınıfında yer alan kırmızı çamurun plastisite indisi oldukça düşüktür. Kompaksiyon verilerinin geleneksel zemin malzemelerinde karşılığının CH-MH malzeme aralığında olması sonucu, geleneksel zemin indeks testlerinin ve ilgili ampirik denklemlerin, kırmızı çamurun davranışının doğru bir şekilde tahmin edilemeyeceğini göstermektedir (Gore, 2015).

Geçirgenlik özelliklerinin değerlendirilmesi

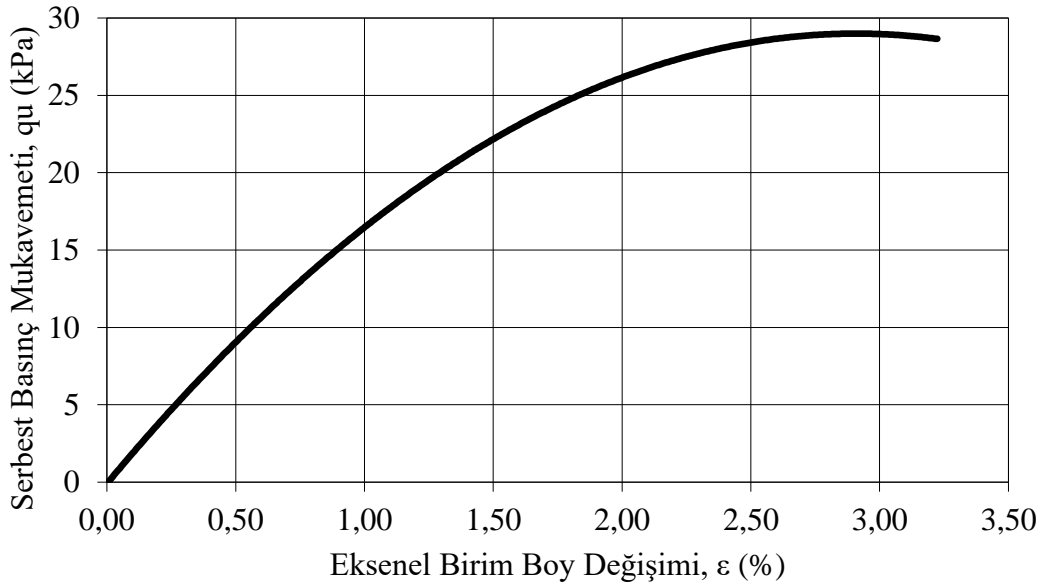
Kırmızı çamurun permeabilite katsayısı 10^{-6} cm/sn ve daha düşük seviyelerdedir (Çizelge 4.2). Kırmızı çamur oldukça küçük taneli bileşenlerden meydana gelmektedir. Düşük hidrolik iletkenlik, gözenek boşluklarını tıkamak için yeterli miktarda ince tanenin olması ve zemin tabakasının yoğun bir kütle ile sıkışmasını engelleyen büyük tanelerin yokluğunda elde edilebildiği için kırmızı çamurun

geçirgenliği de düşüktür. Standart proktor gibi orta düzeyde bir sıkıştırma çabası ve optimumum biraz üstündeki su muhtevasında sıkıştırılan kırmızı çamurun hidrolik iletkenliği, bir hidrolik bariyer malzemesi için önerilen minimum gereksinimleri karşılayabilmektedir (Rubinos vd., 2015).

4.2. Kırmızı Çamurun Mekanik Özellikleri

Serbest basınç deneyi

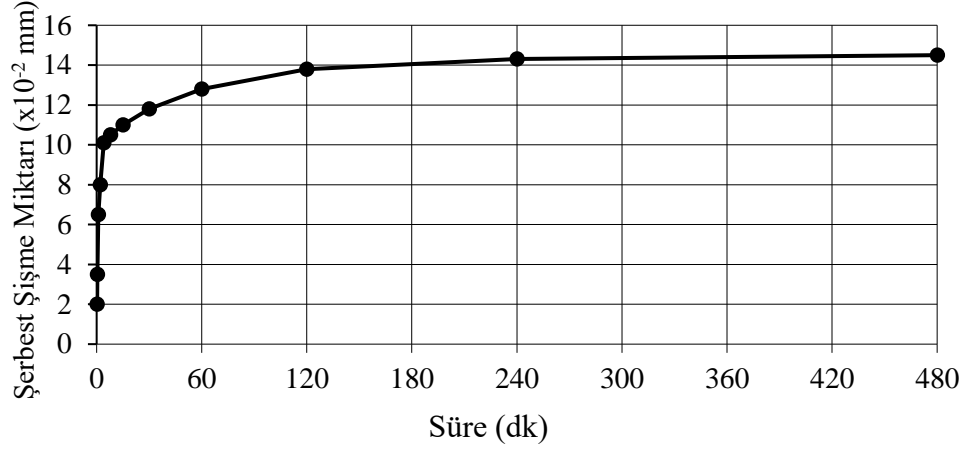
Standart sıkıştırma deneyi sonucu belirlenen maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevasında hazırlanmış kırmızı çamur numunesinin gerilme-eksenel birim boy değişimi ilişkisi Şekil 4.7’de görülmektedir. Serbest basınç deneyi sonucunda serbest basınç dayanımı 29 kPa bulunmuştur.



Şekil 4.7. Kırmızı çamura ait serbest basınç grafiği

Serbest şişme deneyi

Standart sıkıştırma deneyi sonucu belirlenen maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevasında hazırlanmış kırmızı çamur numunesinin bir boyutlu serbest şişme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda kırmızı çamurun serbest şişme yüzdesi %0,85, serbest şişme basıncı ise 6,50 kPa olarak belirlenmiştir. Zamana bağlı olarak zemin numunesinde meydana gelen şişme miktarını gösteren grafik Şekil 4.8’de verilmiştir.

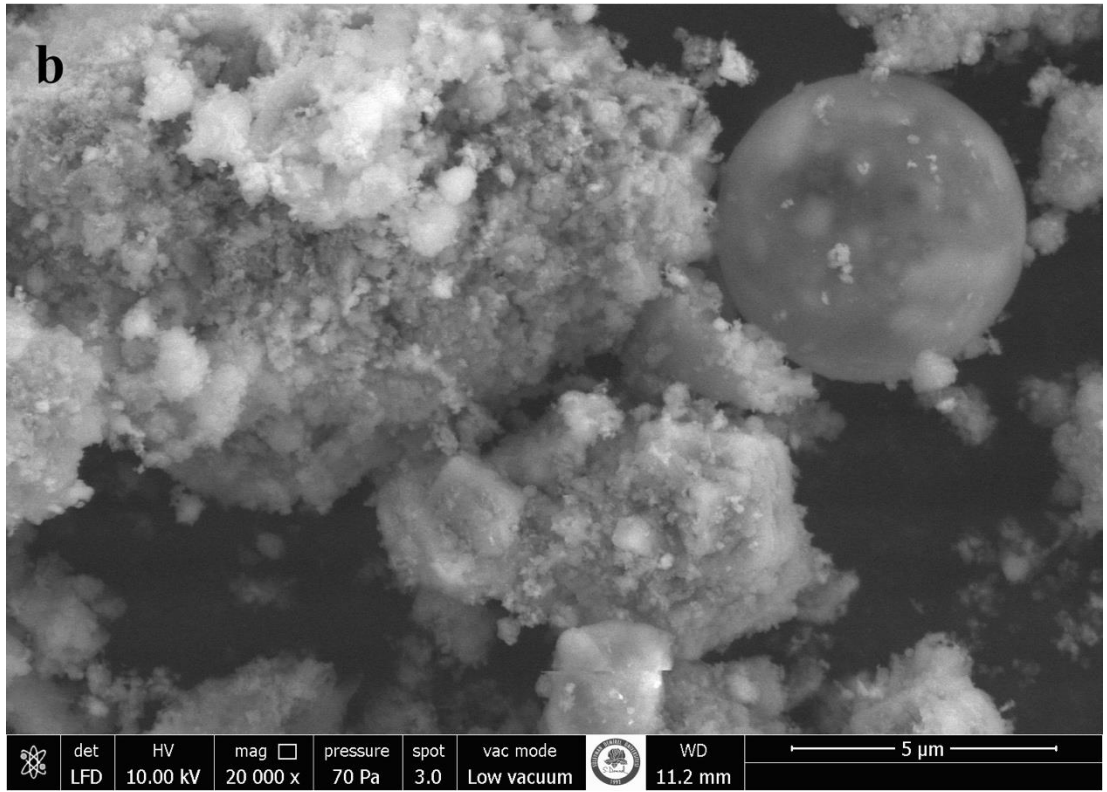
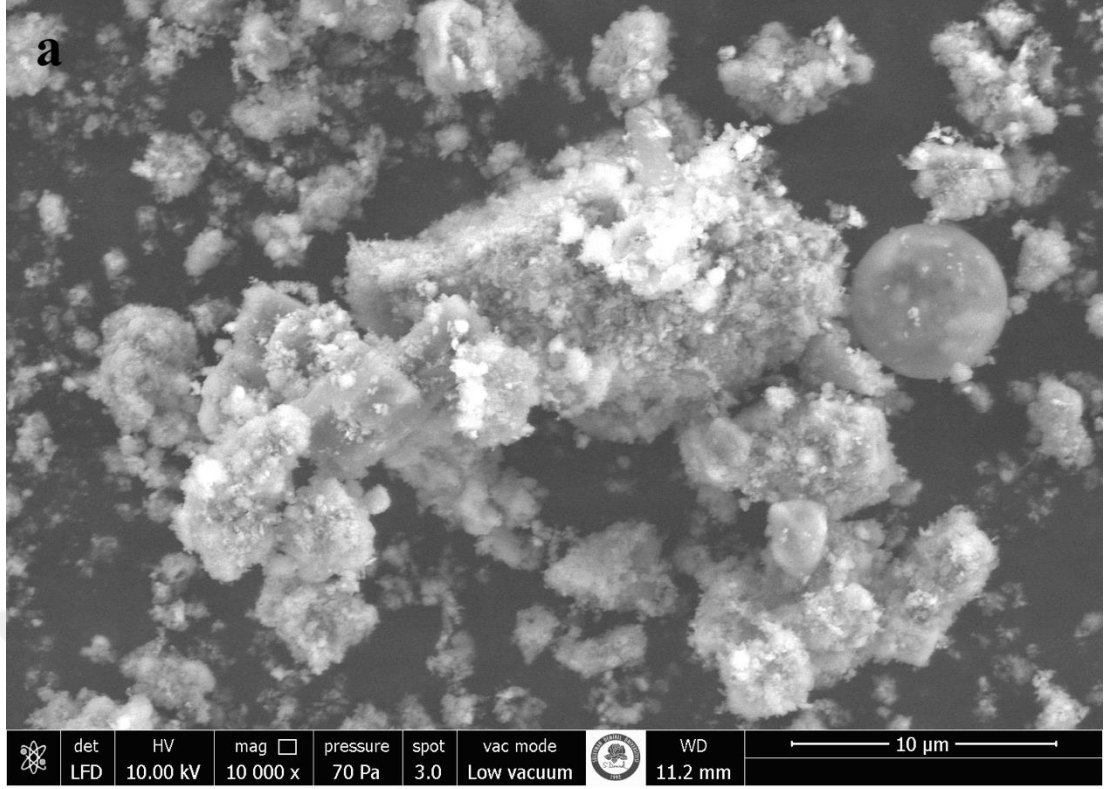


Şekil 4.8. Kırmızı çamura ait serbest şişme-zaman grafiği

4.3. Kırmızı Çamurun Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri

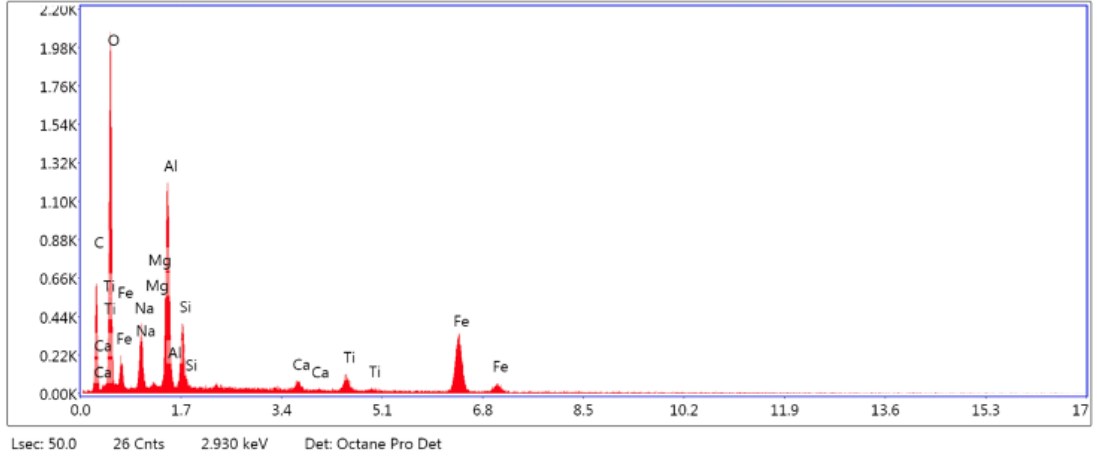
SEM-EDS analizleri

Kırmızı çamurun farklı ölçeklerde büyütülmüş SEM görüntüleri Şekil 4.9'da sunulmaktadır. SEM görüntülerinden, kırmızı çamurun yüzey morfolojisinin düzensiz, topaklaşmış ve küresel parçacıklar içerdiği görülmektedir. SEM görüntülerinde görülen büyük parçacıklar kırmızı çamurun topaklaşmış bileşenlerdir. Das vd. (2015) düşük nem koşullarında bile topaklaşma eğiliminin görülmesini, kırmızı çamurun yüksek alkali yapısının bir sonucu olarak açıklamıştır.



Şekil 4.9. Kırmızı çamurun SEM görüntüleri, (a) 10.000 x, (b) 20.000 x

Kırmızı çamurun elementel karakterizasyonunu belirlemek için EDS analizi yapılmıştır. Seçilen alanın EDS spektrumları Şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.10. Kırmızı çamurun EDS spektrumu

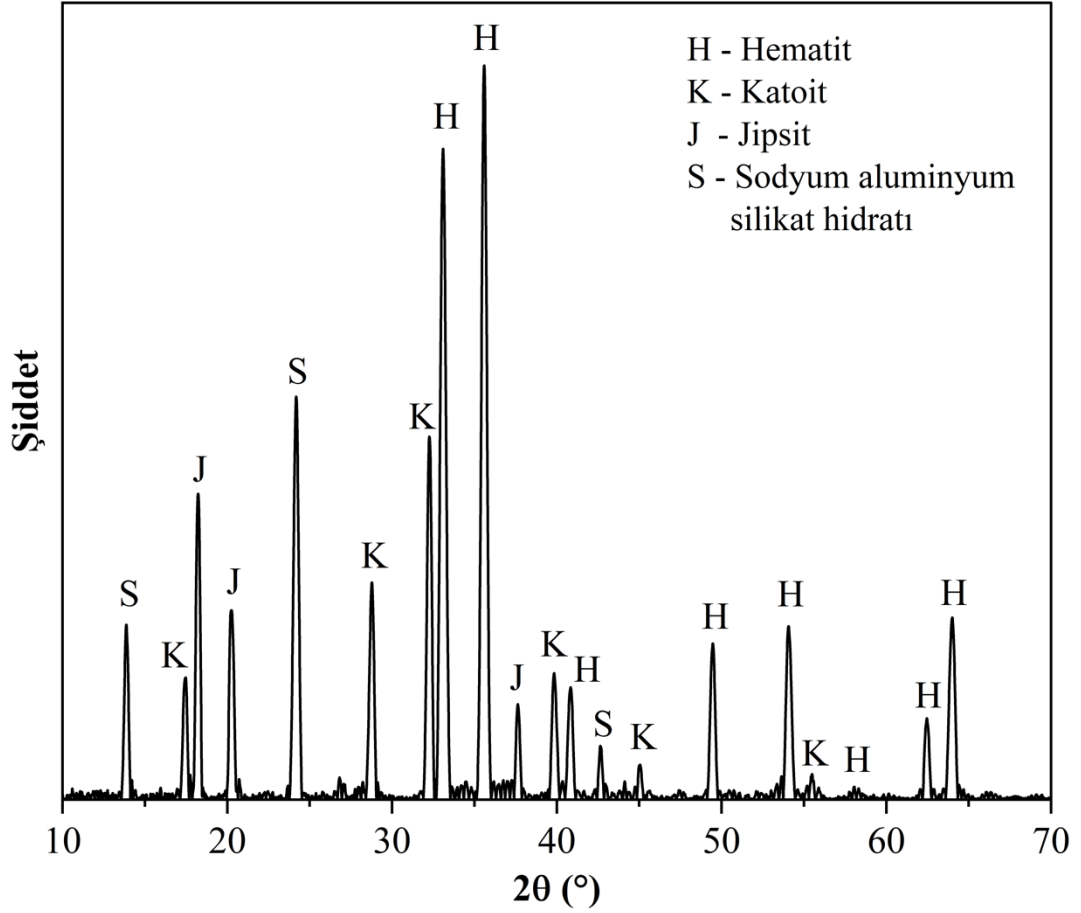
EDS spektrumlarından kırmızı çamurda Fe, Al, Ca, C, O, Si, Ti, Mg ve Na'nın varlığı görülmektedir. EDS spektrumlarına karşılık gelen elementel bileşenleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Kırmızı çamurun elementel bileşenleri

Element	Ağırlık (%)
C	26,53
O	40,95
Na	5,95
Mg	0,24
Al	9,39
Si	2,69
Ca	0,66
Ti	1,38
Fe	12,20

XRD analizi

Kırmızı çamurun XRD deseni Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11. Kırmızı çamurun XRD grafiği

Şekil 4.11'den görüldüğü üzere kırmızı çamurun, Sodyum alüminyum silikat hidratı ($(\text{Na}_2\text{O})_{1.08} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{SiO}_2)_{1.68} \cdot (\text{H}_2\text{O})_{1.8}$) ($2\theta=13.9, 24.2, 32.7, 34.6, 42.7, 51.8, 58.0$), Jipsit ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ($2\theta=18.2, 20.5, 36.5, 37.6, 44.0, 50.4$), Katoit ($(\text{CaO})_3(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1.75}(\text{H}_2\text{O})_{3.75}$) ($2\theta=17.5, 28.8, 32.3, 39.8, 45.1, 53.3$ ve 55.5), Hematit (Fe_2O_3) ($2\theta=33.1, 35.6, 40.8, 49.4$, ve 54.0) yapılarını içerdiği belirlenmiştir.

Boksit mineralojik bir örnek olarak tanımlanmaz. Bu terim, esas olarak alümina hidrat, demir oksit, alüminyum silikat ve titanyum oksitten oluşan bir mineral karışımını ifade eder (Villar, 2009). Yıkama işleminden kaynaklanan atık, muhtemelen cevher kaynağında mevcut olan tüm kimyasal bileşenleri içerecek ve mineralojik bileşimleri, cevher tekdüzeliğine ve onu zenginleştirmek için kullanılan teknolojiye büyük ölçüde bağlı olacaktır (Kır, 2002).

BET yüzey alanı analizi

Kırmızı çamur numunesinin spesifik yüzey alanı (S_{BET}) $36,50 \text{ m}^2/\text{g}$ olarak belirlenmiştir. Kırmızı çamurun spesifik yüzey alanının yüksek olması kırmızı çamur tanelerinin büyük çoğunluğunun (%99,7'si) çok ince ($63 \mu\text{m}$ 'den küçük) olmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, kırmızı çamurun spesifik yüzey alanı, boksitin öğütülme derecesine bağlı olarak yaklaşık 10 ila $40 \text{ m}^2/\text{g}$ arasındadır (Deihimi vd., 2018; Al-Fakih vd., 2023; Cai vd., 2023; Nganda vd., 2023; Niu ve Lin, 2024).

4.4. Nötrale Edilen Kırmızı Çamurun Özellikleri

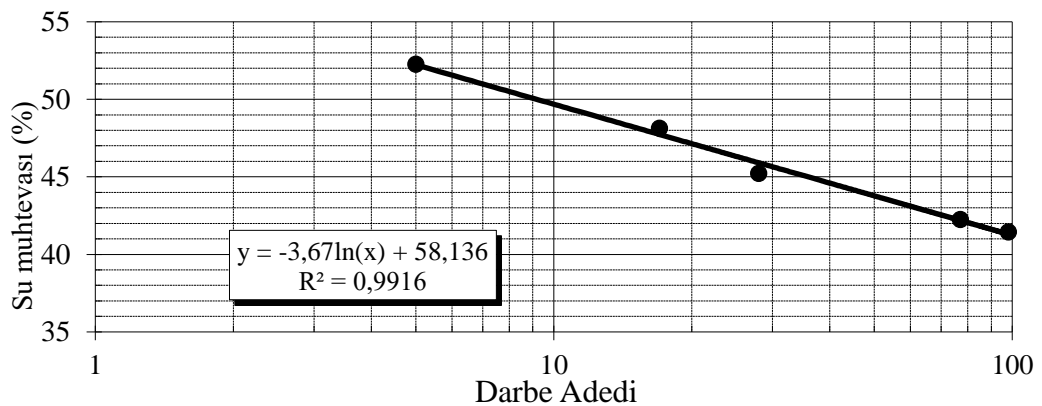
Alkalitesinin azaltılması için damıtılmış su ile yıkanan kırmızı çamurun pH derecesi 10,65'den 9,35'e düşürülmüştür. Bu bölümde damıtılmış su ile süzülerek nötrale edilmiş kırmızı çamurun mühendislik özellikleri araştırılmış, pH değişiminin mühendislik özellikleri üzerinde olası etkisi incelenmiştir.

Özgül ağırlık deneyi

Nötrale edilmiş kırmızı çamurun özgül ağırlığı (G_s) 2,82 olarak belirlenmiştir.

