İMO Teknik Dergi, 2016 7477-7496, Yazı 455

Yeraltı Nükleer Atık Haznelerinde Kullanılabilecek Sıkıştırılmış Kum Bentonit Karışımlarının Geoteknik Değerlendirmesi ve Bariyer Tasarımı

Haluk AKGÜN[1]
Mahir ADA[2]
Mustafa Kerem KOÇKAR[3]

ÖZ

Bu çalışmada, yeraltı nükleer atık depolama haznelerinin sızdırmazlığının sağlanması için geoteknik ve hidrolojik açıdan sıkıştırılmış kum bentonit izolasyon malzemesi tasarlanması amaçlanmaktadır. Optimum karışım miktarını belirlemek için %5 ile %15 oranları aralığında bentonit içeren kum bentonit karışımları üzerinde kompaksiyon, düşen seviyeli hidrolik iletkenlik, şişme basıncı, serbest basınç ve basit kesme deneyleri yapılmıştır. Seçilen optimum kum bentonit bariyer karışımının tasarımı, bariyere uygulanan düşey gerilmenin ve bariyer yükseklik-yarıçap oranının (L/a) fonksiyonu olarak yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kum bentonit karışımı, nükleer atık depolaması, bariyer tasarımı.

ABSTRACT

Geotechnical Assessment of Compacted Sand Bentonite Mixtures to be Utilized in Underground Nuclear Waste Repositories and Barrier Design

This study assesses the mechanical and hydrological performance of compacted sand bentonite mixtures to be utilized in sealing underground nuclear waste repositories. In order to assess the performance of this material and to obtain an optimum sand bentonite mixture, a variety of laboratory tests, namely, compaction, falling head permeability, swelling, unconfined compression and shear strength tests were performed on sand bentonite mixtures possessing bentonite contents ranging from 5% to 15%. Sand bentonite barrier design was performed for the optimum seal selected as a function of the axial stress applied to the barrier and barrier length-to-radius ratio (L/a).

Keywords: Sand bentonite mixture, nuclear waste disposal, barrier design.

Not: Bu yazı
- Yayın Kurulu'na 26.06.2014 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2016 gününe kadar tartışmaya açıktır.

1 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Ankara - hakgun@metu.edu.tr
2 Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı (TPAO), Ankara - mahira@tpao.gov.tr
3 Gazi Üniversitesi, Deprem Müh. Uygulama ve Araştırma Merkezi, Ankara - mkockar@gazi.edu.tr

1. GİRİŞ

2020 yılından önce Türkiye'nin birincil yerel enerji kaynaklarının tamamı hizmete geçirilse dahi enerji talebinin tamamının karşılanması mümkün olamayacağından, fosil yakıtların en önemli alternatifi olan nükleer elektrik santrallerinin (NES) Türkiye'de inşa edilmeleri kaçınılmaz duruma gelmiştir [1]. Buna bağlı olarak, NES'ler tarafından üretilen nükleer atıklar yeraltı jeolojik depolarda bertaraf edilmelidir ve erişilebilir çevrenin kirletilmesini önlemek için uygun şekilde izole edilmelidir [2-5]. Çeşitli kuruluşlar [6-9], NES'ler tarafından üretilen nükleer atıkların depolanacakları yeraltı atık hazneleri ve bileşenleri için kavramsal tasarım bilgileri ile birlikte yürütülmekte olan yerinde deneyler ve büyük ölçekli laboratuvar deneyleri hakkında bilgi vermektedir.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'nin güneyinde yapımına başlanan Akkuyu Nükleer Elektrik Santralinden kaynaklanacak nükleer atıkların yeraltı nükleer atık haznelerinde depolanması sonrası, bu hazneleri yeryüzüne bağlayan şaft ve sondajların sıkıştırılmış kum bentonit karışımları ile güvenli bir şekilde izole edilebilmesidir.

Nükleer atıkları çevreden izole etmek için kullanılan malzemeler depolama sistemlerinin en önemli bileşenlerinden birisidir. Nükleer atık depolama izolasyonunun başarısı açısından malzemelerin mekanik olarak stabil, hazne kayacı ile uyumlu, kimyasal olarak dayanıklı, yıkıma karşı dirençli ve çok düşük geçirgenliğe sahip olması hayati önem arz etmektedir [2-16]. Bu nitelikleri taşımalarından dolayı bentonit ve kum bentonit karışımlarının İsveç, İsviçre, Kanada, Almanya ve Fransa'daki henüz tasarım safhasında bulunan yeraltı nükleer atık haznelerinin izolasyonunda tampon ve dolgu malzemesi olarak kullanılması [2, 12, 17] ve A.B.D.'nin New Mexico eyaletindeki Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) sahasındaki şaftların izolasyonunda kullanılması planlanmaktadır [18, 19].

Kum bentonit bariyerlerinin izolasyon performansları üzerine ilk çalışmalar çeşitli araştırmacılar [20-26] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmaların yapılmasındaki amaç, kuma belirli miktarda bentonit katılarak iki bileşenli izolasyon malzemesi elde edilmesi ve kum bileşenin yük taşıyıcı iskeleti, bentonite bileşeninin de kumdaki boşlukları dolduran geçirimsizlik bariyer malzemesini oluşturarak dayanıklı ve nispeten geçirimsiz bir izolasyon malzemesinin oluşturulmasıdır. Bir diğer amaç da kuma nazaran pahalı olan bentonitin kumla karıştırılarak maliyetin azaltılmasıdır.

Türkiye'nin enerji talebi için bir nükleer elektrik santrali (NES) inşa etme fikri Türk hükümeti tarafından 30 yıl kadar önce ortaya atılmıştır. Santralin uzun dönem güvenilirliği, elektrik üretim sisteminde yakıt çeşitliliği ve çevresel sorunlardaki azalma, Türkiye'nin elektrik şebekesine bir NES'in entegre edilmesi sonucunu doğurmuştur. Buna bağlı olarak da Akkuyu NES sahasının Mersin ilinin Silifke ilçesinde yapımına başlanmıştır.

Akkuyu NES bölgesinde Orta Doğu Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (ODTÜ/DMAR), Türkiye Elektrik Kurumu (TEK), Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİEİ), Maden Tetkik ve Araştırma Kurumu (MTA) ve Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından bir dizi jeolojik ve geoteknik etüt programları önerilmiş ve uygulanmıştır. MTA tarafından 1985 yılında NES sahasını kapsayan 1/1000 ölçeğinde bir jeolojik harita hazırlanmıştır. Bu haritaya göre, Büyükeceli formasyonu, Akdere formasyonu ve Kırtıldağı formasyonu olmak üzere üç adet formasyon haritalanmıştır. Büyükeceli formasyonunun hakim litolojileri kuvarzitik kumtaşı, vaketaşı, kireçtaşı, karbonat çamurtaşı, dolomit ve dolomitik vaketaşıdır. Akdere formasyonu, geniş bir alana yayılması ve litolojik çeşitliliği nedeniyle

en belirgin stratigrafik birimlere sahiptir. Akdere formasyonu temelde şeyler, çamurtaşı, çamurkayaçları ve bunların ardalanmasından oluşmaktadır. NES sahası temelde Akdere formasyonu üzerinde yer almaktadır. Kırtıldağı formasyonu inşaat alanında yer alan haritalanabilir formasyonlar arasında en üstte yeralır. Bu formasyon, kumlu vaketaşı, istiftaşı, kırıntıtaşı (grainstone), dolomitler ve karbonat çamurkayalarından oluşmaktadır. Akdere formasyonu üzerinde diskordanslı olarak yer almaktadır [27-29].

Arjilik (killi) formasyonlar, atık malzemesinin izolasyonu için hazne kaya formasyonları olarak kabul edilebilir. Şeyl ve çamurtaşı gibi arjilik formasyonları nükleer atık depolama sahaları için aday formasyonlar yapan özellikler temel olarak şu şekilde sıralanabilir: çok düşük hidrolik iletkenlik, çözünmüş katyonlar için yüksek emme (soğurma) kapasitesi, koloidler ve büyük moleküller için etkili filtreleme kapasitesi ve kil içeriklerinin düşük çözünebilirliğidir [30]. Dolayısı ile NES sahasından üretilecek herhangi bir atık malzemesi bu formasyon içinde depolanabilir.

