

Araştırma Makalesi

Hamzadere Barajının Geoteknik İncelemesi

Ertuğrul Ordu^{1,*} , Mustafa Yıldırım² 

¹ İnşaat Mühendisliği, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye, 59850

² İnşaat Mühendisliği, İnşaat Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 34220

¹eordu@nku.edu.tr, ²yildir@yildiz.edu.tr

Geliş: 06.12.2024

Kabul: 17.12.2024

DOI: 10.55581/ejeas.1597255

Öz. Bu çalışmada, homojen toprak dolgu tipinde tasarlanan Hamzadere Barajı'nın jeolojik özellikleri incelenmiştir. Baraj gövdesini oluşturacak dolgu malzemesinin geoteknik açıdan uygunluğu çeşitli deneylerle araştırılmıştır. Bu kapsamda malzeme alanı olarak iki yer belirlenmiştir ve zeminlerin özelliklerini belirlemek amacıyla testler yapılmıştır. Toprak dolgu barajlar, önemli mühendislik projeleri olup büyük yatırım gerektiren yapılardır. Bu tür projelerde, ön incelemelerin yapılması, hem ekonomik verimlilik hem de yapı güvenliği açısından kritik bir rol oynamaktadır. Yanlış baraj yeri seçimi ve inşaat aşamasında uygun şekilde tasarlanmayan kil çekirdekleri, birçok mühendislik sorununa yol açabilir. Bu tür problemler, inşaat sürecinde veya barajın ömrü boyunca etkili olabilecek ciddi riskler oluşturabilmektedir. Bu yüzden yapılan bu çalışmayla, dolgu baraj inşasında zemin etütlerinin önemi gösterilmek istenmiştir. Bu çalışmayla Hamzadere Barajının mühendislik jeolojisine değinilmekte, dolgu sahalarından alınan malzemeler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar anlatılmakta ve sonuçları belirtilmektedir.

Anahtar kelimeler: Baraj, Baraj göçmesi, Dolgu barajların tasarım esasları, Toprak dolgu baraj, Zemin etüdü.

Geotechnical Investigation of Hamzadere Dam

Abstract: In this study, the geological characteristics of the Hamzadere Dam, designed as a homogeneous earth fill type, were examined. The geotechnical suitability of the fill material that will form the dam body was investigated through various tests. In this context, two locations were identified as material areas, and tests were conducted to determine the properties of the soils. Earth fill dams are significant engineering projects that require substantial investment. In such projects, preliminary investigations play a critical role in both economic efficiency and structural safety. Incorrect dam site selection and improperly designed clay cores during the construction phase can lead to numerous engineering problems. These issues can pose serious risks that may affect the construction process or the lifespan of the dam. Therefore, this study aims to demonstrate the importance of soil investigations in the construction of earth fill dams. This study addresses the engineering geology of the Hamzadere Dam, describes the experimental studies conducted on materials taken from the fill sites, and presents the results.

Keywords: Dam, Dam failure, Design principles of embankment dams, Earthfill dam, Soil investigation.

1. Giriş

Barajlar, su kaynaklarının yönetimi, tarımsal sulama, içme ve kullanma suyu temini, enerji üretimi, taşkın kontrolü gibi birçok avantaj sunan önemli mühendislik yapılarıdır. Barajların güvenli, maliyet açısından etkin, çevresel açıdan uygun ve deprem dayanımı yüksek olan yapılar olarak inşa

edilmesi, kurulacak alanlarda doğal yaşamın korunmasına yönelik tasarım ilkelerine uyulması büyük önem taşımaktadır. Barajların yapımı esnasında, yerel topoğrafya, jeoloji ve meteoroloji koşullarının detaylı bir şekilde araştırılması önemlidir. Bu değerlendirmeler, zemin etütleri ile güçlendirilmelidir ve temelin uygunluğunun belirlenmesi için geoteknik ve jeofizik etütler yapılmalıdır [1, 2]. Baraj

*Sorumlu yazar

E-posta adresi: eordu@nku.edu.tr (E. Ordu)

gövdesinde tercih edilen malzemenin kalitesi ve uygunluğu, barajın uzun ömürlü olması ve performansını doğrudan etkileyen unsurlar arasında bulunmaktadır [3, 4].

Baraj mühendisliği, modern altyapı projelerinin en önemli ve dikkatli çalışma alanlarından birini temsil etmektedir. Barajların güvenli, sürdürülebilir ve çevreye duyarlı bir şekilde inşa edilmesi, ulusal su yönetimi stratejilerinin önemli bir parçasını oluşturur. Bu çerçevede, zemin mekaniği ve geoteknik özelliklerin kapsamlı incelenmesi, barajın etkinliği ve emniyeti açısından kritik bir faktördür [5, 6].