Kıvam limitleri deneyleri

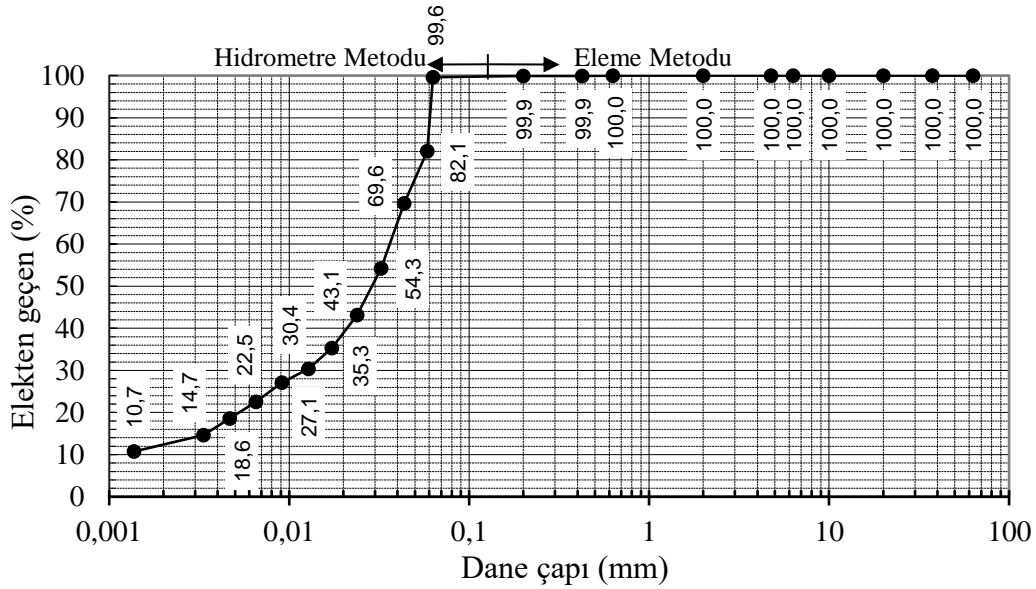
Nötrale edilmiş kırmızı çamurun kıvam limiti özelliklerini belirlemek üzere yapılan deneyler sonucunda likit limit değeri 46, plastik limit değeri 34 ve plastisite indisi 12 olarak belirlenmiştir. Casagrande yöntemi ile belirlenen likit limit değerinin yarı logaritmik grafik ile gösterimi Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12. Nötrale edilmiş kırmızı çamurun likit limit değerinin belirlenmesi

Tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi deneyi

Nötralize edilmiş kırmızı çamurun tane büyüklüğü dağılımını belirlemek için sırayla elek analizi ve hidrometre deneyleri yapılmış ve kırmızı çamura ait granülometri eğrisi Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.13. Nötralize edilmiş kırmızı çamurun granülometri eğrisi

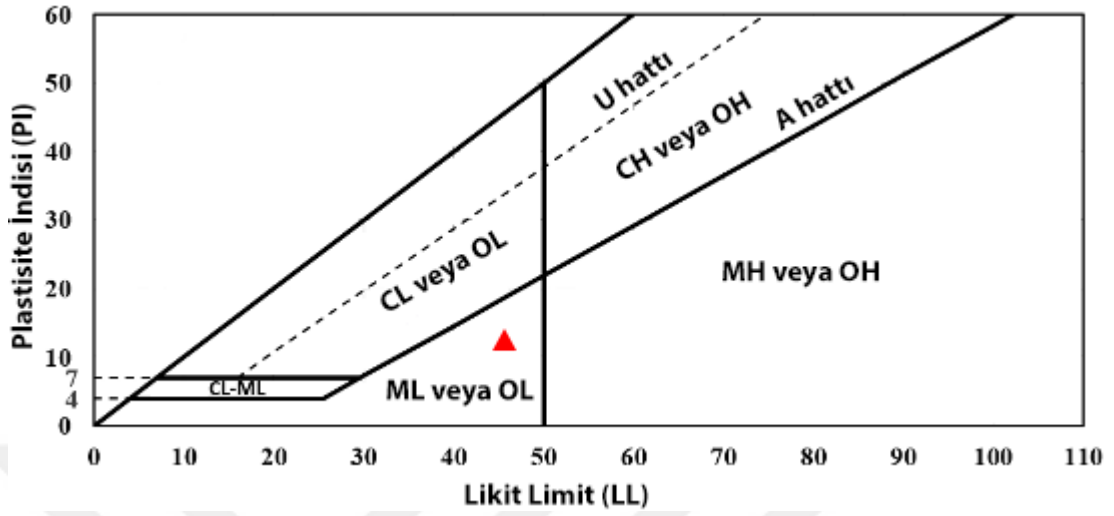
Nötralize edilmiş kırmızı çamurun tane büyüklüğü dağılımına bakıldığında %99,6’sı 63 µm’yi geçen silt ve kil boyutundadır. Kil boyutundaki tane oranı %11,9, silt boyutundaki tane oranı %87,7, kum boyutundaki tane oranı ise %0,4’tür. Ortalama parçacık boyutu çapı (D₅₀) 30 µm olarak görülmektedir. Tane büyüklüğü dağılımı deneylerine göre belirlenen diğer özellikler Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Kırmızı çamurun tane büyüklüğü dağılımına göre belirlenen diğer özellikleri

Özellik	Değer
D ₁₀ (mm)	0,0013
D ₃₀ (mm)	0,0135
D ₆₀ (mm)	0,0365
Uniformluk katsayısı, $C_u = D_{60}/D_{10}$	28,10
Süreklilik katsayısı, $C_r = (D_{30}D_{30})/(D_{60}D_{10})$	3,84

Kıvam limitleri ve granülometri eğrisi belirlenen nötralize edilmiş kırmızı çamurun plastisite kartındaki yeri Şekil 4.14’te gösterilmiştir. Buna göre bu çalışmada nötralize

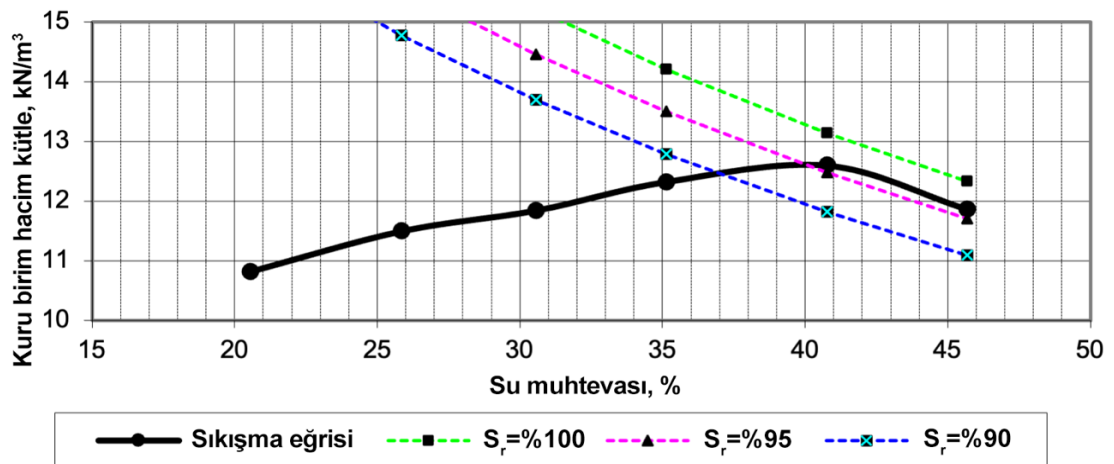
edilmiş kırmızı çamur, birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre (USCS) düşük plastisiteli inorganik silt zemin (ML) sınıfındadır.



Şekil 4.14. Nötralize edilmiş kırmızı çamurun plastisite kartındaki yeri

Standart sıkıştırma deneyi

Nötralize edilmiş kırmızı çamurun maksimum kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmax}) ve optimum su muhtevası (w_{opt}) değerlerini tespit etmek için yapılan standart proktor deneyi sonucunda elde edilen kompaksiyon eğrisi Şekil 4.15'te verilmiş olup γ_{kmax} ve w_{opt} değerleri sırayla $12,6 \text{ kN/m}^3$ ve %39,2 olarak tespit edilmiştir.



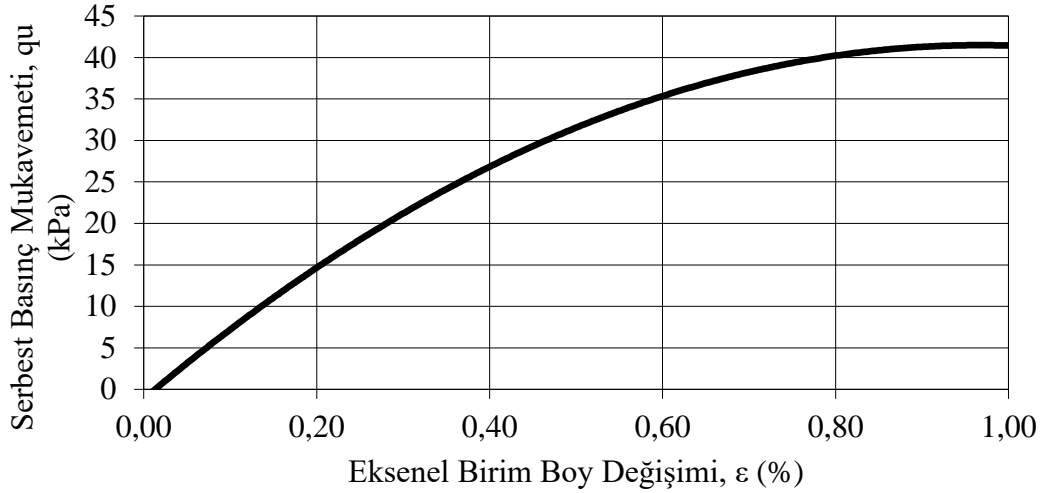
Şekil 4.15. Nötralize edilmiş kırmızı çamurun kompaksiyon eğrisi

Düşen seviyeli geçirgenlik deneyi

Nötralize edilmiş kırmızı çamurun standart sıkıştırma deneyinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerlerine göre hazırlanan numune üzerinde düşen seviyeli geçirgenlik deneyleri gerçekleştirilmiş ve nötralize kırmızı çamurun permeabilite katsayısı $5,99 \times 10^{-4}$ bulunmuştur.

Serbest basınç deneyi

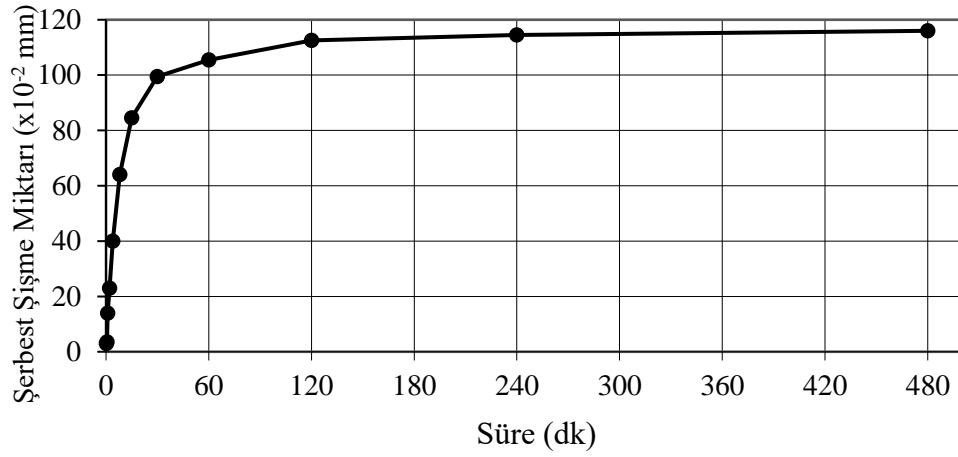
Nötralize edilmiş kırmızı çamurun standart sıkıştırma deneyinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerlerine göre hazırlanmış numuneler ile serbest basınç deneyi yapılmış olup gerilme-eksenel birim boy değişimi Şekil 4.16'da verilmiştir. Kırmızı çamurun serbest basınç mukavemeti (qu) 41 kPa bulunmuştur.



Şekil 4.16. Nötralize edilmiş kırmızı çamurun serbest basınç grafiği

Serbest şişme deneyi

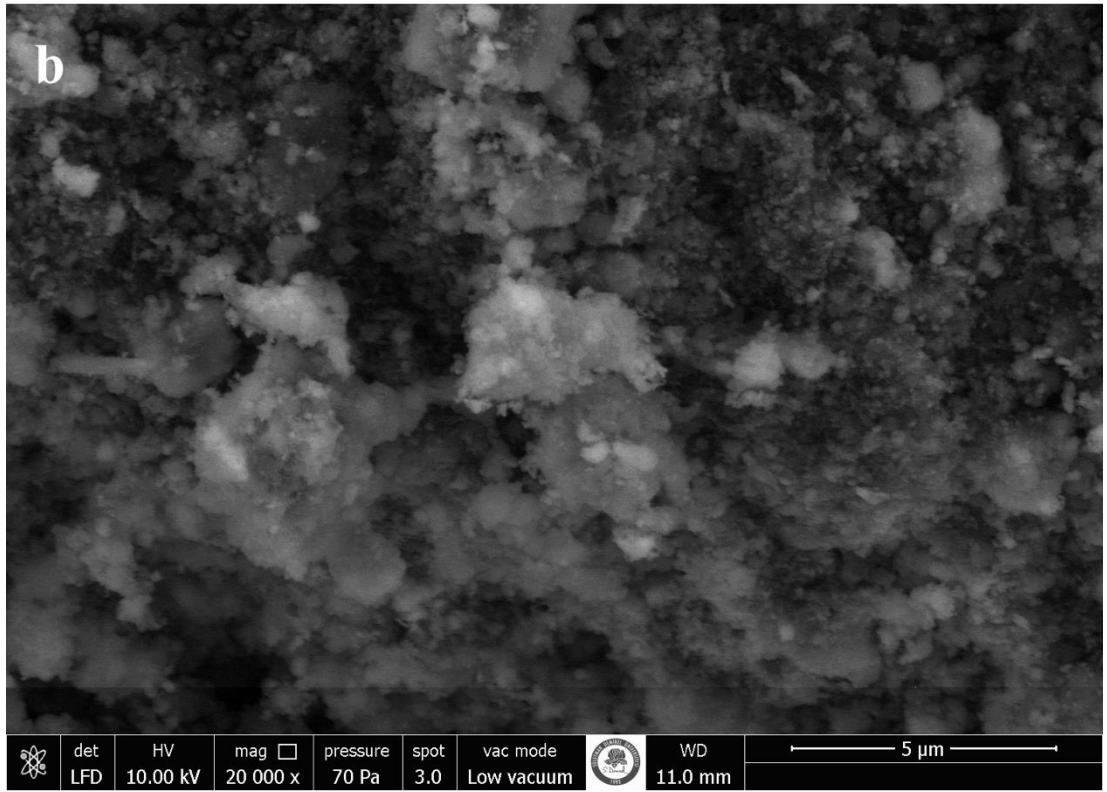
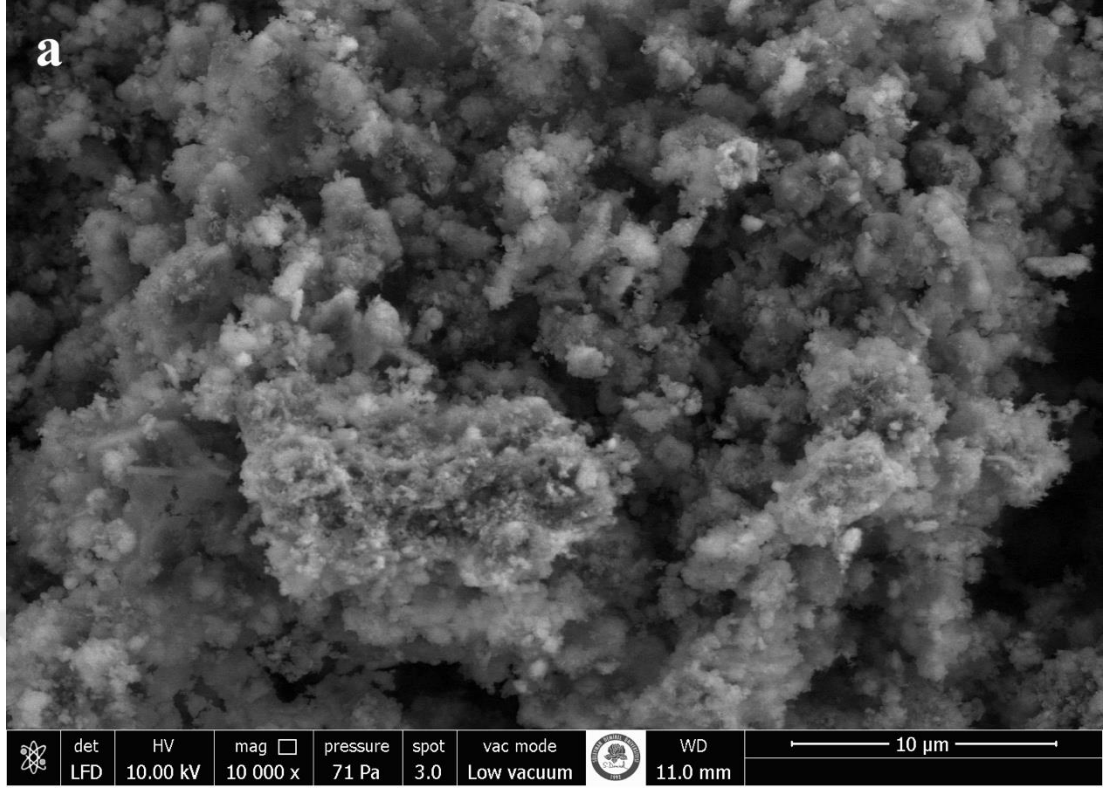
Nötralize edilmiş kırmızı çamurun standart sıkıştırma deneyinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevası değerlerine göre hazırlanan numuneler ile bir boyutlu serbest şişme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda şişme miktarı-zaman eğrisi Şekil 4.17'de verilmiştir. Nötralize edilmiş kırmızı çamurun serbest şişme yüzdesi %6,90, serbest şişme basıncı ise 25,60 kPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.17. Nötralize edilmiş kırmızı çamurun şişme miktarı-zaman grafiği

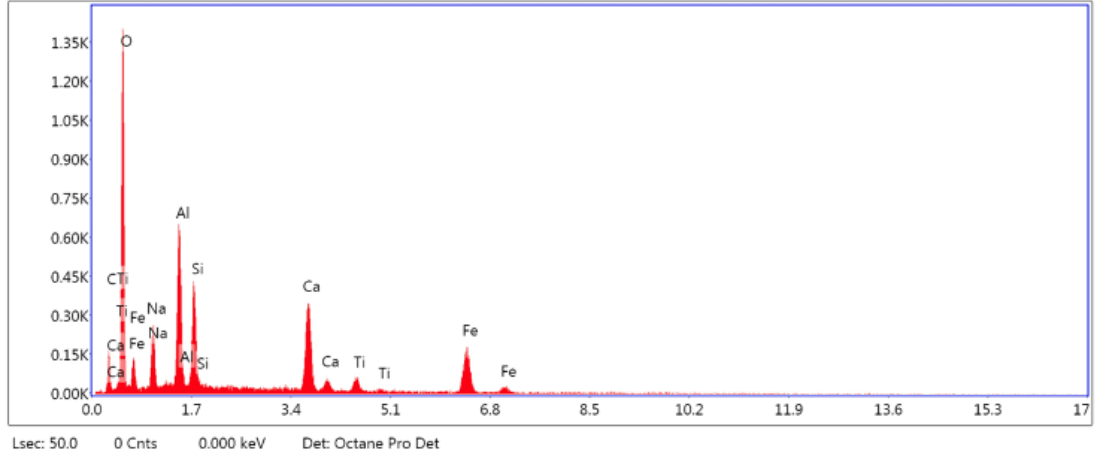
SEM-EDS analizleri

Nötralize edilmiş kırmızı çamurun farklı ölçeklerde büyütülmüş SEM görüntüleri Şekil 4.18'de verilmiştir. SEM görüntülerinden, kırmızı çamurun yüzey morfolojisinin nispeten düzenli ve bileşenlerinin topaklanmış olduğu görülmektedir.



Şekil 4.18. Nötralize kırmızı çamurun SEM görüntüleri, (a) 10.000x, (b) 20.000x

Nötralize edilen kırmızı çamurun elementel karakterizasyonu için EDS analizi yapılmıştır. Analiz için seçilen alanın EDS spektrumları Şekil 4.19’da verilmiştir.