Bu çalışmada, Türkiye'nin güneyinde yapımına başlanan Akkuyu Nükleer Elektrik Santralinden kaynaklanacak nükleer atıkların yeraltı nükleer atık haznelerinde depolanması sonrası, bu hazneleri yeryüzüne bağlayan şaft ve sondajların sıkıştırılmış kum bentonit karışımları ile izole edilebilmesi için bu malzemenin performansı laboratuvar ortamında değerlendirilmiş ve bariyer tasarımı yapılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Deneylerde %5 ile %15 arasında bentonit içeren kum bentonit karışımları kullanılmıştır. Karışımlardaki bentonit yüzdeleri, bentonit ağırlığının (B) karışımın içindeki toplam bentonit ve kum ağırlığına (B+K) oranlanması ile hesaplanmıştır [B/(B+K)]. Bentonit Çanbensan firmasından [31], kum da Silifke, Mersin'deki Göksu nehrinden elde edilmiştir. Çanbensan bentonit, en az %75 montmorilonit içeren ve piyasada mevcut olan bir bentonittir. Kullanılan kum ince ile orta taneli, temiz, yuvarlak köşeli kuvarz parçacıklı ve organik madde içermemektedir. Geoteknik laboratuvar test programı kapsamında, kum bentonit karışımları üzerinde ağırlıklı olarak ASTM standartlarına göre özgül ağırlık deneyi [32], elek analizi [33], zemin sınıflaması [34], standart Proctor deneyi [35], şişme basıncı deneyi [36], serbest basınç deneyi [37], basit kesme deneyi [38] ve hidrolik iletkenlik deneyi [39] gerçekleştirilmiştir.

2.2. Yöntem

2.2.1. Şişme Deneyi

Optimum su içeriğinde sıkıştırılmış kum bentonit karışımlarının şişme davranışının belirlenmesi için konvansiyonel bir ödometre aparatı kullanılmıştır. Örneğe ilk yük olarak 5 kPa uygulanmıştır. Ardından, şişme basıncının elde edilmesi için örnek suya daldırıldıktan sonra düşey basınçtaki ayarlamalarla örnek sabit yükseklikte tutulmuştur. Düşey gerilme kademeli olarak uygulanmış ve deformasyon okumaları her 0.005 mm'de bir alınmıştır.

2.2.2. Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneylerinde optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılmış örnekler kullanılmıştır. Örneklerin örselenme seviyelerini en aza indirgemek için bir hidrolik numune çıkarıcı kullanılmıştır. Serbest basınç deneyleri için 35 mm çap (D) ve 71 mm boyunda (H) örnekler hazırlanmıştır. Örneklerin bu boyutlarda olması sayesinde 2.0 ile 2.5 aralığında boy/çap oranında olma koşulu sağlanmıştır. Ardından, eksenel gerinim (deformasyon) oranı dakikada %1 olan bir kompaksiyon aleti kullanılmıştır. Örnekler %15 deformasyon oranı elde edilene kadar yüklenmiştir. Young Modül değerleri, gerilim-birim deformasyon eğrisinden Secant Modülü değerine göre (eğri üzerindeki maksimum serbest basınç dayanım miktarının %50'sine tekabül eden noktanın eksenle birleştirilmesi sonucu elde edilen doğrunun eğiminden) hesaplanmıştır.

2.2.3. Basit Kesme Deneyi

Bentonit içeriği %5 ile %15 aralığında olan kum bentonit karışımları üzerinde konsolidasyonlu drenajsız (CU) kesme kutusu (basit kesme) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler, sabit hızda basit kesme deformasyonu tipinde yükleme kullanılarak tek-boyutlu konsolidasyondan sonra kohezif zeminlerin gerilme-deformasyon özelliklerinin ölçülmesi için gerçekleştirilmiştir. Önceden optimum su içeriğinde sıkıştırılmış kum bentonit örnekleri basit kesme deney cihazının hücresinin içine yerleştirilmiş ve kesit alanları sabit kalacak şekilde iki paralel, sabit plaka arasında kısıtlanarak eksenel ve enlemsel olarak kısıtlanmışlardır. Deneylerde membran kullanılmıştır. Ardından örnekler, eksenel olarak yüklenmiş ve bir yönde (boyutta) konsolide olmalarına izin verilmiştir. Aşırı boşluk suyu basıncının tamamı dağılana kadar normal yük artışı kademesi sabit tutulmuştur. Örneğe daha sonra bir plakayı diğerine göre sabit bir deplasman hızında teğet olarak yer değiştirmek suretiyle kesme (makaslama) uygulanmış ve ortaya çıkan kesme kuvveti kaydedilmiştir. Bu prosedür 3 farklı normal gerilme seviyesi (100, 150 ve 200 kPa) için tekrarlanmıştır.

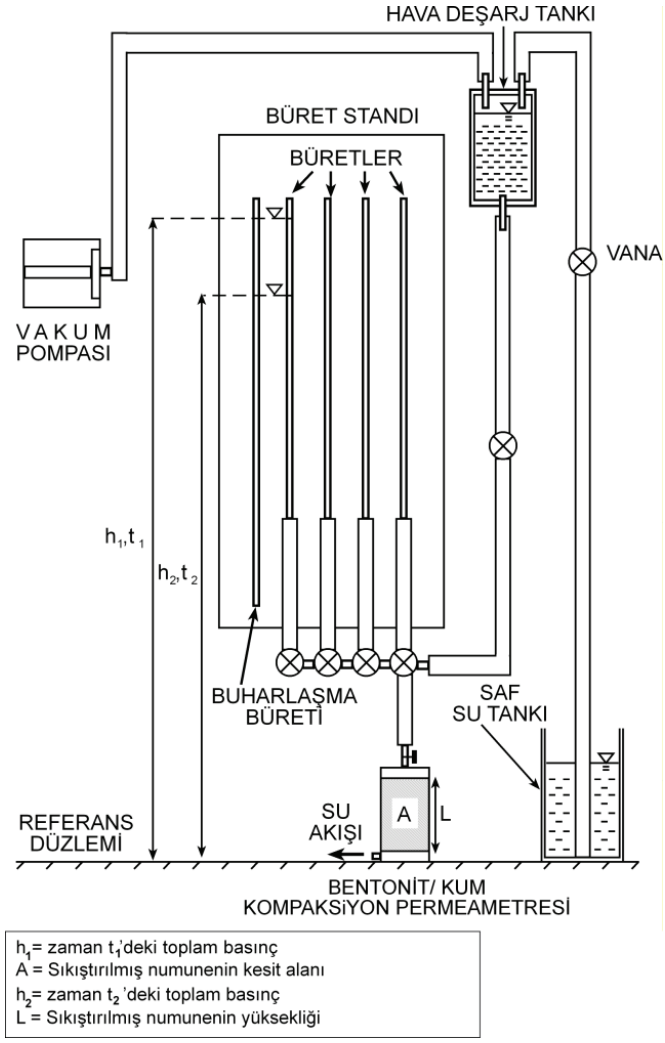
2.2.4. Hidrolik İletkenlik Deneyi

Sıkıştırılmış kum bentonit karışımlarının hidrolik iletkenlikleri sabit duvarlı permeametreler aracılığıyla belirlenmiştir. Düşen seviyeli sabit duvarlı permeametre düzeneğinin şematik çizimi Şekil 1'de verilmiştir. Düzenek, dört adet düşen seviyeli deneyi eş zamanlı gerçekleştirebilmek için dört adet sabit duvar kompaksiyon permeametresi, bir adet hava boşaltma tankı, dört adet ölçü tüpü (büret), bir adet damıtılmış su tankı ve bir adet vakum pompasından oluşmaktadır. Deneylerde sıvı olarak damıtılmış ve havası alınmış su kullanılmıştır. Test edilen numunelerin çapları 102 mm, yükseklikleri 116 mm olup deneylerde uygulanan hidrolik eğim değeri yaklaşık 12'dir. Her deney, sıkıştırılmış örneklerin tam doygunluk seviyesine ulaşması için gerekli süre olan 47 gün ile 62 gün geçtikten sonra başlatılmıştır (%5, %10 ve %15 kum bentonit içeren karışımların tam doygunluk seviyesine ulaşmaları sırasıyla 47 gün, 51 gün ve 62 gün sürmüştür). Numunelerin tam doygunluk seviyesine ulaşmalarının sabit duvar kompaksiyon permeametrelerinin çıkış ağızlarından su gelmesi ile teyit edilmesinden sonra başlatılan hidrolik iletkenlik deneyleri 203 gün sürmüştür. Deneylerin tamamlanma kriteri olarak hidrolik iletkenliğin sabit seviyeye ulaşması ve en az bir adet boşluk hacmi cinsinden akış

miktarı (BHCAM) toplanması baz alınmıştır. Çeşitli araştırmacılar [16, 40-44] tarafından önerildiği üzere örneklerin optimum su içeriğinin nemli tarafında sıkıştırılması düşük hidrolik iletkenliğe neden olduğundan, kum bentonit karışımları optimum su içeriklerinin yaklaşık %2 üzerindeki bir seviyede sıkıştırılmışlardır.