Toprak dolgu barajları, dünya genelinde en yaygın baraj türlerinden biridir ve Türkiye'de de barajların %71'ini oluşturmaktadır [7]. Bu barajların güvenli bir şekilde inşa edilmesi, zemin özelliklerinin doğru bir şekilde analiz edilmesi ile mümkün olmaktadır. Zemin etütleri, barajların stabilitesini ve performansını etkileyen en kritik unsurlardandır [8, 9]. Dolayısıyla, zemin özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi, barajların güvenli inşası için temel bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

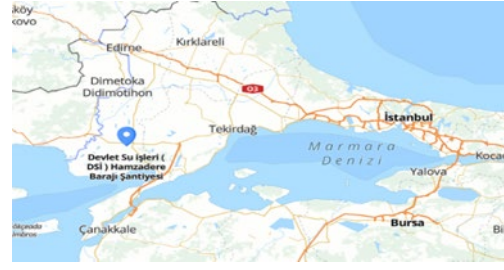
Baraj güvenliği açısından kritik risk faktörleri detaylı olarak incelendiğinde, yapısal bütünlüğü tehdit eden unsurlar net bir şekilde görülmektedir. Uluslararası Büyük Barajlar Komisyonu (ICOLD) tarafından 1973 yılında yayımlanan bir rapora göre, baraj yıkılmalarının %38'i dolusavak kapasitesinin yetersizliği nedeniyle suyun barajı aşması veya aşırı yağışlardan kaynaklanan su baskınları sonucu gerçekleşmektedir [10]. Yıkılan barajların %33'ü ise borulama veya sızmalar nedeniyle yıkılmaktadır [11, 12]. Diğer yandan, yıkılmaların %23'lük kısmı temel problemleri, heyelanlar, şev kaymaları ve deprem gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır [13-16].

Tarihsel örnekler, geoteknik parametrelerin önemini açıkça ortaya koymaktadır. 71 metre yüksekliğindeki Gouhou Barajı içsel erozyon nedeniyle çökmüş, 93 metre yüksekliğindeki Teton Barajı ise borulama sonucu yıkılmıştır. Bu vakalar, sadece Teton Barajı örneğinde bile 200'den fazla aileyi etkilemiş ve maddi zararları 400 milyon ile 1 milyar dolar arasında değişen sonuçlar doğurmuştur [17]. Bu olaylar, barajların güvenliğini sağlamak için gerekli olan geoteknik incelemelerin önemini bir kez daha gözler önüne sermektedir [18-20].

Modern baraj mühendisliği, zeminin detaylı geoteknik karakterizasyonunu gerektirmektedir. Bu süreç;

- Topoğrafik analizler
- Jeolojik etütler
- Meteorolojik değerlendirmeler
- Sismik risk incelemeleri
- Malzeme özellikleri testlerini kapsamaktadır [21].

Hamzadere Barajı, Edirne İli İpsala İlçesi'nin 29 km güneyinde, Koyuntepe Köyü'nün doğusunda yer almaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. İnceleme alanının haritası

İnceleme alanı, mevcut litolojik koşullardan kaynaklanan az engebeli bir topografyada konumlanmakta ve çevresindeki dağlar ile birlikte doğal bir koruma sağlamaktadır [22]. Bölgenin jeolojik yapısı, Kırklareli kireçtaşı, Korudağ Keşan, Yenimuhacir, Danişmen formasyonları ve Hisarlıdağ volkanitleri ile karakterize edilmektedir. Üst katmanlarda alüvyon birikimi gözlenmektedir [23]. Bu jeolojik çeşitlilik, baraj inşaat sürecinde detaylı zemin etütlerini zorunlu kılmaktadır. Hamzadere Barajı, 47.7 metre gövde yüksekliği ve 210 milyon m³ su depolama hacmi ile 273.350 dekar tarım arazisini sulayarak bölgesel tarımsal üretkenliği arttırmaktadır [24-25].

Baraj gövdesinde kullanılan dolgu malzemelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi, hem yapının stabilitesi hem de uzun dönemli performansı açısından kritik bir öneme sahiptir. Hamzadere Barajı'nın geoteknik özellikleri ve malzeme analizi, bu çalışmanın temel odak noktası olacaktır. Bu bağlamda, laboratuvar çalışmaları ve yerinde incelemelerle baraj temeli ve dolgu malzemelerinin uygunluğu değerlendirilmiştir. Çalışma, Hamzadere Barajı'nın geoteknik performansına katkı sağlamak amacıyla yapılan kapsamlı bir araştırmayı sunmaktadır.

2. Materyal ve Metot

Hamzadere barajı gövdesinde kullanılan dolgu malzemelerinin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla laboratuvarda deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu doğrultuda dane çapı dağılımı, kıvam limitleri, özgül ağırlık, permeabilite, geçirimsizlik, kompaksiyon, kayma mukavemeti, serbest basınç, sıkışabilirlik, şişme parametreleri testleri yapılmıştır.