Şekil 4.19. Nötralize kırmızı çamurun EDS spektrumu

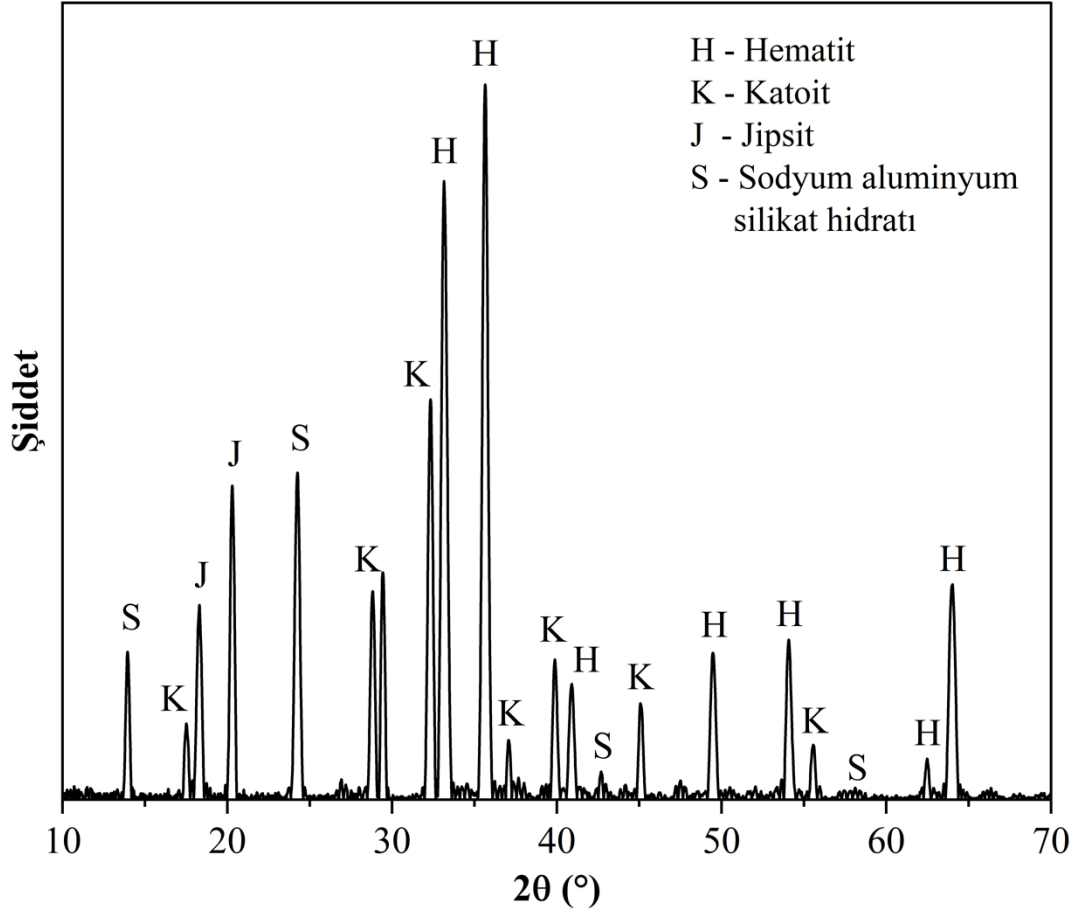
EDS sonuçlarından, kırmızı çamurda Fe, Al, Ca, C, O, Ti ve Na' nın varlığı görülmektedir. EDS spektrumlarına karşılık gelen elementel bileşenleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Nötralize kırmızı çamurun elementel bileşenleri

Element	Ağırlık (%)
C	10,75
O	47,92
Na	7,56
Al	9,09
Si	5,36
Ca	8,00
Ti	1,32
Fe	10,02

XRD analizi

Nötralize edilen kırmızı çamurun XRD deseni Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20. Nötraliz edilmiş kırmızı çamurun XRD grafiği

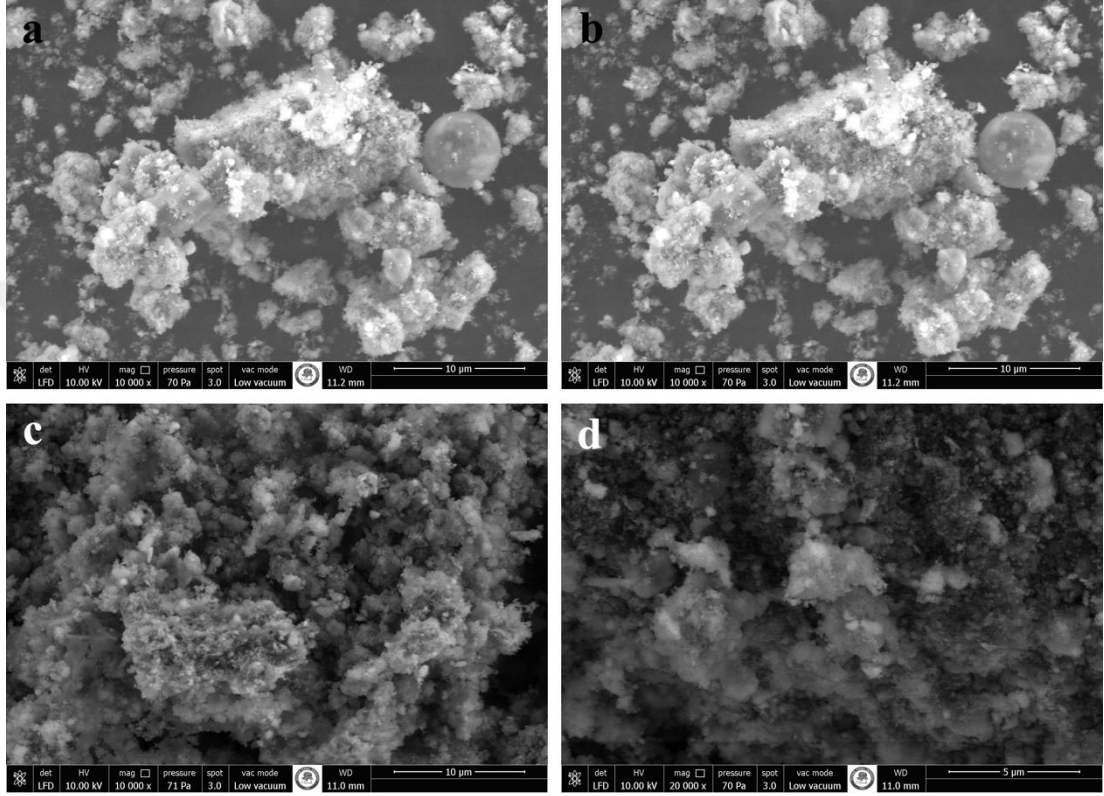
Şekil 4.20'den görüldüğü üzere nötraliz kırmızı çamur Sodyum alüminyum silikat hidratı $(\text{Na}_2\text{O})_{1.08} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (\text{SiO}_2)_{1.68} \cdot (\text{H}_2\text{O})_{1.8}$ ($2\theta=13.9, 24.2, 32.7, 34.6, 42.7, 51.8, 58.0$), Jipsit ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ($2\theta=18.2, 20.5, 36.5, 37.6, 44.0, 50.4$), Katoit ($(\text{CaO})_3(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1.75}(\text{H}_2\text{O})_{3.75}$) ($2\theta=17.5, 28.8, 32.3, 39.8, 45.1, 53.3$ ve 55.5), Hematit (Fe_2O_3) ($2\theta=33.1, 35.6, 40.8, 49.4$, ve 54.0) yapılarını içerdiği belirlenmiştir.

BET yüzey alanı analizi

Nötraliz kırmızı çamur numunesinin spesifik yüzey alanı (S_{BET}) $38,50 \text{ m}^2/\text{g}$ olarak belirlenmiştir.

4.5. Nötralizasyonun Kırmızı Çamurun Mühendislik Özellikleri Üzerine Etkisi

Bu bölümde saf su ile yıkanarak nötralize edilen kırmızı çamurun mühendislik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Şekil 4.21’de saf kırmızı çamur ve nötralize edilmiş kırmızı çamurun SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.21. (a) 10.000x, (b) 20.000x yakınlaştırılmış doğal kırmızı çamur, (c) 10.000x, (d) 20.000x yakınlaştırılmış nötralize kırmızı çamurun SEM görüntüleri

Nötralizasyon öncesi kırmızı çamurun morfolojisinde, küresele yakın ve boyutları oldukça farklı tanelerin düzensiz dağılımı görülmektedir (Şekil 4.21a ve Şekil 4.21b). Saf su ile yıkanarak nötralize edilmiş kırmızı çamurun morfolojisinde ise tanelerin nispeten düzenli olduğu (Şekil 4.21c ve Şekil 4.21d) görülmektedir (Panda vd., 2017; Rai vd., 2017). Rai vd. (2012) nötralize edilmiş kırmızı çamurun SEM görüntülerinde, demir ve titanyumun yuvarlak köşeli parçalarını içeren topaklaşmış malzemeler ile bloklu, küçük ve pürüzsüz sodalit yapılara dikkat çekmiştir. Aglomeraların çoğunlukla 10 µm'den küçük parçacıklardan oluştuğunu belirtmiştir. Ayrıca nötralize edilmiş kırmızı çamurun filtrasyon hızında ciddi bir artış olduğunu belirterek, bu artışın nötralizasyon sonucu oluşan aglomeraların gözenekli yapısından kaynaklandığını

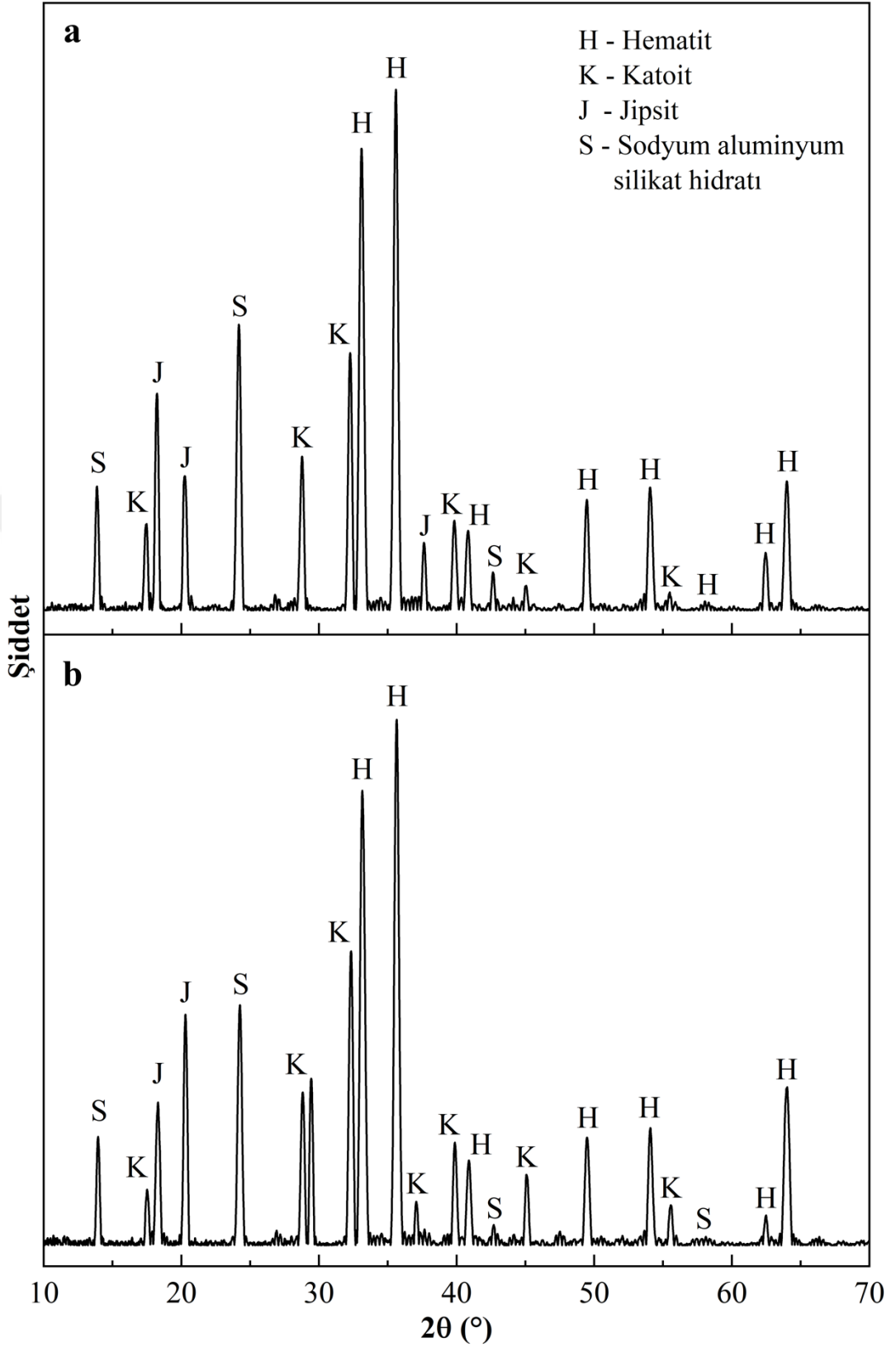
açıklamış ve bu özelliği ile nötralize edilmiş kırmızı çamurun adsorban malzeme olarak kullanılabilceğini açıklamışlardır.

Doğal kırmızı çamur ve nötralize edilmiş kırmızı çamurun EDS spektrumlarına karşılık gelen elementel bileşenleri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Kırmızı çamurun ve nötralize edilmiş kırmızı çamurun elementel bileşenleri

Element	KÇ	NKÇ
	Ağırlık (%)	Ağırlık (%)
C	26,53	10,75
O	40,95	47,92
Na	5,95	7,56
Mg	0,24	-
Al	9,39	9,09
Si	2,69	5,36
Ca	0,66	8,00
Ti	1,38	1,32
Fe	12,20	10,02

Nötralizasyondan sonra kırmızı çamurun elementel bileşenlerinde değişiklikler görülmüştür (Çizelge 4.6). Alüminyum, demir ve titanyum küçük oranlarda azalmış; sodyum, silisyum ve kalsiyum oranları ise artmıştır. Newson vd. (2006) asitle nötralize edilen kırmızı çamurun kimyasal analizinde SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O ve CaO oranlarının azaldığını açıklamışlardır. Rai vd. (2012) asidik dekapaj likör atığı ile nötralize ettikleri kırmızı çamurun pH değerini 7’nin altına düşürmüşlerdir. Kimyasal analiz sonuçlarında nötralizasyon sonrası kırmızı çamurdaki alümina, demir, silika, titanyum ve kalsiyumun hemen hemen aynı kaldığını ancak sodyumun azaldığını rapor etmişlerdir. Sonuçların farklı olması nötralizasyon için tercih edilen yöntemlerden kaynaklanabilir. pH değeri 1,3 olan oldukça asidik dekapaj likör atığı ile saf suyun, kırmızı çamur üzerinde bırakacağı etkinin farklı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca bu çalışmada karşılaştırma için kullanılan EDS analizi numunenin oldukça küçük bir alanını taradığından, nötralizasyonun etkisini incelemek için tek başına yeterli olmayabilir. Daha fazla çıkarım için ayrıntılı çalışmalara ihtiyaç olduğu düşünülmektedir. Doğal kırmızı çamurun ve saf su ile yıkanarak nötralize edilmiş kırmızı çamurun XRD grafikleri Şekil 4.22’de verilmiştir.

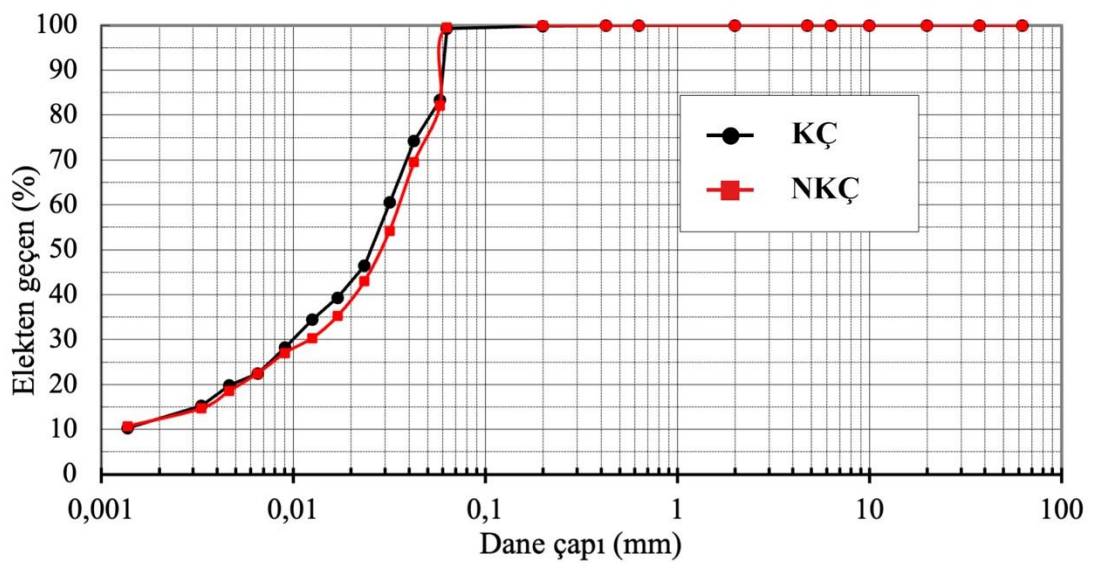


Şekil 4.22. (a) Kırmızı çamurun, (b) nötrleştirilmiş kırmızı çamurun XRD grafiği

Kırmızı çamur ve nötrleştirilmiş kırmızı çamurun XRD modeli, hematit (Fe_2O_3), katoit $(\text{CaO})_3(\text{Al}_2\text{O}_3)_{1.75}(\text{H}_2\text{O})_{3.75}$, jipsit $(\text{Al}(\text{OH})_3)$ ve sodyum alüminyum silikat

hidratının $((Na_2O)_{1.08} \cdot Al_2O_3 \cdot (SiO_2)_{1.68} \cdot (H_2O)_{1.8})$ mevcut ana bileşenler olduğunu göstermektedir. Nötralizasyondan sonra kırmızı çamurda farklı bir mineralojik faza rastlanılmamıştır ve XRD analizi ile tespit edilen mevcut yapılar nötralizasyondan çok fazla etkilenmemiştir. Elde edilen bu sonuçlar literatürle uyum içindedir (Castaldi vd., 2008; Palmer ve Frost, 2009; Luo vd., 2017).

Şekil 4.23'te saf kırmızı çamur (KÇ) ve nötralize edilmiş kırmızı çamurun (NKÇ) granülometri eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.23. (a) Kırmızı çamurun ve (b) nötralize edilmiş kırmızı çamurun granülometri eğrisi

Nötralizasyonun kırmızı çamurun granülometri eğrisini değiştirdiği Şekil 4.23'te görülmektedir. Nötralize edilen kırmızı çamur numunesinde, boyutları 0,01 mm'den büyük tanelerin yüzdesi artmıştır. Granülometri eğrisinde meydana gelen bu değişimin, nötralizasyon sonrası kırmızı çamurun SEM görüntülerinde (Şekil 4.21) tespit edilen topaklanmalardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar literatürle uyum içerisindedir (Panda vd., 2017).

Saf kırmızı çamur (KÇ) ve nötralize edilmiş kırmızı çamurun (NKÇ) fiziksel ve mekanik özellikleri özet halinde Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Saf ve nötralizasyon sonrası kırmızı çamurun mühendislik özellikleri

Özellik	KÇ	NKÇ
pH	10,65	9,35
Likit Limit, W_L (%)	41	46
Plastik Limit, W_P (%)	30	34
Plastisite İndisi, PI (%)	11	12
Birleşik Zemin Sınıfı, USCS	ML	ML
Özgül Ağırlık, G_s	2,87	2,82
No #200 Elek Altı Malzeme, (%)	99,3	99,6
Mak. Kuru Birim Hacim Ağırlık, γ_{kmax} (kPa)	13,6	12,6
Optimum Su İçeriği, w_{opt} (%)	33,6	39,2
Permeabilite, k (cm/sn)	$7,24 \times 10^{-6}$	$5,99 \times 10^{-4}$
Serbest Basınç Mukavemeti, q_u (kPa)	29	41
Serbest Şişme Basıncı, S_{Pr} (kPa)	6,50	25,60
Serbest Şişme Yüzdesi, S_I (%)	0,85	6,90
Spesifik Yüzey Alanı, S_{BET} (m ² /g)	36,50	38,50

Saf su ile yıkanarak pH değeri 10,65'ten 9,35'e düşürülen kırmızı çamurun W_L , W_P değerleri artmış, PI değerinde ise belirgin bir değişiklik olmamıştır. USCS'ye göre düşük plastisiteli inorganik silt (ML) grubunda yer alan kırmızı çamurun zemin sınıfı pH değişiminden etkilenmemiştir. Özgül ağırlık ise nötralizasyon sonrası 2,87'den 2,82'ye azalmıştır. Özgül ağırlıktaki hafif azalma, EDS analizinde (Çizelge 4.6) belirlenen Fe, Al, Ti bileşenlerinin oranlarındaki azalmadan kaynaklanabilir. Elde edilen sonuçlar literatür ile uyum içindedir (Panda vd., 2017).

Standart kompaksiyon deneyine göre nötralizasyon sonucu kırmızı çamurun maksimum kuru birim hacim ağırlığı 13,6 kPa'dan 12,6 kPa'ya azalmış, optimum su miktarı ise %33,6'dan %39,2'ye artmıştır. Kırmızı çamurun sıkışma özellikleri nötralizasyondan etkilenmektedir (Li, 1998; Panda vd., 2017). Reddy ve Rao (2018) kırmızı çamurun sıkışma özelliklerini farklı parametreler altında inceledikleri çalışmada, kırmızı çamur numunelerini farklı asit çözeltileri (HCl ve NaCl) ile iyileştirilerek standart ve modifiye proktor testlerine tabi tutmuşlardır. Çalışma sonucunda, asit çözeltileri ile iyileştirilmiş kırmızı çamur numunelerinin optimum su muhtevalarında azalma, maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında çok az bir artış olduğunu tespit etmişlerdir. HCl ile NaCl'yi karşılaştırdıklarında, HCl ile daha yüksek su muhtevası ve daha düşük maksimum kuru birim hacim ağırlığını elde ettiklerini belirtmişler ve bunun nedenini, katyon değişiminin sebep olduğu parçacık aglomerasyonu ve hızlı flokülasyon olarak açıklamıştır. Ayrıca HCl'nin kırmızı

çamurla karıştırılmasıyla, birim ağırlığı kontrol edenin hidrojen iyonlarından ziyade, partiküllerin parçalanması sonucu açığa çıkmış olabilecek Al iyonları olabileceğini belirtmişlerdir. Genellikle sodyum gibi zayıf bağlar ile bağlanmış yapıları içeren zeminlerin adsorbe olma eğilimi gösterdiğini ve daha fazla su tuttuğunu ve bunun optimum su muhtevsındaki değişikliğin sebeplerinden birisi olabileceğini açıklamışlardır.

Düşen seviyeli geçirgenlik deneyine göre nötrale edilen kırmızı çamurun permeabilite katsayısı $7,24 \times 10^{-6}$ 'dan $5,99 \times 10^{-4}$ 'e artmıştır. Kompaksiyon özelliklerinde görülen değişim geçirgenlik özelliğindeki artışı desteklemektedir (Bozbey, 2004). Nötralizasyon sonrası kırmızı çamurda meydana gelen topaklanma sonucu sıkıştırılmış numunenin daha gözenekli bir yapı sergileyebileceği ihtimali ile geçirgenliğin arttığı düşünülmektedir. Panda vd. (2017) çalışmalarında nötralizasyon sonrası kırmızı çamurun kuru birim hacim ağırlığının arttığını, optimum su muhtevası ve geçirgenliğin ise azaldığını rapor etmişlerdir.

Nötralizasyon sonrası kırmızı çamurun serbest basınç mukavemeti 29 kPa'dan 41 kPa'ya, serbest şişme basıncı 6,50 kPa'dan 25,60 kPa'ya ve serbest şişme yüzdesi ise %0,85'ten %6,90'a artmıştır. Newson vd. (2006) ödometre ve üç eksenli deneyler ile mekanik özelliklerini incelediği kırmızı çamurun oldukça güçlü ve kararlı hidroksisodalit bağlarının, asitle yıkandığında parçalandığını ve mekanik özelliklerin değiştiğini açıklamışlardır. Ayrıca Gibbs oluşum enerjisi katsayıları kullanılarak yaptıkları ön geokimyasal hesaplamalarla hidroksisodalitin parçalanmasının, çözücünün pH'ına bağlı olduğunu ileri sürerek; yüksek pH'lı çözücülerle çözünmenin hafif kaldığını ancak düşük pH'da çok daha fazla olduğunu açıklamışlardır. Bu nedenle, sahada depolanan kırmızı çamurun doğal alkali yapısının, mevsimsel ıslanma ve kuruma döngülerinden etkilenmeyeceğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, literatürde madeni asit atıkları ile alkali kırmızı çamurun karıştırılarak bertaraf edilmesini öneren çalışmalara dikkat çekerek, bu uygulamalar ile bertaraf edilmiş kırmızı çamurun uzun vadede geoteknik performansının etkilenebileceğini açıklamışlardır. Ayrıca kırmızı çamurun fizikokimyasal özellikler açısından kile benzer davranış gösterse de mekanik özellikleri açısından kum veya siltlerle bazı özellikleri paylaşabileceğini belirtmişlerdir.

