KUM-BENTONİT KARIŞIMLARININ EMME BASINCI KAPASİTESİNE İNCE DANE İÇERİĞİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FINE CONTENT ON THE SUCTION OF SAND-BENTONITE MIXTURES

Feyza TOYĞAR[1], Yeliz YÜKSELEN AKSOY[2]

ÖZET

Birçok ülkede, yüksek seviyeli radyoaktif atıkların (HLW) bertarafında ve enerji kazıkları gibi enerji-geo yapılarının etrafında tampon/dolgu malzemesi olarak sıkıştırılmış bentonit ve kum-bentonit karışımlarının kullanılması önerilmektedir. Nükleer atık depolama alanlarında tampon malzeme olan bentonit ve kum-bentonit karışımları iç yüzeyden metalik canister ile temas halindeyken dış yüzeyden ana kaya ile temas halindedir. Bu tampon malzeme uzun yıllar sonra ana kayadan gelen su ile doygun hale gelebilir. Bu yüzden, doymamış bu zemin karışımlarının su tutma kapasitesi nükleer atık depolama alanlarının tasarımında son derece önemlidir. Bu çalışmada, bentonit dane içeriği etkisi kum-bentonit karışımlarının emme basıncı kapasitesine etkisi iki farklı emme basıncı belirleme yöntemi ile incelenmiştir. Bu yöntemlerden biri filtre kağıdı yöntemiyken diğeri ise buhar denge tekniğidir. Bu amaçla farklı bentonit içeriğine sahip (%20, %40 ve %60) kum-bentonit karışımları (KB) ve %100 bentonit kullanılmıştır. Numunelerin öncelikle Standart Proctor kompaksiyon parametreleri belirlenmiştir. Kompaksiyon parametrelerine uygun olarak maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriğinde hazırlanan numunelerin hem filtre kağıdı yöntemi hem de buhar denge tekniği ile emme basıncı değerleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre karışımların çoğunda ve uygulanan her iki deneysel yöntemde de bentonit oranının artması, zeminin mikro-gözenek hacmini ve özgül yüzey alanını artırarak su tutma kapasitesini ve matrik/toplam emmeyi belirgin şekilde yükseltmiştir. Buhar denge yöntemi (VET) ile filtre kağıdı yöntemine kıyasla çok daha yüksek emme basınçları uygulanmış ve bu durum tüm numunelerde belirgin bir kuruma (desatürasyon) ile sonuçlanmıştır. Bentonit türünün etkisi yönteme göre farklılık göstermiş; filtre kağıdı yönteminde Na-bentonitli karışımlar aynı emme seviyelerinde Ca-bentonitli karışımlara kıyasla daha yüksek su tutma kapasitesi sergilerken, buhar denge yönteminde bu durumun tersine, Ca-bentonitli karışımlar aynı emme basınçlarında çoğunlukla daha yüksek su içeriğine ve dolayısıyla daha yüksek su tutma kapasitesine sahip olmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Emme, Kum-Bentonit karışımları, Filtre kağıdı yöntemi, Buhar denge tekniği (VET), Dane içeriği.*

ABSTRACT

In many countries, the use of compacted bentonite and sand-bentonite mixtures is recommended as buffer/backfill materials in the disposal of high-level radioactive waste (HLW) and around energy-geo structures such as energy piles. In nuclear waste repositories, buffer materials such as bentonite and sand-bentonite mixtures are in contact with the metallic canister on the inner surface and with the host rock on the outer surface. This buffer material may become saturated over time due to water flow from the host rock. Therefore, the water retention capacity of these initially unsaturated soil mixtures is critical importance in the design of nuclear waste repositories. In this study, the effect of bentonite content on the suction capacity of sand-bentonite mixtures was investigated using two different suction measurement methods. One of these

[1]Prof. Dr., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, yeliz.yükselen@deu.edu.tr.
[2]Araştırma Görevlisi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, feyza.toygar@deu.edu.tr. (Sorumlu yazar) {Feyza TOYĞAR}

methods is the filter paper method, while the other is the Vapor equilibrium technique (VET). For this purpose, sand-bentonite mixtures (SB) with different bentonite contents (20%, 40%, and 60%) and 100% bentonite were used. Firstly, the Standard Proctor compaction parameters of the samples were determined. The samples, prepared at maximum dry unit weight and optimum water content in accordance with the compaction parameters, had their suction values measured using both the filter paper method and the Vapor equilibrium technique (VET). According to the results, in most of the mixtures and under both experimental methods, an increase in bentonite content enhanced the micro-pore volume and specific surface area of the soil, thereby significantly increasing its water retention capacity as well as its matric/total suction. Considerably higher suction pressures were applied via the vapor equilibrium technique (VET) compared to the filter paper method, resulting in pronounced drying (desaturation) in all specimens. The effect of bentonite type was found to vary depending on the method employed: while Na-bentonite mixtures exhibited higher water retention capacity than Ca-bentonite mixtures at equivalent suction levels under the filter paper method, the opposite trend was observed under the vapor equilibrium method, where Ca-bentonite mixtures generally displayed higher water content and consequently higher water retention capacity at equivalent suction pressures.
Keywords: *Suction, Sand-Bentonite mixtures, Filter paper method, Vapor Equilibrium Technique(VET), Fine content.*