Dane çapı dağılımı, zeminler hakkında genel bir değerlendirme yapmayı sağlar. Bu dağılım, zeminlerin su geçirgenliği, sıkışabilirliği, dayanıklılığı gibi çeşitli özelliklerinin belirlenmesinde yardımcı olur. Dolgu malzemelerinin dane çapları açısından sınıflandırılması için ilk aşamada 200 numaralı elekten ıslak eleme işlemi uygulanmıştır. Elek üzerinde kalan malzeme, kurutulup elenerek daneler birbirinden ayrılmıştır. 200 numaralı elekten geçen parçacıklar ise, süspansiyon haline getirilerek hidrometre deneyi yapılmıştır. İnce taneli zeminlerdeki su içeriği, zeminin mühendislik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Özellikle killi zeminlerde su miktarı artırılarak, zeminin kıvamı katıdan akışkan bir hale getirilebilir. Kohezyonlu zeminlerde, suyun artışı ile birlikte, tanecikler arasındaki bağlar zayıflar ve bu durum zeminin sıvı gibi davranma eğilimini artırır. Bu değişim, zeminin mukavemet, sıkışma ve yük altında deformasyon gibi mühendislik özelliklerinde önemli değişikliklere yol açabilir [26]. Killerin

kıvamında su muhtevasına bağlı olarak meydana gelen değişimleri deneysel olarak belirleyebilmek için kıvam limitleri tanımlanmıştır [27]. Kıvam limitleri, ince daneli zeminlerin değişik su muhtevalarındaki mukavemetlerinin bir göstergesidir [28]. Zeminlerin doğal su içeriği ile kıvam limitlerinin karşılaştırılması, zeminlerin gerilme geçmişi hakkında fikir verir. Eğer bir zeminin doğal su içeriği plastik limit (PL) seviyelerine yakınsa, bu, zemin için aşırı konsolide olduğunu gösterir. Öte yandan, likit limit (LL) değerine yakın bir su içeriği ise zemin için normal konsolide bir durumun göstergesidir [29]. Kıvam limitleri, zeminlerin plastisite düzeylerine göre sınıflandırılmasına olanak tanır. Ayrıca, bu limitler zeminlerin su geçirgenlik özelliklerini, çeşitli inşaat uygulamaları için uygunluklarını, yük altındaki sıkışma ve şişme potansiyellerini değerlendirmek için önemli ön bilgiler sunar [30].

Permeabilite, kohezyonlu zeminlerde sızma, oturma ve stabilite gibi önemli zemin mühendisliği problemleriyle doğrudan ilişkilidir ve zeminin temel parametrelerinden biridir. Özellikle dolgu barajlarında iç kısımlardan veya temellerden sızan sular, yapıdaki çökmeler, konsolidasyon sonrası dolgularda meydana gelen mukavemet artışları gibi pek çok sorunda permeabilite kritik bir rol oynamaktadır [31]. Baraj dolgusunda kullanılacak malzemeler kohezyonlu zemin olduklarından laboratuvarında bunların permeabilite katsayılarının bulunmasında, düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılmıştır.

Zeminler, genellikle İnşaat Mühendisliği açısından doğrudan kullanım için uygun olmayabilir. Bu nedenle, temel zemini veya baraj gibi yapılarda dolgu malzemesi olarak kullanılacak zeminlerin özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir [32]. Bu amaçla, zeminlerin mühendislik özelliklerini iyileştirmek için kullanılan yöntemlerden biri de kompaksiyondur. Kompaksiyon, zemindeki tanelerin birbirlerine yaklaşmasını sağlayarak, aralarındaki boşlukların azalmasına yol açan bir işlemdir. Dolgu malzemelerinin kompaksiyonu için gerekli optimum su muhtevaları Standart Proktor Deneyi ile bulunmuştur.

Zeminlerin kayma direncini ölçmek amacıyla yapılan kesme kutusu deneyinde, numune üzerine belirli bir normal gerilme uygulanır. Bu sayede, zemin kesilmeden önce konsolide olabilmekte ve kesme işlemi sırasında normal gerilmeler kontrol altında tutulabilmektedir. Optimum su muhtevalarının %2 ıslak tarafında Standart Proktor aletiyle 3 tabaka halinde

sıkıştırılarak hazırlanan deney malzemelerinde kesme kutusu deneyi yapılmıştır.

Serbest basınç deneyinde dolgu malzemelerinden Standart Proktor kalıbında üç tabaka halinde optimum, optimumun %2 ıslak ve %2 kuru tarafında 2 tekrarlı olarak hazırlanmış numuneler üzerinde yapılmıştır. Hazırlanan numuneler, biri sabit diğeri düşey yönde hareket ettirilebilen iki plaka arasına yerleştirilerek aksel yönde düşey olarak yüklemeye tabi tutulmuştur. Drenaj koşullarının çok iyi kontrol edilebilme olanağı bulunan ve en çok kullanılan bir laboratuvar deneyi olan Üç eksensli basınç deneyi de yapılmıştır.

Hamzadere Dolgu barajının inşasında dolgu malzemesi olarak kullanılan zeminlerin değişik su muhtevaları ve farklı basınçların sonrasında meydana gelecek oturmaların incelenmesi ve inşaatın çeşitli aşamalarında ne kadar oturma yapacaklarının saptanması amacıyla standart ödometre (bir boyutlu konsolidasyon) deneyleri yapılmıştır. Bu deneyde numuneler optimum su muhtevasının %2 kuru tarafında, optimum su muhtevasında ve optimum su muhtevasının %2 ıslak tarafında Standart Proktor kabında sıkıştırılarak hazırlanmıştır.