4.6. Kırmızı Çamurun Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün Dolgu İşleri Teknik Şartnamesi'ne göre baraj ve gölet dolgularında kullanılacak geçirimsiz malzemenin özellikleri Çizelge 4.8'de verilmiştir. Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü'nün Toprak İşleri Teknik Şartnamesi ve Karayolları Genel Müdürlüğü'nün Karayolu Teknik Şartnamesi'ne göre dolgu yapımında kullanılacak malzeme özellikleri ise Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.8. Baraj ve göletlerde kullanılacak geçirimsiz dolgu malzemesinin özellikleri (DSİ, 2007)

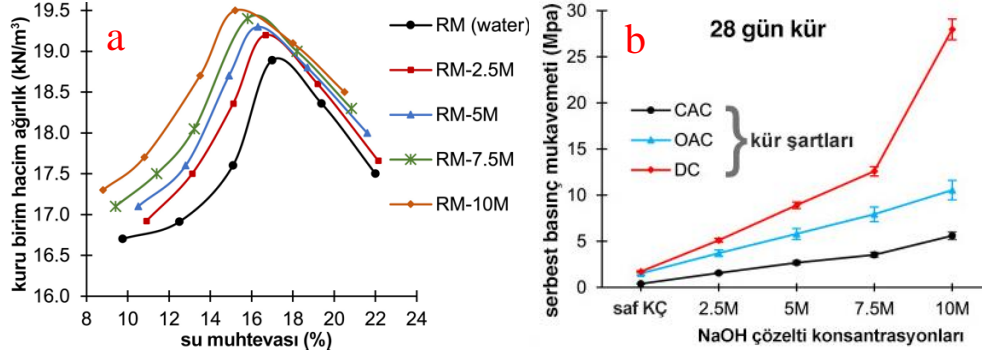
Maksimum tane boyutu	yaklaşık 75 mm
No.4 elekten geçen	% 70-100
No.200 elekten geçen	%40-90
Kil muhtevası ($< 2 \mu$)	\leq %10
Plastisite indisi, PI (%)	\leq %15

Çizelge 4.9. Dolgu malzemesi özellikleri (KGM, 2013; AYG, 2020)

Likit Limit, W_L (%)	\leq 60
Plastisite İndisi, PI (%)	\leq 35
Maks. kuru birim hacim ağırlığı (Standart Proctor)	\geq 1,45 t/m ³

Seydişehir Alüminyum tesislerinden temin edilen ve mühendislik özellikleri araştırılan kırmızı çamurun baraj ve göletlerde geçirimsiz dolgu malzemesi olarak ve karayollarında dolgu malzemesi olarak değerlendirilebilmesi için gereken niteliklere bakıldığında, kırmızı çamurun tamamı No.4 elekten, %99,3'ü de No.200 elekten geçmektedir. Malzemenin kil muhtevası %12 ve plastisite indisi %11'dir. Bu sonuçlara göre baraj ve göletlerde kullanılacak geçirimsiz dolgu malzemesi için Çizelge 4.8'de istenen dört özellikten ikisi (No.200 elekten geçen ve plastisite indisi) sağlanamamıştır. Karayollarında kullanılacak dolgu malzemesi için belirtilen özelliklere bakıldığında (Çizelge 4.9), kırmızı çamurun likit limit ve plastisite indisi değerleri istenen sınırlar içinde olsa da maksimum kuru birim hacim ağırlığı 1,45 t/m³'ün altında kalmaktadır. Geleneksel dolgu malzemelerine kıyasla istenen tüm şartları sağlayamayan kırmızı çamurun, dolgularda kullanılan yüksek plastisiteli kil malzemelerine göre nispeten düşük plastisite ve aktiviteye sahip olması, sıkıştırılmış kırmızı çamurun dolguda kullanımı için bir avantajdır. Çünkü kil zeminlere kıyasla

daha az büzülme/ime davranışı gösteren kırmızı çamur, daha düşük kuruma çatlağı oluşturacaktır. Ayrıca, geleneksel kil malzemelerinde bulunabilecek organik madde, doğası gereği kırmızı çamurda bulunmamaktadır (Gore, 2015). Kırmızı amur, boksit cevherinin kaynağına ve boksitin ilenme yöntemine (Bayer veya Sinterleme) göre özellikleri değişkenlik gösteren bir malzemedir. Çizelge 4.2’de görüldüğü üzere izelge 4.8’de istenen şartlardan plastisite indisinin %15’in üzerinde olduğunu bildiren alımalar (Olaya vd., 2017; Li vd., 2018) ve No.200 elekten geçen malzeme oranının %40-90 aralığında olduğunu bildiren alımalar (Deelwal vd., 2014; Panda vd., 2017; Reddy ve Rao, 2017; Nigam vd., 2023) bulunmaktadır. Yine aynı şekilde izelge 4.9’da belirtilen nitelikleri sağlayan alımalar (Rubinos vd., 2015; Olaya vd., 2017; Panda vd., 2017; Kumar Nigam vd., 2023; Samantasinghar ve Singh, 2023) da bulunmaktadır. Ayrıca çeşitli stabilizasyon yöntemleri ile kırmızı çamurun özellikleri iyileştirilebilir ve dolgu için istenen nitelikler sağlanabilir. Singh vd. (2023) atık barajı sedde dolgusunda kırmızı çamurun kullanılabilirliğini araştırdıkları çalışmada, saf kırmızı çamur ve dört farklı konsantrasyonda sodyum hidroksit (NaOH) ile aktive edilmiş kırmızı çamurun fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda NaOH ile aktive edilmiş kırmızı çamurun, saf su ile sıkıtırılmı kırmızı çamura kıyasla daha yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve daha düşük nem muhtevasına (ekil 4.24a) sahip olduğunu ve bunun nedenini itici kuvvetlerin azalması sonucu parçacıkların kaymasını kolaylaştıran sudan daha yüksek yağlama kapasitesi olarak yorumlamışlardır. Çeşitli kr şartlarında, 28 günlük kr süresi sonunda farklı konsantrasyonlarda NaOH ile aktive edilen kırmızı çamurun serbest basınç dayanımlarını incelediklerinde (ekil 4.24b), tüm krleme koşulları altında alkali konsantrasyonunun artmasıyla, kırmızı çamurun basınç dayanımlarında iyileşme sağlanabildiğini rapor etmişlerdir.



Şekil 4.24. Farklı konsantrasyonlarda alkali ile aktif edilmiş kırmızı çamurun a) kuru birim hacim ağırlığı-su muhtevası, b) 28 gün farklı kür şartlarında serbest basınç dayanım grafikleri (Singh vd., 2023)

Dolgu İşleri Teknik Şartnamesi'nde (DSİ, 2007) baraj ve gölet dolgularında kullanılacak geçirimsiz çekirdek malzemesinin hidrolik iletkenlik nitelikleri belirtilmemiştir. Ancak su kaybının minimumda tutulması için geçirimsiz çekirdekte kullanılan malzemenin düşük permeabilite olması gerekmektedir (DSİ, 2012). Geçirimsizlikleri düşük ve likit limitleri yüksek olan killi malzemeler gerek boşluk suyu basıncı doğurdıklarından ve gerekse işlenmeleri güç olduğundan ve de büyük hacim değişiklikleri gösterdiklerinden kullanılmaları tavsiye edilmemektedir. Bu nedenle $k=10^{-8}$ cm/sn'den düşük permeabilite zeminler ile likit limiti 50'nin üzerinde olan zemin malzemeleri genellikle toprak dolguların ana geçirimsiz çekirdeklerinde kullanılmamaktadır. İstenilenden fazla geçirimli zeminler ise borulanma ve stabilite kaybına neden olabilmektedir. Çizelge 4.10'da farklı nitelikteki dolgu malzemelerinin alt ve üst permeabilite limitleri ve optimum değerleri verilmiştir (Akçalı ve Arman, 2006).

Çizelge 4.10. Farklı nitelikteki dolgu malzemelerinin permeabilite limit değerleri (Akçalı ve Arman, 2006)

Malzeme Niteliği	Tavsiye edilen alt limit	Tavsiye edilen üst limit	Tavsiye edilen optimum değerler	Limit aşımının tehlikesi
Geçirimsiz Malzeme	10^{-5} cm/s	10^{-8} cm/s (LL > 50 ise)	10^{-5} - 10^{-8} cm/s	Geçirimsizlik, Stabilite
Yarı geçirimli ve geçirimsiz kabuk dolgu malzeme	10^{-4} cm/s	10^{-6} cm/s	10^{-5} cm/s	Boşluk suyu basıncı, geçirimsizlik, stabilite
Filtre ve geçirimli kabuk dolgu malzeme	10^{-4} cm/s	-	$>10^{-4}$ cm/s	Boşluk suyu basıncı, geçirimsizlik

Hidrolik iletkenlik açısından kırmızı çamurun bu çalışmada elde edilen sonuçları olumludur. Bulgular, standart kompaksiyon verileri sonucuna göre sıkıştırılan kırmızı çamurun 10^{-6} cm/s mertebesinde bir hidrolik iletkenliğe sahip olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak kırmızı çamur Çizelge 4.10'da belirtilen limit değerlere göre değerlendirildiğinde dolgularda geçirimsiz malzeme için minimum gereklilikleri karşılamaktadır.

Dolgularda kullanılan geçirimsiz malzemelerin özgül ağırlığı 2,50 ila 2,80 arasındadır, bu sınırın altında kalmak yeterli geçirimsizliği sağlayamama ve malzemenin organik madde içerme olasılığının bulunduğunu gösterir (Akçalı ve Arman, 2006). Sınırın çok üstünde kalması halinde de malzemenin çok ağır olacağı ve bu nedenle set dolgusu olarak kullanıldığında aşırı oturma sorunları yaşanacağı yönünde bir endişe vardır (Gore, 2015). Bu çalışmada kırmızı çamurun özgül ağırlığı 2,87 (nötralize kırmızı çamur için 2,82) olarak belirlenmiş olup dolgularda kullanılan geleneksel kil malzemelerin çok az üzerindedir. Kırmızı çamurun yüksek özgül ağırlığı, sıkıştırılmış birim hacim ağırlığı ile değerlendirildiğinde geleneksel kil malzemelerine göre dezavantaj oluşturmaz. Bunun nedeni kompaksiyon deneylerinden elde edilen kırmızı çamurun sıkıştırılmış birim hacim ağırlığının tipik killer veya siltler için elde edilen ağırlıklardan çok daha düşük olmasıdır. Dolayısıyla, tipik bir dolgu malzemesi ile kırmızı çamur arasında büyük ağırlık farkları olduğuna dair algılanan endişe, sunulan laboratuvar verileri ile ortadan kalkmaktadır (Gore, 2015).

Kırmızı çamur yalnızca bu çalışmaya bağlı kalmadan literatürle birlikte değerlendirildiğinde, geoteknik özellikler açısından dolgu malzemesi olarak gereken nitelikleri karşılamaktadır. Malzeme düşük plastiklik, kabul edilebilir özgül ağırlık, mukavemet ve sıkışma, yeterli hidrolik iletkenlik özelliklerine sahiptir. Ayrıca düşük plastisite ve az şişme özelliği, geleneksel kil zeminlere göre avantaj oluşturmaktadır. Özgül ağırlığının yüksek olması ile ilgili oturma endişesi, sıkıştırılmış birim hacim ağırlığının düşük olması nedeniyle önemsizdir. Kırmızı çamurun dolgu malzemesi olarak yeniden kullanımındaki en ciddi endişe olan yüksek pH'ın, damıtılmış su ile süzülendiğinde makul seviyeye düşürülebildiği ve bu işlemin malzemenin geoteknik özellikleri üzerinde olumsuz bir değişiklik oluşturmadığı da göz önüne alındığında, elde edilen sonuçlar kırmızı çamurun dolgu malzemesi olarak değerlendirilebilme potansiyeli açısından cesaret vericidir.

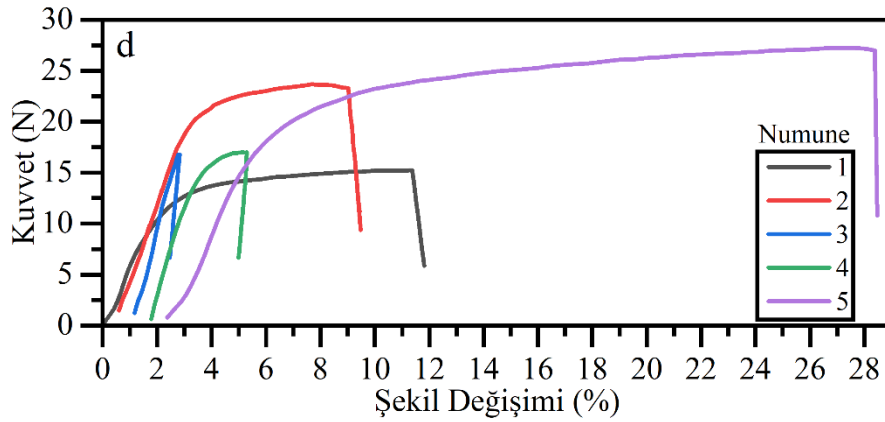
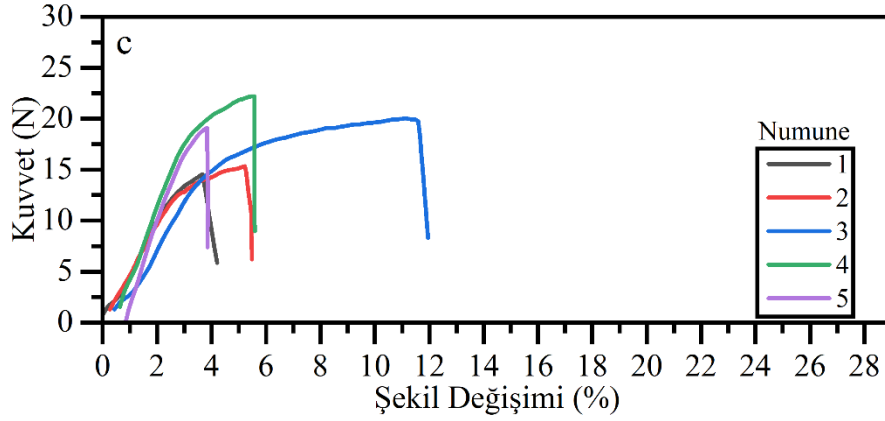
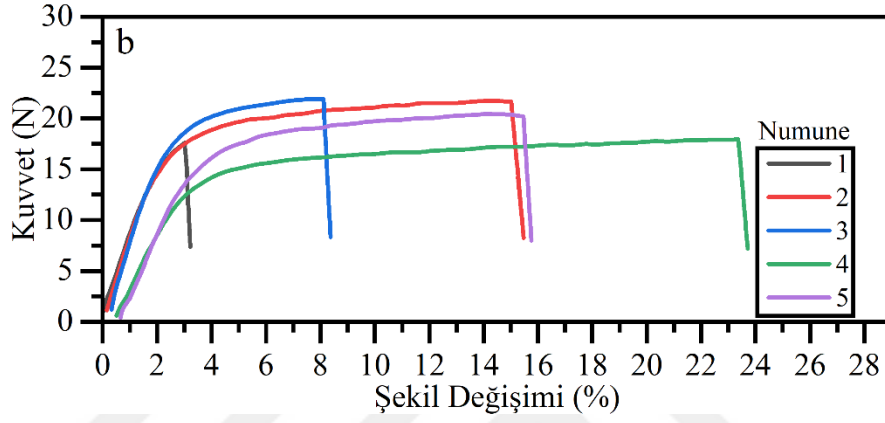
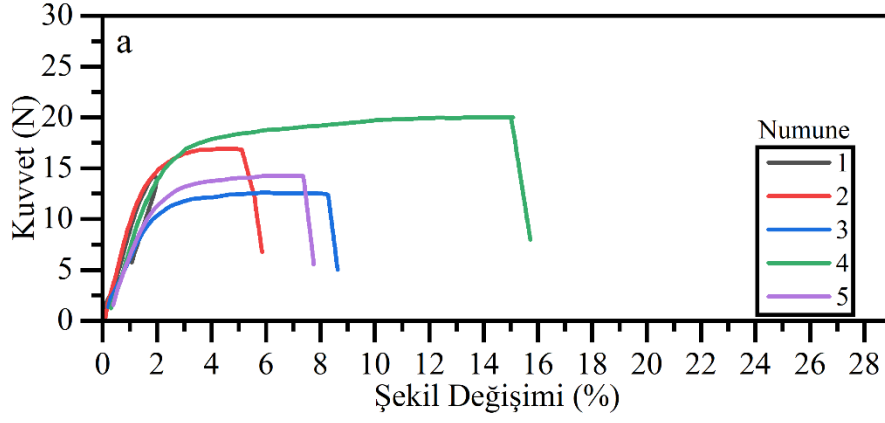
4.7. Hazırlanan Kompozitlerin Mühendislik Özellikleri

Bu bölümde geosentetik bariyer amaçlı üretilen, katkı olarak kırmızı çamur, karakaya bentonit, eşen kili ve pomzanın kullanıldığı polisülfon (PSF) tabanlı PSF GBR, KÇ/PSF GBR, KB/PSF GBR ve EP/PSF GBR numune kodları ile hazırlanan kompozitlerin özellikleri araştırılmıştır.

4.7.1. Kompozitlerin mekanik özellikleri

Çekme dayanımı özellikleri

Hazırlanan her kompozit malzeme için 5 adet numune üzerinde çekme deneyleri gerçekleştirilmiş olup numunelerin çekme kuvveti-şekil değiştirme davranışları Şekil 4.25'te gösterilmektedir.



Şekil 4.25. Hazırlanan kompozitlerin çekme kuvveti-şekil değiştirme davranışı, (a) PSF GBR, (b) KÇ/PSF GBR, (c) KB/PSF GBR, (d) EP/PSF GBR

Çekme kuvveti-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, maksimum çekme kuvveti ve maksimum kopma uzamasını EP/PSF GBR'nin 5 no'lu numunesi (27,2N, %26 uzama) göstermiştir. Ancak burada kompozit numunelerinin standart kalınlıkta olmadığı göz önünde bulundurulması gerekir. Çizelge 4.11'de çekme deneyleri sonucu numunelerin maksimum çekme kuvvetleri, çekme gerilmeleri ve kopma anındaki uzama oranları verilmiştir.

Çizelge 4.11. Hazırlanan kompozitlerin çekme dayanımı özellikleri

Malzeme	Numune	Kalınlık [mm]	Genişlik [mm]	Maksimum Çekme Kuvveti [N]	Çekme Dayanımı [N/mm ²]	Kopma Uzaması [%]
PSF GBR	1	1,23	6,48	14,4	1,8	1,1
	2	1,53	6,45	17,0	1,7	5,5
	3	0,71	6,52	12,6	2,7	8,1
	4	1,20	6,48	20,0	2,6	14,7
	5	1,85	6,60	14,3	1,2	7,0
	Ortalama	1,30	6,51	15,7	2,0	7,3
KÇ/PSF GBR	1	0,99	6,33	17,7	2,8	3,1
	2	0,73	6,37	21,7	4,7	14,8
	3	0,78	6,29	22,0	4,5	7,8
	4	0,49	6,32	18,0	5,8	22,9
	5	0,63	6,44	20,5	5,0	14,8
	Ortalama	0,72	6,35	20,0	4,6	12,7
KB/PSF GBR	1	1,16	6,41	14,5	1,9	3,7
	2	0,93	6,39	15,3	2,6	5,3
	3	1,04	6,37	19,9	3,0	11,2
	4	1,37	6,37	22,3	2,6	5,0
	5	1,53	6,35	19,0	2,0	3,0
	Ortalama	1,21	6,38	18,2	2,4	5,6
EP/PSF GBR	1	0,71	6,44	15,3	3,4	11,3
	2	1,27	6,44	23,7	2,9	8,5
	3	1,64	6,63	16,9	1,6	1,3
	4	1,22	6,50	17,1	2,2	3,5
	5	1,43	6,33	27,2	3,0	26,0
	Ortalama	1,25	6,47	20,1	2,6	10,1

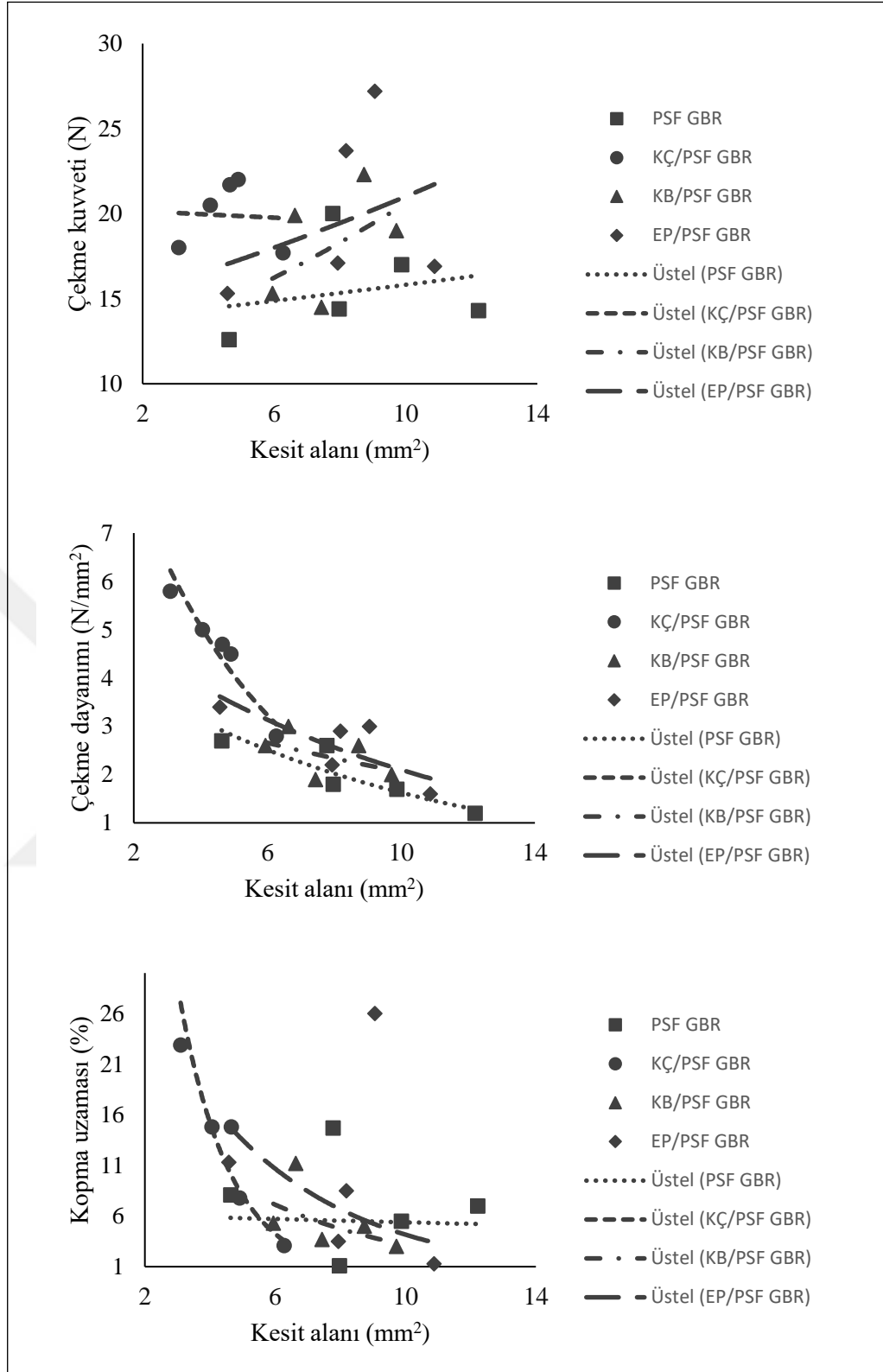
Çekme dayanımı, kopma anındaki maksimum çekme kuvvetinin numunenin kesit alanına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Çizelge 4.11'deki sonuçlar incelendiğinde, en yüksek çekme dayanımı KÇ/PSF GBR'nin 4 no'lu numunesinde (5,8 N/mm²) elde edilmiştir. Ayrıca bu numune, numuneler arasında kalınlığı en az (0,49 mm) olandır. Ortalama çekme dayanımı değerlerine göre en yüksek çekme dayanımı, kırmızı çamur katkılı kompozitte (KÇ/PSF GBR) 4,6 N/mm² olarak belirlenmiştir. En düşük çekme dayanımı ise katkısız olan referans kompozitte (PSF GBR) 2,0 N/mm² olarak belirlenmiştir. Ortalama maksimum çekme kuvveti değerleri incelendiğinde, en yüksek ortalama çekme kuvveti KÇ/PSF GBR, en düşük ortalama çekme kuvveti ise

PSF GBR olarak görülmektedir. Ortalama kopma uzaması değerleri incelendiğinde ise en yüksek ortalama kopma uzamasını KÇ/PSF GBR, en düşük kopma uzamasını ise KB/PSF GBR göstermektedir.

