Maden Atık Barajlarında Kullanılacak Killerin Jeoteknik Özellikleri

Geotechnical Properties of Clays to be Used in Mine Tailings Dams

Selçuk Alemdağ[1*], İbrahim ÇAVUŞOĞLU[2]
[1]*Gümüşhane Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, TÜRKİYE*
[2]*Gümüşhane Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, TÜRKİYE*
**Sorumlu Yazar: selcuk@gumushane.edu.tr*

ÖZET

Bu çalışmada, Gümüşhane ili Tamzı Köyü sınırları içerisinde yayılım gösteren killerin doğal malzeme olarak mühendislik uygulamalarında kullanılabilirliği sıkışabilirlik ve geçirimlilik açısından değerlendirilmiş olup, özellikle maden atık barajlarının rezervuar alanlarında kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Laboratuvar deneyleri ve literatür taramaları ile elde edilen veriler ışığında, killerin maden atık barajlarında rezervuar alanı tabanında ve yamaçlarda geçirimsiz tabaka olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Çalışma bulguları incelendiğinde, Tamzı Köyü'nde yayılım gösteren killerin düşük plastisiteli özellikte olduğu, sahalar arasında en ideal sıkışma özelliğine sahip 1 ve 7 nolu sahalardaki killer olduğu ve incelenen killerin geçirimlilik değerlerinin $1.54x10^{-7}$-$7.96x10^{-8}$cm/s arasında değiştiği belirlenmiş olup, geçirimsiz özelliktedir. İncelenen killerin uygun sıkışma ve geçirimsizlik özellikleri nedeniyle maden atık barajlarında sızıntı kontrolü açısından önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir. Bu bulgular, maden atık depolama tesislerinin tasarım ve inşaat süreçlerinde daha güvenli ve çevre dostu çözümler geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

Anahtar Kelimeler: Atık Barajı, Geçirimlilik, Kil, Sıkışabilirlik

ABSTRACT

In this study, the usability of clays spreading within the borders of Tamzı Village in Gümüşhane province as natural materials in engineering applications was evaluated in terms of compressibility and permeability, and especially their usability in the reservoir areas of mine waste dams was evaluated. In the light of the data obtained through laboratory experiments and literature reviews, the usability of clays as impermeable layers at the base of the reservoir area and on the slopes in mine waste dams was evaluated. When the study findings were examined, it was determined that the clays spreading in Tamzı Village had low plasticity, the clays in sites 1 and 7 showed the most ideal compression among the sites, and the permeability values of the examined clays varied between $1.54x10^{-7}$ - $7.96x10^{-8}$ cm/s and were impermeable. It shows that the examined clays have significant potential in terms of leakage control in mine waste dams due to their suitable compression and impermeability properties. These findings will contribute to the development of safer and more environmentally friendly solutions in the design and construction processes of mine waste storage facilities.

Keywords: Clay, Compressibility, Tailings Dam, Permeability

1. Giriş

Maden endüstrisi faaliyetleri, modern toplumun ihtiyaç duyduğu hammaddeleri sağlamada merkezi bir rol oynamaktadır. Ancak bu faaliyetler, büyük hacimlerde maden atığı (pasa ve cevher zenginleştirme artıkları) üretmekte ve bu atıkların depolanması çevresel ve jeoteknik

açıdan önemli sorunları beraberinde getirmektedir. Maden atık barajları, bu atıkların uzun süreli ve güvenli bir şekilde depolanması için inşa edilen büyük mühendislik yapılarıdır. Geçmişte yaşanan baraj göçmeleri ve sızıntılar, maden atık barajlarının tasarımında, yapımında ve işletilmesinde jeoteknik prensiplere sıkı sıkıya uyulmasının hayati önemini gözler önüne sermiştir. Bu yapıların en kritik bileşenlerinden biri, atık kütlelerinden gelen sızıntıların yeraltı sularına ve yüzey sularına karışmasını önleyen, aynı zamanda barajın genel duraylılığına katkıda bulunan geçirimsiz tabakalardır (Karapınar, 2011; Naveen vd., 2018).

Ülkemizin ekonomik lokomotifi olan madenlerimiz işletilirken, çevre felaketlerine yol açmayacak şekilde doğru projelendirme ve gerekli önlemlerin alınması büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, baraj, gölet, atık barajı, çöp depolama alanları ve atık havuzları gibi mühendislik yapılarında geçirimsizlik malzemesi olarak kullanılacak doğal zeminlerin, özellikle killerin mühendislik özelliklerini belirlemek üzere birçok bilimsel araştırma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir (Mitchell et al., 1965; Abeele, 1986; Chapuis, 1990; Nalbantoglu and Tuncer, 2001; Jafari and Shafiee, 2004; Jacobs et al., 2007; Fall et al., 2009; Tizpa et al., 2014).