Baraj gölünde su birikmeye başladıktan sonra, baraj gövdesinin altında bulunan, suya doymun olmayan yüksek plastisiteli siltli ve killi zeminler zamanla suya doymun hale gelir. Bu zeminler, su içeriğinin artmasıyla hacimsel olarak genişler ve buna bağlı olarak şişme basınçları oluşabilir. Baraj dolgusu bu tür zeminler üzerine inşa edildiğinde, dolgu altındaki bazı bölgeler kilin şişme özelliklerinden ötürü büyük kaldırma kuvvetlerine maruz kalabilir. Su etkisiyle oluşan şişme ve kabarmalar, baraj gölünden suyun kaçmasına yol açabilir. Ayrıca, farklı etmenlerin birleşmesiyle bazı dolgu barajlar işlevsiz hale gelebilir ya da ciddi hasarlara yol açarak yıkılabilir [31].

3. Bulgular

Dolgu malzemelerinin endeks özellikleri, standart laboratuvar deney sonuçlarına bağlı olarak Tablo 1'de verilmektedir. Dolgu malzemeleri ince daneli zeminlerden oluşmakta ve plastisite abağında A hattı üzerine rastlamaktadır. A dolgu malzemesi düşük plastisiteli inorganik ve killi siltler (ML), B dolgu malzemesi yüksek plastisiteli inorganik ve killi siltler (CH) grubu zeminlerden oluşmaktadır.

Tablo 1 Dolgu Malzemelerinin Endeks Özellikleri

Malzeme	Çakıl (%)	Kum (%)	Silt (%)	Kil (%)	Plastisite İndisi (%)	Rötre Limiti (%)	Lineer Rötre	Özgül Ağırlık (%)	Zemin Tanımlaması
A		15	67,20	8,90	17,2	17,1	14,68	2,59	ML
B		30	58,33	11,7	32	10,5	15,04	2,68	CH

Permeabilite değerleri A malzemesinde 3.67×10^{-7} cm/sn, B malzemesinde 3.76×10^{-8} cm/sn olduğu elde edilmiştir.

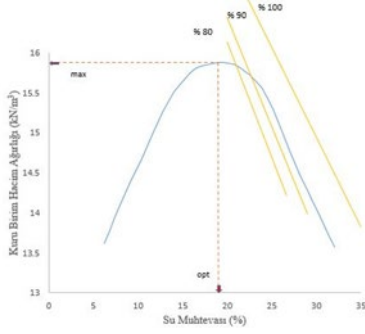
Kompaksiyon deney sonuçları A malzemesi için Şekil 2'de verilmiştir. Zeminlerdeki boşlukların hangi oranda su ile dolu olduklarını yansıtan, kayma direnci ve sıkışabilirlik gibi

önemli zemin özelliklerine etkiyen doymunluk derecelerinin bilinmesi, zemin özelliklerinin değerlendirilmesinde büyük faydalar sağlamaktadır. Doymunluk eğrileri, sıkışma eğrilerinin tepe noktalarında doymunluk durumunun öğrenilmesine yardımcı olmaktadır. Şekil 2'de aynı zamanda

bu dolgu malzemeleri suya doygunluk eğrileri de gösterilmektedir. Her iki malzeme için kompaksiyon deney sonuçları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2 Kompaksiyon Deney Sonuçları

Malzeme	Max kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³)	Optimum su muhtevası (%)
A	15,85	19,20
B	15,27	20,50

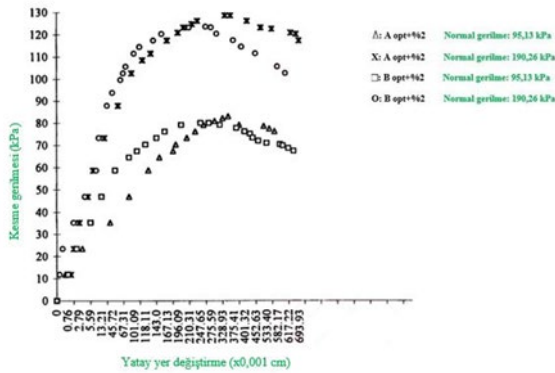


Şekil 2. A Malzemesi kompaksiyon deney sonuçları

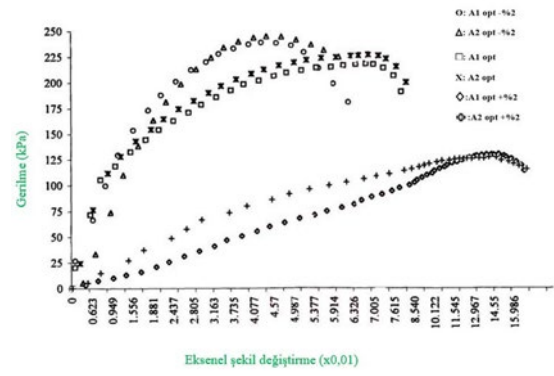
Kesme kutusu deneyi sonucunda Tablo 3’de verilen kayma mukavemeti parametreleri bulunmuştur. Kesme kuvveti ile meydana gelen yatay ve düşey yer değiştirmeler deformasyon saatlerinden ölçülerek kesme kuvvetinin yatay yer değiştirmelere göre değişimleri ve yatay yer değiştirmeler ve hacim değişimleri arasındaki ilişkiler Şekil 3 ve 4’de gösterilmiştir.