Çekme deneylerinden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- KÇ/PSF GBR kompoziti, hem maksimum çekme kuvveti hem de çekme dayanımı açısından en yüksek değere sahiptir.
- EP/PSF GBR kompoziti kopma uzaması açısından en yüksek değere sahiptir.
- PSF GBR kompoziti hem maksimum çekme kuvveti hem de çekme dayanımı açısından en düşük değere sahiptir.
- KB/PSF GBR kompoziti, kopma uzaması açısından en düşük değere sahiptir.
- EP/PSF GBR kompozitinin 5 no'lu numunesi hem maksimum çekme kuvveti hem de kopma uzaması açısından en yüksek değere sahiptir.
- PSF GBR kompozitinin 3 nolu numunesi hem maksimum çekme kuvveti hem de çekme dayanımı açısından en düşük değere sahiptir.

Çekme kuvveti-kesit alanı, çekme dayanımı-kesit alanı, kopma uzaması-kesit alanı değerlerinin grafik üzerinde gösterimi Şekil 4.26'da gösterilmektedir.



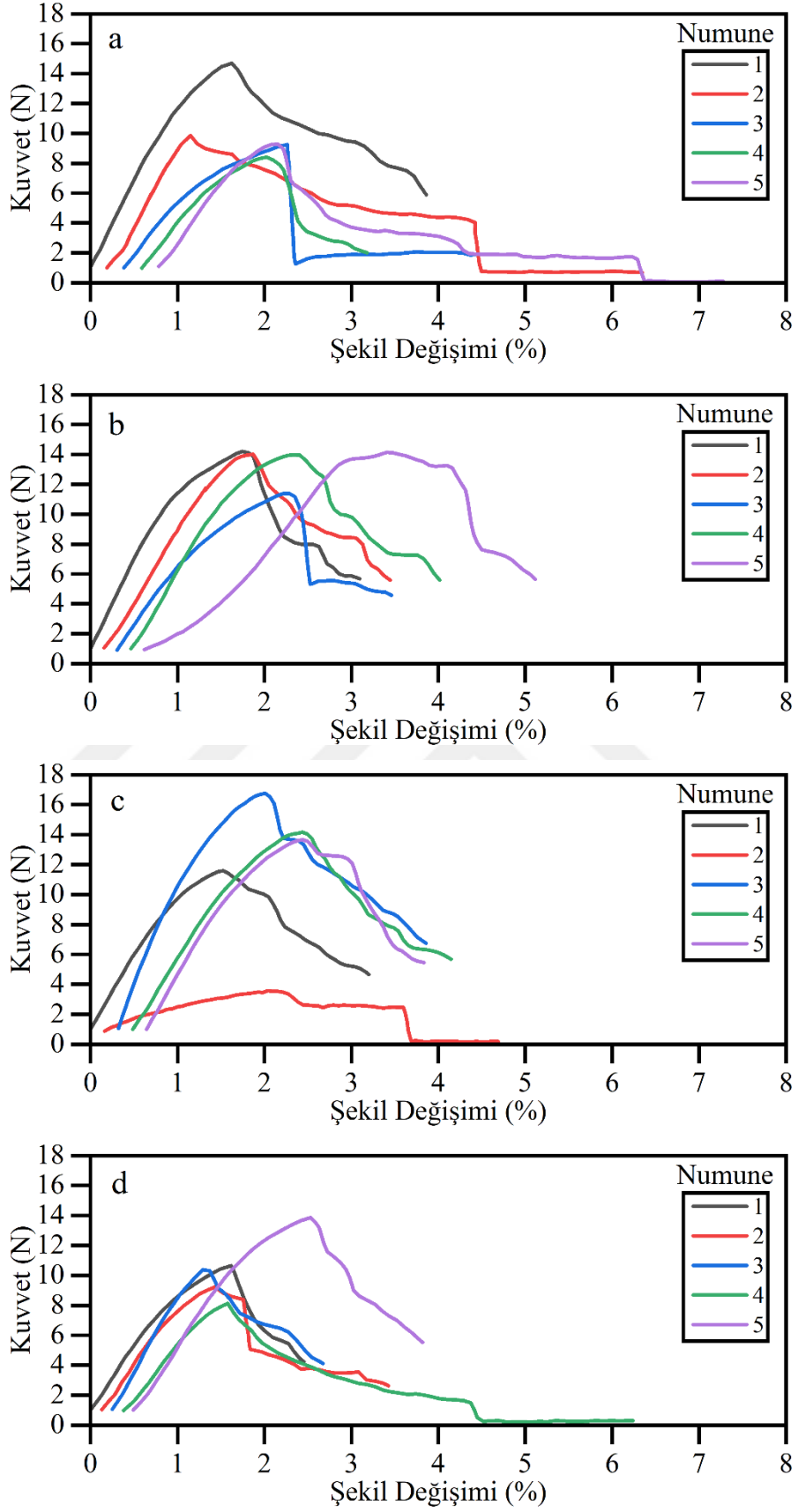
Şekil 4.26. Numunelerin kesit alanının çekme özelliklerine etkisi

Şekil 4.26’da verilen çekme kuvveti-kesit alanı, çekme dayanımı-kesit alanı, kopma uzaması-kesit alanı grafikleri incelendiğinde aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- Numunelerin kalınlıkları arttıkça, çekme kuvvetleri de artmaktadır. Bu, numunenin kesit alanının büyümesi ile daha yüksek çekme kuvvetine dayanabileceğini göstermektedir.
- Numunelerin kalınlıkları arttıkça, çekme dayanımlarının azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni, numunenin kesit alanının artması ile birim alana düşen gerilimin azalması olabilir.
- Numunelerin kalınlıkları arttıkça, kopma uzamalarının azaldığı görülmektedir. Bu, numunenin kesit alanının artması ile malzemenin nispeten daha gevrek davranış sergilediğini göstermektedir.
- Çekme testi sonuçlarının numunenin geometrisine bağlı olduğu ve malzemenin mekanik özelliklerini tam olarak yansıtamadığı görülmüştür. Daha doğru bir değerlendirme ve kıyaslama yapılabilmesi için, numunelerin standart kalınlıklarda ve daha fazla veri ile çalışılması gerektiği düşünülmektedir.

Yırtılma dayanımı özellikleri

Hazırlanan kompozitlerin yırtılma dayanımlarını belirlemek üzere yırtılma deneyleri gerçekleştirilmiş olup numunelerin yırtılma kuvveti-şekil değiştirme davranışları Şekil 4.27'de verilmiştir.



Şekil 4.27. Hazırlanan kompozitlerin yırtılma kuvveti-şekil değiştirme davranışı, (a) PSF GBR, (b) KÇ/PSF GBR, (c) KB/PSF GBR, (d) EP/PSF GBR

Şekil 4.27’de verilen yırtılma kuvveti-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde, KB/PSF GBR kompozitinin 3 no’lu numunesi maksimum yırtılma kuvvetine (17 N) sahiptir ve diğer numuneler arasında kalınlığı en fazla olandır. Çizelge 4.12’de kompozit numunelerinin maksimum yırtılma dayanımları ve numune kalınlıkları verilmiştir.

Çizelge 4.12. Hazırlanan kompozitlerin yırtılma dayanımı özellikleri

Malzeme	Numune	Kalınlık [mm]	Maksimum Kuvvet F _{max} [N]	Yırtılma Dayanımı [N/mm]
PSF GBR	1	1,08	15	14
	2	1,14	10	9
	3	0,56	9	17
	4	0,61	8	14
	5	0,73	9	13
	Ortalama	0,82	10	13
KÇ/PSF GBR	1	0,70	14	20
	2	0,74	14	19
	3	0,55	11	21
	4	0,67	14	21
	5	0,70	14	20
	Ortalama	0,67	14	20
KB/PSF GBR	1	1,15	12	10
	2	1,19	4	3
	3	1,22	17	14
	4	0,97	14	15
	5	0,98	14	14
	Ortalama	1,10	12	11
EP/PSF GBR	1	0,46	11	23
	2	0,54	9	17
	3	0,69	10	15
	4	0,63	8	13
	5	0,94	14	15
	Ortalama	0,65	10	17

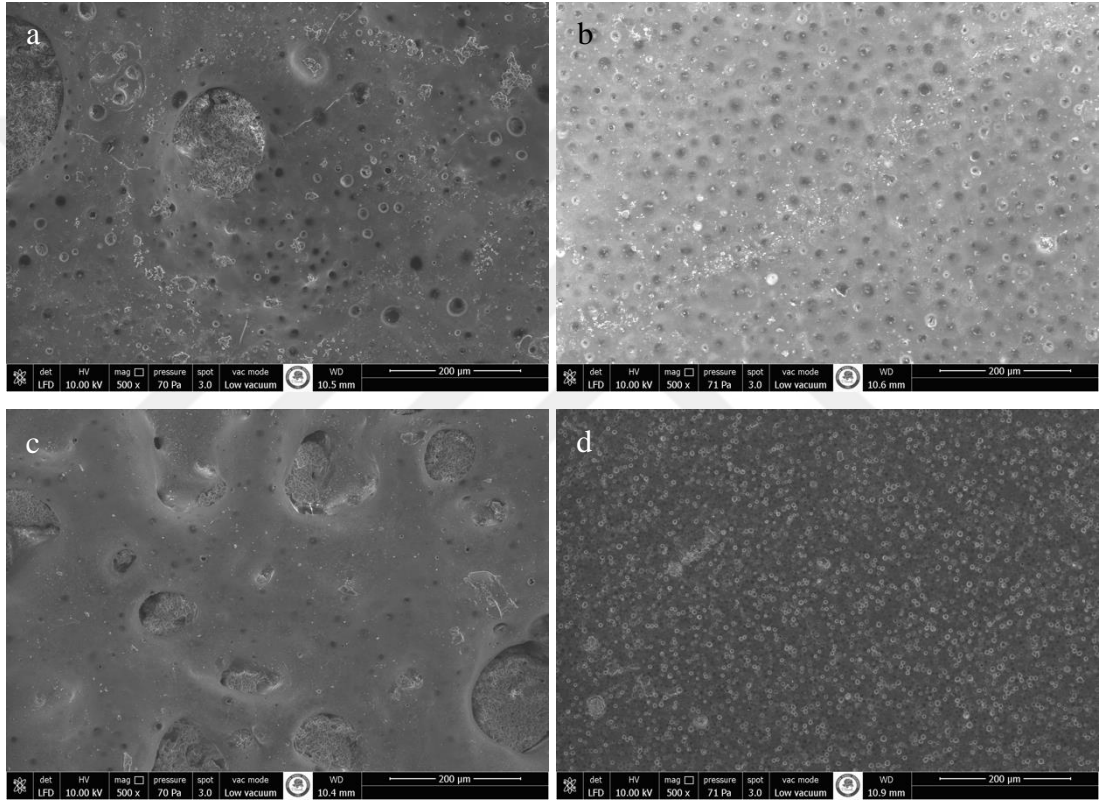
Çizelge 4.12’ye göre KÇ/PSF GBR, diğer kompozitlere göre hem maksimum kuvvet hem de yırtılma dayanımı açısından en iyi performansı göstermiştir. Ortalama olarak 14 N maksimum kuvvet ve 20 N/mm yırtılma dayanımına sahiptir ve kalınlığı en az olandır. KB/PSF GBR, diğer kompozitlere kıyasla yırtılma dayanımı açısından en düşük performansı göstermiştir. Ortalama 12 N maksimum kuvvet ve 11 N/mm yırtılma dayanımına sahiptir ve aynı zamanda kalınlığı en fazla olandır. PSF GBR ve

EP/PSF GBR kompozitleri, maksimum kuvvet ve yırtılma dayanımı açısından benzer değerlere sahiptir.

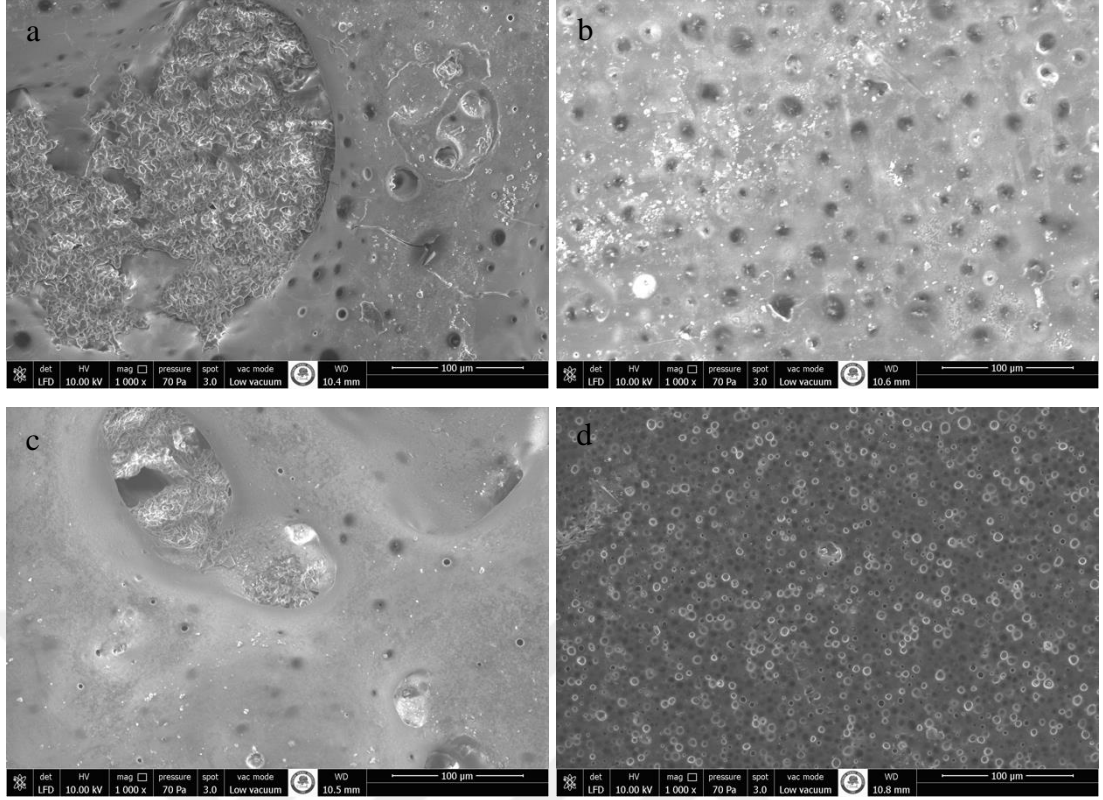
4.7.2. Kompozitlerin yapısal özellikleri

Kompozitlerin SEM görüntüleri

Hazırlanan kompozitlere ait SEM görüntüleri Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da gösterilmektedir.



Şekil 4.28. (a) PSF GBR, (b) KÇ/PSF GBR, (c) KB/PSF GBR, (d) EP/PSF GBR numunelerinin 500 kat yakınlaştırılmış SEM görüntüleri

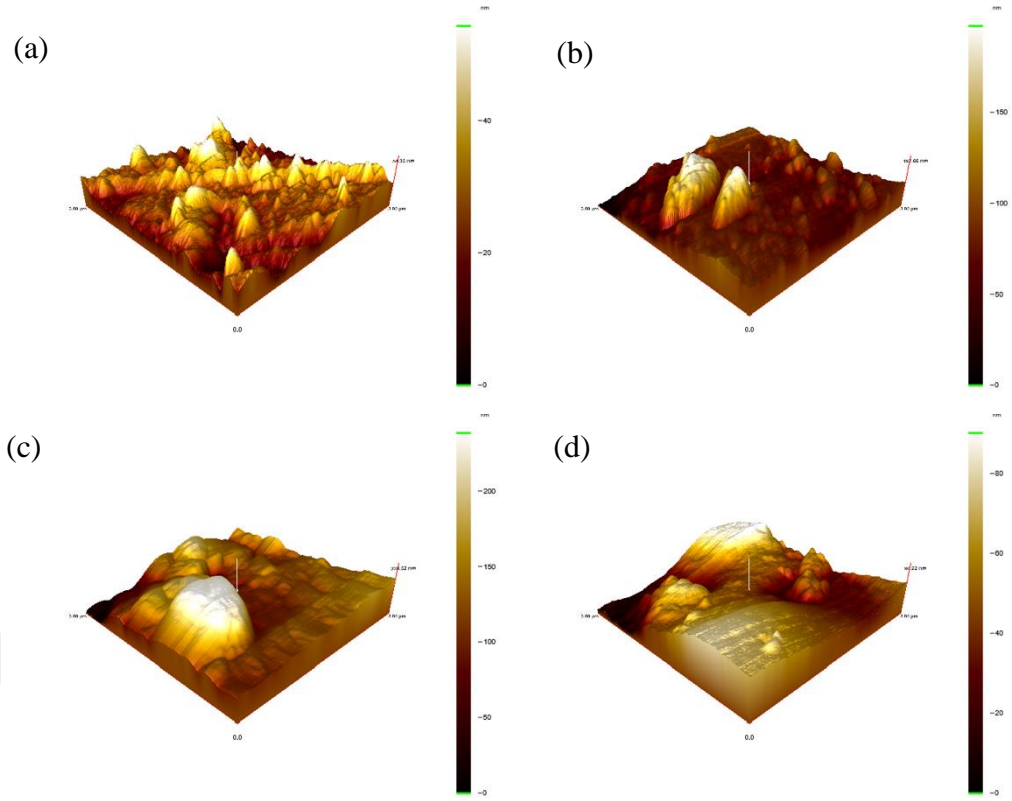


Şekil 4.29. (a) PSF GBR, (b) KÇ/PSF GBR, (c) KB/PSF GBR, (d) EP/PSF GBR numunelerinin 1000 kat yakınlaştırmış SEM görüntüleri

Şekil 4.28’de 500 kat yakınlaştırmış SEM görüntüleri, Şekil 4.29’da ise 1000 kat yakınlaştırmış SEM görüntüleri verilmiştir. Her iki büyüklükteki SEM görüntüleri incelendiğinde, katkısız referans kompozit (PSF GBR) ile katkılı kompozitlerin morfolojik yapılarının farklı olduğu görülmektedir. Özellikle kırmızı çamur ve eşen kili-pomza katkılarının ilave edildiği kompozitlerin SEM görüntülerinde (Şekil 4.29b ve Şekil 4.29d) yüzeyin daha homojen olduğu ve parçacıkların polisülfon matrisi içine daha düzenli dağıldığı görülmektedir (Alosaimi vd., 2017). Matrise ilave edilen katkılar, polisülfon yüzeyini belirgin bir şekilde değiştirmiş ve bu değişim katkısız referans kompozite kıyasla katkılı kompozitlerin karakteristik mukavemet ve kararlılık test sonuçlarını olumlu yönde etkilemiştir.

Kompozitlerin AFM analizleri

Hazırlanan kompozitlerin AFM görüntüleri Şekil 4.30’da gösterilmektedir.