Bu yöntemde, akışkan, L boyundaki ve A silindirik kesit alanındaki zemin örneğinden sızdıkça, bürette t_1 zamanındaki h_1 seviyeleri ve t_2 zamanındaki h_2 seviyeleri okunmuştur (Şekil 1). Ardından Denklem (1) kullanılarak hidrolik iletkenlik (k) değeri belirlenmiştir:

$$k = \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} \tag{1}$$



Şekil 1. Düşen seviyeli kompaksiyon permeametresi düzeneğinin şematik çizimi ([45]'den değiştirilerek alınmıştır)

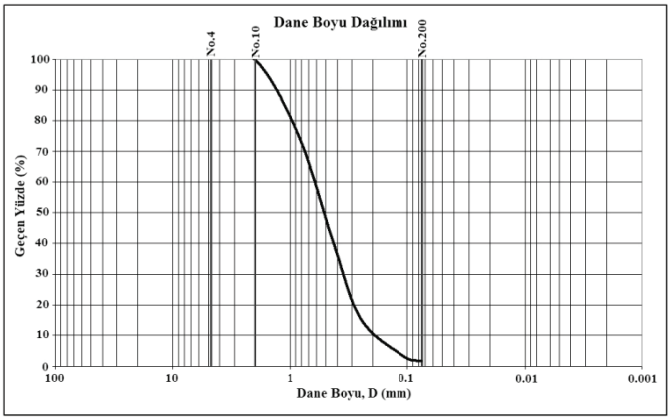
3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bentonitin ve kumun özgül ağırlıkları sırasıyla 2.75 ve 2.68 olarak belirlenmiştir. Bentonitin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Çizelge 1'de özetlenmiştir [31]. İnce ile orta taneli gradasyonlu (SP) kum olarak sınıflandırılan kumun dane boyu dağılımı eğrisi Şekil 2'de, zemin sınıflama parametreleri ise Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Çanbensan Na-bentonitin kimyasal bileşiği, fiziksel ve indeks özellikleri [31], kullanılan kumun zemin sınıflama parametreleri

Element	**Bileşim (%)**
SiO_2	59-61
Al_2O_3	18-20
Fe_2O_3	4-6
MgO	2.5-3.5
Na_2O	2-3
CaO	0.5-1.5
K_2O	0.5-1.5
TiO_2	0.5-1.5
Renk	**Sarı**
Metilen mavisi değeri	320 mg/g
Montmorillonit içeriği	>%75
Serbest şişme miktarı [46]	%591
Nem içeriği	(kuru malzeme bazında) %9.5
pH (%6.5 sıvı çamur)	9.5
Minimum kullanım sıcaklığı	1°C
Bentonit elek analizi [33]	
Çakıl (>2 mm)	%0
Kum (2-0.075 mm)	%6
Silt (0.075-0.002 mm)	%20
Kil (<0.002 mm)	%74
Atterberg (kıvam) limitleri	
Likit limit [47]	%397
Plastik limit [48]	%59
Plastisite indeksi [48]	%338
Kumun dane boyu dağılımı [33]	Kumun USCS Sınıfı [34]
D_{10} = 0.23 mm D_{30} = 0.38 mm D_{60} = 0.65 mm Cc^{*} = 0.96 Cu^{**} = 2.82	SP, ince ile orta daneli kum

* $C_u = D_{60}/D_{10}$; $^{**}C_c = D_{30}^2/D_{10} \times D_{60}$



Şekil 2. Kum için dane boyu dağılımı eğrisi

Çizelge 2'de özetlenen özgül ağırlık değerlerinden görülebileceği gibi kum bentonit karışımlarının özgül ağırlık değerleri 2.676 ile 2.687 arasında değişmektedir. Bentonitin özgül ağırlığı kum malzemesinin özgül ağırlığından daha yüksek olduğundan, bentonit içeriği arttıkça kum bentonit karışımlarının özgül ağırlıklarında hafif bir yükselme gözlemlenmiştir. Benzer gözlemler [49] tarafından da yapılmıştır.

Çizelge 2. Kum bentonit karışımlarının belirlenen mühendislik özellikleri

Bentonit İçeriği (%)	G	γ_{dmaks} (kN/m^3)	w_{opt} (%)	σ_s (kPa)	q_u (kPa)	E (MPa)	c (kPa)	ϕ (°)	k (m/s)
5	2.676	17.2	17.4	51.6	81.6	15.2	19.0	31.0	6.2×10^{-8}
10	2.685	17.5	16.2	73.5	102.0	19.0	28.3	29.1	3.0×10^{-8}
15	2.687	17.6	16.1	99.1	198.4	29.3	35.1	26.8	8.7×10^{-10}

Sıkıştırılmış kum bentonit karışımlarının kompaksiyon özelliklerini incelemek ve optimum su içeriklerini ve maksimum kuru birim hacim ağırlıklarını değerlendirmek üzere karışımların tamamı için kuru birim hacim ağırlığına göre su içeriği grafiklerini kapsayan Standart Proctor kompaksiyon eğrileri çizilmiştir (Şekil 3(a)'dan 3(c)'ye). Kompaksiyon deneyi sonuçlarına göre, optimum su içeriği değerleri %17.4 ile %16.1 arasında, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri ise 17.2 kN/m^3 ile 17.6 kN/m^3 arasında belirlenmiştir. Sıkıştırılmış bentonit/kum karışımlarının maksimum kuru birim hacim ağırlık (γ_{dmax}) ve optimum su içeriği (w_{opt}) değerleri Çizelge 2'de özetlenmiştir. Çizelge 2'den takip edilebileceği üzere, kum bentonit karışımlarının bentonit oranı arttıkça, maksimum kuru birim hacim ağırlıkları artmakta ve optimum su içerikleri azalmaktadır. %5-%15 aralığında bentonit içeriğine sahip kum bentonit karışımlarında bentonit içeriğinin artması ile maksimum kuru birim hacim ağırlığının (γ_{dmaks}) artması ve optimum su

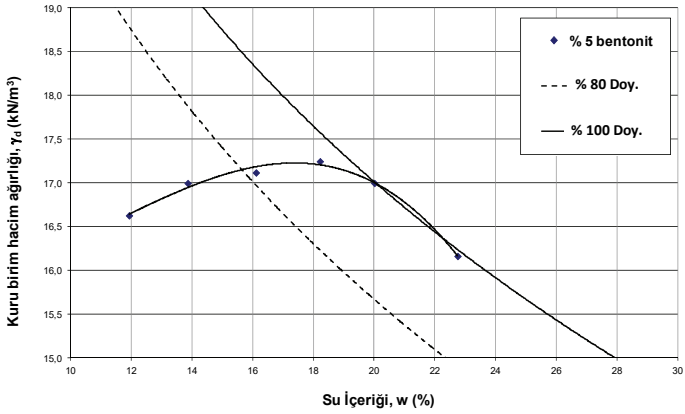
içeriğinin (w_{opt}) azalması (Çizelge 2) diğer araştırmacılar [50-55] tarafından da gözlemlenmiştir. Bu araştırmacılardan [53], %5, %10, %20, %30 ve %50 kum bentonit karışımlarının kompaksiyon özelliklerini incelemiş, %30 kum bentonit karışımı dahil olmak üzere %5-%30 karışım aralığında bentonit içeriğinin artması ile maksimum kuru birim hacim ağırlığının (γ_{dmaks}) arttığını ve optimum su içeriğinin (w_{opt}) azaldığını, %30'dan yüksek karışımlar için bu davranışın tersinin gerçekleştiğini gözlemlemiştir. %30 kum bentonit karışımı en yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlığını (γ_{dmaks}) ve en düşük optimum su içeriğini (w_{opt}) vermiştir. Bu davranışın sebebi olarak da %5-30 bentonit içeren karışımların kumlu zemin kompaksiyon karakteristiği sergilemelerini, %50'den yüksek bentonit içeren karışımların da killi zemin kompaksiyon karakteristiği sergilemelerini göstermiştir. Yaptığı araştırma sonucu [54], %30 ve bu oranın altındaki kum bentonit karışımlarında bentonitin kumun iskelet yapısını güçlendiren kohesif bir malzeme işlevini gördüğünü, buna nazaran %50'den yüksek bentonit içeren karışımlarda ise kum bentonit karışımının iskelet yapısında miktarı nispeten yüksek olduğu için genel olarak bentonitin iskelet yapısının hakim olduğunu savunmuştur. Bu nedenle [54], %50'den yüksek bentonit içeren kum bentonit karışımların kompaksiyon parametrelerinin bentonitin kompaksiyon parametreleri ile benzerlik gösterdiğini ve %50 kum bentonit karışımından itibaren maksimum kuru birim hacim ağırlığının (γ_{dmaks}) azalıp optimum su içeriğinin (w_{opt}) artmaya başladığını gözlemlemiştir.