1. GİRİŞ

Kum-bentonit karışımları ve bentonit, yüksek su tutma kapasitesi nedeniyle özellikle atık depolama tesislerindeki sızdırmazlık bariyerlerinde, nükleer atık depolama sahaları ve enerji kazıkları etrafında tampon malzeme olarak kullanılmaktadır (Sellin ve Leupin, 2013). Yüksek şişme potansiyeli, geniş özgül yüzey alanı ve düşük hidrolik iletkenliği ile ilişkilendirilen bentonit, zemin matrisinin su tutma ve sızdırmazlık performansını belirleyen ana mineralojik bileşendir (Sellin ve Leupin, 2013). Ancak %100 bentonitin yüksek büzülme-şişme davranışı ve uygulama zorlukları nedeniyle, mekanik kararlılığı artırmak ve hidrolik davranışı optimize etmek amacıyla bentonite farklı oranlarda kum ilave edilmektedir (Agus vd., 2010; Durukan vd., 2014). Bu doğrultuda, %100 bentonit ve farklı oranlarda oluşturulan kum-bentonit karışımları, bileşimlerindeki bentonit oranı ve baskın katyon türüne bağlı olarak farklı hidro-mekanik davranışlar sergilemektedir. Bentonit oranının artması, zemin matrisinin toplam özgül yüzey alanını ve matrik emme potansiyelini yükselterek her bir emme seviyesinde tutulabilen suyu belirgin şekilde artırmaktadır (He vd., 2016; Zhang vd., 2022). Diğer taraftan, bentonit bünyesindeki baskın katyon türü (sodyum veya kalsiyum) mikro-yapısal düzenlenmeyi doğrudan etkilemektedir. Tek değerlikli Na^+ iyonları içeren sodyum bentonit (Na-bentonit), geniş bir difüz çift katman (DDL) gelişimine izin vererek daha dağınık bir partikül yapısı oluşturmakta ve bu sayede tüm emme seviyelerinde daha yüksek su tutma kapasitesi sergilemektedir (Mojid ve Toride, 2001). Buna karşın, çift değerlikli Ca^{2+} iyonlarına sahip kalsiyum bentonit (Ca-bentonit), difüz çift katman (DDL) gelişiminin sınırlı kalması ve yüksek yoğunluklarda yüzey/iyon hidrasyon kuvvetlerinin baskın hale gelmesiyle ilişkilendirilmekte, bu durum kılcal menisküs kuvvetlerini ve matrik emme bileşenini ön plana çıkarmaktadır (Schanz ve Tripathy, 2009).

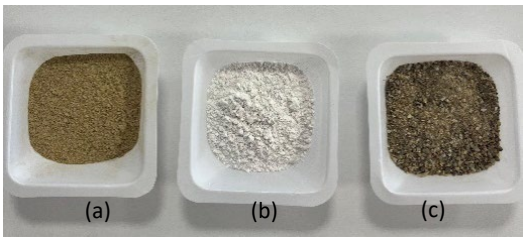
Karışım içerisindeki kum oranı arttıkça, iri dane matrisi zemin içerisindeki makro-gözeneklerin payını artırmakta ve kapiler emme kuvvetlerini zayıflatmaktadır. Aksine, bentonit oranının artması veya dane boyutunun küçülmesi, zemin içerisindeki gözenek boyutu dağılımını değiştirerek makro-gözeneklerin yerini dar ve mikro-gözeneklere bırakmaktadır (Durukan vd., 2014). Bu mikro-gözenek yapısı, yüksek matrik emme potansiyeli üretmekte ve özellikle kuru durumlarda veya uzun kuruma periyotlarında suyun zemin iskeleti tarafından adsorpsiyon ve kapiler kuvvetlerle daha sıkı tutulmasına katkıda bulunmaktadır (Delage vd., 1998; Romero vd., 2003). Dolayısıyla, %100 bentonit ve farklı

kum-bentonit karışımlarının emme bileşenlerinin (matrik ve toplam emme) belirlenmesi, zemin-su karakteristik eğrilerinin (ZSKE) doğru anlaşılması ve bariyer performansının değerlendirilmesi açısından son derece önemlidir. Bu emme bileşenlerinin belirlenmesinde, kontrollü bağıl nem koşulları altında çalışan buhar denge yöntemi (VET) yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır (Tang ve Cui, 2005; Blatz vd., 2008).

