

İNCE DANELİ ZEMİNLERDE DİSPERSİF EROZYON DİRENCİNİN GELİŞTİRİLEN YENİ TEST EKİPMANIYLA BELİRLENMESİ

DETERMINATION OF DISPERSIVE EROSION RESISTANCE IN FINE-GRAINED SOILS WITH NEWLY DEVELOPED TEST EQUIPMENT

Sadettin TOPÇU¹, Hasan TOSUN²

ÖZET

Dispersif zeminler, suya istinat eden toprak yapıları ve korumasız şev yüzeylerine erozyon hassasiyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle büyük zarar vermektedirler. İnce daneli zeminlerde dispersibilite arttıkça erozyon direnci azalır. Dispersibilite, ince daneli zeminlerin sahip olduğu kil içeriği tarafından belirlenir. Killerin dispersiyon mekanizması ise kil mineralojisi ve kil-su sistemindeki fizikokimyasal itki kuvvetleri tarafından kontrol edilir. Dispersif zeminlerin erozyon direnci ise yüzey ve içsel erozyon deneyleri ile belirlenebilmektedir. Bu çalışmada örneklerde oluşturulan delikten akımın geçirilebildiği yeni test ekipmanı ile, ince daneli zeminlerde dispersiyon mekanizmasının gerçekleşmesi durumunda, zeminlerin içsel erozyon dirençleri belirlenebilmektedir. Üniform ve tam gelişmiş akım koşullarının oluşturulduğu deney sisteminden elde edilen zamana bağlı debi değerleri; fiziksel hidrolik modelden kurulan teorik hidrolik modellerde boru hidroliğinin temel teoremleri yardımıyla çok düşük hata oranlarında enerji çizgisi eğimi gibi hidrolik parametrelerin belirlenmesinde kullanılabilir. Bunun yanında süreklilik denklemini esas alan yaklaşımla erozyon oranları nicelik olarak belirlenirken; dispersiyon mekanizmasıyla gelişen içsel erozyon için kritik kayma gerilmelerinin nitel mukayesesi yapılabilmektedir. Tek bir hidrolik yük altında benzer kil mineralojisine sahip iki farklı doğal dispersif zeminde yapılan deneylerden elde edilen sonuca göre kum/kil oranı dispersif zeminlerin erozyon direncini ve davranışını belirlemektedir.

Anahtar Kelimeler: Delik Erozyonu, Dispersif Erozyon, Dispersif Zeminler, İçsel Erozyon, Test Ekipmanı

ABSTRACT

Dispersive soils cause significant damage to soil structures retaining water and unprotected slope surfaces due to their high erosion susceptibility. As dispersibility increases in fine-grained soils, erosion resistance decreases. The clay content of fine-grained soils determines dispersibility. The dispersion mechanism of clays is controlled by

¹ Öğr. Gör. Dr., Kütahya DPU Kütahya Teknik Bilimler MYO, sadettin.topcu@dpu.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Prof.Dr., ESOGÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü (Emekli), htosun26@gmail.com

clay mineralogy and repulsive physicochemical forces in the clay-water system. Erosion resistance of dispersive soils can be determined by surface and internal erosion tests. In this study, the internal erosion resistance of the soils can be determined in the case of dispersion mechanism in fine-grained soils, with the new test equipment in which the flow can be passed through the hole created in the samples. Time-dependent flow rates are obtained from the test system in which uniform and fully developed flow conditions were created. They can be used to determine hydraulic parameters such as energy grade lines at low error rates with the help of the fundamental theorems of pipe hydraulics in theoretical hydraulic models built from the physical hydraulic model. In addition, while the erosion rates are determined quantitatively with the approach based on the continuity equation, qualitative comparisons of critical shear stresses can be made for internal erosion by the dispersion mechanism. According to the results obtained from the experiments performed on two different natural dispersive soils with similar clay mineralogy under a single hydraulic head, the sand/clay ratio determines dispersive soils' erosion resistance and behaviour.

Keywords: *Hole erosion, Dispersive erosion, Dispersive soil, Internal erosion, Test equipment*

1. GİRİŞ

Suya istinat eden toprak dolgu baraj, demiryolu dolgusu, karayolu dolgusu, sedde, tersip bendi gibi toprak yapılarında kararlı akım koşullarında yerçekimi ve sızma kuvvetlerinin etkisi ile zemin içinde hareket eden su; zeminin özelliklerine, yükleme koşullarına ve zemindeki içsel gerilme dağılımlarına bağlı olarak içsel erozyona neden olabilir. Bu durumda yapıda farklı şekillerde oluşan hasar ile göçmeler meydana gelebilir ve yapı işlevselliğini kısmen veya bütünü ile kaybedebilir. Göçen dolgu barajların % 46.1'i içsel erozyon nedeniyle göçmüştür (Foster vd., 2000). İnşaat mühendisliği toprak işleri uygulamalarında, zemin danelerinin sızma ve basınçlı boru akımı koşullarında taşınması ve bu işleme bağlı olarak ortamda su taşınmasına neden olan boşlukların oluşması, genel olarak "içsel erozyon" olarak tanımlanır (Topçu, 2020). ABD Su İşleri Teşkilatı'nın (USBR) ve ABD Ordu Mühendisleri Birliği'nin (USACE) ortaklaşa yaptıkları tanımlamalara göre içsel erozyon biçimleri; geriye doğru erozyon, kaçak erozyonu, kontak erozyonu, toplam geriye doğru erozyon ve sufüzyon/sufozyondur (USBR, 2015). Bu çalışmanın esasını oluşturan kaçak erozyonu mekanizması dolguda veya temellerde memba-mansap doğrultusunda uzanan enine çatlaklarda ve boşluklarda gelişen basınçlı boru akımı sonucu gelişir (Bonelli, 2013). Kaçak erozyonu çatlağın/boşluğun üzerinde kalan rezervuar su seviyesi, çatlağın/boşluğun uzunluğu ve kohezyonlu(ince daneli) zeminlerin erozyon direnci tarafından kontrol edilir (Fell vd., 2008). Kondüvi ve dolusavak duvarları boyunca oluşan çatlaklarda, boşluklarda veya zayıf sıkıştırılmış dolgunun muhtemel bölgelerinde meydana gelen erozyon da kaçak erozyonuna girmektedir. Temellerde de meydana gelmektedir (Topçu, 2020).