Bu bağlamda, Gümüşhane ili Tamzı Köyü çevresinde yayılım gösteren killerin, maden atık barajlarında geçirimsizlik tabakası olarak kullanılabilirliğine ilişkin herhangi bir kapsamlı jeoteknik değerlendirme daha önce yapılmamıştır. Bölgedeki doğal zemin malzemelerinin yerinde kullanım potansiyelinin belirlenmesi, hem yüksek maliyetli sentetik jeomembranlara alternatif oluşturabilecek çevresel ve ekonomik açıdan sürdürülebilir bir çözüm sunmakta hem de bölgesel maden atık yönetimi uygulamalarına özgü bilimsel veri sağlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, yerel kil formasyonlarının geçirimsizlik ve sıkışabilirlik davranışlarını uluslararası standartlara (ASTM) göre deneysel olarak değerlendirerek, bölgeye özgü malzeme karakterizasyonu sunan ilk araştırma olma özelliği taşımaktadır. Böylece, maden atık barajlarının güvenli tasarımı ve çevresel risklerin azaltılması açısından yerel zeminlerin mühendislik potansiyelinin ortaya konulması, çalışmanın hem bilimsel hem de uygulamalı önemini oluşturmaktadır. İnceleme alanında yedi farklı alanda yayılım gösteren killerin jeoteknik özellikleri arazi ve laboratuvar çalışmaları ile değerlendirilmiştir. Arazi çalışmalarında farklı alanlarda yüzeylenme veren killerde araştırma çukurları açılarak örselenmiş numuneler alınmış ve laboratuvarda jeoteknik özellikleri belirlenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, Gümüşhane ili Tamzı Köyü çevresinde yüzeylenen doğal killerin, maden atık barajlarında geçirimsizlik tabakası olarak kullanılabilirliğini belirlemek amacıyla arazi ve

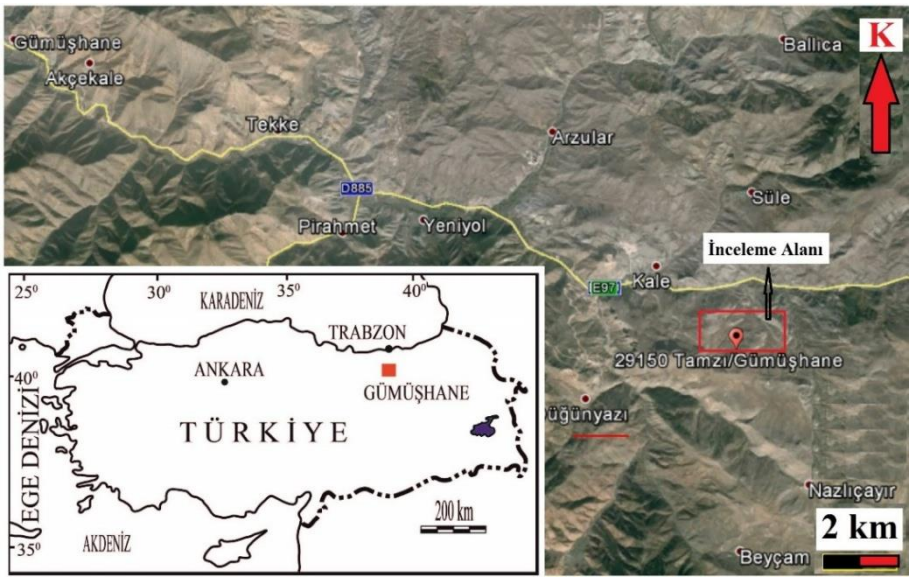
laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Arazi çalışmaları kapsamında kil birimlerinin stratigrafik konumu, yayılım özellikleri ve örnekleme alanları belirlenmiştir.

Laboratuvar aşamasında ise alınan örnekler üzerinde zeminlerin fiziksel, sıkışabilirlik ve geçirimlilik özelliklerini ortaya koymak üzere ASTM ve TS standartlarına uygun deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılan deneysel çalışmalar, doğal killerin mühendislik parametrelerini tanımlayarak, atık barajı taban ve şev tasarımlarında geçirimsiz tabaka olarak kullanılabilirliğini değerlendirmeye yöneliktir.