Şekil 4.30. (a) PSF GBR, (b) KÇ/PSF GBR, (c) KB/PSF GBR, (d) EP/PSF GBR numunelerin AFM görüntüleri

Tarama modu AFM görüntüleri hazırlanan geosentetik bariyerlerin yüzey morfolojilerini incelemek için kullanılır. PSF GBR, KÇ/PSF GBR, KB/PSF GBR ve EP/PSF GBR numunelerinin yüzey topografyasının 3 boyutlu görüntülerinden de görüldüğü üzere katkısız referans kompozit (PSF GBR) ile katkılı kompozitlerin yüzey topografyaları arasında değişiklikler mevcuttur. PSF GBR'nin AFM görüntüsü diğer kompozitlere kıyasla daha düşük tepe noktası (pürüzlülük) sergilemektedir. Çizelge 4.13'te hazırlanan kompozitlerin R_a , R_q ve R_z karakteristik değerleri verilmiştir. Çizelgeden görüldüğü üzere, PSF GBR'nin R_a , R_q ve R_z değerleri diğer kompozitlerden daha düşüktür. Katkılı kompozitlerin R_a , R_q ve R_z değerlerinin katkısız olana göre daha yüksek olması bu malzemelerin PSF polimeri içine immobilize olduğunu desteklemektedir. İmmobilizasyon (yükleme) işleminin gerçekleştiğinin bir diğer kanıtı da R_q - R_a değerleri arasındaki farktır. PSF GBR'nin R_q - R_a değeri tablodan da görüldüğü gibi 1,95 nm dir. Bu değer küçük olması PSF matrisi içinde çok fazla dalgalanma yani farklı parçacıkların olmadığını göstermektedir. Fakat katkılı kompozitlerde bu değerler daha yüksek olarak (KB/PSF GBR: 10,63, KÇ/PSF GBR: 9,2, EP/PSF GBR: 3,62) bulunmuştur. Bu yüksek değerler polisülfon matrisi içine bu malzemelerin immobilize olduğunu göstermektedir. Elde

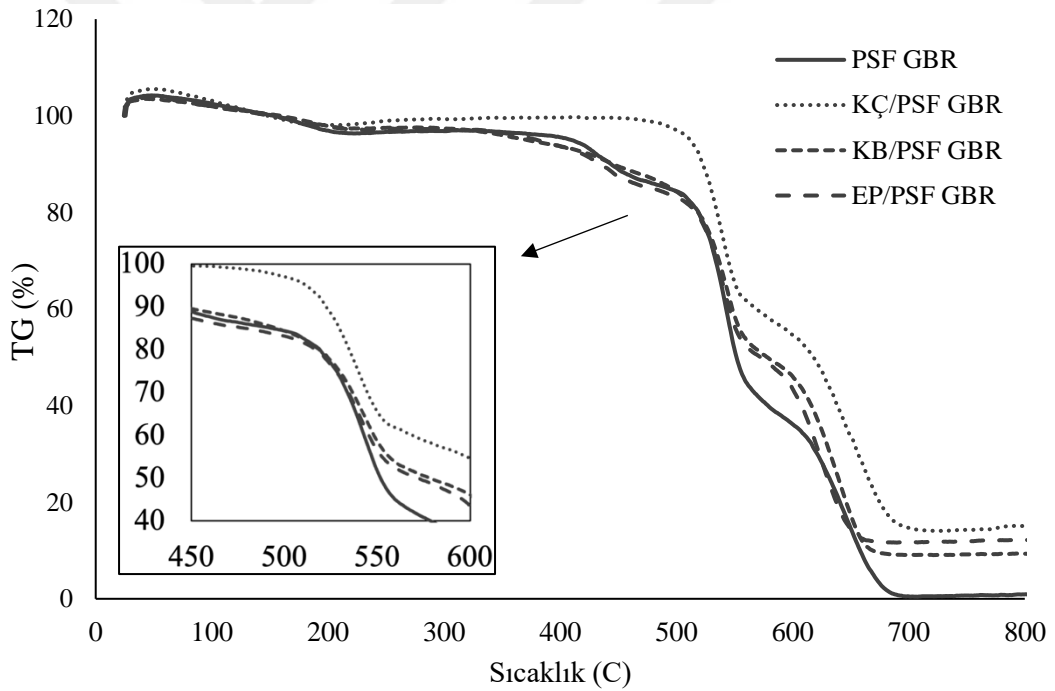
edilen bu sonuçlar literatürler ile de uyum içindedir (Jose vd., 2012; Mahmoudian vd., 2018)

Çizelge 4.13. Kompozitlerin pürüzlülük parametreleri

Malzeme	Ortalama Pürüzlülük (Ra)(nm)	Ortalama Karekök (Rq)(nm)	On Nokta Yüksekliği (Rz)(nm)	Rq-Ra (nm)
PSF GBR	5,82	7,77	54,08	1,95
KÇ/PSF GBR	18,76	27,96	196,85	9,20
KB/PSF GBR	28,67	39,30	237,51	10,63
EP/PSF GBR	14,61	18,23	90,11	3,62

Kompozitlerin TGA analizleri

Hazırlanan kompozitlerin TGA analizleri Şekil 4.31’de gösterilmektedir.



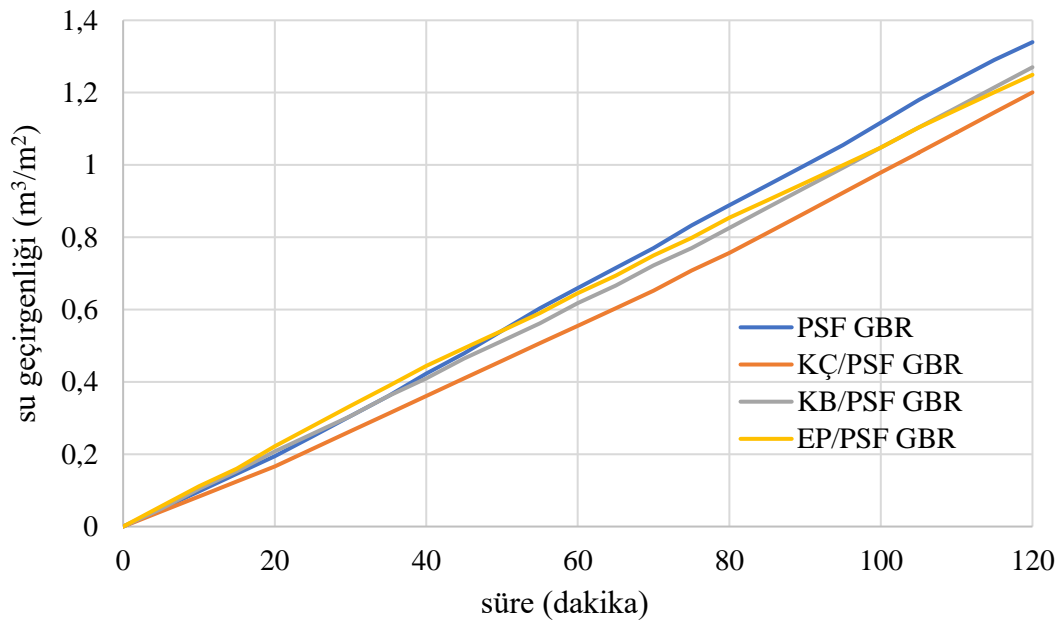
Şekil 4.31. Kompozitlerin TGA grafikleri

Polimer esaslı kompozitlerin termal özellikleri, bu malzemelerin mühendislik uygulamaları için tasarlanmasında termal bozunmanın önemli kriterlerden biri olması nedeniyle önemlidir (Jose vd., 2012). Polimer kompozitlerde kullanılan dolgu maddesinin polimer matrisindeki dağılımı ve kompozit yapısı, termal davranışın değişiminde önemli bir rol oynamaktadır (Selvin vd., 2010). Bu nedenle, farklı

malzemeler kullanılarak (kırmızı çamur, karakaya bentonit, eşen kili-pomza) hazırlanan kompozitlerin termal stabilitelerini belirlemek için kompozitlerin termal davranışları TGA kullanılarak analiz edilmiş ve elde edilen termogramlar Şekil 4.31'de gösterilmiştir. TGA eğrileri, PSF, KÇ/PSF, KB/PSF ve EP/PSF GBR'lerin 200 ila 700°C arasındaki iki aşamalı kütle kaybı ile termal olarak bozunduğunu göstermektedir. PSF/GBR kompoziti için 430-600°C sıcaklık aralığındaki ana kütle kaybı (\approx %30) polisülfonun yapısındaki sülfonik gruplarının kaybı nedeni ile karakteristik termal bozunmasından kaynaklanmaktadır (Kazak vd., 2016; Nasirian vd., 2020). Hazırlanan tüm kompozitler içinde aynı termal bozunma gözlenmiş, fakat termal bozunma sıcaklıkları PSF GBR'ye göre biraz daha yüksek sıcaklıklara doğru kaymıştır. Bozunma sıcaklığındaki bu artış, hazırlanan kompozitlerin PSF GBR ile kıyaslandığında termal kararlılıklarının geliştiğini ve polisülfon matrisi içine kullanılan malzemelerin başarılı bir şekilde immobilize edildiğini gösterir. Elde edilen TGA verileri literatür ile uyum içindedir (Jose vd., 2012; Kazak vd., 2020).

4.7.3. Kompozitlerin su geçirgenliği özellikleri

Geosentetik bariyer amaçlı hazırlanan kompozitlerin su geçirgenliği özelliklerini belirlemek için gerçekleştirilen deneyler sonucunda, numunelerden geçen su hacimlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.32'de verilmiştir.



Şekil 4.32. Kompozitlerin zamana bağlı su geçirgenliği özellikleri

Hazırlanan kompozitlerin su geçirgenlikleri, ticari geosentetik bariyer malzemelerine kıyasla yüksek çıkmıştır. Bu nedenle deneyler 2. saatte sonlandırılmıştır. Ancak Şekil 4.32'den görüldüğü üzere en düşük su geçirgenliği KÇ/PSF GBR kompozitinde elde edilmiş olup en yüksek geçirgenlik ise katkısız referans kompozitte (PSF GBR) görülmüştür. KB/PSF GBR ve EP/PSF GBR kompozitleri birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Çalışmalar, polisülfon matrisine eklenen katkıların kompozitin su geçirgenliği özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir.

4.8. Kompozitlerin Geosentetik Bariyer Amaçlı Kullanımının Değerlendirilmesi

Ülkemizde düzenli depolama tesislerinin yer seçimi, teknik tasarımlarının yapılması, inşa edilmesi, işletilmesi, kapatılması ile kapatma sonrası kontrol ve bakım süreçleri 26 Mart 2010 tarih 27533 sayılı Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe giren Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik (ÇŞB, 2010) çerçevesinde yürütülmektedir. Birlikler, belediyeler, özel ve tüzel kişiler tarafından işletilen bu düzenli depolama tesislerinin tekniğine uygun olarak kurulmasını sağlamak amacıyla ayrıca Çevre Şehircilik Bakanlığı tarafından Düzenli Depolama Tesisleri Saha Yönetimi ve İşletme Kılavuzu (ÇŞB, 2014) hazırlanmıştır.

Düzenli depolama tesislerinin inşaatında, tesisin taban ve yan yüzeylerinde, atık sızıntı suyunun yeraltı suyuna karışmasını önleyecek şekilde geçirimsizlik tabakası teşkil edilir. Bu geçirimsizlik tabakası sıkıştırılmış kil veya kil grubu minerallerden oluşturulur ve geomembran kullanılarak güçlendirilir (ÇŞB, 2010). Kullanılan geomembranın özellikleri TS EN 13493 (TS, 2018)'e uygun test yöntemleri ile belirlenir ve kimyasal maddelere karşı yüksek dirençli, çekme mukavemeti yüksek, geçirgenliği düşük, delinme ve çatlamalara karşı dayanıklı ve sızmalara karşı üstün koruma sağlaması beklenir (ÇŞB, 2014). Atık depolama tesislerinde kullanılacak geosentetik bariyerlerin standart test yöntemlerine göre sağlaması gereken minimum değerlere yönetmelikte rastlanmamıştır.

Geomembranlar yırtılmaya, delinmeye ve darbeye en çok depolanırken, taşınırken, kurulurken ve depolama alanı atık ile doldurulurken maruz kalmaktadır. Bu tür olaylar genellikle kötü işçilik nedeniyle tesadüfen meydana gelir. Tipik durumlar, aletlerin geomembran üzerine düşürülmesi, araçların korumasız astar üzerinde sürülmesi,

yerleştirme sırasında geomembranın altına giren şiddetli rüzgar kuvveti, büyük geomembran tabakalarının yerine hareket ettirilmesindeki zorluk ve geri dolgu malzemesi ve işlemleridir. Yırtılma, delinme ve darbe hasarına karşı dirençte en fazla ilgili olan özellik geomembranın kalınlığıdır. Kalınlık arttıkça bu eylemlere karşı dirençte en azından doğrusal ve bazen üstel bir artış görülür. Bu nedenle birçok kurum her koşulda minimum kalınlığa ihtiyaç duyar. Örneğin, ABD Su Yönetimi İdaresi, kanal kaplamaları için minimum 0,50 mm kalınlık önerirken, ABD Çevre Koruma Ajansı, katı atık kaplamaları için minimum 0,75 mm kalınlık önermektedir. Almanya'daki benzer uygulamalar için 2,0 mm kalınlığında geomembran kullanılması gerekmektedir. Bununla birlikte, tüm koşullar için tek bir düzenlenmiş değer kullanmak yerine, minimum kalınlık ve bu kalınlığa göre belirlenen özelliklerin sahaya özgü koşullarla ilişkilendirilmesi gerekir. Çizelge 4.14, geomembranların dayanım özellikleri için tavsiye edilen minimum değerleri göstermektedir. Bu değerler tasarım yerine kullanılmamalı, sadece kurulumun düzgün bir şekilde sağlanabildiğini görmek için tasarım üzerinde bir kontrol olarak kullanılmalıdır (Koerner, 2012).

Çizelge 4.14. Geomembranların dayanım özellikleri için tavsiye edilen minimum değerler (Koerner, 2012)

Özellik	Gereken Dayanım Derecesi			
	Düşük ¹	Orta ²	Yüksek ³	Çok Yüksek ⁴
Kalınlık (mm)	0,63	0,75	0,88	1,00
Çekme (N/mm)	7,0	8,7	10,5	12,2
Yırtılma (N)	33	45	67	90

Düşük¹: Bina döşeme altlarında tipik rutubet izolasyonu gibi yerlerde statik nitelikte hafif yüklerle çok düzgün, iyi derecelenmiş temel zeminine dikkatle yerleştirme.
Orta²: Kanal kaplamalarında, makine ile düzlenmiş temel zeminine, orta yüklerle elle veya makine ile yerleştirme.
Yüksek³: Atık depolama taban ve üst kaplamalarında, yüksek yüklerle, elle veya makine ile düzlenmiş, kötü dokulu temel zeminine yerleştirme.
Çok Yüksek⁴: Rezervuar kapakları ve yıkama/süzme yığınları kaplamalarında, yüksek yüklerle makine ile düzlenmiş, çok kötü dokulu temel zeminine yerleştirme.

Çizelge 4.14'te verilen çekme özellikleri, ASTM DIN882 standardına göre çekme dayanımı (N/mm²) üzerinden değil kırılma faktörünü (N/mm) baz alınarak belirlenmiştir. Kırılma Faktörü, maksimum çekme kuvvetinin numunenin orijinal minimum çekme genişliğine bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Ancak ASTM DIN882 standardında çekme numunesinin geometrisi, ISO 527-3 standardından farklıdır. ISO 527-3'te minimum çekme genişliği 6,3 mm iken ASTM DIN 882'de 25 mm'dir. Bu nedenle bu çalışmada üretilen kompozitlerle Çizelge 4.14'te verilen değerler arasında tutarlı bir karşılaştırma yapılamamıştır.

DSİ Genel Müdürlüğü tarafından yaptırılacak rezervuarlarda, barajlarda ve kanallarda kullanılacak geosentetik bariyerler minimum 1,5 mm kalınlığında istenmekte olup gereken teknik özellikleri Çizelge 4.15'te verilmiştir (DSİ, 2021).

Çizelge 4.15. Geosentetik bariyerlerin teknik özellikleri (DSİ, 2021)

Deney	Gereken Minimum Dayanım Değeri			
	HDPE	LLDPE	PVC	EPDM
	(Düz/pürüzlü)	(Düz/pürüzlü)		
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	27/10	20/10	15	8
Yırtılma Dayanımı (kN/m)	125/125	100/100	60	40

Bu çalışmada üretilen PSF GBR, KÇ/PSF GBR, KB/PSF GBR ve EP/PSF GBR'lerin çekme ve yırtılma dayanımları, Çizelge 4.15'te verilen DSİ'nin rezervuar, baraj ve kanallarda kullanılacak geosentetik bariyerlerin sağlaması gereken minimum dayanım değerlerini karşılamamaktadır. Yalnızca KÇ/PSF GBR'nin çekme dayanımı, DSİ tarafından istenen EPDM geosentetik bariyerinin çekme ve yırtılma dayanımına yaklaşabilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Bayer prosesi ile boksit cevherinden alüminyum üreten Seydişehir Eti Alüminyum tesislerinde üretim sonucu ortaya çıkan ve kırmızı çamur adı ile bilinen boksit atığının fiziksel, kimyasal, mineralojik ve mekanik özellikleri deney çalışmaları ile araştırılmış olup sonuçları farklı ülkelerdeki kırmızı çamur atığının özellikleri ile karşılaştırılmış ve atığın inşaat alanında dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Kırmızı çamurun özelliklerinin araştırılması çalışmalarından elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

1-) Ağırlıkça %99,3'ü no 200 elek altına geçen oldukça ince taneli ve düşük plastisiteli bir malzemedir. İnce taneli olması, kil benzeri davranış göstermesinin nedeni olarak düşünülmektedir.

2-) Kil mineralleri içermediği halde düşük plastik davranış sergilemektedir.

3-) Özgül ağırlığı, doğal zemin malzemelerine kıyasla daha yüksektir. Bunun nedeni metalik, özellikle de demir açısından zengin minerallerden oluşması olabilir.

4-) Zemin sınıfı, Birleşik Zemin Sınıflama Sistemine göre ML (düşük plastisiteli silt) olarak belirlenmiştir.

5-) Standart kompaksiyon deneyi sonucuna göre, ince taneli doğal zemin malzemelerine (ML, CH) benzer davranış gösterse de maksimum kuru birim hacim ağırlığı daha düşük, optimum su muhtevası ise yüksektir.

6-) Permeabilite katsayısı $7,24 \times 10^{-6}$ cm/s'dir. Bu değere göre geçirgenlik derecesi düşüktür.

7-) Şişme basıncı ve şişme yüzdesi çok düşüktür. Malzemenin şişme özelliği olmadığı kabul edilebilir.

8-) Alkalitesi oldukça yüksek ve pH değeri kaynağına göre değişiklik göstermekle birlikte 10-13 aralığındadır.

9-) Literatürdeki çalışmalarla birlikte değerlendirildiğinde, kırmızı çamurun özelliklerindeki değişkenliğin nedeni işlenmemiş boksit kaynağının mineralojik yapısı, boksit işleme yöntemindeki farklılıklar ve kırmızı çamurun bekleme süresidir.

Kırmızı çamurun inşaat malzemesi olarak potansiyel kullanımı, çevresel kaygılar nedeniyle birçok soru işaretini beraberinde getirmektedir. Dolgu malzemesi olarak kullanımında, yağmur sonucu oluşacak yüksek pH'lı sızıntı suyu ile yeraltı sularını kirletebilme potansiyeli ve pH değerinin fauna ve flora için uygun olmaması gibi çeşitli sorunlar ilk akla gelenlerdir. Bu sorunlar, sadece kırmızı çamurun yeniden değerlendirilmesi değil aynı zamanda atık barajlarında depolanmasında da ortaya çıkmaktadır. Geçmişte kırmızı çamur atık barajlarında yaşanan kazalar da bunu doğrulamaktadır. Yıkılan dolgu seddesinden dağılan kırmızı çamur çok ciddi çevre problemlerine neden olmuştur. Bu nedenle kırmızı çamurun pH değerinin kabul edilebilir seviyelere düşürülerek depolanması veya yeniden kullanılması, potansiyel sorunların çözümü olabilir. Ancak, depolanan atığın miktarı oldukça fazladır ve inşaatlarda atığın potansiyel kullanımında büyük miktarlarda malzeme gerekecektir. Bu nedenle pH'ın düşürülmesi için ucuz ve pratik yöntemlerin tercih edilmesi gerekir. Bu tez çalışmasında ayrıca bu sorunlara da cevaplar aranmıştır. Bu amaçla pratik bir yöntem olduğu için, kırmızı çamuru damıtılmış su ile süzerek pH değeri düşürülmüştür. pH değişiminin kırmızı çamurun özelliklerine olası etkisini belirlemek üzere, pH değeri düşürülen kırmızı çamur numuneleri ile deneyler tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

1-) Damıtılmış su ile süzdürülme yöntemi sonucu kırmızı çamurun pH değeri 10,65'ten 9,35'e düşürülebilmektedir.

2-) Likit limit, plastik limit ve plastisite indisinde bir miktar artış meydana gelmiştir ve USCS'ye göre zemin sınıfında değişme olmamış, ML olarak kalmıştır.

3-) Özgül ağırlığında belirgin bir değişiklik yoktur.

4-) Maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalmış, optimum su muhtevası artmıştır.

5-) Hidrolik iletkenliği yaklaşık 100 kat artmış ve geçirgenlik derecesi düşükten ortaya geçmiştir.

Hidrolik iletkenliğindeki artış haricinde, pH değişimi, kırmızı çamurun özellikleri üzerinde belirgin bir değişiklik sağlamamıştır. Çalışmalar hidrolik iletkenlikteki artışı açıklama yönünden yetersizdir, bu artışın sebebini açıklayabilecek daha ileri çalışmalar yapılabilir. Farklı pH değerlerinde kırmızı çamurun özellikleri araştırılarak, olası değişimlerin nedeni yorumlanabilir. Ayrıca çevre açısından kırmızı çamurun olması gereken en uygun pH aralığı araştırılabilir. Farklı nötralizasyon yöntemleri de denenerek sonuçlar kıyaslanabilir. Literatürde rapor edilmiş çeşitli nötralizasyon yöntemleri ile, daha düşük pH değerleri elde edilebilmektedir. Özellikle atık maden asitlerinin alkali kırmızı çamurlarla karıştırılması her iki malzemeyi ayrıca bir katkı kullanma ihtiyacı olmadan nötralize edebileceği için ortak bertarafı mümkün kılabilir. Bu alanda özellikle asitlerin kırmızı çamurun özellikleri üzerindeki etkisini araştıran çalışmalar oldukça sınırlıdır. Ayrıca deniz suyu ve alçı ile karıştırma gibi çeşitli nötralizasyon yöntemlerinin kırmızı çamurun özellikleri üzerindeki etkisini inceleyen ve karşılaştıran çalışmalar da sınırlıdır.

Kırmızı çamurun dolgu malzemesi olarak kullanımını için araştırılan sıkıştırma özelliklerini, doğal zemin malzemeleri için hazırlanan parametrelere göre değerlendirmek doğru bir yaklaşım olmayabilir. Bu nedenle sıkıştırma özellikleri üzerine daha ileri çalışmalar yapılabilir. Ve arazi deneyleri ile kırmızı çamurun sıkıştırma özellikleri desteklenebilir. Ayrıca farklı arazi deneyleri veya minyatür modeller hazırlanarak kırmızı çamurun arazi koşullarında göstereceği davranış incelenebilir. Kireç, çimento, polimer, nanolif-nanofiber gibi çeşitli stabilizasyon malzemelerinin kırmızı çamurun özellikleri üzerindeki etkisi araştırılabilir. Şişme özelliği düşük olduğu için şişen doğal zeminlerin stabilizasyonunda etkisi araştırılabilir.

Kırmızı çamurla ilgili yapılan çalışmalarda, özellikle geoteknik özelliklerin oldukça değişken olduğu görülmektedir. Literatürde bunun nedeni, boksit cevherinin mineralojik farklılıkları ve tercih edilen boksit işleme prosesinin sonucu olarak açıklanmaktadır. Ancak deney yapılış prosedürlerindeki olası farklılıklardan kaynaklanmadığı ile ilgili herhangi bir kanıt yoktur. Bu nedenle farklı kaynaklardan alınan kırmızı çamur numuneleri aynı şartlarla deneye tabi tutularak özelliklerindeki farklılıklar araştırılabilir.

Çalışmaların sonraki bölümünde taşıyıcı matris polimeri olarak polisülfon ve katkı malzemeleri olarak kırmızı çamur, bentonit, eşen kili ve pomza kullanılarak üretilen geosentetik bariyer amaçlı kompozitlerin mekanik ve yapısal özellikleri araştırılmış ve geosentetik bariyer olarak potansiyel kullanımı değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

1-) Çekme dayanımı ve yırtılma dayanımına göre kırmızı çamur katkılı kompozit diğer kompozitlerden daha üstün özellikler sergilemektedir.

2-) Katkıların tamamı polisülfonun çekme mukavemetinde artışa neden olmaktadır.