Dispersif zemin olarak tanımlanan ince daneli zeminlerin erozyon hassasiyeti çok yüksektir (ICOLD, 2012). Dispersif zemin olarak tanımlanan ince daneli zeminlerde meydana gelen dispersif erozyon veya dispersiyon kil-su sistemindeki fiziko-kimyasal itici kuvvetler tarafından kontrol edilir (Paige-Green, 2008). Zeminlerin boşluk sıvısındaki kanyonları dikkate alan kimyasal yaklaşımlar yardımıyla dispersif zeminler

tanımlanabilmektedir (Aitchison ve Wood, 1965; Sherard vd., 1972; Gerber ve Harmse, 1987). Bunun yanında fiziksel deneyler olan Dağılma Deneyi (Emerson 1967; Sherard vd., 1976a) , Çifte Hidrometre Deneyi (Decker ve Dunnigan, 1977) ve İğne Deliği Deneyi (Sherard vd., 1976b) ile de ince daneli zeminlerdeki dispersiyon mekanizmasının varlığı belirlenebilmektedir. Dispersiyon mekanizması erozyona neden olan akımın hızından bağımsızdır ve durağan suda da gerçekleşebilir (Alvarez-Benedi vd., 2004). Saf su kullanıldığında dispersif olarak tanımlanan birçok ince daneli zemin, çeşme suyu veya toplam çözünmüş tuz oranı (TDS) yüksek su kullanıldığında dispersif olmayan zemin olarak tanımlanabilmektedir (Fernando, 2010; Turgut vd., 2017). Yine erozyona neden olan sıvı olarak sodyum konsantrasyonu yüksek su kullanıldığında ince daneli zeminlerin dispersibilitesi azalmakta ve buna bağlı olarak erozyon dirençleri artmaktadır (Arulanandan vd., 1973; Arulanandan vd., 1975). Dispersiyon mekanizmasının tanımlandığı fiziksel deneylerde de saf su kullanılmaktadır.

İnce daneli zeminlerin erozyon direnci; erozyonun başladığı akımın hızıyla ifade edilen kritik kayma gerilmeleri (τ_{cr}) ve malzeme taşınımının hızını gösteren erozyon oranı ($\dot{\epsilon}$) ile belirlenir. Erozyon direnci; kritik kayma gerilmeleri arttıkça ve/veya erozyon oranı azaldıkça; artar. Zeminlerin erozyon davranışının incelenmesinde çok çeşitli test ekipmanları kullanılmıştır. Bu deney sistemlerinde geçmişten bugüne ciddi oranda bir gelişme kaydedilmiştir. Özellikle ölçüm teknolojilerindeki gelişmeler, dolgu barajlardaki çatlaklarda meydana gelen içsel erozyon davranışının benzerinin laboratuvar ortamında oluşturulmasını sağlamıştır. Zeminlerin erozyon direnci, yüzey erozyonu (Laboratuvar kanal erozyon testi, Kapalı kanalda basınçlı akım testi, Jet erozyon testi ve Dönen silindirik erozyon testi) ve içsel erozyon deneyleri (delik/yarık ve çatlak erozyon testi ve iğne deliği testi) ile belirlenebilmektedir (Wan and Fell, 2002). İlk olarak Dunn (1959) tarafından geliştirilen Jet erozyon testinde zemin örneğinin üzerine su jeti şeklinde çarpan suyun oluşturduğu oyulmaya bağlı olarak erozyon davranışı incelenmektedir (Nguyen vd., 2017). Yüzeysel akımların oluşturduğu erozyon, laboratuvar kanal erozyon testinde incelenmiştir. Açık bir kanala yerleştirilen zeminlerin üzerinden geçirilen su akımı sonucu oluşan erozyon davranışı araştırılmıştır (Gibbs, 1962; Fujisawa vd., 2008). Kapalı kanalda basınçlı akım oluşturularak da ince daneli zeminlerin erozyon davranışı incelenmiştir (Ghebreiyessus vd., 1994; Briaud vd., 2001). Dönen silindirik erozyon testinde su dolu hücre içerisine yerleştirilen zemin örneğinin ortasından geçirilen rod yardımıyla döndürülmesiyle zemin yüzeyinde meydana gelen erozyon incelenmiştir (Moore ve Masch, 1962; San Lim ve Khalili, 2009). Delik erozyon testinde ise örnekte oluşturulan delikten su akımının geçirilmesiyle ince daneli zeminlerin erozyon davranışı araştırılmıştır (Lefebvre vd., 1986; Wan ve Fell 2002). Bunların yanında zemin örneğinde çatlak (Hjeldnes ve Lavania, 1980) ve yarık (Cedeno, 1998) oluşturularak da ince daneli zeminlerin erozyon dirençleri belirlenmiştir. Bu test ekipmanlarında erozyona neden olan sıvı olarak TDS'si yüksek çeşme suyu kullanılmıştır. Özellikle dispersif zeminlerin erozyon dirençlerinin belirlenmesinde ASTM ve USBR tarafından standartları belirlenmiş iğne deliği deneyi de kullanılmıştır (Lewis ve Schmidt, 1977).