2.1. Arazi Çalışmaları

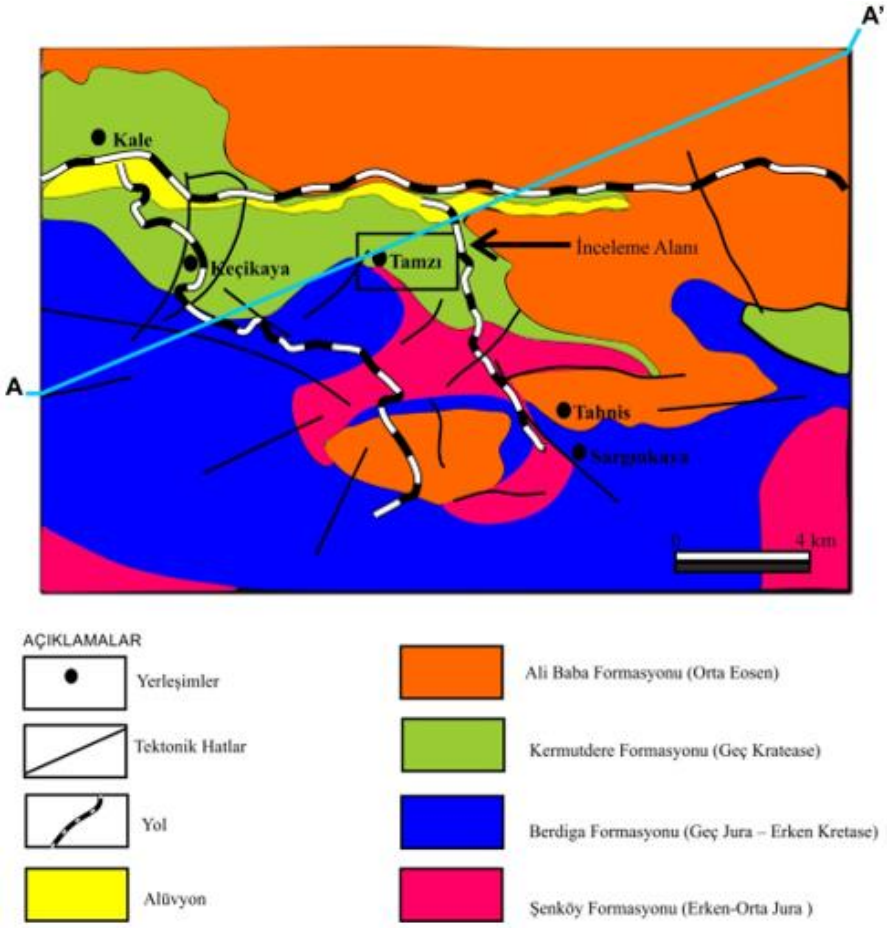
Çalışmaya konu olan killer, Gümüşhane ilinin güneydoğusunda ve yaklaşık 30 km uzaklıkta olup (Şekil 1), Kandemir ve Yılmaz (2009) tarafından adlandırılan Erken–Orta Jura yaşlı Şenköy Formasyonu'na ait kırmızı kumlu çamur taşlarının ayrışmasıyla oluşmuştur (Şekil 2).

Birim, Geç Karbonifer yaşlı (320-324 My; Topuz vd. 2010) Gümüşhane Plütonu üzerine uyumsuzlukla gelirken, üst sınırı Berdiga Formasyonu'na ait dolomitik kireçtaşları ile uyumludur. Ayrıca çalışma alanı çevresinde yayılım gösteren Kermutdere Formasyonu Geç Kretase yaşlı olup, Berdiga Formasyonu'nu uyumlu olarak örtmekte ve bunun üzerine Eosen yaşlı (30-43 My; Kaygusuz vd., 2011; Arslan vd., 2014) Ali Baba Formasyonu uyumsuz olarak gelmektedir (Şekil 3).