Kum bentonit karışımlarının ölçülen maksimum şişme basınçları (σ_s), artan bentonit içeriği ile artmaktadır ve 5%'lik karışımda 51.6 kPa ile %15'lik karışımda 99.1 kPa aralığında değişmektedir (Çizelge 2). [49] çeşitli kum bentonit karışımlarında şişme basıncı deneyleri gerçekleştirmiş ve çalışmalarında kum bentonit karışımının bentonit içeriğinin artmasının şişme basıncının artmasına yol açtığına dair benzer sonuçlar elde etmiştir.

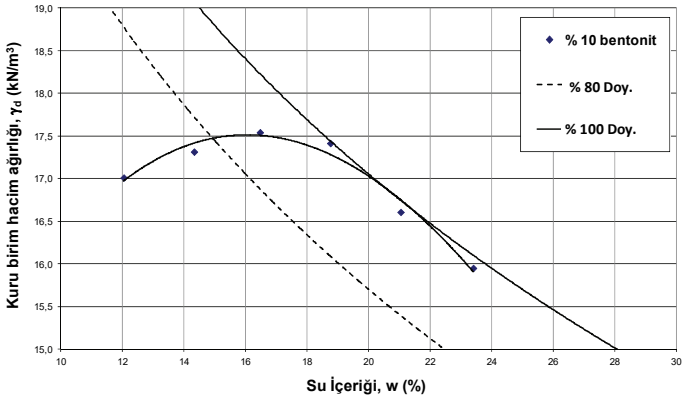
Çizelge 2'de özetlenen laboratuvar deneyi sonuçları serbest basınç dayanımı ve Young Modülü değerlerinin artan bentonit içeriği ile arttığını göstermektedir.Bunun sebebi olarak, %5-%15 aralığında bentonit içeriğine sahip kum bentonit karışımlarında bentonitin kumun iskelet yapısını güçlendiren kohesif bir malzeme işlevini görmesi sebebiyle bu karışım aralığında bentonit oranının artması ile serbest basınç dayanımının ve Young Modülünün artması gösterilebilir. Bu çalışmada elde edilen bentonit oranı ile serbest basınç dayanımı ve Young Modülü arasındaki ilişkinin bir benzeri [56] tarafından da elde edilmiştir. [55] ise bentonit oranı ve serbest basınç dayanımı arasında benzer bir ilişki gözlemlemiştir.

Farklı karışımların kohezyonu (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri Çizelge 2'de özetlenmiştir. Çizelge 2'den görülebileceği üzere, kum bentonit karışımlarının bentonit oranlarının artması ile kohesif malzeme özelliklerinin artması sebebiyle bentonit içeriği artıkça karışımların kohezyonları artmış ve içsel sürtünme açıları azalmıştır.

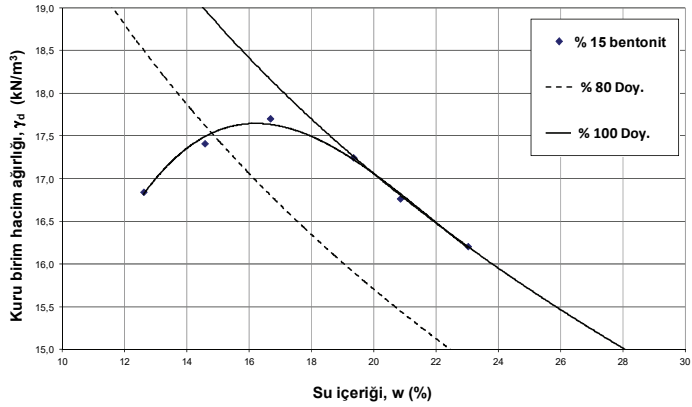
%5, %10 ve %15 kum bentonit içeren karışımların hidrolik iletkenliğe (k) karşı gelen boşluk hacmi cinsinden akış miktarı (BHCAM) Şekil 4'te, hidrolik iletkenliklerinin zamana karşı değişimi ise Şekil 5'te verilmiştir. %5, %10 ve %15'lik karışımların deneylerin başlangıcındaki hidrolik iletkenlik değerleri sırasıyla 4.1×10^{-7} m/s, 1.8×10^{-8} m/s ve 4.3×10^{-9} m/s'dir. 203 günlük deney süresi sonunda hidrolik iletkenlik değerleri sırasıyla 6.2×10^{-8} m/s, 3.0×10^{-8} m/s ve 8.7×10^{-10} m/s'ye düşmüştür. 203 günlük süreye denk gelen boşluk hacmi cinsinden akış miktarları (BHCAM) sırasıyla 2.9, 1.7 ve 1.9'dur.



(a)



(b)

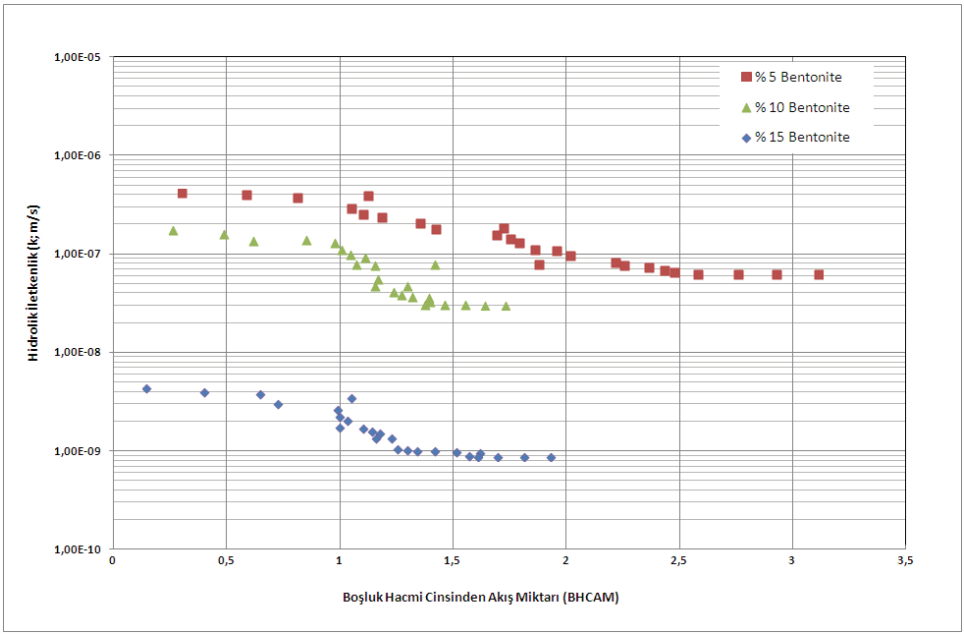


(c)