Bu çalışma, Na-bentonit ve Ca-bentonit olmak üzere iki farklı bentonit türünün farklı oranlarda (%20, %40 ve %60) hazırlanan kum-bentonit karışımlarının emme (suction) davranışını ve zemin-su karakteristik özelliklerini detaylı bir şekilde incelemeyi amaçlamaktadır. Hazırlanan numunelerin matrik ve toplam emme potansiyellerini bulmak için Buhar denge yöntemi (VET) ile filtre kağıdı yöntemi olmak üzere iki farklı deneysel metodolojiden yararlanılmıştır. Elde edilen bulgular, farklı mineraloji ve karışım oranlarına sahip bentonit bazlı bariyerlerin hidro-mekanik performanslarının değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada kum-bentonit (%20, %40 ve %60) ve %100 bentonit karışımları kullanılmıştır. Kullanılan bentonit numunelerinin ilki Na-Bentonit olup Çanbensan Ticaret Sanayi A.Ş.'den, ikincisi Ca-Bentonit özellkli olup Esan Eczacıbaşı A.Ş'den temin edilmiştir. Tüm malzemeler doğal su içerikleriyle kullanılmıştır. Na-Bentonit doğal su içeriği %8.5, likit limiti ise %304 iken Ca-Bentonit numunesinin doğal su içeriği %9.5, likit limiti ise %150'dir. Malzemelerin fiziksel görünümleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

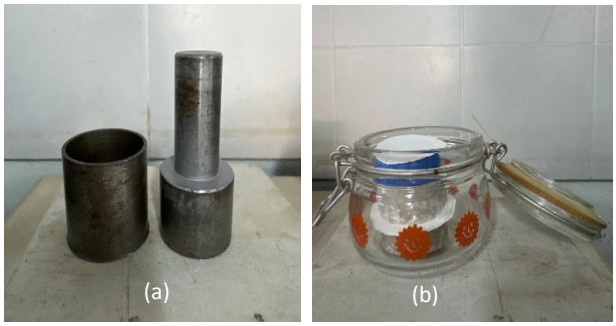


Şekil 1. Kullanılan malzemeler a) Na-bentonit b) Ca-bentonit c) kum

Tablo 1. Malzemelerin fiziksel-kimyasal özellikleri

	Ca-Bentonit	Na-Bentonit	Kum	ASTM
Özgül Ağırlık	2.55	2.78	2.62	ASTM: D854-14 (2014)
Su içeriği (%)	9.5	8.5	-	
Elek Analizi	-No 200	-No 200	-No 6	ASTM: D422-63 (2007)
Kum (%)	0	3.37	95.14	
Silt (%)	32	30.63	4.86	ASTM: D1140-00 (2007)
Kil (%)	68	66	0	
USCS zemin sınıfı	CH	CH	SP	
Likit Limit (%)	150	340	-	ASTM:D4318-17e1 (2017)
	Casagrande	Casagrande	-	
Plastik limit (%)	49	38	-	ASTM:D4318-17e1 (2017)
Plastisite İndisi (%)	101	302	-	
pH	7.66	10.54	7.38	ASTM: D4972-19 (2019)

Bu çalışma kapsamında, bentonit ve farklı oranlarda hazırlanan kum-bentonit karışımları (%20, %40 ve %60 bentonit içeriği) kullanılmıştır. Numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriğini saptamak amacıyla ASTM D698-12 standardına uygun Standart Proctor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Karışımlar önce kuru halde homojen bir yapı elde edilene kadar karıştırılmış, ardından su püskürtme yöntemiyle dört farklı su içeriğinde hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler, suyun zemin bünyesinde homojen dağılımını sağlamak amacıyla hava geçirmez plastik poşetler içerisinde 24 saat boyunca bekletilmiştir. Zemin su karakteristik eğrileri (ZSKE) ve emme basıncı ölçümleri, filtre kağıdı (ASTM D 5298) ve buhar denge yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Filtre kağıdı deneyleri için zemin örnekleri, Standart Proctor deneyiyle belirlenen maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su içeriği değerlerinde, özel tasarım sıkıştırma kalıplarında (R=3.65 cm, V=38.7 cm) sıkıştırılmıştır (Şekil 2a). Sıkıştırılan her bir numune, yaklaşık 1.85 cm yüksekliğinde iki eşit parçaya bölünmüştür. Matrik emme basıncı ölçümlerinde, zeminle tam teması sağlamak amacıyla üç adet filtre kağıdı sandviç yöntemiyle iki filtre kağıdı parçası arasına yerleştirilmiştir (ölçümler dış etkilerden korunan ortadaki filtre kağıdı üzerinden alınmıştır). Toplam emme basıncını belirlemek için ise numunenin üzerine plastik bir platform yerleştirilerek iki adet filtre kağıdının zeminle teması kesilmiş, böylece sadece buhar dengesi üzerinden ölçüm yapılması sağlanmıştır. Hazırlanan numuneler, buhar dengeyi sağlamak için vakumlu cam kavanozlara yerleştirilmiştir (Şekil 2b). Deneyler boyunca sıcaklık dalgalanmalarının emme basıncı üzerindeki etkisini minimize etmek amacıyla numuneler, sabit sıcaklık ve nem koşullarına sahip (%65 bağıl nem, oda sıcaklığı) bir inkübatör içerisinde muhafaza edilmiştir. Filtre kağıtları düzenli aralıklarla hassas terazi ile tartılmış ve emme basıncı değerlerinin tam dengeye ulaştığı teyit edildiğinde deneyler sonlandırılmıştır.