Şekil 1. İnceleme alanının yer belirleme haritası

Şekil 2. Şenköy Formasyonuna ait kırmızı renkli çamurtaşılarının görünümü



Şekil 3. İnceleme alanının jeolojisi

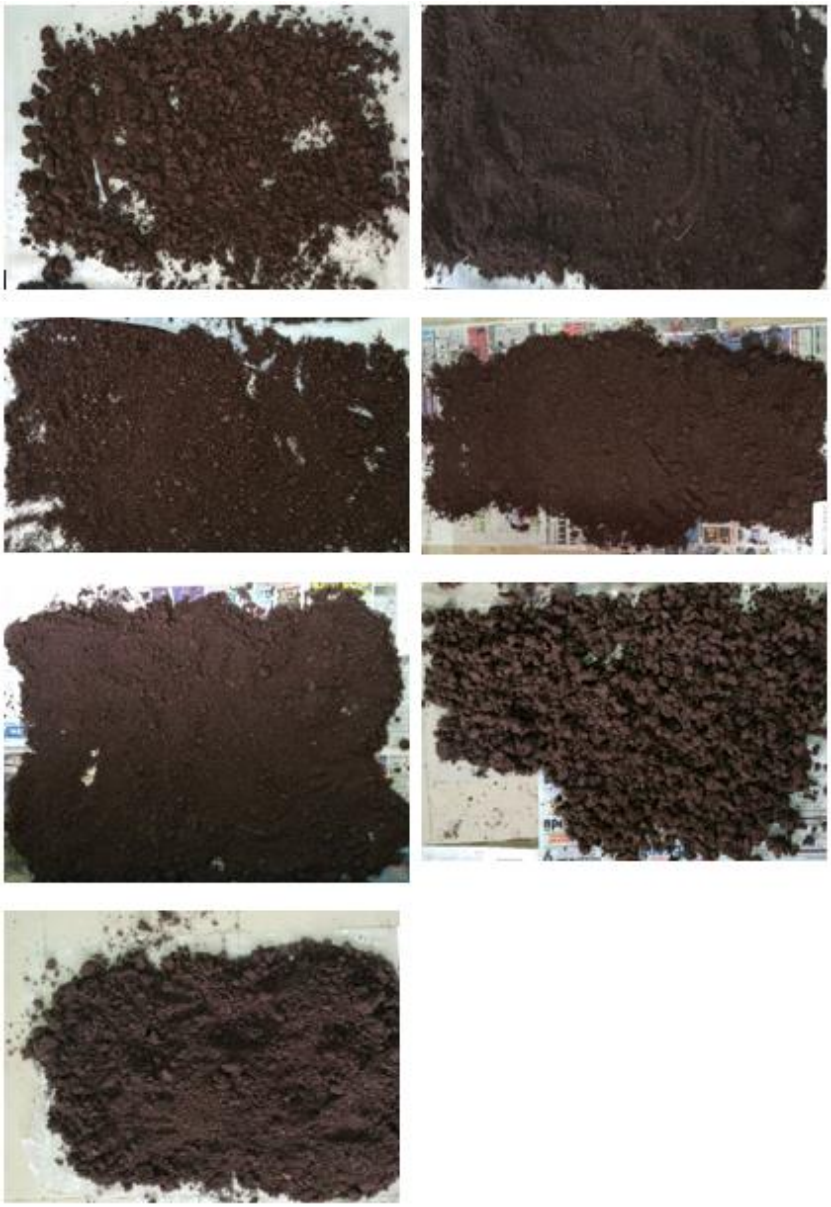
İnceleme alanında yüzeyleyen killer Şenköy Formasyonu'nun ayrışma ürünleri olarak geniş alanlarda görülmekte olup, bu killerden örnekler araştırma çukurları açılarak alınmıştır (Şekil 4–5).

Şekil 4. İnceleme alanında yüzeyleyen killerin görünümü (Google Earth)

Şekil 5. Killerin yayılım gösterdiği alanlarda yapılan örnek alımı

2.2. Deneysel Çalışmalar

Arazi çalışmalarında belirlenen yedi farklı sahada açılan araştırma çukurlarından 15–20 kg arasında değişen miktarlarda örselenmiş numuneler alınmıştır. Numuneler laboratuvarda doğal koşullarda serilerek kurutulmuş ve deney standartlarına uygun şekilde hazırlanmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Çalışma alanındaki killerden alınmış örneklerin laboratuvar ortamında kurutulması

Laboratuvar çalışmalarında ASTM (2003) ve TS (2006) standartlarına göre elek analizi, kıvam limitleri, özgül ağırlık, standart proktor ve düşen seviyeli geçirimlilik deneyleri yapılmıştır.

Standart Proktor deneyi TS 1900-1 (2006) standartlarına göre yapılmıştır. Deneyin yapılışında 2.5 kg ağırlığında hazırlanan numuneler, 3 tabaka halinde her tabakaya 30.5 cm'den

serbest düşme yapabilen tokmak ile 25 darbe uygulanarak sıkıştırılmıştır (Şekil 7). Her deneyden sonra zemini temsil eden bir miktar örnek alınmış ve içerisinde su muhtevası bulunmuştur. Elde edilen deney sonuçlarına göre doğal birim hacim ağırlıklar (γ_n), kuru birim hacim ağırlıklar (γ_{kmax}) ve su içeriği (w_{opt}) değerleri hesaplanmıştır.