Bu çalışmada; seçilmiş iki farklı doğal örselenmiş dispersif zeminin erozyon direnci, örnekte oluşturulan delikten geçen akımın oluşturduğu erozyonun incelenbildiği yeni test ekipmanında saf su kullanılarak araştırılacaktır. Yeni test ekipmanının kullanılmasıyla

birlikte ince daneli zeminlerin dispersif erozyon direncinin belirlenmesindeki metodolojik yenilikler ve farklılıklar ortaya konulacaktır.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Materyal

Zemin örneklerinin dane çapı dağılımları, kıvam limitleri, standart enerji kullanılarak elde edilen kompaksiyon parametreleri, özgül graviteleri ve Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine(USCS) göre zemin grupları tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Zemin örneklerinin fiziksel, tanımlama ve kompaksiyon deney sonuçları

Örnek	Dane çapı dağılımı (%)				Kıvam Limitleri (%)			Kompaksiyon parametreleri		Gs	Grup
	Kil	Silt	Kum	Çakıl	LL	PL	PI	ρ_{dmaks} (Mg/m ³)	w_{opt} (%)		
AF1	35.9	45.2	16.2	2.7	59	29	30	1.535	22.3	2.68	CH
AF2	11.9	61.5	25.1	1.5	43	26	17	1.508	20.1	2.65	CL

Zemin örneklerinde dispersibilitiyi tanımlamak için yapılan dağılma deneyi, çifte hidrometre ve iğne deliği deneylerinden elde edilen sonuçlara göre zemin örnekleri bütün deney sonuçlarına göre dispersif zemin olarak tanımlanmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Dispersibilitenin belirlendiği fiziksel deneylerin sonuçları

Örnek	Dağılma Deneyi ^a	Çifte Hidrometre Deneyi ^b	İğne Deliği Deneyi ^c
AF1	G3	D-% 77.5	D1
AF2	G3	D-% 69.0	D1

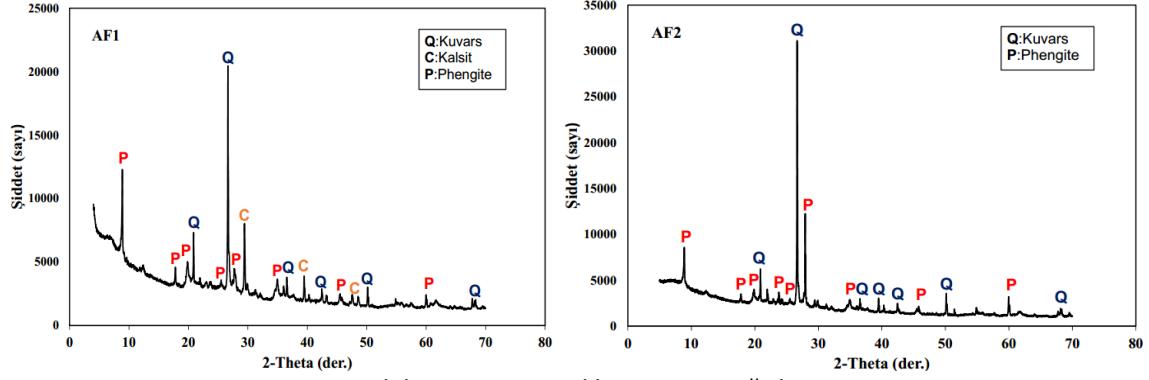
a; USBR 5400’e (1990) göre G1:Dispersif olmayan, G2:Ara zemin, G3, G4:Dispersif. b; USBR 5405’e (1990) göre % D < 30: Dispersif olmayan (ND), 30-50: Ara zemin (I), > 50: Dispersif (D). c; USBR 5410’a (1990) göre ND1,ND2; Dispersif olmayan, ND3,ND4: Ara zemin, D1,D2: Dispersif.

Boşluk sıvısının kimyasal analizinden elde edilen sonuçlara göre zemin örneklerinin kimyasal deney sınıfları da dispersif olarak tanımlanmıştır (Tablo 3).

Tablo 3. Kimyasal deney sınıfları

Örnek	TDS-Na(%)	CEC-ESP(%)	ESP (%)
	Sherard vd. (1972)	Gerber ve Harmse (1987)	Aitchison ve Wood (1965)
AF1	A-Dispersif	HD-Yüksek dispersif	D-Dispersif
AF2	A-Dispersif	HD-Yüksek dispersif	D-Dispersif

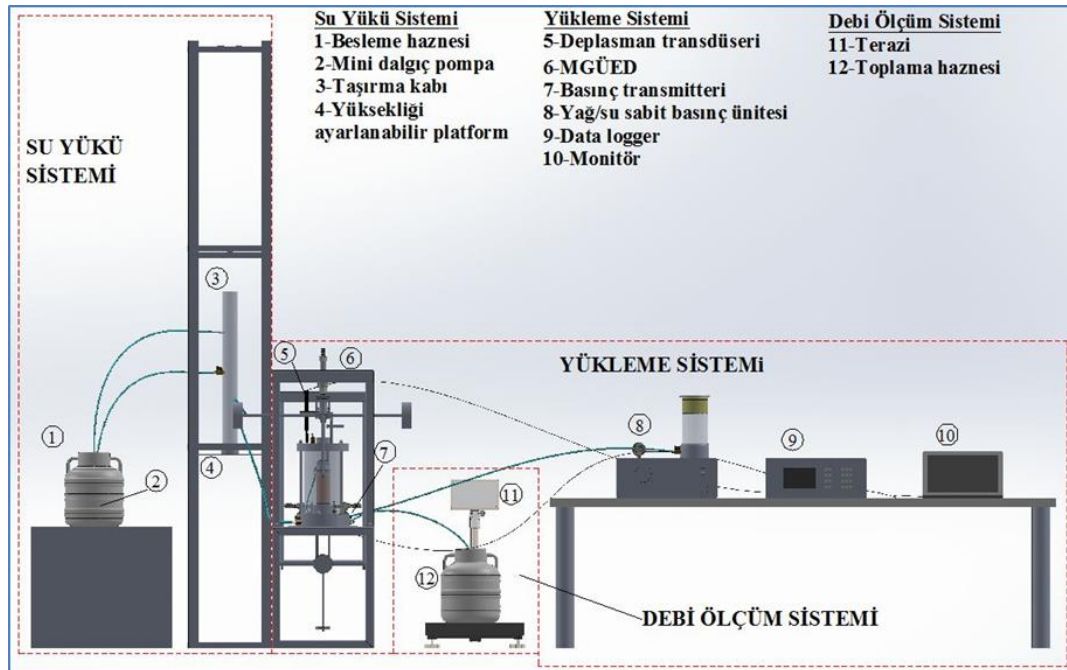
Zemin örneklerinin mineralojik analiz sonuçları şekil 1’de verilmektedir (Brandenburg ve Putz, 2006). Zemin örneklerinde 2:1 tabakalı Mika grubu kil minerali olan Phengite bulunmaktadır (Velde ve Meunier, 2008). 2:1 tabakalı kil minerallerinde özgül yüzey alanı ve CEC değerinin yüksek olması nedeniyle dispersiyonun gerçekleşmesine olanak sağlayacak kolloidal aktivite artmaktadır (Shainberg ve Levy, 2005).