Şekil 2. Filtre kağıdı yöntemi a) Numune hazırlama aparatı b) Filtre kağıdı yöntemin deney düzeneği

Buhar denge yöntemi (VET), bağıl nemi kontrol etmek amacıyla doymuş tuz çözeltileri kullanılarak, sıkıştırılmış numunelerin ıslanma ve kuruma yollarını belirlemek üzere uygulanmıştır Sıkıştırılmış bentonit ve kum-bentonit karışımlarının emme basıncı (suction) değerleri, serbest (hapsedilmemiş) koşullar altında buhar denge yöntemi (VET) kullanılarak belirlenmiştir. Deney numuneleri, standart kompaksiyonla belirlenen optimum su içeriği ve buna karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri esas alınarak hazırlanmıştır. Numunelerin sıkıştırılması sürecinde, 3 cm çapında ve 1 cm yüksekliğinde özel tasarım halkalar kullanılmıştır. Ayrıca, deney düzeneğiyle uyumlu bir yükleme plakası ve manşon (collar) imal edilmiştir (Şekil 3a). Sıkıştırılan numuneler, imal edilen metal bir başlık yardımıyla yapısal bir hasar görmeyecek şekilde halkalardan özenle çıkarılmıştır. Hedeflenen kuru birim hacim ağırlık değerinde sıkıştırılan numuneler, ardından deney düzeneğinin bir parçası olan cam kavanozlara yerleştirilmiştir.

Deneylerde desikatör görevi görmesi amacıyla küçük (130ml hacimli) cam kavanozlar kullanılmış; bu kavanozların içerisinde toplam hacimlerinin yaklaşık yarısını dolduracak şekilde doygun tuz çözeltileri ile hazırlanmıştır. Çözeltilerin hazırlanmasında tuz kristalleri ve deiyonize (saf) su kullanılarak 2.0 cm yüksekliğinde bir tuzlu çözelti oluşturulmuştur. Kavanoz içerisine numuneye destek sağlaması amacıyla plastik bir platform yerleştirilmiştir. Numunenin hem alt hem de üst yüzeyinden nem transferine (adsorpsiyon) izin verecek şekilde modifiye edilen geniş kapaklar kullanılarak numuneler bu düzenek içerisine konumlandırılmıştır (Şekil 3b). Hazırlanan kavanozlar sızdırmazlığı sağlanacak şekilde sıkıca kapatıldıktan sonra, deney süresince çevresel koşulların sabit kalmasını garanti altına almak amacıyla hedef nem (%65) ve sıcaklık (25°C) değerlerine ayarlı bir inkübatör içerisinde muhafaza edilmiştir (Şekil 2c). Buhar fazı dengesine ulaşıldığında toplam emme basıncı değerleri kaydedilmiştir.



Şekil 3. Buhar Denge Yöntemi a) Buhar denge yöntemi deney düzeneği b) Sıkıştırılmış numune c) Numunelerin inkübatörde bekletilmesi

Her iki yöntemde de deneyler sırasında, kum-bentonit karışımlarında zamanla küf oluşumu gözlemlenmiştir. Bu sorunu gidermek amacıyla, Tong ve Shackelford'un (2016) kum-bentonit karışımları üzerine yaptığı çalışmadan esinlenilerek karışımlarda biyosit kullanılmıştır. Numune hazırlama aşamasında, biyosit çeşme suyuna hacimce %0.4 oranında karıştırılmış ve bu işlem küf sorununu etkili bir biçimde çözmüştür.

3. BULGULAR

3.1. Kompaksiyon Deneyi

Kum-bentonit karışımlarında bentonit oranı arttıkça, maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin azaldığı optimum su içeriğinin arttığı görülmüştür. Ca-Bentonit-kum karışımlarının Na-Bentonit-kum karışımlarından daha yüksek optimum su içeriğine sahipken daha düşük maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerine sahiptir (Tablo 2).

Tablo 2. Standart kompaksiyon deney sonuçları

	Karışımlar	$\gamma_{d,max}$ (kN/m^3)	w_{opt} (%)
Ca-Bentonit-Kum	20B80S	17.3	15.6
	40B60S	15.3	21.3
	60B40S	13.4	29
	100B	10.4	48
Na-Bentonit-Kum	20B80S	17.40	14.7
	40B60S	16.7	18
	60B40S	15.4	20
	100B	12.8	32

3.2. Filtre Kağıdı Deneyi

Kum-bentonit karışımlarında deneyler sonucunda; karışımlardaki bentonit içeriğinin ve numunelerin nihai su içeriğinin matrik ve toplam emme üzerinde belirleyici bir rol oynadığı görülmektedir. Ca-bentonit kum karışımlarında en yüksek matrik ve toplam emme değeri 60B40S numunesine aittir. 100B numunesinde beklenmedik bir azalış olduğu görülmüştür. Na-bentonit kum karışımlarında 20B80S en düşük toplam emme değerine sahipken, 40B60S numunesi matrik emmede bu trendin dışında kalmış, toplam emme ise özellikle 40B60S karışımından 60B40S karışımına kadar kayda değer bir artış göstermiştir. Bu artış trendi 100B karışımına kadar devam etmiş ve en büyük emme değerleri burada görülmüştür. Bentonit oranı arttıkça karışımların çoğunluğunda hem matrik hem de toplam emme basıncında artış görülmüştür (Tablo 3). Bu durum, kumun bentonit ile karıştırıldığında önemli ölçüde su tutma kapasitesine sahip hale geldiğini göstermektedir. Böylece bentonit içeriği arttıkça toplam emme potansiyeli de artmakta ve sistemin su tutma potansiyelini yükseltmektedir.