Şekil 7. Standard Proktor deneyinin zeminlere uygulanmasının görünümü

İnceleme alanındaki zeminlerin geçirimlilik değerlerini belirlemek için, düşen seviyeli geçirimlilik deneyi yapılmıştır. Düşen seviyeli geçirimlilik deneyinde, tüpteki su seviyesinin düşmesine izin verilir ve daha sonra permeametrede su akışı duruncaya kadar sık aralıklarla hidrolik yük ölçümleri yapılır. Bu deneyde hidrolik yükün $\boldsymbol{h_0}$'dan $\boldsymbol{h_1}$'e düşmesi için gereken zaman " t " ölçülerek, geçirimlilik değeri aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$K = \frac{aL}{At}\ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right) \quad (1)$$

K: Permeabilite katsayısı (cm/sn)

a : Piezometre borusunun kesit alanı (cm^2)

L: Örneğin yüksekliği (cm)

A: Örneğin kesit alanı (cm^2)

t : Cam borudaki h_0'ın h_1 'e inmesi için geçen zaman (sn)

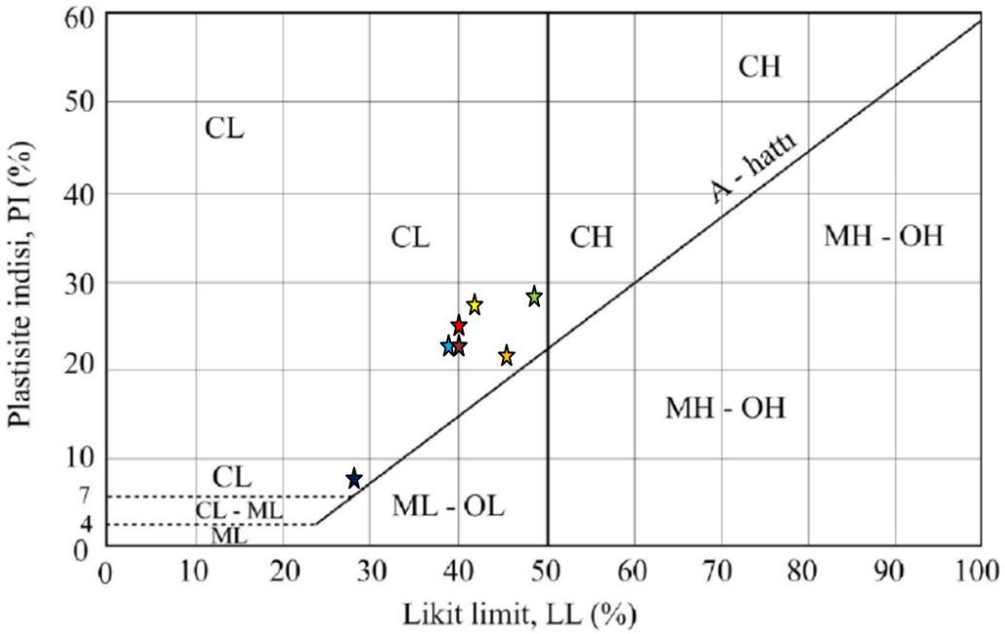
3. Bulgular ve Tartışma

Laboratuvar deneyleri sonucunda, elde edilen fiziksel özellikler Tablo 1'de, zeminlerin sınıflandırılması ise Şekil 8'de verilmiştir. ASTM (2003) ve TS (2006) standartlarına göre yapılan elek analizi, kıvam limitleri, özgül ağırlık, standart proktor ve düşen seviyeli geçirimlilik deneyleri, tüm sahalardaki zeminlerin benzer özellikler gösterdiğini ortaya koymuştur. Birleştirilmiş zemin sınıflamasına göre, inceleme alanındaki tüm numuneler düşük

plastisiteli kil (CL) sınıfında yer almakta olup, bu durum killerin homojen yapıda ve mühendislik uygulamaları açısından uygun bir geçirimsizlik potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 1. İnceleme alanındaki zeminlerin fiziksel özelliklerine göre dağılımı

Araştırma Sahası	4 Nolu elekte kalan (%)	200 Nolu elekten geçen (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	Özgül Ağırlık (G_s)
1	0.23	90.44	40	15	25	2.43
2	0.32	84.34	46	19	27	2.72
3	0.86	76.98	28	19	9	2.85
4	1.20	83.43	39	16	23	2.81
5	1.19	97.84	40	17	23	2.35
6	0.41	91.53	42	14	28	2.37
7	0.16	95.18	38	19	19	2.59