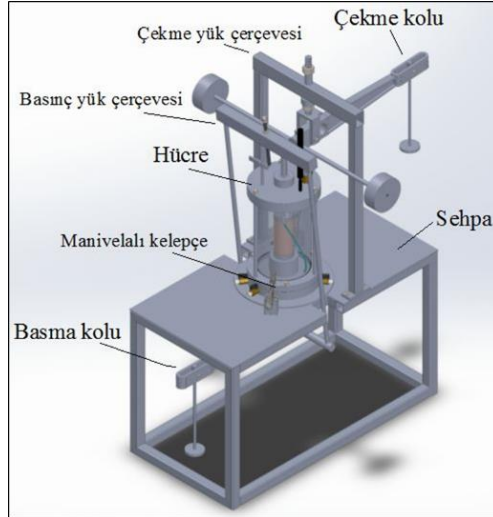
Şekil 1. Zemin örneklerinin XRD eğrileri

2.2. Test Ekipmanı

İnce daneli zeminlerin erozyon direncinin belirlenebilmesi için yeni bir test ekipmanı geliştirilmiştir. Bu test ekipmanında aynı zamanda ince daneli zeminlerin, gerilme koşulları altındaki erozyon davranışları da incelenebilmektedir. Fakat bu çalışmada deneyler gerilmesiz koşulda yapılmıştır. Geliştirilen deney ekipmanı üç ana sistemden oluşmaktadır (Şekil 2). Su yükü sisteminde silindirik taşıma kabı pleksiglastan imal edilmiştir. Silindirik taşıma kabını besleyen haznenin hacmi 30 L'dir. Hazneden suyun taşıma kabına iletilmesini sağlayan mini dalgıç pompanın deşarj kapasitesi 200 L/sa ve pompa gücü ise 3 Watt'dır. Yüksekliği ayarlanabilir platform yardımıyla deneylerde 25 000 Pa'lık hidrolik bir yük oluşturulabilmektedir. Zemin örneklerinde gerilme koşullarının oluşturulabilmesi için yükleme sistemi oluşturulmuştur. Modifiye Edilmiş Gerilme Kontrollü Üç Eksenli Deney Cihazı(MGÜED) şekil 3'de görülmektedir.



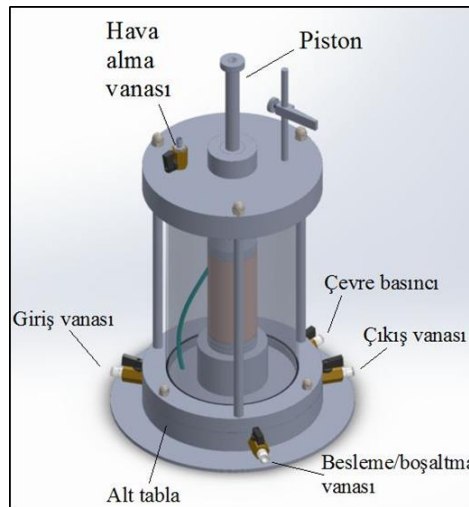
Şekil 2. Test ekipmanı (Topçu ve Tosun, 2021'den değiştirilerek alınmıştır)



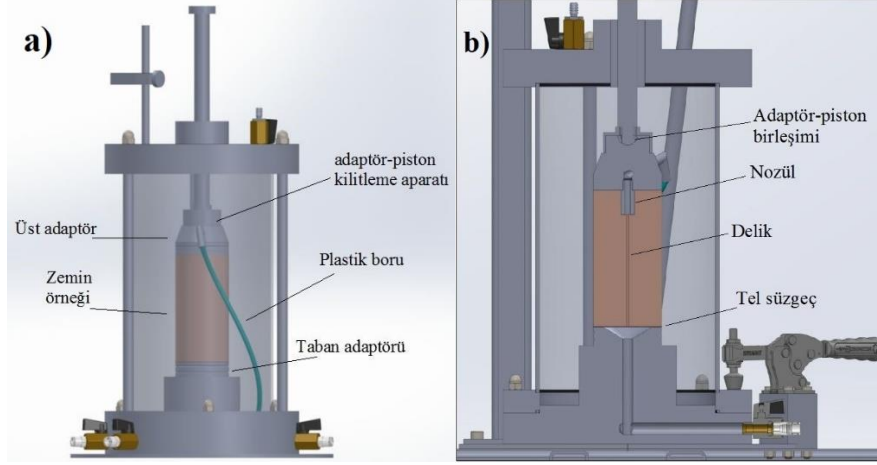
Şekil 3. Modifiye Edilmiş Gerilme Kontrollü Üç Eksenli Deney Cihazı (Topçu ve Tosun,2021)

MGÜED ile zemin örneğine çevre basıncı yanında eksenel çekme ve basınç gerilmeleri de uygulanabilmektedir. Kuvvet, çekme kolunda 1:5 oranında; basınç kolunda ise 1:10 oranında büyütülerek örneğe aktarılır. Cihazda basınç gerilmeleri için 50-300 kPa ve çekme gerilmeleri için ise 25-150 kPa aralıkları için kalibrasyon işlemi yapılmıştır. Hücresinin test sırasında stabil halde durması için iki adet manivellalı kelepçe ile alt tablaya tutturulmuştur. Hücre, 70 ve 100 mm çaplı örnekler için kullanılabilen üç eksenli deney hücresidir (şekil 4). Hücre 1000 kPa su basıncına dayanıklı olacak şekilde pleksiglas malzemeden üretilmiştir. Hücresinin oturduğu alt tablada dört ve üst kısmında bir adet olmak üzere toplamda beş adet vana vardır. Hücre içerisine yerleştirilmiş zemin örneğinin görüntüsü ve boyuna kesit detayı şekil 5’de gösterilmiştir.