3-) Kompozit numunelerinin kalınlıkları arttıkça, çekme kuvvetleri de artmakta ancak çekme dayanımları ve kopma uzama oranları azalmaktadır.

4-) Kompozitlerin çekme özellikleri numunenin kalınlığına bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Bu nedenle malzemenin gerçek mekanik özelliklerini yansıtmadığı düşünülmektedir. Doğru bir değerlendirme ve kıyaslama için, numunelerin standart kalınlıklarda ve daha fazla veri ile yapılması gerektiği düşünülmektedir.

5-) SEM görüntüleri ve diğer yapısal analiz sonuçlarına göre, hazırlanan kompozitlerin tamamında katkılar polisülfon matrisine homojen dağılım sağlamak ve mekanik deney sonuçlarını desteklemektedir.

6-) Hazırlanan kompozitlerin geosentetik bariyer amacıyla kullanılabilmesi için su geçirgenliği özellikleri yeterli değildir.

Hazırlanan kompozitlerin mekanik özellikleri, geosentetik bariyer malzemeleri ile ilgili şartnamelerde kullanım için istenen nitelikleri karşılamakta yetersizdir ancak katkıların üretilen kompozitler üzerindeki olumlu etkisi çalışmalar için umut vericidir. Bu nedenle ileriki çalışmalarda ticari geosentetik bariyerlerde kullanılan geleneksel polimer malzemeleri ile çalışmalara devam edilmesi ve farklı üretim yöntemleri ile kompozitlerin hazırlanması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abdelaal, F.B., Rowe, R.K., 2023. Physical and Mechanical Performance of an HDPE Geomembrane in 10 Mining Solutions with Different pHs. *Canadian Geotechnical Journal*, 60(7), 978-993.
- Abdelaal, F.B., Rowe, R.K., Morsy, M.S., e Silva, R.A., 2023. Degradation of HDPE, LLDPE, and Blended Polyethylene Geomembranes in Extremely Low and High pH Mining Solutions at 85 °C. *Geotextiles and Geomembranes*, 51(5), 27-38.
- Abedi Koupai, J., Fatahizadeh, M., Mosaddeghi, M.R., 2020. Effect of Pore Water pH on Mechanical Properties of Clay Soil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(3), 1461-1469.
- Acharya, S., 2020. Utilization of Red Mud as a Stabilizer to Enhance the Geotechnical Properties of Expansive Soil. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 7(8), 1265-1269.
- Agrawal, V., Paulose, R., Arya, R., Rajak, G., Giri, A., Bijanu, A., Sanghi, S.K., Mishra, D., N, P., Khare, A.K., Parmar, V., Khan, M.A., Bhisikar, A., Srivastava, A.K., Thankaraj Salammal, S., 2022. Green Conversion of Hazardous Red Mud into Diagnostic X-Ray Shielding Tiles. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127507.
- Akçalı, E., Arman, H., 2006. Baraj Dolgularında Kullanılan Doğal Malzemenin Seçim Kriterleri Ve Limit Aşımının Doğuracağı Tehlikeler. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(2), 16-23.
- Akıncı, A., Akbulut, H., Yılmaz, F., 2008. Mechanical Properties of Cost-Effective Polypropylene Composites Filled With Red-Mud Particles. *Polymers and Polymer Composites*, 16, 439-446.
- Al-Fakih, A., Mohamed Nor, Z., Inayath Basha, S., Nasiruzzaman Shaikh, M., Ahmad, S., Al-Osta, M.A., Aziz, M.A., 2023. Characterization and Applications of Red Mud, an Aluminum Industry Waste Material, in the Construction and Building Industries, as well as Catalysis. *The Chemical Record*, 23(5), e202300039.
- Alkan, B., 2014. Polysulfone-based amphiphilic polymers. Istanbul Technical University, Graduate Schools of Science Engineering and Technology, M.Sc Thesis, 60p.
- Alosaimi, A.M., Hussein, M.A., Abdelaal, M.Y., Elfaky, M.A., Sobahi, T.R., Abdel-Daiem, A.M., 2017. Polysulfone-based Modified Organoclay Nanocomposites as a Promising Breast Anticancer Agent. *Cogent Chemistry*, 3(1), 1417672.
- Anirudh, M., Rekha, K.S., Venkatesh, C., Nerella, R., 2021. Characterization of Red Mud Based Cement Mortar; Mechanical and Microstructure Studies. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1587-1591.

- Anton, A., Rékási, M., Uzinger, N., Széplábi, G., Makó, A., 2012. Modelling the Potential Effects of the Hungarian Red Mud Disaster on Soil Properties. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(8), 5175-5188.
- Archambo, M., Kawatra, S.K., 2021. Red Mud: Fundamentals and New Avenues for Utilization. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 42(7), 427-450.
- Ari, A., Akbulut, S., 2021. Evaluation of Sand–Geomembrane Interface Behavior Using Discrete Element Method. *Granular Matter*, 24(1), 21.
- Arslan, S., 2016. Eti Alüminyum A.Ş. Kırmızı Çamurunun Susuzlandırma Performansının Artırılması. Selçuk Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 133s, Konya.
- Ashkenazi, D., 2019. How Aluminum Changed the World: A Metallurgical Revolution Through Technological and Cultural Perspectives. *Technological Forecasting and Social Change*, 143, 101-113.
- ASTM, 2008. D4546-08 Standard Test Method for One-Dimensional Swell or Settlement Percent of Cohesive Soils. ASTM International, United States.
- ASTM, 2016. D2266 Standart Test Method for Unconfident Compresive Strenght of Cohesive Soil. ASTM International, United States.
- ASTM, 2023. D4439-23 Standard Terminology for Geosynthetics. ASTM International, United States.
- Aswathy, M., Salini, U., Gayathri, V.G., 2019. Utility of Lime and Red Mud in Clay Soil Stabilization. *Geotechnical Characterisation and Geoenvironmental Engineering*, Singapore, 19-26, Springer Singapore.
- Ateş, M., 2018. Nanoparçacıkların Ölçme Ve İnceleme Teknikleri. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 11(1), 63-69.
- AYGM, 2020. Toprak İşleri Teknik Şartnamesi. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Altyapı Yatırımları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Bandopadhyay, A., Giri, D., 2023. Improvement of Expansive Soils Mixed with Red Mud and Phosphogypsum. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(5), 322.
- Bánvölgyi, G.G., 2018. The Failure of the Embankment of the Red Mud Reservoir at Ajka (Hungary). *Proceedings of the 36th International ICSOBA Conference*, 387-399.
- Bhat, A.H., Abdul Khalil, H.P.S., Bantia, A., 2011. Thermoplastic Polymer Based Modified Red Mud Composites Materials. *Advances in Composite Materials - Ecodesign and Analysis*. InTech. China, 642p.
- Bhowmik, R., Shahu, J.T., Datta, M., 2018. Failure Analysis of a Geomembrane Lined Reservoir Embankment. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(1), 52-65.

- Birinci, M., Gök, R., 2021. Characterization and Flotation of Low-Grade Boehmitic Bauxite Ore from Seydişehir (Konya, Turkey). *Minerals Engineering*, 161, 106714.
- Borra, C.R., Pontikes, Y., Binnemans, K., Van Gerven, T., 2015. Leaching of Rare Earths from Bauxite Residue (Red Mud). *Minerals Engineering*, 76, 20-27.
- Bozbey, İ., 2004. Kireç İle Stabilize Edilmiş Bir Zeminin Hidrolik Geçirgenliğinin Arazi Boyutlarında Belirlenmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(1), 60-80.
- Burke, I.T., Mayes, W.M., Peacock, C.L., Brown, A.P., Jarvis, A.P., Gruiz, K., 2012. Speciation of Arsenic, Chromium, and Vanadium in Red Mud Samples from the Ajka Spill Site, Hungary. *Environmental Science & Technology*, 46(6), 3085-3092.
- Burke, I.T., Peacock, C.L., Lockwood, C.L., Stewart, D.I., Mortimer, R.J., Ward, M.B., Renforth, P., Gruiz, K., Mayes, W.M., 2013. Behavior of Aluminum, Arsenic, and Vanadium during the Neutralization of Red Mud Leachate by HCl, Gypsum, or Seawater. *Environmental Science & Technology*, 47(12), 6527-6535.
- Burmister, D.M., 1949. Principles and Techniques of Soil Identification. Proceedings of Annual Highway Research Board Meeting. National Research Council. Washington, DC, 402-434.
- Cai, T., Pan, R., Yang, M., 2023. Study on the Effect of Structural Sodium Dissolution on the Physical Properties of Red Mud Treated by Sulfuric Acid. *Minerals Engineering*, 204, 108424.
- Carneiro, J., Tobaldi, D.M., Hajjaji, W., Capela, M.N., Novais, R.M., Seabra, M.P., Labrincha, J.A., 2018. Red Mud as a Substitute Coloring Agent for the Hematite Pigment. *Ceramics International*, 44(4), 4211-4219.
- Castaldi, P., Silveti, M., Santona, L., Enzo, S., Melis, P., 2008. XRD, FTIR, and thermal analysis of bauxite ore-processing waste (red mud) exchanged with heavy metals. *Clays and Clay Minerals*, 56(4), 461-469.
- Cen, W.-J., Wang, H., Sun, Y.-J., 2018. Laboratory Investigation of Shear Behavior of High-Density Polyethylene Geomembrane Interfaces. *Polymers*, 10(7), 734.
- Çağlar, C., 2019. Stabilization of Expansive Soils by Using Red Mud. Middle East Technical University, Yüksek Lisans Tezi.
- Çengeloğlu, Y., Kir, E., Ersöz, M., 2001. Recovery and Concentration of Al(III), Fe(III), Ti(IV), and Na(I) from Red Mud. *Journal of Colloid and Interface Science*, 244(2), 342-346.
- Çimen, Ö., Dereli, B., Günaydın, H.İ., 2021. Güncü Tandır Kilinin Geoteknik Özellikleri ve İnşaat Uygulamalarında Kullanılabilirliği. *Rahva Teknik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 1(2), 74-83.

- Çimen, Ö., Günaydın, H.İ., Keskin, S.N., 2017. Effect of construction waste to engineering properties of high Plasticity clay soil. *Journal of Engineering Science, Pamukkale University*, 23(3), 250-253.
- ÇŞB, 2010. Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- ÇŞB, 2014. Düzenli Depolama Tesisleri Saha Yönetimi ve İşletme Kılavuzu Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Das, S., K. Banthia, A., Adhikari, B., 2006. Pervaporation Separation of DMF from Water Using a Crosslinked Polyurethane Urea-PMMA IPN Membrane. *Desalination*, 197(1), 106-116.
- Das, S., Rout, S., Alam, S., 2015. Characterization of Red Mud as a Subgrade Construction Material. 3rd Conference of Transport Research Group of India (CTRG), 17-20 December, Kolkata, West Bengal, India, 12p.
- Dauvin, J.-C., 2010. Towards an Impact Assessment of Bauxite Red Mud Waste on the Knowledge of the Structure and Functions of Bathyal Ecosystems: The Example of the Cassidaigne Canyon (North-Western Mediterranean Sea). *Marine Pollution Bulletin*, 60(2), 197-206.
- Deady, É.A., Goodenough, K., Mouchos, E., Wall, F., Williamson, B.J., 2016. A Review of the Potential for Rare-Earth Element Resources from European Red Muds: Examples from Seydişehir, Turkey and Parnassus-Giona, Greece. *Mineralogical Magazine*, 80(1), 43-61.
- Deelwal, K., Dharavath, K., Kulshreshtha, M., 2014. Evaluation of Characteristic Properties of Red Mud for Possible Use as a Geotechnical Material in Civil Construction. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 7(3), 1053-1059.
- Deihimi, N., Irannajad, M., Rezai, B., 2018. Characterization Studies of Red Mud Modification Processes as Adsorbent for Enhancing Ferricyanide Removal. *Journal of Environmental Management*, 206, 266-275.
- Dereli, B., 2013. Bor ve Amorf Silikanın Bentonitin Mühendislik Özelliklerine Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 62s, Isparta.
- Ding, C., Zhang, Y., Zhang, N., Di, X., Li, Y., Zhang, Y., 2022. A New Insight into Utilization of Red Mud in Poly(vinyl chloride) Composites via Surface Modification and Toughening Modulation to Attain Performance Optimization. *Construction and Building Materials*, 333, 127340.
- Dodoo-Arhin, D., Konadu, D., Annan, E., Buabeng, F., Yaya, A., Agyei-Tuffour, B., 2013. Fabrication and Characterisation of Ghanaian Bauxite Red Mud-Clay Composite Bricks for Construction Applications. *American Journal of Materials Science*, 3(5), 110-119.

- Donoghue, A.M., Frisch, N., Olney, D., 2014. Bauxite Mining and Alumina Refining: Process Description and Occupational Health Risks. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 56, 12-17.
- DSİ, 2007. Dolgu İşleri Teknik Şartnamesi. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.
- DSİ, 2012. Dolgu Barajlar Tasarım Rehberi, 11-12 Ekim. 1. Barajlar Kongresi, Ankara.
- DSİ, 2021. Geosentetik Bariyerler Genel Teknik Şartnamesi. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Earnest, C.M., 1984. Modern Thermogravimetry. *Analytical Chemistry*, 56(13), 1471-1486.
- Epp, J., 2016. X-Ray Diffraction (XRD) Techniques for Materials Characterization. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*. Woodhead Publishing. 81-124.
- Eroğlu, G., Şahiner, M., 2018. Dünyada ve Türkiye’de Alüminyum. MTA Genel Müdürlüğü Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Ankara.
- Evans, K., 2016. The History, Challenges, and New Developments in the Management and Use of Bauxite Residue. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(4), 316-331.
- Feng, S.-J., Liu, X., Chen, H.-X., Zhao, T., 2018. Micro-Mechanical Analysis of Geomembrane-Sand Interactions Using DEM. *Computers and Geotechnics*, 94, 58-71.
- Feng, S.-J., Lu, S.-F., 2016. Repeated Shear Behaviors of Geotextile/Geomembrane and Geomembrane/Clay Interfaces. *Environmental Earth Sciences*, 75(3), 273.
- Garrido, M., António, D., Lopes, J.G., Correia, J.R., 2021. Reparability of Aged PVC Waterproofing Membranes: Effect of Joining Method. *Journal of Building Engineering*, 33, 101569.
- Gelencsér, A., Kováts, N., Turóczy, B., Rostási, Á., Hoffer, A., Imre, K., Nyirő-Kósa, I., Csákberényi-Malasics, D., Tóth, Á., Czitrovsky, A., Nagy, A., Nagy, S., Ács, A., Kovács, A., Ferincz, Á., Hartyáni, Z., Pósfai, M., 2011. The Red Mud Accident in Ajka (Hungary): Characterization and Potential Health Effects of Fugitive Dust. *Environmental Science & Technology*, 45(4), 1608-1615.
- Geng, J., Zhou, M., Zhang, T., Wang, W., Wang, T., Zhou, X., Wang, X., Hou, H., 2016. Preparation of blended geopolymer from red mud and coal gangue with mechanical co-grinding preactivation. *Materials and Structures*, 50(2), 109.
- Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Michael, J.R., Ritchie, N.W., Scott, J.H.J., Joy, D.C., 2017. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Springer.

- González, J., Albano, C., Ichazo, M., Díaz, B., 2002. Effects of Coupling Agents on Mechanical and Morphological Behavior of the PP/HDPE Blend with Two Different CaCO₃. *European Polymer Journal*, 38(12), 2465-2475.
- Gore, M.S., 2015. Geotechnical Characterization of Bauxite Residue. Faculty of the Graduate School, The University of Texas at Austin, Ph.D. thesis, 287p, United States.
- Göral, M., 1999. Kırmızı Çamurdan Alümina'nın Geri Kazanımında Verimlilik Koşullarının Araştırılması. Sakarya Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 95s, Sakarya.
- Gräfe, M., Power, G., Klauber, C., 2011. Bauxite residue issues: III. Alkalinity and associated chemistry. *Hydrometallurgy*, 108(1-2), 60-79.
- Han, M.J., Nam, S.T., 2002. Thermodynamic and Rheological Variation in Polysulfone Solution by PVP and its Effect in the Preparation of Phase Inversion Membrane. *Journal of Membrane Science*, 202(1), 55-61.
- Hanahan, C., McConchie, D., Pohl, J., Creelman, R., Clark, M., Stocksiek, C., 2004. Chemistry of Seawater Neutralization of Bauxite Refinery Residues (Red Mud). *Environmental Engineering Science*, 21(2), 125-138.
- Hergenrother, P.M., 2003. The Use, Design, Synthesis, and Properties of High Performance/High Temperature Polymers: An Overview. *High Performance Polymers*, 15(1), 3-45.
- Hertel, T., Van den Bulck, A., Onisei, S., Sivakumar, P.P., Pontikes, Y., 2021. Boosting the Use of Bauxite Residue (Red Mud) in Cement - Production of an Fe-rich Calciumsulfoaluminate-ferrite Clinker and Characterisation of the Hydration. *Cement and Concrete Research*, 145, 106463.
- Holtz, R.D., Kovacs, W.D., Sheahan, T.C., 2011. *An Introduction to Geotechnical Engineering* (2nd ed.). Pearson, 864p.
- Hu, G., Lyu, F., Khoso, S.A., Zeng, H., Sun, W., Tang, H., Wang, L., 2020. Staged Leaching Behavior of Red Mud During Dealkalization with Mild Acid. *Hydrometallurgy*, 196, 105422.
- Ingold, T.S., 2013. *Geotextiles and Geomembranes Handbook* (1st ed.). Elsevier Science, 610p.
- ISO, 2012. 9513-Metallic Materials Calibration of Extensometer Systems Used in Uniaxial Testing. International Standard.
- ISO, 2018. 7500-1 Metallic Materials Calibration and Verification of Static Uniaxial Testing Machines Part 1: Tension/Compression Testing Machines. International Standard.
- Işık, F., Zaimoğlu, A.Ş., Altun, F., Akbulut, R.K., 2020. Nano-CuO İle Hazırlanan Kompozit Kil Karışımlarının Kıvam Limitleri, pH ve Elektrik İletkenlik

Özelliklerinin İncelenmesi. Journal of the Institute of Science and Technology, 10(1), 290-298.

- Jose, A.J., Alagar, M., Aprem, A.S., 2012. Thermal and Barrier Properties of Organoclay-filled Polysulfone Nanocomposites. International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials, 61(7), 544-557.
- Kalay, E., 2010. Sıkıştırılmış Yüksek Plastisiteli Kil Zemin Stabilizasyonunda Pomza, Mermer Tozu Ve Kirecin Kullanılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 54s, Isparta.
- Kalender, L., Kara, H., 2023. Boksit Oluşumlarının Jeokimyasal Özellikleri. Doğa Ve Mühendislik Bilimlerinde Güncel Tartışmalar 8. Bilgin Kültür Sanat Yayınları. Ankara, 253-262.
- Kalkan, E., 2006. Utilization of Red Mud as a Stabilization Material for the Preparation of Clay Liners. Engineering Geology, 87(3), 220-229.
- Kavazanjian Jr, E., Dixon, N., Katsumi, T., Kortegast, A., Legg, P., Zanzinger, H., 2006. Geosynthetic Barriers for Environmental Protection at Landfills. Geosynthetics-8th International Conference on Geosynthetics, 121-152.
- Kaya, K., Soyer-Uzun, S., 2016. Evolution of structural characteristics and compressive strength in red mud–metakaolin based geopolymer systems. Ceramics International, 42(6), 7406-7413.
- Kazak, O., Eker, Y.R., Tor, A., 2020. In-situ Magnetization of Porous Carbon Beads by Pyrolysis of Waste Red Mud Doped Polysulfone Beads for Efficient Oil Sorption. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 158, 108190.
- Kazak, O., Tor, A., Akin, I., Arslan, G., 2016. Preparation and Characterization of Novel Polysulfone-Red Mud Composite Capsules for the Removal of Fluoride from Aqueous Solutions. RSC Advances, 6(89), 86673-86681.
- KGM, 2013. Karayolu Teknik Şartnamesi. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Khairul, M.A., Zanganeh, J., Moghtaderi, B., 2019. The Composition, Recycling and Utilisation of Bayer Red Mud. Resources, Conservation and Recycling, 141, 483-498.
- Khanna, R., Konyukhov, Y., Zinoveev, D., Jayasankar, K., Burmistrov, I., Kravchenko, M., Mukherjee, P.S., 2022. Red Mud as a Secondary Resource of Low-Grade Iron: A Global Perspective. Sustainability, 14(3), 1258.
- Kır, E., 2002. Kırmızı Çamurdan Metallerin Geri Kazanılması Ve Değerlendirilme Yollarının Araştırılması. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Doktora Tezi, 89s, Konya.

- Kirwan, L.J., Hartshorn, A., McMonagle, J.B., Fleming, L., Funnell, D., 2013. Chemistry of Bauxite Residue Neutralisation and Aspects to Implementation. *International Journal of Mineral Processing*, 119, 40-50.
- Klebercz, O., Mayes, W.M., Anton, Á.D., Feigl, V., Jarvis, A.P., Gruiz, K., 2012. Ecotoxicity of Fluvial Sediments Downstream of the Ajka Red Mud Spill, Hungary. *Journal of Environmental Monitoring*, 14(8), 2063-2071.
- Koerner, G.R., Koerner, R.M., 2017. The Durability of Exposed Geomembrane Covers. *Geotechnical Frontiers*. ASCE Library. 139-147.
- Koerner, R.M., 2012. *Designing with Geosynthetics* (6th ed.). Xlibris, 526p, United States.
- Kumar, A., Kumar, S., 2013. Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization. *Construction and Building Materials*, 38, 865-871.
- Kumar Nigam, S., Sinha, A.K., Madan, S.K., 2023. Characterisation of stabilised red mud waste material for road infrastructure. *Materials Today: Proceedings*.
- Li, D., McHugh, M.A., 2004. Limited Polysulfone Solubility in Supercritical Dimethyl Ether with THF and DMF Cosolvents. *The Journal of Supercritical Fluids*, 28(1), 79-83.
- Li, J., Feng, S.J., Chen, H.X., Wang, H., 2018. Chemical and Geotechnical Properties of Red Mud at Liulin, China. *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Geoenvironment and Geohazard*, Singapore, 405-414, Springer.
- Li, L.Y., 1998. Properties of Red Mud Tailings Produced Under Varying Process Conditions. *Journal of Environmental Engineering*, 124(3), 254-264.
- Li, Y., Min, X., Ke, Y., Liu, D., Tang, C., 2019. Preparation of red mud-based geopolymer materials from MSWI fly ash and red mud by mechanical activation. *Waste Management*, 83, 202-208.
- Liang, W., Couperthwaite, S.J., Kaur, G., Yan, C., Johnstone, D.W., Millar, G.J., 2014. Effect of Strong Acids on Red Mud Structural and Fluoride Adsorption Properties. *Journal of Colloid and Interface Science*, 423, 158-165.
- Liu, J., Li, X., Zhou, C., 2018. Mechanical and Thermal Properties of Modified Red Mud-Reinforced Phenolic Foams. *Polymer International*, 67(5), 528-534.
- Liu, R.-X., Poon, C.-S., 2016. Utilization of Red Mud Derived from Bauxite in Self-Compacting Concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 384-391.
- Liu, X., Zhang, N., 2011. Utilization of Red Mud in Cement Production: A Review. *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 29, 1053-1063.