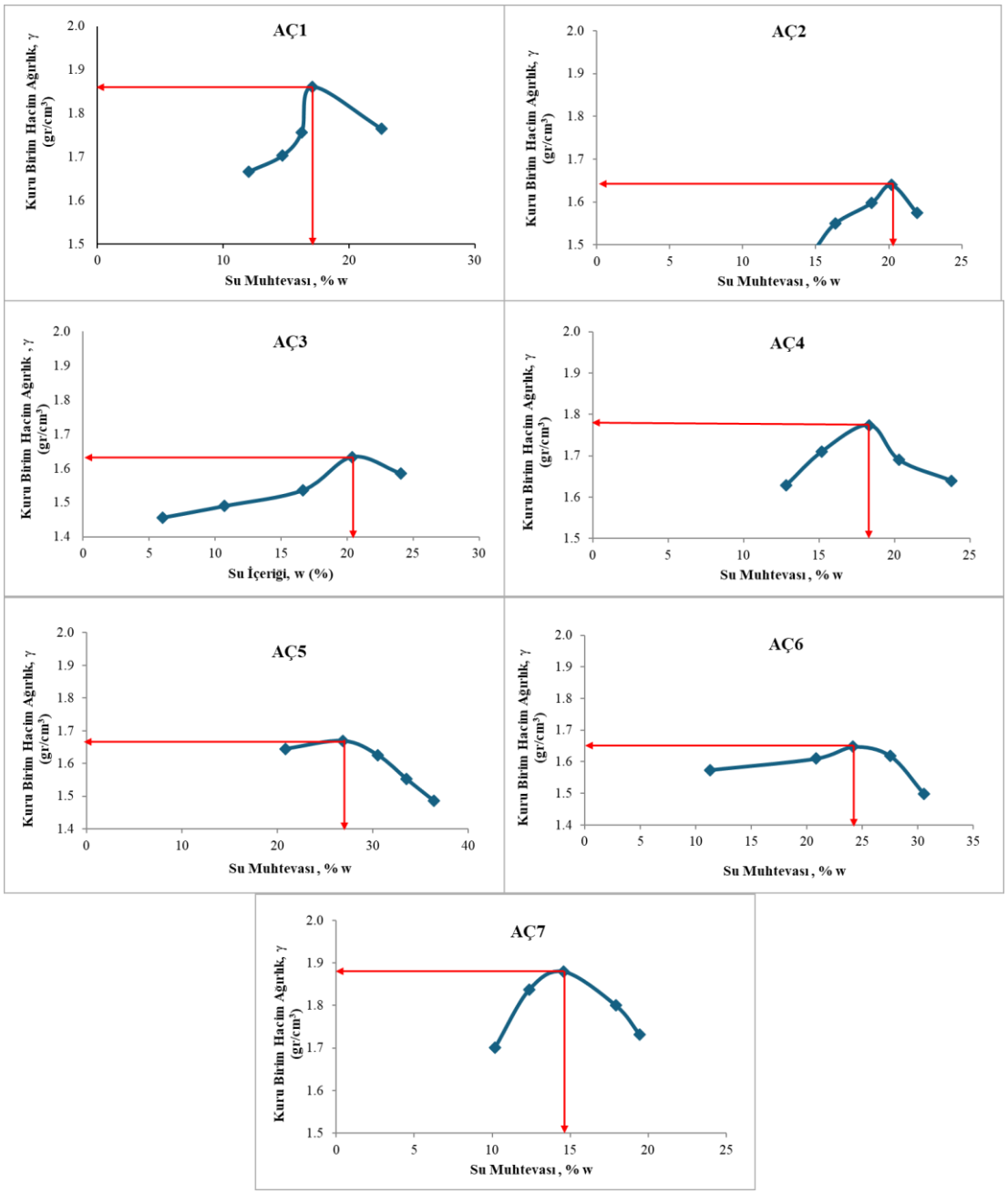


Şekil 8. İnceleme alanındaki killerin birleştirilmiş zemin sınıflamasına göre dağlımı

Her bir zemin örneğine ait kuru birim hacim ağırlık–su içeriği ilişkileri Şekil 9'da verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen sonuçlara göre, maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. Proktor deneyi sonuçlarına göre, inceleme alanındaki killerin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri 1.63–1.87 g/cm³ arasında, optimum su içeriği değerleri ise %14.6–%28 aralığında değişmektedir.