Pistonun adaptör ile birleşimi kilitleme aparatı ile sağlanmıştır. Kilitleme aparatı üzerinde pistonun tek bir yönde girebileceği bir yuva vardır. Pistonun ucu ve yuvanın içerisinde birbirine geçmeli kilitleme sistemi oluşturulmuştur. Bu yuvaya giren piston herhangi bir yöne 90° kadar döndürüldüğünde kilitlenme sağlanmaktadır.



Şekil 4. Üç eksenli deney hücresi (Topçu ve Tosun, 2021)



Şekil 5. a) Hücre içerisine yerleştirilmiş zemin örneği b) Zemin örneğinin boyuna kesit detayı (Topçu ve Tosun, 2021)

Zemin örneğinde açılan deliğe akım, nozül tarafından verilmektedir. Yağ/su sabit basınç ünitesi olarak analog manometresi olan, 0-1700 kPa çevre basıncı oluşturabilecek kapasitesiye sahip ELE marka cihaz kullanılmıştır. Hücre içerisindeki çevre basıncı aynı zamanda kalibre edilmiş data logger'a bağlı basınç transmitteri tarafından da ölçülerek monitörden izlenmiştir. Zemin örneğine uygulanan yüklemeler sonucunda örnekte meydana gelen eksenel şekil değiştirmeler yine data logger yardımıyla deplasman transdüseri ile monitörden takip edilmiştir.

Zemin örneğinde oluşturulan delikten geçen akımın debisi, dijital göstergeli terazi ve toplama haznesinden oluşan debi ölçüm sistemi ile ölçülmüştür. Dijital terazi ile ölçülen zamana bağlı ağırlık verileri, suyun ölçülen sıcaklıktaki yoğunluk değerine bölünerek hacim değerleri elde edilir. Zamana bağlı elde edilen hacim değerlerinden de debi değerleri hesaplanır. Hesaplamalarda delikteki zeminin erozyona uğraması sonucu akımla birlikte taşınan malzemelerin ağırlığı ihmal edilmiştir.

2.3. Hidrolik Modelin ve Kapasitenin Belirlenmesi

Zemin örneğinde oluşturulan delikten geçen akımın hidrolik parametrelerinin belirlenmesinde boru hidroliğinin temel prensipleri kullanılmıştır. Test ekipmanında deneyler tek bir hidrolik yük altında gerçekleştirilmektedir. Test ekipmanında hidrolik modellerin enerjisinin belirlenmesinde Bernoulli eşitliğinden elde edilen denklem (1) kullanılmaktadır.

$$1.09 = \frac{V_c^2}{2g} + \Sigma \Delta h \quad (1)$$

Test ekipmanının hidrolik kapasitesinin belirlenmesinde ise zemin örneğine eşdeğer farklı delik çaplarına (1,2,3,4,6,8,10,12,14 mm) sahip alüminyum kalıplar kullanılmıştır. Alüminyum kalıplar kullanılarak hidrolik kapasite belirlenirken elde edilen fiziksel hidrolik modele göre; deneylerde başlangıç delik çapı olan 2 mm ile 4 mm arasında debi artışının doğrusala çok yakın olduğu görülmüştür. Bu nedenle erozyona uğrayan zemin örneklerinde erozyon oranının hesaplanmasında süreklilik denklemi esasında bu iki delik çapı arasındaki debi değişimleri dikkate alınmaktadır. Test ekipmanında sürtünme ve yersel enerji kayıpları belirlenerek bu delik çapları (2,3 ve 4 mm) için SF Pressure Drop v7.2 programında teorik hidrolik modeller kurulmuştur. Fiziksel hidrolik modelden bu

delik çapları için elde edilen debi değerleri teorik hidrolik modellerde değerlendirildiğinde; Bernoulli eşitliğinden elde edilen fiziksel hidrolik modeldeki toplam enerji kayıpları ile teorik hidrolik modellerden elde edilen toplam enerji kayıplarının çok düşük hata oranlarıyla birbirine yakın olduğu görülmüştür. Teorik hidrolik modellerde sürtünme enerji kayıplarının hesaplanmasında $Re < 3000$ olduğu zaman akımın rejimi laminar; $Re > 3000$ olduğu zaman ise akımın rejimi türbülanslı kabul edilmektedir. Test ekipmanındaki hidrolik modelin ve kapasitenin belirlenmesiyle ilgili diğer detaylar Topçu ve Tosun'da (2021) verilmektedir.