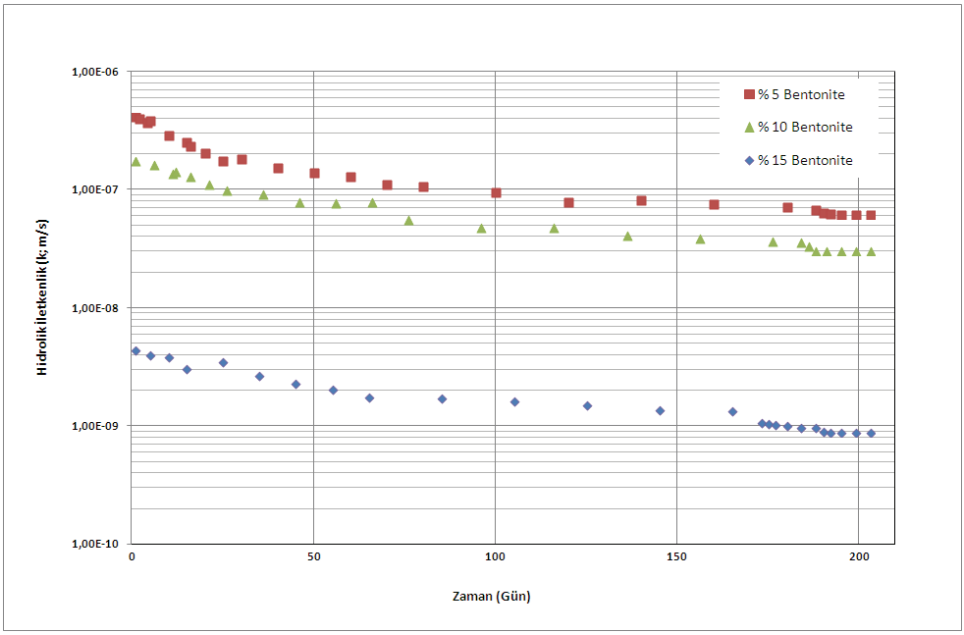
Şekil 3. (a) %5, (b) %10 ve (c) %15 bentonit içeriği olan kum bentonit örnekleri için kuru birim hacim ağırlık-su içeriği grafikleri

Bentonit içeriği %5 ile %15 arasında olan kum bentonit karışımlarının hidrolik iletkenlik değerleri karışımların bentonit içeriğinin artması ile azalma göstererek 6.2 x 10^{-8} m/s ile 8.7 x 10^{-10} m/s arasında değişim göstermektedir (Çizelge 2). Bu sonuçlar, farklı oranlarda kum bentonit karışımları üzerinde düşen seviyeli hidrolik iletkenlik deneyleri gerçekleştiren, örneğin [50, 57-61]'in bildirilen sonuçlarıyla uyum göstermektedir. Bu çalışmalarda, bentonitin tek başına geçirimsiz malzeme özelliğine ve 10^{-10} ile 10^{-12} m/s aralığında düşük hidrolik iletkenlik değerlerine sahip olmasından dolayı sıkıştırılmış kum bentonit karışımlarının içindeki bentonit oranının artması ile hidrolik iletkenlik değerlerinin azalmasının beklenebileceği sonucuna varılabilir.

Elde edilen sonuçlara göre %15 bentonit içeren kum bentonit karışımı en düşük hidrolik iletkenlik değeri olan 8.7 x 10^{-10} m/s'yi verdiği ve sıkıştırılmış killi bir malzemenin ABD'de ve Türkiye'de öngörülen minimum yönetmelik şartı olan 1 x 10^{-9} m/s'yi sağladığı için [62, 63] izolasyon malzemesi olarak %15 bentonit içeriğine sahip optimum sıkıştırılmış kum bentonit karışımının seçilmesi önerilmektedir. Bentonit oranı %15 olan kum bentonit karışımının maksimum şişme basıncı (σ_s), serbest basınç dayanımı (q_u), Young Modülü (E), kohezyonu (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) sırasıyla 99.1 kPa, 198.4 kPa, 29.3 MPa, 35.1 kPa ve 26.8° (Çizelge 2) olarak belirlenmiştir. Yukarıda kum bentonit karışımlarının mühendislik davranışlarının (örneğin, maksimum şişme basıncı, serbest basınç dayanımı, Young Modülü, kohezyonu, içsel sürtünme açısı, vb.) muhtemel sebepleri üzerinde yorum yapılmıştır.



Şekil 4. Hidrolik iletkenliğin %5'lik, %10'luk ve %15'lik karışım için boşluk hacmi cinsinden akış miktarı (BHCAM)



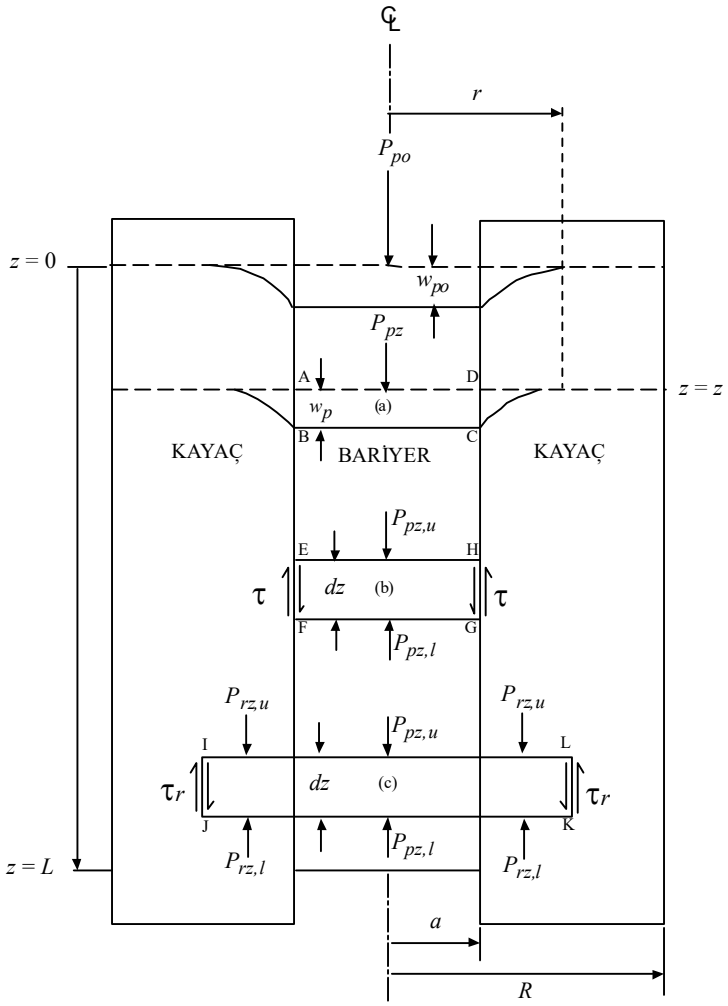
Şekil 5. Hidrolik iletkenliğin %5'lik, %10'luk ve %15'lik karışım için zamana karşı değişimi

4. KAYAÇ İÇİNE YERLEŞTİRİLMİŞ KUM BENTONİT BARİYERLERİN DÜŞEY YÜKLEMEYE KARŞI STABİLİTESİ

Bu kısımda, kayaç içine yerleştirilmiş ve düşey yüklemeye maruz kalan kum bentonit bariyerlerinin tasarımı için analitik çözüm sunulmaktadır. Kazıklı temel, kaya soket, kaya bulon/ankraj ve kompozit malzeme ile benzerlikler gösteren zemin (kayaç)-yapı (kum bentonit bariyeri) mekanik etkileşiminde kum bentonit bariyerine uygulanan düşey yük, yan kayaya bariyer/kaya dokanağı boyunca kesme gerilmesi şeklinde transfer olmaktadır. Kum bentonit bariyerlerinin üzerine etki etmesi en muhtemel olan düşey yükün, bariyerin üzerine etki eden su kolonunun yüksekliğinden (h_w) kaynaklanacağı düşünülmektedir [15].

Şekil 6, sondaj/şaft içerisine yerleştirilmiş bariyer/kayaç sistemi içerisindeki gerilme dağılımını incelemek için kullanılan modeli göstermektedir. Şekil 6(a)'daki ABCD kesitinden görülebileceği gibi, bariyere uygulanan düşey bir kuvvet (P_{po}), bariyer/kayaç dokanağına kesme gerilmesi şeklinde transfer olmakta, ve bu da bariyerin farklı düşey deformasyona maruz kalmasına yol açmaktadır (örneğin, z=0 seviyesinde w_{po} ve z=z seviyesinde w_p; Şekil 6(a)). Şekil 6(b)'deki EFGH kesitinin (a yarıçapı ve dz kalınlığında) düşey yöndeki denge koşulunun göz önüne alınması sonucunda dokanak kesme gerilmesi (τ) için analitik çözüm sağlanmaktadır. Öte yandan, Şekil 6(c)'deki IJKL kesitinin (r yarıçapı ve dz kalınlığında) düşey yöndeki denge koşulu göz önüne alındığında, kayaç içerisindeki kesme gerilmesi (τ_r) için analitik çözüm elde edilmektedir [15]. Şekil 6'da P_{po}, bariyere uygulanan düşey kuvveti; P_{pz} ve P_{rz}, sırasıyla, bariyerdeki ve kayaçtaki düşey kuvveti; τ, bariyer/kayaç dokanağındaki

makaslama gerilmesini; τ_r, kayaç içerisindeki makaslama gerilmesini ve, u,l, sırasıyla, üst ve alt bariyer veya kayaç yüzeyini belirten altsimgeleri ifade etmektedir.