Tablo 3. Filtre kağıdı deney sonuçlar

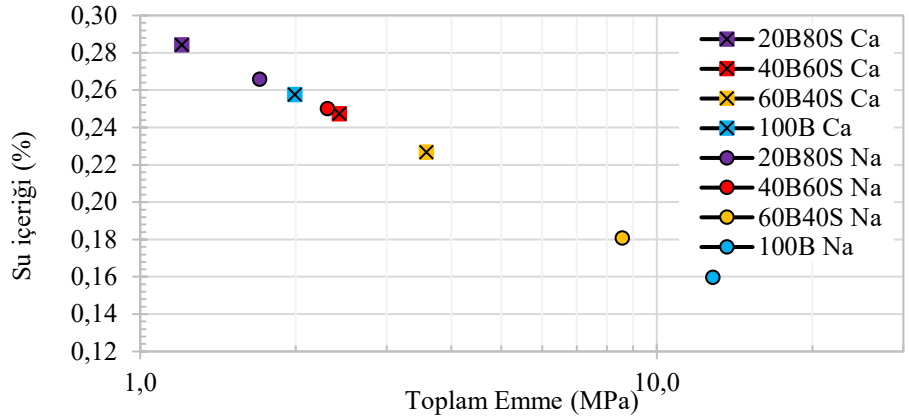
	Karışımlar	Su içeriği (%)	Matrik Emme (MPa)	Toplam Emme (MPa)
Ca-Bentonit-Kum	20B80S	0.284	0.6	1.2
	40B60S	0.247	0.8	2.4
	60B40S	0.227	2.4	3.6
	100B	0.258	1.2	2.0
Na-Bentonit-Kum	20B80S	0.266	1.0	1.7
	40B60S	0.250	0.7	2.3
	60B40S	0.181	5.7	8.6
	100B	0.160	6.0	12.8

Ca-bentonit karışımlarında (20B80S, 40B60S ve 60B40S) toplam emme değerleri artmakta ve 1.2 MPa seviyelerinden 3.6 MPa seviyelerine kadar çıkmaktadır. Zemin neredeyse tamamen kuruduğunda (ultra-kuru durum) gözeneklerdeki serbest su kaybolur. Su tutma mekanizması kapiler (kılcal) etkilerden tamamen sıyrılarak adsorpsiyon ve osmotik kuvvetlerin kontrolüne geçer. Dane yüzeylerinde kalan ince su tabakası çok yüksek bir emme potansiyeli üretir (Delage vd., 1998; Romero vd., 2003). 20B80S ve 40B60S Ca-bentonit karışımları, daha yüksek su içeriğinde (%0.284 - %0.247) ve belirgin şekilde daha düşük toplam emme (1.2 - 2.4 MPa) değerlerinde kümelenmiştir. Bu artış trendi 60B40S karışımına kadar devam ederek daha düşük su içeriğinde (%0.227) daha yüksek toplam emme (3.6 MPa) değeri ölçülmüştür. 100B Ca-bentonit karışımında ise daha yüksek su içeriğinde (%0.258) ve daha düşük toplam emme (2.0 MPa) değeri ölçülmüştür; yani artış trendine uymayıp toplam emme değerinde bir azalış meydana gelmiştir. Ca-bentonit karışımları 20B80S'den 40B60S'a geçerken toplam emme değerinde 2 kat artış olurken, daha az artışla 60B40S'a kadar devam etmiştir.

Na-bentonit karışımlarında, su içeriği azaldıkça (%0.266'dan %0.160 seviyelerine düşerken) toplam emme değerleri artmakta ve 1.7 MPa seviyelerinden 12.8 MPa seviyelerine kadar çıkmaktadır. 20B80S ve 40B60S Na-bentonit karışımları, daha yüksek su içeriğinde (%0.266 - %0.25) belirgin şekilde daha düşük toplam emme (1.7 - 2.3 MPa) değerlerinde kümelenmiştir. 60B40S ve 100B Na-bentonit karışımları da genel olarak