2.4. Deneyin Yapılışı

Araziden gelen doğal zeminler çeyreklemeye yöntemine tabi tutulmuşlardır. Malzemeler elek açıklığı 2 mm olan No.10 elekten elenmiştir. Deneyler, hacim kontrollü bir şekilde en büyük kuru yoğunlukta ve $w_{opt}+2$ su muhtevasında sıkıştırılmış zemin örneklerinde yapılmıştır. Her bir örnek için üç deney yapılmış ve çıkan sonuçların genel eğilimi dikkate alınmıştır. Deneylerde karışım suyu olarak saf su kullanılmıştır. Saf su karıştırılan zemin, pirinçten özel olarak imal edilmiş kalıp, tokmak ve iğneden oluşan sistemle sıkıştırılmıştır. Zemin örnekleri yedi tabakada sıkıştırılmıştır. Zemin örneğinin her yerinde aynı sıkılığı sağlamak için üst katmanlara doğru sıkıştırma kalınlığı düşürülmüştür. Böylece zemin örneğinde üst katmanları sıkıştırırken alt katmanların artan sıkılığının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Zemin örneklerinde tabakalar arası oluşacak derzlerin önüne geçmek sıkıştırılan tabakalar ucu sivri bir bıçakla iğnelenmiştir. Deneylerde kullanılan zemin örneğinin çapı 70 mm ve yüksekliği 140 mm'dir. Kalıptan hidrolik kriko ile çıkarılan örnek üç eksenli deney hücresine membran takılarak yerleştirilmiştir. Üst adaptör ile zemin örneği arasında boşluk kalmaması için 3 kPa'lık küçük bir düşey gerilme, basma kolu ve basınç yük çerçevesi ile zemin örneğine aktarılmıştır. Deneyler tek bir hidrolik yük altında gerçekleştirilmiştir. Besleme haznesi saf su ile doldurulup mini dalgıç pompa çalıştırılarak taşıma kabında bu hidrolik yük oluşturulmuştur. Besleme haznesindeki suyun sıcaklığı, cam çubuk termometre ile ölçülmüştür. Zemin örneğine akım verilirken önce taşıma kabının çıkışındaki vana açılır, daha sonra sırasıyla alt tabladaki giriş ve çıkış vanaları açılır. Akım, zemin örneğinden deney ekipmanının hidrolik kapasitesine ulaşıncaya kadar geçirilir. Dijital göstergeli terazideki ağırlık okumalarından Bölüm 2.2'de anlatıldığı gibi debi değerleri hesaplanır.

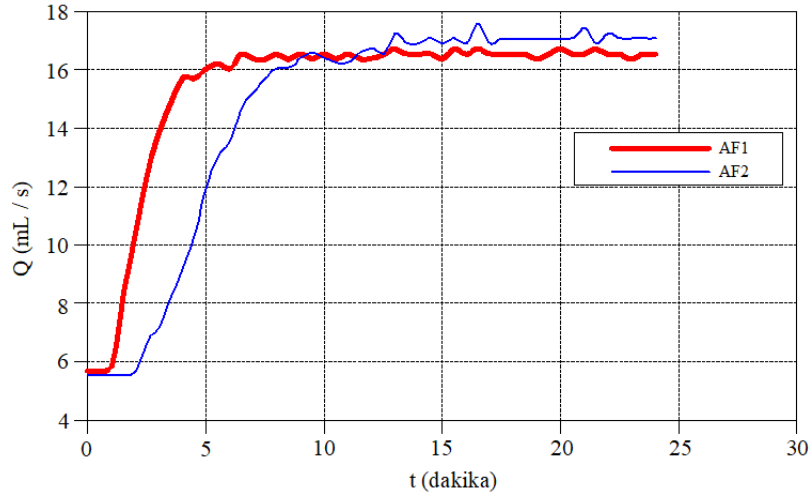
2.5. Verilerin Değerlendirilmesi

Erozyona uğrayan zemin örneklerinde verilerin değerlendirilmesinde aşağıdaki yol izlenir: **1-)** Deneylerden elde edilen akımın debi değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği çizilir. **2-)** Zamana bağlı değişim grafiğinde debi artışının başladığı nokta Q_2 ve t_2 tespit edilir. Bununla birlikte t_4 belirlenirken 15.63 mL/s'den (Fiziksel hidrolik modelde $d=4$ mm için elde edilen debi değeri) küçük debiler dikkate alınır. Bu küçük debilerden de doğrusallığın regresyon katsayısını (R^2) en büyük veren nokta Q_4 olarak belirlenir. Belirlenen bu iki nokta arası için erozyon oranı hesaplamasında dikkate alınacak zamana bağlı debi grafiği çizilir. **3-)** Erozyonun başladığı ve sonlandığı anlara bağlı olarak delik çapının zamana bağlı değişim grafiği çizilir. Doğrunun denklemi, $d=mt+2$ belirlenir ve t_3 bu denklemden belirlenir ($m=\frac{\Delta d}{\Delta t}$). **4-)** Erozyon oranı hesaplanmasında kullanılan zamana bağlı debi

grafiğindeki doğrunun denklemi olan $Q=at+b'$ 'den Q_3 , t_3 değeri için hesaplanır. 5-) $\dot{\epsilon} = \frac{\rho_d \Delta d}{2 \Delta t}$ hesaplanır. 6-) Her bir zemin örneği için Q_2 , Q_3 ve Q_4 debi değerleri; 2,3, ve 4 mm delik çapları için oluşturulan teorik hidrolik modellerde kullanılarak k_s ve i belirlenir. Bu parametreler Bernoulli eşitliğinden hesaplanan $\Sigma \Delta h$ değerine göre belirlenir. Pürüzlülük yüksekliğine bağlı olarak delik içerisinde meydana gelen $\Delta h_{sürtünme}$ 'nin deliğin uzunluğuna bölünmesiyle enerji çizgisinin eğimi hesaplanmaktadır. 7-) Kritik kayma gerilmelerinin nitel mukayesesi t_2 dikkate alınarak yapılır. t_2 arttıkça kritik kayma gerilmeleri artmaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Seçilmiş zemin örnekleri için dispersif erozyon direnci, geliştirilen yeni test ekipmanında araştırılmıştır. Benzer kil mineralojisine sahip dispersif zemin örnekleri için elde edilen zamana bağlı debi eğrileri şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 6. Zemin örneklerinin zamana bağlı debi değerleri

Yapılan deneyler sonucunda; AF2 örneğinin AF1 örneğine göre erozyon direncinin daha yüksek olduğu görülmektedir (Tablo 4 ve Tablo 5).