Şekil 6. Sondaj/şaft içerisine yerleştirilmiş bariyer/kayaç sistemi içerisindeki gerilme dağılımını incelemek için kullanılan model

Üst yüzeyine düşey yönde gerilme (σ_z) uygulanan kum bentonit bariyerindeki pik kesme gerilmesi (τ_p) bariyer/kayaç dokanağının yüklenen seviyesine (z = 0; Şekil 6) etki etmektedir [15]:

$$\tau_p = \frac{\sigma_z \gamma}{2\tanh[\gamma(L/a)]} \tag{2}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{1-2\nu_s\alpha}{(1+\nu_r)(E_s/E_r)\ln(r/a)}} \tag{2a}$$

$$\alpha = \frac{\nu_p}{(1-\nu_p)+(E_s/E_r)(1+\nu_r)} \tag{2b}$$

$$r = a + \left[2.07Le^{-0.18(E_s/E_r)}\right] \tag{2c}$$

burada, γ ve α: boyutsuz parametreler, L: bariyer yüksekliği, a: bariyer yarıçapı, ν_s ve ν_r: sırasıyla, bariyer ve kayacın Poisson oranları, E_s/E_r: bariyer ve kayacın Young Modüllerinin oranı, ve r: kesme ve düşey gerilmelerin çok düşük seviyelere inmeye başladığı ve dolayısı ile yok farz edildiği kritik yarıçaptır (Şekil 6). γ parametresi düşey yönde yüklemeye maruz kalan silindirik kum bentonit bariyerinde oluşan düşey deformasyonun (w_p) Hooke kanunu ile elde edilen differensiyel denklemdeki parametredir ($d^2w_p/dz^2 - \gamma^2 w_p = 0$). α parametresi ise kayaç içine yerleştirilmiş ve düşey yönde yüklemeye maruz kalan silindirik kum bentonit bariyerinin bariyer-kayaç dokanağındaki bariyer radyal deformasyonun (u_{si}) kayaç radyal deformasyonuna (u_{ri}) eşit olduğu varsayımı ile elde edilen parametredir. Örnek olarak, yarıçapı (a) 3 m, yüksekliği (L) 6 m olan %15'lik kum bentonit bariyerinin (E_s: bariyer Young Modülü = 29.3 MPa, E_r: kayaç Young Modülü = 364.4 MPa [28], ν_s: bariyer Poisson oranı = 0.30 [19], ν_r: kayaç Poisson oranı = 0.257 [28]) γ değeri 0.375, α değeri ise 2.17'dir. Konu ile daha fazla bilgi [15]'den temin edilebilir.

Bariyer/kayaç dokanağındaki pik kesme dayanımı ($|\tau_p|$) bariyerin yüklenen seviyesinde (z = 0; Şekil 6) gelişmekte olup Coulomb kriterine göre [13] tarafından Denklem (3) ile ifade edilmektedir:

$$|\tau_p| = c + \sigma_{np} \tan\phi \tag{3}$$

$$\sigma_{np} = \sigma_z \alpha + \sigma_s \tag{3a}$$

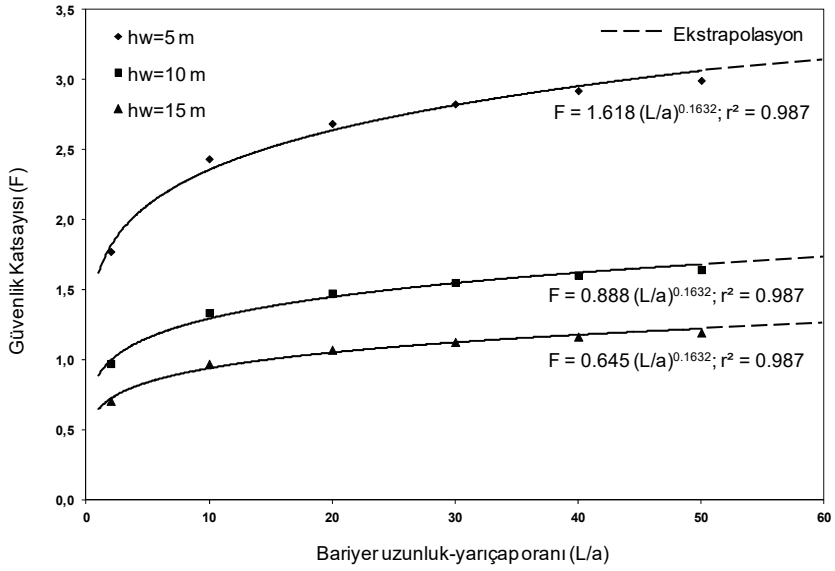
burada, c: kohezyon, σ_{np}: bariyer/kayaç dokanağına normal yönde (dik) etki eden pik normal gerilme, ϕ: içsel sürtünme açısı, σ_z: bariyere düşey yönde uygulanan gerilme, α: Denklem (2b) ile ifade edilen boyutsuz parametre, ve σ_s: kum bentonit dokanağına normal (dik) etki eden ve dokanak boyunca sabit kabul edilen bentonit şişme basıncıdır. Saha koşullarında (yerinde) yerleştirilmiş bariyerlerde kum bentonit dokanağına normal (dik) etki eden pik normal gerilmesi (σ_{np}) ve bununla birlikte pik kesme dayanımı ($|\tau_p|$), dokanağın yüklenen seviyesine (z = 0; Şekil 6) etki etmektedir.

Saha koşullarında (yerinde) yerleştirilmiş bariyerlerde kum bentonit dokanağının kaymaya karşı güvenlik katsayısı (F) Denklem (4) ile ifade edilmektedir:

$$F=\frac{|\tau_p|}{\tau_p} \tag{4}$$

burada, $|\tau_p|$: pik kesme dayanımı ve τ_p: pik kesme gerilmesidir.

Şekil 7'de, Akkuyu Nükleer Elektrik Santralinden kaynaklanacak nükleer atıkların, santralin yakınlarında yer alması muhtemel olan yeraltı nükleer atık haznelerinde depolanması sonrası, bu hazneleri yeryüzüne bağlayan ve şeyl/çamurtaşı seviyelerinde yer alan şaft ve sondajların içerisine yerleştirilmiş sıkıştırılmış kum bentonit karışımlarının kaymaya karşı güvenlik katsayıları (F) verilmektedir. Güvenlik katsayısı (F), yarıçapı (a) 3 m olan kum bentonit bariyerinin üzerine etki eden su kolonunun yüksekliğinin (h_w) ve kum bentonit bariyerinin uzunluk-yarıçap oranının (L/a) fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Tasarım analizlerinde su kolon yüksekliği (h_w) 5 m'den 15 m'ye, kum bentonit bariyeri uzunluk-yarıçap oranı da 2.0'den 50'ye kadar değiştirilmiştir. Şekil 7'de verilen sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, bariyerin güvenlik katsayısı (F), bariyerin uzunluk-yarıçap oranının (L/a) artması ve bariyerin üzerine etki eden su kolonunun yüksekliğinin (h_w) azalması ile artmaktadır. Şekil 7'de verilen regresyon denklemlerinden yapılan hesaplamalar sonucunda 5 m, 10 m, ve 15 m'lik su kolon yüksekliğine (h_w) maruz kalan kum bentonit bariyerlerinde güvenlik katsayısının (F) 1.2'e eşit olması için gerekli olan bariyer yükseklik-yarıçap oranları (L/a) sırasıyla 1.0, 7.0, ve 45.0 olmalıdır.