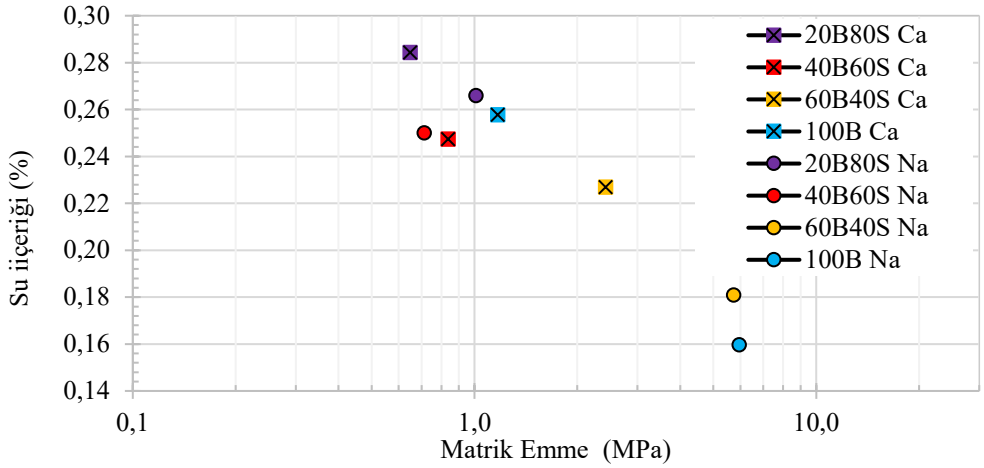
düşük su içeriklerinde (%0.181 - %0.160) ve daha yüksek toplam emme (8.6 - 12.8 MPa) bölgesinde yer almaktadır. Na-bentonit karışımları 40B60S'dan 60B40S'a geçerken en çok artış bu iki numune arasında olup yaklaşık 4 kat artış olmuştur (Şekil 4).

Na-bentonit karışımlarının, 40B60S numunesi hariç, diğer karışımları Ca-bentonit karışımlı numunelere göre daha yüksek toplam emme değerleri ürettiği görülmektedir.



Şekil 4. Toplam emme-su içeriği grafiği (Filtre kağıdı yöntemi)

Ca-bentonit karışımlarında (20B80S, 40B60S ve 60B40S), su içeriği azaldıkça (%0.284'ten %0.227 seviyelerine düşerken), matrik emme değerleri artmakta ve 0.6 MPa seviyelerinden 2.4 MPa seviyelerine kadar çıkmaktadır. 20B80S'den 60B40S karışımına kadar artış trendi devam etmiştir. 40B60S'den 60B40S'e geçerken en çok artış bu iki numune arasında olup 3 kat artış olmuştur. Na-bentonit karışımlarında 20B80S'den 100B'e kadar su içeriği (%0.266'dan %0.160 seviyelerine düşerken) azalmış olup matrik emme değerleri artmaktayken sadece 40B60S bu trende uymamıştır. Na-bentonit karışımlarının, 40B60S numunesi hariç, diğer karışımları Ca-bentonit karışımlı numunelere göre daha yüksek matrik emme değerleri ürettiği görülmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Matrik emme-su içeriği grafiği (Filtre kağıdı yöntemi)

3.3. Buhar Denge Yöntemi (VET)

Farklı kum-bentonit karışımların emme değerleri buhar denge yöntemiyle farklı doygun tuz çözeltileri (K_2SO_4, $ZnSO_4$, KCl ve NaCl) kullanılarak elde edilmiş ve Tablo 4'te

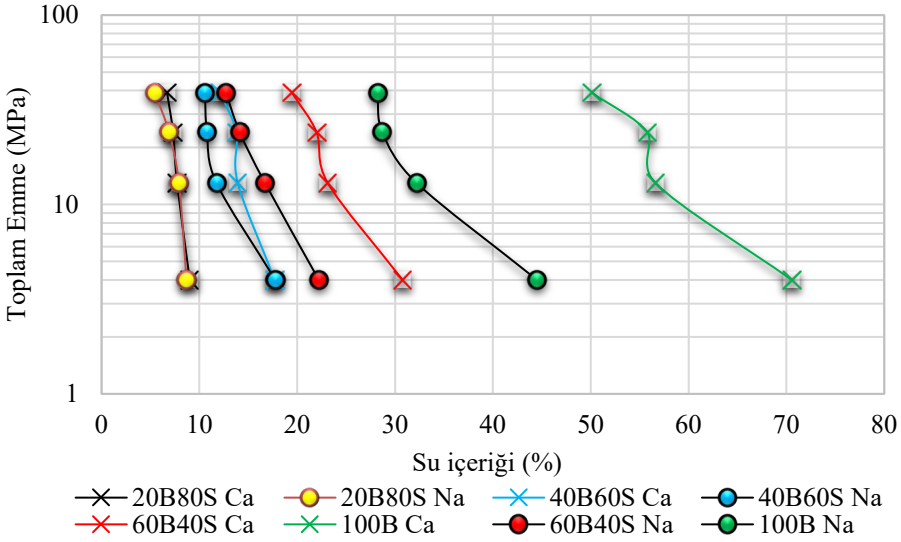
sunulmuştur. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, her iki bentonit türünde de bentonit içeriği arttıkça emme basıncı değerlerinin yükseldiği tespit edilmiştir. Tuz çözeltilerinin emme basıncı potansiyelleri ile karışımların denge durumları incelendiğinde; çözeltiler ile karışımlar arasındaki nem alışverişi sonucu denge durumuna gelindiğinde karışımların su içeriği değerlerinde bir azalma ile sonuçlandığı ve bu sürecin tüm numunelerde belirgin bir kuruma durumuna yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu durum, seçilen tüm tuz türlerinin karışımların su tutma kapasitesini aşarak numuneleri desatürasyon fazına zorladığını ortaya koymaktadır.