Tablo 4. Deney sonuçları

Örnek	m	t_2 (s)	t_3 (s)	t_4 (s)	Q_2 (mL/s)	Q_4 (mL/s)	a	b	R^2	Q_3 (mL/s)	ΣV^* (L)
AF1	0.0133	30	75.2	180	5.68	13.87	0.0597	3.1188	0.974	7.61	1.28
AF2	0.0067	90	149.3	390	5.52	14.72	0.0329	1.7733	0.984	6.69	3.09

* Delikten geçen suyun kümülatif hacmi

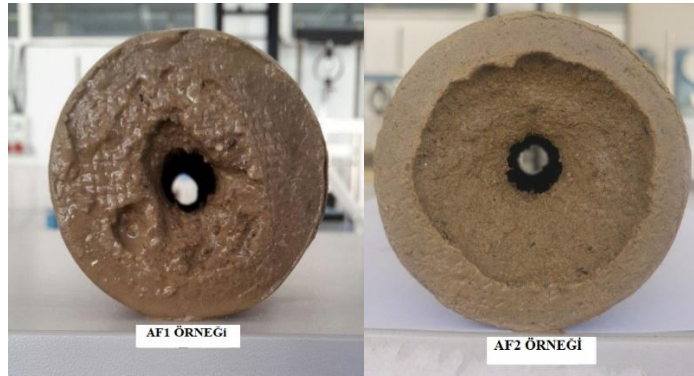
Tablo 5. Zemin örneklerinde hesaplanan erozyon oranları

Örnek	$\dot{\epsilon}$ (kg/m ² /s) x10 ⁻³	Reynolds sayısı			T (°C)
		2 mm	3 mm	4 mm	
AF1	10.21	3870	3456	4725	22.5
AF2	5.05	4205	3398	5607	28.0

AF2 zemin örneğine göre kil oranı daha büyük olan AF1 zemin örneğinde (Bkz. Tablo 1) erozyon oranı daha büyüktür. Erozyonun başlaması için geçen süre AF2 örneğinde daha

yüksek olduğu için AF1 örneğine göre kritik kayma gerilmeleri daha büyük olduğu belirlenmiştir. Deneylerde, dispersibilitenin tanımlandığı fiziksel deneylerde olduğu gibi saf su kullanıldığı için, zemin örneklerinde dispersiyona bağlı dispersif erozyon gelişmektedir. Deneylerde saf su yerine TDS'si yüksek çeşme suyu kullanıldığında dispersif zeminlerde dispersiyon mekanizması gelişmez ve kil oranı arttıkça erozyon direnci artar (Wan ve Fell, 2002; Regazzoni ve Marrot, 2011). Kilde dispersiyon gerçekleşmeden malzeme taşınımı mekanik(fiziksel) erozyonla gerçekleşir (USBR 5410, 1990). Dispersiyonun gerçekleşmediği zeminler, dispersif olmayan zemin olarak tanımlanır. Dispersif olmayan zeminlerde de kil doğası gereği erozyona karşı zeminleri bir arada tutan gerçek kohezyonun artmasına neden olur ve gerçek kohezyonun artmasıyla da zeminlerin erozyon dirençleri artar (Atkinson vd., 1990).

AF1 ve AF2 örneklerinin kum/kil oranları sırasıyla 0.45 ve 2.11'dir. Dispersif zemin örneklerinde kum/kil oranı arttıkça kaçak erozyonunun yanında geriye doğru erozyonun gerçekleşme eğilimi artmaktadır (Şekil 7).



Şekil 7. Zemin örneklerinde deliğin deney sonu görünüşü

Dispersif zeminlerde kil ve kum dışında kalan siltlerin de erozyon hassasiyeti killere göre daha büyüktür (Curtin vd., 1994). Kumların erozyon direnci de ince daneli zeminlerden farklı olarak ortalama dane çapına bağlı olarak değişmektedir (Briaud vd., 1999). Kum daneleri arasında kalan dispersibilitesi yüksek killerin erozyon dirençleri sadece kil-su sistemindeki fizikokimyasal itici kuvvetlerin etkisindedir. Dispersiyon sonucu kolaylıkla dağılabildiği Dağılma ve Çifte hidrometre deneylerinde bilinen bir gerçek olduğu için kum/kil oranı çok düşük olan zeminlerde akımın kritik kayma gerilmeleri sıfır olan dispersif kil danelerini taşınmasıyla birlikte kum daneler de taşınmış olur. Kum/kil oranı yüksek olan ince daneli zeminlerde ise erozyonun başlayıp gelişebilmesi için zeminin iskeletini oluşturan kum danelerinin stabilitesinin bozulması gerekir. Bu stabilitenin bozulması; akımın oluşturduğu yeterli büyüklükteki kayma gerilmeleriyle veya kum danelerin arasında kalan dispersif killerin zamanla taşınmasıyla gerçekleşir. Deneyisel çalışmada; deneyler tek bir hidrolik yük altında gerçekleştirildiği için kum danelerin stabilitesini bozacak yeterli büyüklükte kayma gerilmeleri oluşmamıştır. Bu stabilite, daneler arasındaki dispersif killerin zamanla taşınmasıyla bozulmuştur. Bu geçen zaman, kum/kil oranı arttıkça artmıştır. Yine bu geçen süre(zaman) arttıkça dispersif zeminlerin kritik kayma gerilmeleri de artmaktadır (Bkz. Tablo 4).

Tek bir hidrolik yük altında yapılan deneylerde akımın hidrolik parametreleri teorik hidrolik modeller yardımıyla belirlenmektedir (Tablo 6). Erozyon direnci daha yüksek olan

AF2 zemin örneğindeki pürüzlülük yükseklikleri ve enerji çizgisinin eğimi daha büyüktür. AF2 zemin örneğinde meydana gelen geriye doğru erozyonla delik çapındaki genişlemeden dolayı enerji çizgisinin eğimi, sadece delik çapının 4 mm olduğu anda daha küçüktür. Zemin örneklerinde erozyon direnci arttıkça malzemenin taşınması geçen süre artmakta ve bu da geçen suyun kümülatif hacmini arttırmaktadır (Bkz. Tablo 4 ve 5).