Tablo 3 Kayma Mukavemeti Değerleri

Malzeme	Kohezyon (c _{cu} , kPa)	İçsel Sürtünme Açısı (φ _{cu} , °)
A- ω _{opt} + %2	38,2	30
B- ω _{opt} + %2	37,2	28,7



Şekil 3. Dolgu malzemelerinin kesme gerilme ve yatay yer değiştirmeleri

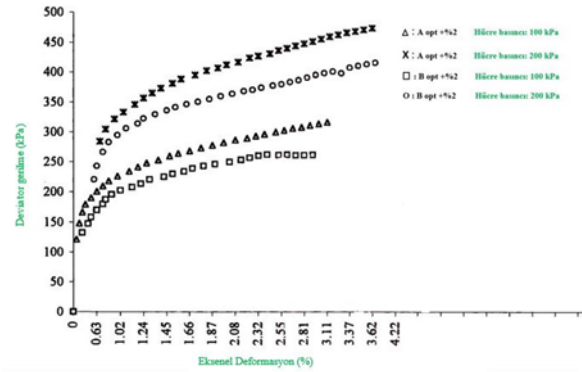


Şekil 4. Dolgu malzemelerin düşey ve yatay yer değiştirmeleri

Serbest basınç deneyi sonucunda, eksenel yük artışları altında meydana gelen boy kısılmaları ölçülüp gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir (Şekil 5). Eğrilerden elde edilen en büyük kayma direnci değerleri dolgu malzemelerin serbest basınç dirençleri olarak Tablo 4’de verilmektedir.

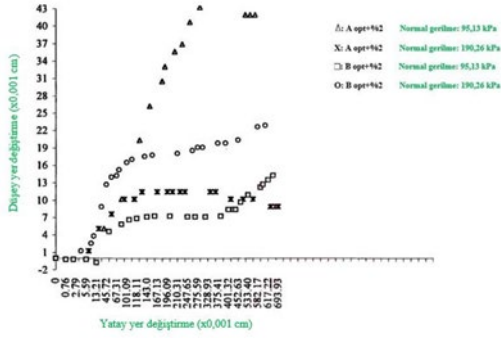
Tablo 4 Dolgu Malzemelerin Serbest Basınç Dirençleri

Malzeme	Serbest Basınç Direnci (q _{cu} , kPa)
A- ω _{opt} - %2	241,47
A- ω _{opt}	222,19
A- ω _{opt} + %2	128,00
B- ω _{opt} - %2	225,38
B- ω _{opt}	186,77
B- ω _{opt} + %2	154,44



Şekil 5. A Malzemesi serbest basınç deney sonuçları

Üç eksenli basınç deneyleri sonucunda belirlenen dolgu malzemelerinin kayma mukavemeti parametreleri Tablo 5’de verilmiştir. Şekil 6’da numunelerin deviator gerilme ile eksenel şekil değiştirmesi arasındaki ilişki gösterilmiştir.

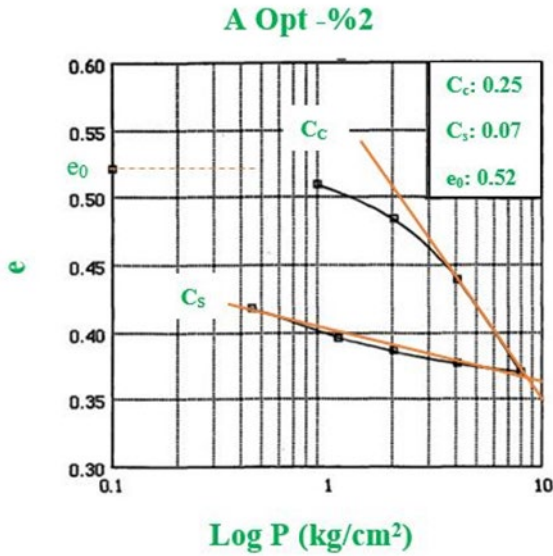


Şekil 6. Dolgu malzemelerin üç eksenlide aksenal deformasyon-deviator gerilme ilişkisi

Tablo 5 Üç Eksenli Basınç Deneyinden Bulunan Kayma Mukavemeti Değerleri

Malzeme	Kohezyon (c_{cu} , kPa)	İçsel Sürtünme Açısı (ϕ_{cu} , °)
A-wopt +%2	49,02	30
B-wopt +%2	38,46	28