Tablo 4. Toplam emme-su içeriği değerleri (VET yöntemi)

Tuzlar	Toplam Emme (MPa)	Su içeriği (%)							
		Ca-bentonit				Na-bentonit			
		20B80S	40B60S	60B40S	100B	20B80S	40B60S	60B40S	100B
K_2SO_4	4	9.0	17.7	30.8	70.5	8.7	17.8	22.2	44.5
$ZnSO_4$	13	7.7	13.9	23.1	56.6	7.9	11.7	16.7	32.2
KCl	24	7.3	13.8	22.0	55.8	6.9	10.8	14.1	28.7
NaCl	39	6.7	12.1	19.5	50.1	5.4	10.6	12.7	28.2

Kullanılan dört farklı tuz çözeltisi için de tuzların toplam emme değeri arttıkça (K_2SO_4, $ZnSO_4$, KCl ve NaCl) (4 MPa'dan 39 MPa'ya), aynı numune üzerinde ölçülen su içeriği değeri düşük daha çıkmıştır. Yani kullanılan tüm tuzlar tüm numunelerde kurumaya neden olmuştur. 20B80S, 40B60S, 60B40S ve 100B karışımların hepsinde, aynı tuz örneğinde Ca-bentonitli karışımlar (x sembollü olanlar), Na-bentonit karışımlarına (daire sembollü olanlar) kıyasla daha yüksek su içeriğine sahiptir. Bu trendin dışında kalan Na-bentonitli karışımlarda $ZnSO_4$ tuzuyla yapılmış 20B80S numunesinde ve K_2SO_4 tuzuyla yapılmış 40B60S karışımı için su içeriği değeri daha yüksektir (Şekil 6).

Bentonit türünün zemin-su karakteristik özellikleri üzerindeki belirleyici etkisi, bünyesindeki baskın katyon türünün ve buna bağlı gelişen mikroyapısal mekanizmaların bir sonucudur. Tek değerli Na^+ iyonları içeren Na-bentonit, çift değerli Ca^{2+} iyonları barındıran Ca-bentonite kıyasla kil tabakaları arasında çok daha kalın bir difüz çift katmanlı (diffuse double layer, DDL) yapı oluşumuna izin vermekte, bu da daha dağınık bir partikül yapısı oluşturarak Na-bentonitli karışımların tüm emme seviyelerinde daha yüksek su tutma kapasitesi sergilemesini sağlamaktadır (Mojid ve Toride, 2001). Bununla birlikte, VET sonuçları aynı emme basınçlarında Ca-bentonitli numunelerin çoğunlukla daha yüksek su içeriğine sahip olduğunu göstermektedir; bu görünürdeki çelişki, çift değerli Ca^{2+} katyonlarının yüksek kuru yoğunluklarda difüz çift katman gelişimini sınırlaması ve yüzey/iyon hidrasyon kuvvetlerinin baskın hale gelmesiyle açıklanabilir (Schanz ve Tripathy, 2009). Bu durum, özellikle yüksek emme/düşük su içeriği (ultra-kuru) koşullarında matrik emme mekanizmasının baskın hale gelmesine ve Ca-bentonitli karışımların bu bölgede daha fazla su tutabilmesine yol açmaktadır.



Şekil 6. Toplam emme-su içeriği grafiği (VET yöntemi)

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yüksek seviyeli radyoaktif atık depolama tesisleri ve enerji-geo yapıları için tampon/dolgu malzemesi olarak önerilen Na-bentonit ve Ca-bentonit katkılı kum-bentonit karışımlarının (%20, %40, %60 ve %100 bentonit) su tutma davranışları Filtre kağıdı yöntemi ve Buhar denge yöntemi (VET) kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen temel bulgular aşağıda özetlenmiştir:

İnce dane (bentonit) içeriğinin etkisine göre, çoğunlukla tüm karışım oranlarında ve uygulanan her iki deneysel yöntemde de bentonit içeriğinin artması, zeminin mikro-gözenek hacmini ve özgül yüzey alanını artırarak su tutma kapasitesini ve matrik/toplam emme potansiyelini belirgin şekilde yükseltmiştir.