Tablo 2. İnceleme alanındaki zeminlerin maksimum kuru birim ağırlık ve optimum su içeriği değerleri

Araştırma Çukuru	γ_{kmax} (gr/cm^3)	w_{opt} (%)
AÇ1	1.86	17
AÇ2	1.64	20
AÇ3	1.63	20
AÇ4	1.77	18.3
AÇ5	1.66	28
AÇ6	1.64	24.2
AÇ7	1.87	14.6



Şekil 9. İnceleme alanındaki killerin kuru birim ağırlık- su içeriği grafikleri

Bu sonuçlar, farklı sahalardan alınan kil örneklerinin genel olarak benzer sıkışabilirlik özellikleri gösterdiğini, ancak bazı sahalarda (özellikle 1 ve 7 numaralı alanlarda) daha yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlığına ulaşıldığını ortaya koymaktadır. Bu durum, söz konusu zeminlerin tane boyu dağılımı, plastisite ve mineralojik bileşim farklarından kaynaklanabilecek şekilde daha iyi sıkışma potansiyeline sahip olduğunu düşündürmektedir. Dolayısıyla, bu iki sahadan elde edilen killerin, geçirimsiz tabaka malzemesi olarak kullanılmaya daha elverişli olduğu değerlendirilmektedir.

Düşen seviyeli geçirimlilik deneyleri, her bir zemin örneğinin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği koşullarında, yani Proktor enerjisine karşılık gelen sıkıştırma yoğunluğunda gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, sahada geçirimsiz tabaka olarak kullanılacak zeminlerin gerçek sıkıştırma koşullarını laboratuvar ortamında temsil etmesi açısından önemlidir. Deneylerde, permeametre hücresine yerleştirilen sıkıştırılmış numunelerden suyun düşey yönde geçişi izlenmiş, belirli zaman aralıklarında hidrolik yük farkları kaydedilerek geçirimlilik katsayısı (K) hesaplanmıştır.

Elde edilen deney sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Buna göre, killerin geçirimlilik katsayıları 3.77×10^{-8} ile 2.42×10^{-7} cm/s arasında değişmektedir. Bu değerler, zeminlerin düşük su geçirgenliğine sahip olduğunu göstermektedir. Hunt (1984) tarafından önerilen sınıflamaya göre tüm örnekler "geçirimsiz" niteliktedir. Bu sonuç, çalışma alanındaki doğal killerin sıkıştırılmış durumda oldukça düşük bir su akışına izin verdiğini ve atık barajlarının taban sızdırmazlığı veya geçirimsiz örtü tabakası olarak kullanılmaya uygun mühendislik özellikleri taşıdığını ortaya koymaktadır. Ayrıca farklı sahalar arasında gözlenen küçük değişimlerin, zeminlerin tane boyu dağılımı ve plastisite farklarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

Tablo 3. İnceleme alanındaki zeminlerin geçirimlilik değerleri

Araştırma Çukuru	K (cm/s)	Geçirimlilik (Hunt, 1984)
AÇ1	$2.42x10^{-7}$	Geçirimsiz
AÇ2	$1.54x10^{-7}$	Geçirimsiz
AÇ3	$2.32x10^{-7}$	Geçirimsiz
AÇ4	$3.77x10^{-8}$	Geçirimsiz
AÇ5	$7.96x10^{-8}$	Geçirimsiz
AÇ6	$6.07x10^{-8}$	Geçirimsiz
AÇ7	$7.19x10^{-8}$	Geçirimsiz

Bu sonuçlar, inceleme alanında yer alan doğal killerin atık barajlarında geçirimsiz tabaka malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Özellikle 1 ve 7 numaralı sahalardan

alınan örneklerin hem düşük geçirimlilik hem de yüksek sıkışabilirlik değerleriyle mühendislik uygulamaları açısından en uygun malzeme özelliklerini sergilediği görülmektedir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, Gümüşhane ili Tamzı Köyü civarında yüzeylenen Kermutdere Formasyonu kökenli killerin, doğal zemin malzemesi olarak maden atık barajlarında geçirimsiz tabaka amacıyla kullanılabilirliği jeoteknik açıdan değerlendirilmiştir. Arazi ve laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- İnceleme alanında Kermutdere Formasyonu'na ait kil seviyelerinin mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Yapılan elek analizi sonuçlarına göre, zeminlerin Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi (USCS) kapsamında düşük plastisiteli kil (CL) sınıfında yer aldığı tespit edilmiştir.
- Zeminlerin özgül ağırlık değerleri 2.35–2.85 arasında değişmekte olup, ortalama özgül ağırlık 2,59 olarak hesaplanmıştır.
- Standart Proktor deneyi sonuçlarına göre, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri 1.63–1.87 g/cm³, optimum su içeriği değerleri ise %14.6–%28 aralığındadır. Bu sonuçlar, özellikle 1 ve 7 numaralı sahalardan alınan zeminlerin daha yüksek sıkışma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.
- Düşen seviyeli geçirimlilik deneyleri, Proktor enerjisinde sıkıştırılmış numunelerde yapılmıştır. Elde edilen geçirimlilik katsayıları 1.54×10^{-7} – 7.96×10^{-8} cm/s aralığındadır. Hunt (1984) sınıflamasına göre, tüm zemin örnekleri "geçirimsiz" olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, Tamzı Köyü civarında yüzeylenen doğal killerin atık barajı göl alanlarında geçirimsizlik tabakası olarak kullanılmasının mühendislik açısından herhangi bir sakınca oluşturmadığı görülmüştür. Bu killerin yerel kaynak olarak değerlendirilmesi hem ekonomik açıdan avantaj sağlayacak hem de çevresel açıdan sürdürülebilir bir çözüm sunacaktır.