Toplam 6 adet ödometre deneyinden elde edilen veriler değerlendirilerek belirlenen konsolidasyon deney sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Bu değerlere bağlı olarak konsolidasyon oturmasının hesaplanması açısından büyük önem taşıyan e-log P eğrileri çizilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. Optimum su muhtevasının %2 kuru tarafında sıkıştırılmış dolgu malzemelerin e-Log P eğrileri

Dolgu malzemelerinin şişme basınçlarını ve serbest şişmelerini elde etmek için tek eksenli konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Optimum su muhtevasında (A ve B malzemeleri), optimum su muhtevasının kuru tarafında (B malzemesi) ve optimum su muhtevasının ıslak tarafında (B malzemesi) hazırlanan numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6 Hamzadere Barajı Dolgu Malzemelerinin Konsolidasyon Özellikleri

Malzeme	Şişme Parametreleri		Sıkışma İndisi (C_c)	Şişme İndisi (C_s)	Başlangıç Boşluk Oranı (e_0)
	Serbest Şişme (%)	Şişme Basıncı (kN/m^2)			
A-wopt - %2			0,25	0,07	0,52
A-wopt		77,87	0,09	0,07	0,47
A-wopt +%2			0,15	0,07	0,61
B-wopt - %2	1,92		0,19	0,10	0,64
B-wopt	1,20	80,91	0,20	0,09	0,58
B-wopt +%2	0,21		0,25	0,10	0,72

4. Sonuçlar

Bu çalışma, Hamzadere Barajı gövde dolgusunda kullanılacak zemin malzemelerinin geoteknik özelliklerini inceleyerek, dolgu barajı projelerinde zemin etütlerinin önemini vurgulamayı amaçlamaktadır. A ve B malzeme sahalarından alınan örselenmiş numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

A dolgu malzemesi, yaygın, üniformluk katsayısı (C_u) 10.56 ve derecelenme katsayısı (C_c) 0.82 ile daha ince taneli ve düşük plastisiteli bir yapı sergilemektedir. Bu malzeme, Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sisteminde düşük plastisiteli inorganik siltler ve killi siltler (ML) grubuna girmektedir. Öte yandan, B dolgu malzemesi, yaygın, üniformluk katsayısı (C_u) 90 ve derecelenme katsayısı (C_c) 3.025 ile yüksek plastisiteli bir yapı göstermekte olup, yüksek plastisiteli inorganik siltler ve killi siltler (CH) grubuna dahil edilmektedir. A malzemesi %8.9, B malzemesi ise %11.67 oranında 200 numaralı elek altından oluşmaktadır.

Casagrande ve Konik Penetrometre yöntemleri ile elde edilen likit limit değerleri benzer sonuçlar vermekte, ancak Casagrande aleti ile bulunan değerler A malzemesi için %1.03 ve B malzemesi için %1.72 daha büyük çıkmaktadır. Kompaksiyon deneyleri sonucunda, A malzemesinin optimum su muhtevasına karşılık gelen doygunluk derecesi %82.5, B malzemesinin ise %80 olarak belirlenmiştir. Her iki malzemenin kompaksiyon eğrisi %100 doygunluk eğrisini kesmemekte, bu da dolgu malzemelerinin sıkıştırılması sırasında boşluklardaki su ve hava karışımının tamamen dışarı atılmasının mümkün olmadığını göstermektedir.

Optimum su muhtevalarında sıkıştırılan malzemelerin geçirgenlikleri üzerinde yapılan deneylerde, A malzemesinde 3.67×10^{-7} cm/sn, B malzemesinde ise 3.76×10^{-8} cm/sn olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, A malzemesinin geçirimsizliğinin çok düşük, B malzemesinin ise pratik olarak geçirimsiz olduğunu ortaya koymaktadır. Permeabilite katsayılarının dikkate alınmasıyla, A malzemesinin mansap, B malzemesinin ise memba kısmına yerleştirilmesi, baraj gövde dolgusunun düşük permeabilite değerine sahip olmasını sağlayacaktır.

Serbest basınç deneyleri, sıkıştırma su muhtevasının optimum, optimumun ıslak ve kuru tarafında uygulandığında, malzemelerin su muhtevaları arttıkça serbest basınç

mukavemet değerlerinin azaldığını ve eksenel şekil değiştirmenin arttığını göstermektedir. Kompaksiyon eğrilerinin kuru tarafında sıkıştırılan numuneler, ıslak tarafta sıkıştırılanlardan daha yüksek drenajsız kayma mukavemeti değerlerine sahip olmaktadır. Bu durum, malzemelerin serbest basınç mukavemetlerinin kompaksiyon su muhtevaları ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Üç eksenli deneyler sonucunda, her iki numunede göçme meydana geldikten sonra bile uygulanan yükü taşımaya devam ettikleri ve eğrilerin biçimlerinin birbirlerinden farklı olduğu gözlemlenmiştir. A malzemesinin kırılma anındaki kayma mukavemeti parametre değerleri, B malzemesine göre daha yüksek bulunmuştur. Bu durum, A malzemesinin daha sağlam ve sert bir yapı kazanmasından kaynaklanmaktadır. Malzemelerin içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri de bu bulguları desteklemektedir.