- Liu, Y., Lin, C., Wu, Y., 2007. Characterization of Red Mud Derived from a Combined Bayer Process and Bauxite Calcination Method. *Journal of Hazardous Materials*, 146(1), 255-261.
- Lockwood, C.L., Stewart, D.I., Mortimer, R.J.G., Mayes, W.M., Jarvis, A.P., Gruiz, K., Burke, I.T., 2015. Leaching of Copper and Nickel in Soil-Water Systems Contaminated by Bauxite Residue (Red Mud) from Ajka, Hungary: The Importance of Soil Organic Matter. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(14), 10800-10810.
- Luciani, A., Todaro, C., Martinelli, D., Peila, D., 2020. Long-term Durability Assessment of PVC-P Waterproofing Geomembranes Through Laboratory Tests. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 103, 103499.
- Luo, M., Qi, X., Zhang, Y., Ren, Y., Tong, J., Chen, Z., Hou, Y., Yeerkebai, N., Wang, H., Feng, S., Li, F., 2017. Study on Dealkalization and Settling Performance of Red Mud. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(2), 1794-1802.
- Lutgens, F.K., Tarbuck, E.J., Tasa, D.G., 2017. *Essentials of Geology* (13th ed.). Pearson Education, 608p.
- Ma, S., Sun, Z., Wei, J., Zhang, X., Zhang, L., 2022. Utilization of Modified Red Mud Waste from the Bayer Process as Subgrade and Its Performance Assessment in a Large-Sale Application. *Coatings*, 12(4), 471.
- Magyar, D., Tischner, Z., Szabó, B., Freiler-Nagy, Á., Papp, T., Allaga, H., Kredics, L., 2024. Characterization of Indoor Molds after Ajka Red Mud Spill, Hungary. *Pathogens*, 13(1), 22.
- Mahmoudian, M., Kochameshki, M.G., Mahdavi, H., Vahabi, H., Enayati, M., 2018. Investigation of Structure-Performance Properties of a Special Type of Polysulfone Blended Membranes. *Polymers for Advanced Technologies*, 29(10), 2690-2700.
- Mareri, P., Bastide, S., Binda, N., Crespy, A., 1998. Mechanical Behaviour of Polypropylene Composites Containing Fine Mineral Filler: Effect of Filler Surface Treatment. *Composites Science and Technology*, 58(5), 747-752.
- Mayes, W.M., Burke, I.T., Gomes, H.I., Anton, Á.D., Molnár, M., Feigl, V., Ujaczki, É., 2016. Advances in Understanding Environmental Risks of Red Mud After the Ajka Spill, Hungary. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(4), 332-343.
- MTA, 2012. *Türkiye Bentonit Envanteri*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 237s, Ankara.
- Mukiza, E., Zhang, L., Liu, X., Zhang, N., 2019. Utilization of Red Mud in Road Base and Subgrade Materials: A Review. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 187-199.
- Naderi, M., 2015. Chapter Fourteen - Surface Area: Brunauer–Emmett–Teller (BET). *Progress in Filtration and Separation*. Academic Press. Oxford, 585-608.

- Nasirian, D., Salahshoori, I., Sadeghi, M., Rashidi, N., Hassanzadeganroudsari, M., 2020. Investigation of the Gas Permeability Properties from Polysulfone/polyethylene Glycol Composite Membrane. *Polymer Bulletin*, 77(10), 5529-5552.
- Nbcnews (2010). Toxic red sludge floods towns near Budapest. Erişim Tarihi: 2 Mayıs 2024. <https://www.nbcnews.com/slideshow/amp/toxic-red-sludge-floods-towns-near-budapest-39514793>.
- Newson, T., Dyer, T., Adam, C., Sharp, S., 2006. Effect of Structure on the Geotechnical Properties of Bauxite Residue. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(2), 143-151.
- Nganda, A., Srivastava, P., Lamba, B.Y., Pandey, A., Kumar, M., 2023. Advances in the Fabrication, Modification, and Performance of Biochar, Red Mud, Calcium Oxide, and Bentonite Catalysts in Waste-to-Fuel Conversion. *Environmental Research*, 232, 116284.
- Nicholson, P.G., 2014. *Soil Improvement and Ground Modification Methods* (1st ed.). Butterworth-Heinemann, 472p.
- Nigam, S.K., Sinha, A.K., Madan, S.K., 2023. Characterisation of Stabilised Red Mud Waste Material for Road Infrastructure. *Materials Today: Proceedings*, 93, 41-46.
- Niu, A., Lin, C., 2024. Trends in Research on Characterization, Treatment and Valorization of Hazardous Red Mud: A Systematic Review. *Journal of Environmental Management*, 351, 119660.
- Olaya, Q., Williams, D.J., Pilar, M., Ingunza, D., Serati, M., 2017. Geotechnical Characterisation of Neutralised Red Mud for Use in Civil Engineering Construction and Manufacturing. *The 32nd International Conference on Solid Waste Technology and Management*, Philadelphia, United States, 613-623.
- Ozden, B., Brennan, C., Landsberger, S., 2019. Investigation of Bauxite Residue (Red Mud) in Terms of its Environmental Risk. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 319(1), 339-346.
- Önalp, A., 2018. *Geoteknik Bilgisi 1 Zeminler ve Mekanik Çözümlü Problemlerle*, 4. Baskı. Birsen Yayınevi, 379s, İstanbul.
- Özcan, A., 2019. *Geosentetik Bariyerlerin Standart Metotlara Göre Karşılaştırılması*. Ankara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 107s, Ankara.
- Pagano, G., Meriç, S., De Biase, A., Iaccarino, M., Petruzzelli, D., Tünay, O., Warnau, M., 2002. Toxicity of Bauxite Manufacturing By-products in Sea Urchin Embryos. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 51(1), 28-34.
- Palmer, S.J., Frost, R.L., 2009. Characterisation of Bauxite and Seawater Neutralised Bauxite Residue Using XRD and Vibrational Spectroscopic Techniques. *Journal of Materials Science*, 44(1), 55-63.

- Panda, I., Jain, S., Das, S.K., Jayabalan, R., 2017. Characterization of Red Mud as a Structural Fill and Embankment Material Using Bioremediation. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 368-376.
- Panda, S., Behera, D., 2017. Effect of Red Mud on Mechanical and Chemical Properties of Unsaturated Polyester-Epoxy-Bamboo Fiber Composites. *Materials Today: Proceedings*, 4(2A), 3325-3333.
- Parija, S., Mohanty, A.K., Misra, M., Nayak, S.K., 2000. Evaluation of Physico-Mechanical Properties of Biodegradable Kendu Gum Dust Filled Polyolefin Blends. *Polymer Degradation and Stability*, 67(1), 7-12.
- Patel, A., 2019. 1 - Introduction. *Geotechnical Investigations and Improvement of Ground Conditions*. Woodhead Publishing. Elsevier, 1-6.
- Pathak, P., Srivastava, R.R., 2017. Assessment of Legislation and Practices for the Sustainable Management of Waste Electrical and Electronic Equipment in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 220-232.
- Patil, S.V., Thorat, B.N., 2022. Mechanical Dewatering of Red Mud. *Separation and Purification Technology*, 294, 121157.
- Pişkin, S., Kantürk Figen, A., Özkan, E., Özçay, ü., 2013. Structural Characterization of Seydişehir Red Mud to Utilization in Roof Tile Manufacturing. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(16), 484-487.
- Power, G., Gräfe, M., Klauber, C., 2011. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices. *Hydrometallurgy*, 108(1), 33-45.
- Rai, S., Wasewar, K., Agnihotri, A., 2017. Treatment of Alumina Refinery Waste (Red Mud) Through Neutralization Techniques: A Review. *Waste Management & Research*, 35(6), 563-580.
- Rai, S., Wasewar, K., Mukhopadhyay, J., Yoo, C., Uslu, H., 2012. Neutralization and Utilization of Red Mud for its Better Waste Management. *Archives Environmental Science*, 6, 13-33.
- Rai, S., Wasewar, K.L., Lataye, D.H., Mishra, R.S., Puttewar, S.P., Chaddha, M.J., Mahindiran, P., Mukhopadhyay, J., 2012. Neutralization of red mud with pickling waste liquor using Taguchi's design of experimental methodology. *Waste Management & Research*, 30(9), 922-930.
- Rai, S., Wasewar, K.L., Lataye, D.H., Mukhopadhyay, J., Yoo, C.K., 2013. Feasibility of Red Mud Neutralization with Seawater Using Taguchi's Methodology. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10(2), 305-314.
- Reddy, N.G., Rao, B.H., 2017. Assessment of Dispersion Characteristics of Red Mud Waste from Physical Tests. *Indian Geotechnical Conference 2017 GeoNEst*, 14-16 December, IIT Guwahati, India.

- Reddy, N.G., Rao, B.H., 2018. Compaction and Consolidation Behaviour of Untreated and Treated Waste of Indian Red Mud. *Geotechnical Research*, 5(2), 106-121.
- Reddy, P.S., Reddy, N.G., Serjun, V.Z., Mohanty, B., Das, S.K., Reddy, K.R., Rao, B.H., 2021. Properties and Assessment of Applications of Red Mud (Bauxite Residue): Current Status and Research Needs. *Waste and Biomass Valorization*, 12(3), 1185-1217.
- Rékási, M., Feigl, V., Uzinger, N., Gruiz, K., Makó, A., Anton, A., 2013. Effects of Leaching from Alkaline Red Mud on Soil Biota: Modelling the Conditions after the Hungarian Red Mud Disaster. *Chemistry and Ecology*, 29(8), 709-723.
- Renforth, P., Mayes, W.M., Jarvis, A.P., Burke, I.T., Manning, D.A.C., Gruiz, K., 2012. Contaminant Mobility and Carbon Sequestration Downstream of the Ajka (Hungary) Red Mud Spill: The Effects of Gypsum Dosing. *Science of The Total Environment*, 421-422, 253-259.
- Robertson, D., 2013. The Oxidative Resistance of Polymeric Geosynthetic Barriers (GBR-P) Used for Road and Railway Tunnels. *Polymer Testing*, 32(8), 1594-1602.
- Rowe, R.K., Abdelaal, F.B., Zafari, M., Morsy, M.S., Priyanto, D.G., 2020. An approach to High-Density Polyethylene (HDPE) Geomembrane Selection for Challenging Design Requirements. *Canadian Geotechnical Journal*, 57(10), 1550-1565.
- Rowe, R.K., Rimal, S., Arnepalli, D.N., Bathurst, R.J., 2010. Durability of Fluorinated High Density Polyethylene Geomembrane in the Arctic. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(1), 100-107.
- Rubinos, D., Spagnoli, G., Barral, M.T., 2015. Assessment of Bauxite Refining Residue (Red Mud) as a Liner for Waste Disposal Facilities. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 29(6), 433-452.
- Rubinos, D.A., Barral, M.T., 2013. Fractionation and Mobility of Metals in Bauxite Red Mud. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(11), 7787-7802.
- Rupal, A., Kumar Sharma, S., Tyagi, G.D., 2020. Experimental Investigation on Mechanical Properties of Polyurethane Modified Bituminous Waterproofing Membrane. *Materials Today: Proceedings*, 27, 467-474.
- Samantasinghar, S., Singh, S.P., 2023. Red Mud-Slag Blends as a Sustainable Road Construction Material. *Construction and Building Materials*, 375, 130926.
- Sarsby, R.W., 2006. *Geosynthetics in Civil Engineering* (1st ed.). Woodhead Publishing, 312p.
- Selvin, T.P., Seno, J., Murukan, B., Santhosh, A.A., Sabu, T., Weimin, Y., Sri, B., 2010. Poly(ethylene-co-vinyl acetate)/Calcium Phosphate Nanocomposites: Thermo Mechanical and Gas Permeability Measurements. *Polymer Composites*, 31(6), 1011-1019.

- Sharma, H.D., Lewis, S.P., 1994. Waste Containment Systems, Waste Stabilization, and Landfills: Design and Evaluation (1st ed.). Wiley-Interscience, 608p.
- Shoppert, A., Valeev, D., Diallo, M.M., Loginova, I., Beavogui, M.C., Rakhmonov, A., Ovchenkov, Y., Pankratov, D., 2022. High-Iron Bauxite Residue (Red Mud) Valorization Using Hydrochemical Conversion of Goethite to Magnetite. *Materials*, 15(23), 8423.
- Shoppert, A.A., Loginova, I.V., Rogozhnikov, D.A., Karimov, K.A., Chaikin, L.I., 2019. Increased As Adsorption on Maghemite-Containing Red Mud Prepared by the Alkali Fusion-Leaching Method. *Minerals*, 9(1), 60.
- Shukla, S.K., 2002. Geosynthetics and their Applications. Thomas Telford Publishing, 456p.
- Singh, S., Aswath, M.U., Ranganath, R.V., 2020. Performance assessment of bricks and prisms: Red mud based geopolymer composite. *Journal of Building Engineering*, 32, 101462.
- Singh, S., Kumar, A., Sitharam, T.G., 2023. Investigating the Strength and Durability Properties of Alkali Activated Red Mud for Tailings Pond Embankment Material. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 36, 100500.
- Skoog, D.A., Holler, F.J., Crouch, S.R., 2017. Principles of Instrumental Analysis (7th ed.). Cengage Learning, 992p.
- Smiljanić, S., Smičiklas, I., Perić-Grujić, A., Šljivić, M., Đukić, B., Lončar, B., 2011. Study of Factors Affecting Ni²⁺ Immobilization Efficiency by Temperature Activated Red Mud. *Chemical Engineering Journal*, 168(2), 610-619.
- Smith, P., 2009. The Processing of High Silica Bauxites — Review of Existing and Potential Processes. *Hydrometallurgy*, 98(1), 162-176.
- Song, Y., Dong, M., Wang, Z., Qian, X., Yan, D., Shen, S., Zhang, L., Sun, G., Lai, J., Ruan, S., 2022. Effects of red mud on workability and mechanical properties of autoclaved aerated concrete (AAC). *Journal of Building Engineering*, 61, 105238.
- Sonjica, B.P., 2009. National Policy on Thermal Treatment of General and Hazardous Waste. *National Environmental Management: Waste Act*.
- Sridevi, G., Sahoo, S., Sen, S., 2019. Stabilization of Expansive Soil with Red Mud and Lime. *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics*, Singapore, 259-268, Springer Singapore.
- Srivastava, R.R., Rajak, D.K., Ilyas, S., Kim, H., Pathak, P., 2023. Challenges, Regulations, and Case Studies on Sustainable Management of Industrial Waste. *Minerals*, 13(1), 51.
- Swain, B., Akcil, A., Lee, J.-c., 2022. Red Mud Valorization an Industrial Waste Circular Economy Challenge; Review Over Processes and Their Chemistry. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(4), 520-570.

- Taneez, M., Hurel, C., 2019. A Review on the Potential Uses of Red Mud as Amendment for Pollution Control in Environmental Media. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(22), 22106-22125.
- Tang, W.C., Wang, Z., Donne, S.W., Forghani, M., Liu, Y., 2019. Influence of Red Mud on Mechanical and Durability Performance of Self-Compacting Concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 379, 120802.
- Todaro, C., Zanti, D., Carigi, A., Peila, D., 2023. The Role of Bentonite in Two-Component Grout: A Comparative Study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 142, 105412.
- Toniolo, N., Taveri, G., Hurle, K., Roether, J., Ercole, P., Dlouhy, I., Boccaccini, A.R., 2017. Fly-Ash-Based Geopolymers: How the Addition of Recycled Glass or Red Mud Waste Influences the Structural and Mechanical Properties. *Journal of ceramic science and technology*.
- TS, 2000. 1500 İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması. TSE, Ankara.
- TS, 2006. 1900-1 İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri-Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini. TSE, Ankara.
- TS, 2007. 1900-2/T1 İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri-Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN ISO, 2012. 527-1 Plastikler-Çekme Özelliklerinin Tayini-Bölüm 1: Genel Prensipler. TSE, Ankara.
- TS EN ISO, 2013. 9513 Tek Eksenli Deneylerde Kullanılan Ekstansometrelerin Kalibrasyonu. TSE, Ankara.
- TS ISO, 2018. 34-1 Kauçuk, Vulkanize veya Termoplastik - Yırtılma Mukavemetinin Belirlenmesi - Bölüm 1: Pantolon, Açık ve Hilal Test Parçaları. TSE, Ankara.
- TS EN ISO, 2018. 7500-1 Tek Eksenli Statik Deney Makinalarının Doğrulanması - Bölüm 1: Çekme/Basma Deney Makinaları - Kuvvet Ölçme Sisteminin Doğrulanması ve Kalibrasyonu. TSE, Ankara.
- TS EN ISO, 2018. 13493 Geosentetik Bariyerler – Katı Atık Depolama ve Bertaraf Yerlerinin İnşasında Kullanım İçin Gerekli Karakteristikler. TSE, Ankara.
- TS EN ISO, 2019. 527-3 Plastikler - Çekme Mukavemetinin Tayini - Bölüm 3: Film ve Levhalar için Deney Şartları. TSE, Ankara.
- Tsamo, C., Kofa, G.P., Kamga, R., 2017. Decreasing Yield and Alumina Content of Red Mud by Optimization of the Bauxite Processing Process. *International Journal of Metallurgical Engineering*, 6(1), 1-9.
- Turi, D., Pusztai, J., Nyari, I., 2013. Causes and Circumstances of Red Mud Reservoir Dam Failure In

- 2010 at MAL Zrt Factory Site in Ajka, Hungary. 7th Conference of the International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, 02 May 2013, Chicago, Illinois.
- UNIDO, U.N.I.D.O., 1985. Environmental Aspects of Alumina Production. UNEP, Nairobi.
- Ünal, B., 2021. Boksit Atığı İçerisinde Yer Alan Nadir Toprak Elementlerinin Hidrometalurjik Yöntemlerle Geri Kazanımı Necmettin Erbakan Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 55s, Konya.
- Venkatesh, C., Nerella, R., Chand, M.S.R., 2020. Experimental Investigation of Strength, Durability, and Microstructure of Red-Mud Concrete. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 57(2), 167-174.
- Venkatesh, C., Nerella, R., Sri Rama Chand, M., 2020. Comparison of Mechanical and Durability Properties of Treated and Untreated Red Mud Concrete. *Materials Today: Proceedings*, 27, 284-287.
- Viegas, B.M., Magalhães, E.M., Orlande, H.R.B., Estumano, D.C., Macêdo, E.N., 2023. Experimental Study and Mathematical Modelling of Red Mud Leaching: Application of Bayesian Techniques. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(5), 5533-5546.
- Villar, L.F.S., de Campos, T.M.P., Azevedo, R.F., and Zornberg, J.G., 2009. Influence of Laboratory Techniques on the Geotechnical Characterization of Mining and Industrial Wastes. *Proceedings of the Seventeenth International Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5-9 October, Alexandria, Egypt, 186-189.
- Wang, C., Li, Z., Zhou, Z., Gao, Y., Zhang, J., 2022. Compatibility of different fibres with red mud-based geopolymer grouts. *Construction and Building Materials*, 315, 125742.
- Wang, M., Liu, X., 2021. Applications of Red Mud as an Environmental Remediation Material: A Review. *Journal of Hazardous Materials*, 408, 124420.
- Wang, W., Sun, K., Liu, H., 2020. Effects of different aluminum sources on morphologies and properties of ceramic floor tiles from red mud. *Construction and Building Materials*, 241, 118119.
- Wang, Y., Zhang, T.-a., Zhang, Y., Lv, G., Zhang, W., 2019. Transformation and Characterization of Cement Clinker Prepared from New Structured Red Mud by Sintering. *JOM*, 71(8), 2505-2512.
- Wienk, I.M., Boom, R.M., Beerlage, M.A.M., Bulte, A.M.W., Smolders, C.A., Strathmann, H., 1996. Recent Advances in the Formation of Phase Inversion Membranes Made from Amorphous or Semi-Crystalline Polymers. *Journal of Membrane Science*, 113(2), 361-371.
- Wiewel, B.V., Lamoree, M., 2016. Geotextile Composition, Application and Ecotoxicology-A Review. *Journal of Hazardous Materials*, 317, 640-655.

- Wu, P., Liu, X., Zhang, Z., Wei, C., 2023. Properties of Red Mud-Filled and Modified Resin Composites. *Construction and Building Materials*, 409, 133984.
- Xu, X., Song, J., Li, Y., Wu, J., Liu, X., Zhang, C., 2019. The Microstructure and Properties of Ceramic Tiles from Solid Wastes of Bayer Red Muds. *Construction and Building Materials*, 212, 266-274.
- Yaşar, H., 2001. Plastikler Dünyası. TMMOB Makina Mühendisleri Odası, 142(2), 261s, Ankara.
- Yeo, H.-T., Lee, S.-T., Han, M.-J., 2000. Role of a Polymer Additive in Casting Solution in Preparation of Phase Inversion Polysulfone Membranes. *Journal of Chemical Engineering of Japan* 33(1), 180-184.
- Yıldırım, S., Adatepe, Ş., 2018. Zemin İncelemesi ve Temel Tasarımı (3. baskı). Birsen Yayınevi, 486s.
- Yıldız, N., 2022. Cevher Hazırlama Ve Zenginleştirme 3. Cilt (4. Baskı). Ertem Basım, Ankara.
- Yu, L., Zhao, D., Wang, W., 2019. Mechanical Properties and Long-Term Durability of Recycled Polysulfone Plastic. *Waste Management*, 84, 402-412.
- Yurtseven, R., Tarakçılar, A., Topcu, M., 2013. Dolgu Maddesi Olarak Kullanılan Farklı Uçucu Küllerin Sert Poliüretan Köpük Malzemelerin Mekanik Özellikleri İle Isıl Ve Yanma Davranışları Üzerine Etkileri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(4), 841-853.
- Zhang, X., Shi, B., Liu, X., 2013. Preparation of Polysulfone Ultrafiltration Membranes Modified by Silver Particles. *Desalination and Water Treatment*, 51(19-21), 3762-3767.
- Zhang, Y., Zhang, A., Zhen, Z., Lv, F., Chu, P.K., Ji, J., 2011. Red mud/Polypropylene Composite with Mechanical and Thermal Properties. *Journal of Composite Materials*, 45(26), 2811-2816.
- Zorluer, İ., Gücek, S., 2016. Zemin İyileştirmede Endüstriyel Atıkların Dayanıma Etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 16, 244-248.