Katyon türünün (Na^+ ve Ca^{2+}) hidro-mekanik davranışa etkisine göre, Na-bentonit karışımları, tek değerlikli Na^+ katyonlarının sağladığı geniş difüz çift katman (DDL) gelişimi ve yüksek osmotik emme potansiyeli sayesinde, filtre kağıdı yöntemiyle ölçülen aynı emme seviyelerinde Ca-bentonite göre çoğunlukla daha yüksek su tutma kapasitesi göstermiştir.VET sonuçları ise, aynı emme basınçlarında Ca-bentonitli numunelerin çoğunlukla daha yüksek su içeriğine sahip olduğunu net bir şekilde göstermektedir. Ca-bentonit karışımları, çift değerlikli Ca^{2+} katyonlarının çift katman kalınlığını bastırması ve daneleri topaklaşmış bir mikroyapıya zorlaması nedeniyle, özellikle kuruma ve ultra-kuru durumlarda adsorpsiyon ve osmotik kuvvetlerin kontrolündeki toplam emmenin baskın hale geldiği tespit edilmiştir. Filtre kağıdı yöntemi, hem matrik hem de toplam emmenin geniş bir su içeriği aralığında pratik ve güvenilir bir şekilde belirlenmesini sağlamıştır. Buhar denge yöntemi (VET) ise doymuş tuz çözeltileri vasıtasıyla kontrol edilen yüksek emme seviyelerinde, özellikle emmenin ve adsorpsiyon mekanizmalarının baskın olduğu desatürasyon (kuruma) sürecinde bentonit türlerinin su tutma kapasitesi farklarını yüksek hassasiyetle ortaya koymuştur.VET yönteminde Ca-bentonitli karışımlar genelde daha yüksek su içeriği (dolayısıyla aynı emme seviyesinde daha güçlü su tutma) gösterirken, Filtre kağıdı yöntemiyle durum tersine dönüp Na-bentonitli numunelerin toplam emme değeri daha yüksek çıkmıştır. Sonuç olarak; nükleer atık depolama alanları gibi yüksek sızdırmazlık ve iyi su tutma özelliği gerektiren bariyer tasarımlarında Na-bentonit karışımlarının matrik su tutma üstünlüğü ön plana çıkarken, hacimsel kararlılığın ve

mekanik iskeletin ön planda olduğu uygulamalarda Ca-bentonit katkılı karışımların emme ve mikro-yapısal davranış özelliklerinin dikkate alınması gerektiği anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

Agus, S. S., Schanz, T., & Fredlund, D. G. (2010). Measurements of suction versus water content for bentonite-sand mixtures. Canadian Geotechnical Journal, 47, 583–594.

Blatz, J. A., Cui, Y. J., & Oldecop, L. (2008). Vapour equilibrium and osmotic technique for suction control. In Tarantino, A., Romero, E., & Cui, Y. J. (Eds.), Laboratory and field testing of unsaturated soils. Springer, Dordrecht.

Delage, P., Howat, M. D., & Cui, Y. J. (1998). The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay. Engineering Geology, 50, 117–126.

Durukan, S., Pulat, H. F., & Yukselen-Aksoy, Y. (2014). Suction characteristics of compacted zeolite-bentonite and sand–bentonite mixtures. Waste Management & Research, 32(2), 149–156.

He, Y., Ye, W. M., Chen, Y. G., Chen, B., Ye, B., & Cui, Y. J. (2016). Influence of pore fluid concentration on water retention properties of compacted GMZ01 bentonite. Applied Clay Science, 129, 131–141.

Mojid, M. A., & Toride, N. (2001). Electrical conductivity and dielectric constant of bentonite measured with time-domain reflectometry. Lowland Technology International, 3(2), 31–42.

Romero, E., Gens, A., & Lloret, A. (2003). Suction effects on a compacted clay under non-isothermal conditions. Géotechnique, 53(1), 65–81. https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.1.65

Schanz, T., & Tripathy, S. (2009). Swelling pressure of a divalent-rich bentonite: Diffuse double-layer theory revisited. Water Resources Research, 45, W00C12. https://doi.org/10.1029/2007WR006495

Seiphoori, A., Ferrari, A., & Laloui, L. (2014). Water retention behaviour and microstructural evolution of MX-80 bentonite during wetting and drying cycles. Géotechnique, 64(9), 721–734.

Sellin, P., & Leupin, O. X. (2013). The Use of Clay as an Engineered Barrier in Radioactive-Waste Management: A Review. Clays and Clay Minerals, 61, 477–498. https://doi.org/10.1346/CCMN.2013.0610601

Tang, A. M., & Cui, Y. J. (2005). Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay. Canadian Geotechnical Journal, 42(1), 287–296.

Tong S. and Schakelford C.D. Standardized Hydraulic Conductivity Testing of Compacted Sand-Bentonite Mixtures, Geotechnical Testing Journal, 39(6), 1015-1029

Zhang, Z., Cui, Y. J., Yang, J., et al. (2022). Water retention and compression behavior of MX80 bentonite pellet. Acta Geotechnica, 17, 2435–2447. https://doi.org/10.1007/s11440-021-01428-x

SEMBOL İSTESİ			
Sembol	**Açıklama**	**Sembol**	**Açıklama**
$\gamma_{d,max}$	**Maksimum kuru birim hacim ağırlık**	w_{opt}	**Optimum su içeriği**
ZSKE	**Zemin su karakteristik eğrileri**	**(VET)**	**Buhar Denge Yöntemi**