Şekil 7. Kum bentonit bariyerinin üzerine etki eden su kolonunun yüksekliğinin (h_w) ve kum bentonit bariyerinin uzunluk-yarıçap oranının (L/a) güvenlik katsayısına (F) etkisi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'nin güneyinde yapımına başlanan Akkuyu Nükleer Elektrik Santralinden kaynaklanacak nükleer atıkların yeraltı nükleer atık haznelerinde depolanması sonrası, bu hazneleri yeryüzüne bağlayan şaft ve sondajların sıkıştırılmış kum bentonit karışımları ile güvenli bir şekilde izole edilebilmesi için bu malzemenin performansının laboratuvar ortamında geoteknik/hidrolojik açıdan değerlendirilmesi ve bariyer tasarımının yapılmasıdır. Optimum kum bentonit karışımının belirlenmesi için kompaksiyon, düşen seviyeli geçirimsizlik, şişme, serbest basınç ve kesme dayanımı deneyleri gibi bir dizi geoteknik laboratuvar deneyi gerçekleştirilmiştir.

Geoteknik deney programının sonuçlarına göre, kum bentonit karışımının bentonit içeriği arttığında özgül ağırlığı, maksimum kuru birim hacim ağırlığı, maksimum şişme basıncı, serbest basınç dayanımı, Young Modülü ve kohezyon değerleri artmış ve optimum su içeriği, içsel sürtünme açısı ve hidrolik iletkenliği azalmıştır.

Bentonit içeriği %15 olan kum bentonit karışımı, radyoaktif atık depolama alanının yeterli şekilde izole edilebilmesi için ABD'de ve Türkiye'de öngörülen minimum yönetmelik şartı olan $1 \cdot \times 10^{-9}$ m/s'yi sağladığı için [62, 63], izolasyon malzemesi olarak %15 bentonit içeriğine sahip optimum sıkıştırılmış kum bentonit karışımının seçilmesi önerilmektedir. %15 oranındaki karışımın ölçülen hidrolik iletkenlik (k), maksimum şişme basıncı (σ_s), serbest basınç dayanımı (q_u), Young Modülü (E), kohezyon (c) ve içsel sürtünme açısı (ϕ) değerleri sırasıyla 8.7 x 10^{-10} m/s, 99.1 kPa, 198.4 kPa, 29.3 MPa, 35.1 kPa ve 26.8°dir.

Seçilen optimum kum bentonit bariyer karışımının geoteknik parametrelerinin kullanılması sonucu bariyer tasarımı, bariyere uygulanan düşey gerilmenin ve bariyer yükseklik-yarıçap oranının (L/a) fonksiyonu olarak yapılmıştır. Bariyerin güvenlik katsayısı (F), bariyerin yükseklik-yarıçap oranının (L/a) artması ve bariyerin üzerine etki eden su kolonunun yüksekliğinin (h_w) azalması ile artmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda 5 m, 10 m, ve 15 m'lik su kolon yüksekliğine (h_w) maruz kalan kum bentonit bariyerlerinde güvenlik katsayısının (F) 1.2'e eşit olması için gerekli olan bariyer yükseklik-yarıçap oranları (L/a) sırasıyla 1.0, 7.0, ve 45.0'dir.

Bu çalışmaya kum bentonit karışımlarının durabiliteleri dahil edilmemiştir, ancak, seçilen optimum kum bentonit bariyerin durabilitesinin değerlendirilmesi açısından hazne kayacı ile etkileşimi sonucu gerçekleşecek bariyer hidrasyonunun ve olgunlaşmasının incelenmesinin çok önemli olduğu aşikadir. Bu bağlamda, kum bentonit bariyerinin sünme birim deformasyonunun ve yeraltısuyu kimyasının etkisi ile birlikte jeokimyasal, fizikokimyasal, kinetik, termodinamik ve dokusal etkilerin değerlendirilmesinin gerekliliği kaçınılmazdır.

Semboller

γ_{dmax}, w_{opt} : Maksimum kuru birim hacim ağırlığı, optimum su içeriği

σ_s : Maksimum şişme basıncı

q_u, E : Serbest basınç dayanımı, Young Modülü

BHCAM : Boşluk hacmi cinsinden akış miktarı

E_s, E_r : Bariyer ve kayaç Young Modülü

ν_s, ν_r : Bariyer ve kayaç Poisson oranı

c, ϕ : Kohezyon ve içsel sürtünme açısı

k : Hidrolik iletkenlik

r^2 : Belirleme katsayısı

P_{po} : Bariyere uygulanan düşey kuvvet

P_{pz}, P_{rz} : Bariyerdeki ve kayaçtaki düşey kuvvet

τ : Bariyer/kayaç dokanağındaki kesme gerilmesi

τ_r : Kayaç içerisindeki kesme gerilmesi

γ, α : Boyutsuz parametreler

L, a : Bariyer yüksekliği ve yarıçapı

σ_{np} : Bariyer/kayaç dokanağına normal yönde (dik) etki eden pik normal gerilme

σ_z : Bariyere düşey yönde uygulanan gerilme

$|\tau_p|$, τ_p : Pik kesme dayanımı ve pik kesme gerilmesi

F, h_w : Güvenlik katsayısı, Bariyer üzerine etki eden su kolonu yüksekliği

Kaynaklar

[1] TEÜD Şti., Türkiye'nin Elektrik Üretimi ve Dağıtımı, Türkiye Elektrik Üretim ve Dağıtım Şirketi, Ankara, 1999.

[2] IAEA (International Atomic Energy Agency), "Sealing of Underground Repositories for Radioactive Wastes", Editörler: Gray, M., Gera, F., Wiley, J.R., Dlouhy, Z., Squires, D., International Atomic Energy Agency, Vienna, Unipub, Lanham, MD, Tech Reps Series No. 319, 1990.

[3] IAEA (International Atomic Energy Agency), "Hydrogeological Investigation of Sites for the Geological Disposal of Radioactive Waste", Technical Reports Series No. 391, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1999.

[4] IAEA (International Atomic Energy Agency), "The Use of Scientific and Technical Results from Underground Research Laboratory Investigations for the Geological Disposal of Radioactive Waste", IAEA-TECDOC-1243, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2001.

[5] IAEA (International Atomic Energy Agency), "Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes", Technical Reports Series No. 4I3, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2003.10.

[6] OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development), "Geological Disposal of Nuclear Waste in Perspective", OECD, Nuclear Energy Agency (NEA), Paris, 2000.

[7] CTECH, "Conceptual Design for a Deep Geologic Repository for Used Nuclear Fuel", CTECH Report 1106/MD18085/REP/01, 2002.

[8] SKB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.), "Long-term Safety for KBS-3 Repositories at Forsmark and Laxemar - A First Evaluation", Technical Report TR-06-09, SKB, Stockholm, 2006.

[9] ANDRA (French National Radioactive Waste Management Agency), "The Deep Geological Concept as Developed by ANDRA,". ANDRA, www.andra.fr, 4 p, 2011.

[10] Pusch, R. ve Bergström A, "Highly Compacted Bentonite for Borehole and Shaft Plugging", Proceedings of the Workshop on Borehole and Shaft Plugging, Columbus, OH, May 7–9, Organization for Economic Co-operation and Development, Paris, 161–168, 1980.

[11] Meyer, D. ve Howard, J.J., "Evaluation of Clays and Clay Minerals for Application to Repository Sealing", ONWI-486, Office of Nuclear Waste Isolation, Battelle Memorial Institute, OH, 1983.

[12] Pusch, R., "Waste Disposal in Rock", Developments in Geotechnical Engineering 76, Elsevier, Amsterdam, 490 s. 1994.

[13] Akgün, H., "Shear Strength of Cement-grout Borehole Plug", In Situ, 24: 107-137, 2000.

[14] Akgün, H. ve Daemen, J.J.K., "Performance Assessment of Cement Grout Borehole Plugs in Basalt", Engineering Geology, 37: 137-148, 1994.

[15] Akgün, H. ve Daemen, J.J.K., "Design Implications of Analytical and Laboratory Studies of Permanent Abandonment Plugs, Canadian Geotechnical Journal, 36: 21-38, 1999.

[16] Ada, M., Sıkıştırılmış Bentonit/Kum Karışımlarının Performanslarının Yeraltı Atık Depolama Haznelerinin İzolasyonunda Değerlendirilmesi, Y. Lisans Tezi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 107 s, Ankara, 2007.