Kesme deneyleri, her iki malzemede yük artışı ile orantılı olarak kesme kuvveti değerlerinin arttığını göstermektedir. Yük arttıkça, numuneler düşey yönde daha iyi yerleşmekte ve dolayısıyla kesme kuvvetlerine karşı gösterilen dirençleri artmaktadır. Malzemelerin kesme gerilmeleri ile eksenel yer değişimleri arasındaki ilişkiler benzeşim göstermekte, ancak kırılma anındaki kayma gerilmeleri A malzemesinde B malzemesine göre daha yüksek çıkmaktadır. Bu durum, dolgu malzemelerinin iç yapısına ve minerolojik özelliklerine bağlı olarak açıklanabilir.

Konsolidasyon deneyleri sonucunda, A malzemesinde en büyük oturma, optimum su muhtevalarının %2 kuru tarafında sıkıştırılmış numunede %0.025 iken, optimum su muhtevalarında ve %2 ıslak tarafında hazırlanan numunelerde %0.001 civarındadır. B malzemesinde ise en büyük oturma, optimum %2 ıslak tarafında sıkıştırılmış numunede %0.03, optimumda %0.02 ve %2 kuru tarafında %0.01 civarındadır. Konsolidasyon süresine ilişkin düşey konsolidasyon katsayıları (C_v), A malzemesinde 0.005-0.053 cm²/dak aralığında, B malzemesinde ise 0.002-0.194 cm²/dak arasında değişmektedir.

Her iki malzeme için optimum su muhtevalarının %2 ıslak tarafında sıkıştırılmış numunelerdeki boşluk oranı (e) değerleri, optimum su muhtevalarında sıkıştırılmış numunelerdeki boşluk oranı değerlerinden belirgin şekilde yüksektir. A malzemesi numunelerinin konsolidasyonunu tamamlama süresi yaklaşık 1440 dakika iken, B malzemesi numunelerinde bu süre 1500 ile 3100 dakika arasında değişmektedir. Bu durum, B malzemesinin düşük geçirgenliği ve yüksek plastisiteli yapısından kaynaklanmaktadır. Konsolidasyon deneyleri, A ve B malzemelerinin farklı sıkışma ve oturma karakteristiklerine sahip olduğunu göstermiştir. A malzemesi daha hızlı konsolidasyon süreci sergilerken, B malzemesi daha yavaş ve uzun süreli konsolidasyon davranışı göstermiştir.

Sonuç olarak, Hamzadere Barajı'nda kullanılacak dolgu malzemelerinin ıslanma ile çökebilirden türden olmadığı, A malzemesinin optimum su muhtevalarının %2 kuru tarafında hazırlanan numunesinde gerilme seviyesinin 0.90 kg/cm² altında, B malzemesinin ise 2 kg/cm²'den daha az olması durumunda şişme olayına yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu

bulgular, barajın güvenli ve dayanıklı bir şekilde inşa edilmesi için gerekli olan geoteknik bilgileri sağlamakta olup Hamzadere Barajı gövdesinde kullanılacak malzemelerin mühendislik davranışlarının dolgu tasarımında dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Şişme potansiyeli analizleri, her iki malzemenin de belirli gerilme koşulları altında şişme eğilimi gösterebileceğini ortaya koymuştur. Bu durum, dolgu malzemelerinin seçimi ve yerleştirilmesinde dikkat edilmesi gereken önemli bir parametre olarak değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, çalışma kapsamında incelenen A ve B dolgu malzemeleri, Hamzadere Barajı'nın inşaatında kullanılabilir nitelikte bulunmuştur. Ancak, her bir malzemenin kendine özgü mekanik ve hidrolik özellikleri dikkate alınarak, barajın memba ve mansap kısımlarına yerleştirilmesinde optimize bir yaklaşım benimsenmelidir. Özellikle B malzemesinin düşük geçirgenliği ve A malzemesinin mekanik dayanımı, dolgu tasarımında stratejik olarak değerlendirilmelidir.

Yazar Katkısı

Veri iyileştirme - (EO, MY); Biçimsel analiz - (EO, MY); Araştırma - (EO, MY); Deneysel performans - (EO, MY); Veri toplama - (EO, MY); Veri işleme - (EO, MY); Literatür taraması - (EO, MY); Yazan - (EO, MY); İnceleme ve düzenleme - (EO, MY).

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, bu makalenin araştırılması, yazarlığı ve/veya yayınlanması ile ilgili olarak herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemiştir.