Öneri olarak, ilerleyen çalışmalarda bu killerin mineralojik bileşimlerinin (örneğin XRD ve SEM analizleriyle) belirlenmesi ve donma-çözülme ile kuruma-ıslanma döngülerine karşı dayanımlarının incelenmesi, uzun dönem performansın değerlendirilmesi açısından faydalı olacaktır.

5. Kaynaklar

Abeele, W.V., (1986). The influence of bentonite on the permeability of sandy silts. Nuclear and Chemical Waste Management 6, 81–88.

Aslan, Z., Arslan, M., Temizel, İ., and Kaygusuz, A., 2014, K-Ar dating, whole-rock and Sr-Nd isotope geochemistry of calc- alkaline volcanic rocks around the Gümüşhane area: Implications for post-collisional volcanism in the Eastern Pontides, Northeast Turkey: Mineralogy and Petrology, v. 108, no. 2, p. 245–267. doi: 10.1007/s00710-013-0294-2

ASTM D 854-92, (2003). Standard Test Method for Specific Gravity of Soils, In:Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.08, Philadelphia, PA, pp.176-179.

ASTM D 422-63 (2003). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, In:Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.08, Philadelphia, PA, pp. 93-99.

Chapuis, R.P., (1990). Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests. Canadian Geotechnical Journal 27 (1), 47–57.

Fall, M., Cèlestin, J.C., Han, F.S., (2009). Stability of bentonite-paste tailings mixtures as engineering barrier material for mine waste containment facilities. Minerals Engineering 22, 840–848.

Hunt RE., (1984). Geotechnical engineering investigation Manual. MC GrawHill Book Company, N.York , 983 p.

Jacobs,W., Van Kesteren, W.G.M.,Winterwerp, J.C., (2007). Permeability and consolidation of sediment mixtures as function of sand content and clay mineralogy. International Journal of Sediment Research 22 (3), 180–187.

Jafari, M.K., Shafiee, A., (2004). Mechanical behavior of compacted composite clays. Canadian Geotechnical Journal 41 (6), 1152–1167.

Karapınar N. (2011). Maden Atık Alanlarının Kapatılması-Örtü Kaplamalar. Madencilik Dergisi, Cilt 50, Sayı 1, Sayfa 3-21.

Mitchell, J. K., Hopper, D. R., and Campanella, R. C. (1965). Permeability of compacted clay. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 91, No. SM4.

Nalbantoglu Z, Tuncer ER (2001). Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay. Can Geotech J 38:154–160

Naveen, B.P., Sumalatha, J. & Malik, R.K. (2018). A study on contamination of ground and surface water bodies by leachate leakage from a landfill in Bangalore, India. Geo-Engineering 9, 27. https://doi.org/10.1186/s40703-018-0095-x

Tizpa P, Jamshidi CR, Karimpour Fard M, Machado LS (2014). ANN prediction of some geotechnical properties of soil from their index parameters. Arab J Geosci., 8 (5), 2911-2920

TS–1900–1 (2006). İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvarı Deneyleri Bölüm 1. Fiziksel Özelliklerin Tayini, 5.2.1.

Kandemir, R. & Yilmaz, C. (2009) Lithostratigraphy, facies, and deposition environment of the Lower Jurassic Ammonitico Rosso type sediments (ARTS) in the Gumushane area, NE Turkey: Implications for the opening of the northern branch of the Neo-Tethys ocean. Journal of Asian Earth Sciences, 34, 586–598.

Kaygusuz, A., Arslan, M., Siebel W., Şen, C., 2011. Geochemical and Sr-Nd Isotopic Characteristics of Post-Collision Calc-Alkaline Volcanics in the Eastern Pontides (NE Turkey), Turkish Journal of Earth Sciences, 20, 137-159.

Topuz, G., Altherr, R., Siebel, W., Schwarz, W.H., Zack, T., Hasözbek, A., Barth, M., Satir, M., and Şen, C., 2010, Carboniferous high-potassium I-type granitoid magmatism in the Eastern Pontides: The Gümüşhane pluton (NE Turkey): Lithos, v. 116, no. 1–2, p. 92–110. doi: 10.1016/j.lithos.2010.01. 003