[17] Coulon, H., Lajudie, A., Debrabant, P., Atabek, R., Jorda, M. ve Andre-Jehan, R., "Choice of French Clays as Engineered Barrier Components for Waste Disposal", In: Bates, J.K., Seefeldt, W.B. (Eds.), Scientific Basis for Nuclear Waste Management X, Materials Research Society Symposium Proceedings, Boston, MA, December 1–4, 1986: Materials Research Society, Pittsburgh, PA, 84: 813–824, 1987.

[18] DOE/WIPP, "U.S. Waste Isolation Pilot Plant Sealing System Design Report", DOE/WIPP-95-3117, Waste Isolation Pilot Plant, U.S. Department of Energy, 1995.

[19] Daemen, J.J.K. ve Ran, C., "Bentonite as a Waste Isolation Pilot Plant Shaft Sealing Material", Sandia National Laboratories, Albuquerque, Contractor Report SAND96–1968, 1996.

[20] D'Appolonia, D.J., "Soil-bentonite Slurry Trench Cutoffs", ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, 106(4): 339-417, 1980.

[21] Lundgren, T.A., "Some Bentonite Sealants in Soil Mixed Blankets," Proceedings, 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 2: 349-354, 1981.

[22] Chapuis, R.P., "Permeability Testing of Soil-bentonite Mixtures," Proceedings, 10thInternational Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 4: 744-745, 1981.

[23] Chapuis, R.P., Sand-Bentonite Liners: Predicting Permeability from Laboratory Tests", Canadian Geotechnical Journal, 27: 47-57, 1990.

[24] Abeele,W. V., "The Infuence of Bentonite on the Permeability of Sandy Silt", Nuclear and Chemical Waste Management, 6: 81-88, 1981.

[25] Sällfors, G., Peirce, J. ve Petersson, E., "Clay Liners Construction and Quality Control", ASCE Journal of Environmental Engineering, 112(2): 13-24, 1986.

[26] Mollins, L.H., Stewart, D. Ve Cousens, T.W., "Predicting the Properties of Bentonite-sand Mixtures", Clay Minerals, 31: 243-252, 1998.

[27] Demirtaşlı, E., "Çamalanı Nükleer Santrali ve Civarının Jeolojisi", Nihai Rapor, MTA, 102 s, Ankara, 1985.

[28] METU EERC, "Akkuyu II Nuclear Power Plant Geological and Geotechnical Investigations, Progress Report No. 1, Middle East Technical University, Ankara, 1984.

[29] Elektrik İşleri Etüd İdaresi (EİEİ), "Akkuyu II (Çamalanı) Nükleer Santrali Pressiyometre Deney Sonuçları", Elektrik İşleri Etüd İdaresi (EİEİ), Ankara, 1985.

[30] BENIPA, "Bentonite Barriers in Integrated Performance Assessment", Final Report, Office for Official Publications of the European Commission, 104 pp., Luxembourg, 2004.

[31] Çanbensan (Çankırı Bentonit San. Tic. A.Ş.), "Çanbensan Doğal Bentonitinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri", 2010.

[32] ASTM D854-10, "Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer", Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (I), ASTM, West Conshohocken, PA, 2010.

[33] ASTM D422-63, "Test Method for Particle-size Analysis of Soils", Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (I), ASTM, West Conshohocken, PA, 2007.

[34] ASTM D2487-11, "Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)", Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (I), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

[35] ASTM D0698-12, "Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft^3 (600 kN-m/m^3))", Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (I), ASTM, West Conshohocken, PA, 2012.

[36] ASTM D4546-08, "Standard Test Methods for One-dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils", Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (I), ASTM, West Conshohocken, PA, 2008.

[37] ASTM D2166-06, "Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil", Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (I), ASTM, West Conshohocken, PA, 2006.

[38] ASTM D6528-07, "Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils", Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (I), ASTM, West Conshohocken, PA, 2007.

[39] ASTM D5856-95, "Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Material Using a Rigid-wall, Compaction-mold Permeameter", Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (I), ASTM, West Conshohocken, PA, 2007.

[40] Mitchell, J.K., Hooper, D.R. ve Campanella, R.G., "Permeability of Compacted Clay", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 91: 41–65, 1965.

[41] Lambe, T.W. ve Whitman, R.V., "Soil Mechanics", J. Wiley, New York, 1969.

[42] Dixon, D.A., Gray, M.N. ve Thomas, A.W., "A Study of the Compaction Properties of Potential Clay-sand Buffer Mixtures for Use in Nuclear Fuel Waste Disposal", Engineering Geology, 21: 247-255, 1985.

[43] Benson, C. ve Daniel, D., "Influence of Clods on Hydraulic Conductivity of Compacted Clay", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 116: 1231-1248, 1990.

[44] Mitchell, J.K., "Fundamentals of Soil Behavior (2nd Ed.), Wiley, New York, 422 s, 1993.

[45] Met, İ., Akgün, H. ve Türkmenoğlu, A.G., "Environmental Geological and Geotechnical Investigations Related to the Potential Use of Ankara Clay as a Compacted Landfill Liner Material, Turkey", Environmental Geology, 47: 225-236, 2005.

[46] ASTM D5890-02. Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners. Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (I); ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002.

[47] BSI BS 1377, "British Standard Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes, Parts 1-3", British Standards Institution, London, England, 1990.

[48] ASTM D4318-10. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock (I); ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

[49] Komine, H. ve Ogata, N., "Prediction of Swelling Characteristics of Compacted Bentonite", Canadian Geotechnical Journal, 33: 11-12, 1996.

[50] Kenney, T.C., van Veen, W.A., Swallow, M.A. ve Sungaila, M.A., "Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite-Sand Mixture. Canadian Geotechnical Journal, 29: 364-374, 1992.

[51] Gökalp Z., Başaran M. ve Uzun, O., "Compaction and swelling characteristics of sand-bentonite and pumice-bentonite mixtures", Clay Minerals, 46: 49-459, 2011.

[52] Ören, A.H., Durukan, S. ve Kayalar, A.Ş., "Influence of compaction water content on the hydraulic conductivity of sand-bentonite and zeolite-bentonite mixtures", Clay Minerals, 49: 109-121, 2014.

[53] Komine, H., "Simplified evaluation on hydraulic conductivities of sand-bentonite mixture backfill", Applied Clay Science, 26: 13-19, 2004.

[54] Komine, H., "Predicting hydraulic conductivity of sand-bentonite mixture backfill before and after swelling deformation for underground disposal of radioactive wastes", Engineering Geology, 114: 123-134, 2010

[55] Tripathi, K.K. ve Viswanadham, B.V.S., "Evaluation of the permeability behaviour of sand-bentonite mixtures through laboratory tests", Indian Geotechnical Journal, 42(4): 267-277, 2012.

[56] Cho, W.J., Lee, J.O. ve Kang, C.H., "A compilation and evaluation of thermal and mechanical properties of bentonite-based buffer materials for a high-level waste repository", Journal of the Korean Nuclear Society, 34(1): 90-103, 2002.

[57] Chapuis, R.P., "The 2000 R.M. Hardy Lecture: Full-scale Hydraulic Performance of Soil-Bentonite and Compacted Clay Liners", Canadian Geotechnical Journal, 39: 417-439, 2002.

[58] Komine, H., "Simplified Evaluation for Swelling Characteristics of Bentonites", Engineering Geology, 71: 265–279, 2004.

[59] Kaoser, S., Barrington, S., Elektorowicz, M. ve Ayadat, T., "The Influence of Hydraulic Gradient and Rate of Erosion on Hydraulic Conductivity of Sand-Bentonite Mixtures", Soil and Sediment Contamination, 15: 481-496, 2006.

[60] Tashiro, S., Fujiwara, A. ve Senoo, M., "Study on the Permeability of Engineered Barriers for the Enhancement of a Radioactive Waste Repository System", Nuclear Technology, 121: 14-23, 1998.

[61] Kaya, A., Durukan, S., Ören A.H. ve Yukselen Y., "Bentonit-Zeolit Karışımlarının Mühendislik Özelliklerinin Belirlenmesi", Teknik Dergi, 17: 3879-3892, 2006.

[62] U.S. Environmental Protection Agency, "Code of Federal Regulations, Title 40, Part 258 Subtitle D, Criteria for Municipal Solid Waste Landfills", U.S. Environmental Protection Agency, New York, 2010.

[63] T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, http://www.mevzuat.adalet.gov.tr/html/20743.html, 2010.