Kaynaklar

- [1] Srivastava, H., Tiwari, R.P., Kumar, V., & Singh, D. (2021). A review on various geotechnical and geophysical investigations for a dam rehabilitation project. In Indian Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Conference (pp. 83-93). Springer Nature, Singapore.
- [2] Tabwassah, C.A., & Obiefuna, G.I. (2012). Geophysical and geotechnical investigation of Cham failed dam project, NE Nigeria. Research Journal of Recent Sciences.
- [3] Wang, G. (2017). Recent advances in geotechnical engineering of dams and embankments. In Proceedings of the 19th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Seoul.
- [4] Flores-Berrones, R., & López-Acosta, N. P. (2019). Geotechnical engineering applied on earth and rock-fill dams. In Hydraulic Structures-Theory and Applications.
- [5] Talukdar, P., & Dey, A. (2019). Hydraulic failures of earthen dams and embankments. Innovative Infrastructure Solutions, 4, 1-20.
- [6] Yardımcı, E., Toprak dolgu barajların tasarım esasları–Boğazköy barajı örneği, (2019), Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- [7] Çalamak, M., Arıcı Y., & Yanmaz A.M. (2013). Türkiye’de baraj mühendisliğinin gelişimi üzerine bir değerlendirme. 3rd Hydraulic Structures Symposium. Ankara.
- [8] Belazouz, L., Bouzelha, K., Hammoum, H., Amiri, O., & Khelil, N. (2024). Reliability analysis of the slope stability of omogeneous earth dam under seismic loading. Periodica

Polytechnica Civil Engineering, 68(1), 107-121.

[9] Chaudhary, N., & Venkatesh, K. (2024). Slope stability analysis of earthen dam under seismic loading. *National Academy Science Letters*, 1-5.

[10] Bozkuş, Z. (2004). Afet yönetimi için baraj yıkılma analizleri. *Teknik Dergi*, 74, 3335-3350.

[11] Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Laue, J., & Knutsson, S. (2020). Dam safety: general considerations. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 10(6), 1-21.

[12] Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Laue, J., & Knutsson, S. (2020). Dam safety and earthquakes. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 10(6), 79-132.

[13] Imbrogno, D. F. Analysis of dam failures and development of a dam safety evaluation program, (2014), Master's thesis, The Ohio State University.

[14] Zhang, L. M., Xu, Y., & Jia, J. S. (2009). Analysis of earth dam failures: A database approach. *Georisk*, 3(3), 184-189.

[15] Ellingwood, B., Corotis, R. B., Boland, J., & Jones, N. P. (1993). Assessing cost of dam failure. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 119(1), 64-82.

[16] Warren, A. L. (2011). Investigation of dam incidents and failures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Forensic Engineering*, 164(1), 33-41.

[17] Teton Dam Failure Review Group (US). (1977). Failure of Teton Dam: a report of findings. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering and Research Center.

[18] Sivapriya, S. V., & Anne Sherin, A. (2022). Causes and consequences of dam failures—case study. In *Sustainable Practices and Innovations in Civil Engineering: Select Proceedings of Spice 2021*, 155-159.

[19] Jiang, X., Wei, Y., Wu, L., & Lei, Y. (2018). Experimental investigation of failure modes and breaching characteristics of natural dams. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1), 33-48.

[20] Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian*

Geotechnical Journal, 37(5), 1000-1024.

[21] Collin, J. G., Leshchinsky, D., Hung, C. J., & Brinckerhoff, P. (2005). Soil slope and embankment design reference manual. National Highway Institute (US).

[22] Edil, T. B., & Berilgen, M. M. (2009). Construction of earth dams on soft ground: Principles and Examples. In *Advances in Ground Improvement: Research to Practice in the United States and China*, 298-307.

[23] Ozaydın, K., Berilgen, M., Kilic, H., & Edil, T. (2007). Hamzadere Dam Foundation Improvement, Rept. to State Waterworks Directorate XI. District, Edirne, Turkey.

[24] Çebi, U., Özer, S., Öztürk, O., Özcan, C., Tok, E., Şengörür, B., & Ahi, Y. (2019). Edirne ili barajlarının bazı fiziko-kimyasal özellikleri ve sulama suyu kalite sınıfları. *Toprak Su Dergisi*, 8(2), 96-106.

[25] Ordu, E., Hamzadere-Koyuntepe Barajının mühendislik jeolojisi ve geoteknik incelemesi, (1996), Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

[26] Bowles, J.E. (1978). Engineering properties of soil and their measurement. 2nd Ed, McGraw-Hill Book Co., New York.

[27] Casagrande, A. (1948). Classification and identification of Soils. *Trans. ASCE*, 113, 901-932.

[28] Wasti, Y., Özkan, Y. & Yüksel, S. (1994). Laboratuvar koni penetrometre deneyleri ile drenajsız kayma dayanımı tayini. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 5. Ulusal Kongresi*, ODTÜ, Ankara.

[29] Wroht, C.P., & Wood, D.M. (1978). The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15, 137-145.

[30] Bentley, P.S. (1991). Correlations of soil properties. Pentech Press, London, UK.

[31] Floyd, R. (1987). Design of small dams. U.S. Bureau of Reclamation, Denver.

[32] Özaydın, K. (1989). Zemin mekaniği ders kitabı. Medya Matbaacılık ve Yayıncılık, İstanbul.