Tablo 6. Pürüzlülük yükseklikleri ve enerji çizgisi eğimleri

	Delik çapı (mm)	$\Sigma\Delta h$ (m)	k_s (mm)	i
AF1	2	1.08709	0.10719	6.59
	3	1.08477	1.18285	5.24
	4	1.07263	0.65011	2.14
	Delik çapı (mm)	$\Sigma\Delta h$ (m)	k_s (mm)	i
AF2	2	1.08725	0.13446	6.81
	3	1.08596	1.82964	6.20
	4	1.07043	0.24548	1.43

4. SONUÇLAR

Benzer kil mineralojisine sahip ve aynı kategorilerde dispersif olarak tanımlanan iki farklı doğal dispersif zeminin, tek bir hidrolik yük altında saf su kullanılarak yeni geliştirilen test ekipmanında erozyon dirençleri araştırılmıştır. Dispersif erozyonun geliştiği deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre: *) Erozyona neden olan sıvı olarak saf su kullanıldığında dispersiyon gelişip kil oranı arttıkça ince daneli zeminlerin erozyon dirençleri azalmaktadır. İnce daneli zeminlerde erozyona neden olan sıvı olarak TDS'si yüksek çeşme suyu kullanıldığında; zeminlerin saf suda dispersibilitesi yüksek bile olsa; mekanik erozyon gelişmekte ve kil oranı arttıkça erozyon direnci artmaktadır. *) Kum/kil oranı yüksek olan zeminlerde dispersif erozyon görülmesine rağmen kum danelerin taşınımı zorlaşmaktadır. Zeminin iskeleti kum daneleri tarafından oluşturuldukça dispersif zeminlerin erozyon dirençleri artmaktadır. *) Hidrolik modellerden elde edilen parametrelerle (k_s ve i) ve delikten geçen suyun kümülatif toplam hacmi ile zeminlerin erozyon dirençleri hakkında değerlendirme yapılabilmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma; Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde hazırlanmış doktora tez çalışmasından üretilmiştir. Doktora tezi çalışması esnasında yardımlarını esirgemeyen ESOGÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarı çalışanlarına teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Aitchison, G. D. and C. C. Wood. 1965, Some Interactions of Compaction, Permeability and Post-construction Deflocculation Affecting the Probability of Piping Failure in Small Earth Dams (expanded version of this paper constitutes the CP 029), In Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 442–446. Toronto, Canada: University of Toronto Press. 1965.

- Alvarez-Benedi, J., R. Munoz-Carpena, and M. Vanclooster. 2004, Modeling as a Tool for the Characterization of Soil Water and Chemical Fate and Transport, In *Soil-Water-Solute Process Characterization*, edited by J. Alvarez-Benedi and R. Munoz-Carpena. Boca Raton, FL: Press CRC.
- Arulanandan, K., A. Sargunam, P. Loganathan, and R. B. Krone. 1973, Application of Chemical and Electrical Parameters to Prediction of Erodibility, In *Soil Erosion: Causes and Mechanisms, Prevention and Control* edited by D. H. Gray, 42–51. Proceedings of a Workshop on Highway Research, Board and National Science Foundation, Washington, DC.
- Arulanandan, K., P. Loganathan, and R. B. Krone. 1975, Pore and Eroding Fluid Influences on Surface Erosion of Soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 100 (January): 51–66.
- Atkinson, J. H., J. A. Charles, and H. K. Mhach, 1990, Examination of Erosion Resistance of Clays in Embankment Dams, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 23, no. 2 (May): 103–108.
- Bonelli, S., (Ed.), 2013, *Erosion in geomechanics applied to dams and levees*, ISTE Limited, p.6-84.
- Briaud, J. L., F. C. K. Ting, H. C. Chen, R. Gudavalli, S. Perugu, and G. Wei. 1999. "SRICOS: Prediction of Scour Rate in Cohesive Soils at Bridge Piers." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 125, no. 4, 237-246.
- Briaud, J.L., Ting, F.C.K., Chen, H.C., Cao, Y., Han, S.W., Kwak, K.W., 2001, Erosion function apparatus for scour rate predictions, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(2), 105-113.
- Cedeno, A.R.J., 1998, *Piping in Dams: Tests to asses the factors which affect progression*, Project/Thesis, School of Civil and Enviromental Engineering, University of New South Wales, CIVL4906, 256 p.
- Curtin, D., Steppuhn, H., Selles, F., 1994, Clay dispersion in relation to sodicity, electrolyte concentration, and mechanical effects, *Soil Science Society of America Journal*, 58(3), 955-962.
- Decker, R. S., Dunnigan, L.P., 1977, Development and use of the Soil Conservation Service Dispersion Test, J. Sherard, R. Decker (Eds), In *STP623-EB Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 94-109.
- Dunn, I. S. 1959, Tractive Resistance of Cohesive Channels, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 85, no. 3 (March): 1–24.
- Emerson, W. W., 1967, A Classification of soil aggregates based on their coherence in water, *Australian Journal of Soil Research* 5, 47-57.
- Fell, R., Foster, M., Davidson, R., Cyganiewicz, J., Sills, G., Vroman, N., 2008, A unified method for estimating probabilities of failure of embankment dams by internal erosion and piping, *UNICIV Report R, 446*, 10-8, 332 p.
- Fernando, J. 2010, Effect of Water Quality on the Dispersive Characteristics of Soils found in the Morwell Area, Victoria, Australia, *Geotechnical and Geological Engineering* 28, no. 6 (August): 835–850.
- Foster, M., Fell, R., Spannagle, M., 2000, The statistics of embankment dam failures and accidents, *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 1000-1024.

- Fujisawa, K., Kobayashi, A., & Yamamoto, K., 2008, Erosion rates of compacted soils for embankments, *Doboku Gakkai Ronbunshuu C*, 64(2), 403-410.
- Gerber, F.A., Harmse, V.M., 1987, Proposed procedure for identification of dispersive soils by chemical testing, *Civil Engineer in South Africa*, 29(10), 397-399.
- Ghebreiyessus, Y.T., Gantzer, C.J., Alberts, E. E., Lentz, R.W., 1994, Soil erosion by concentrated flow, shear stress and bulk density, *Transactions of the ASAE*, 37(6), 1791-1797.
- Gibbs, H. J. 1962, A Study of Erosion and Tractive Force Characteristics in Relation to Soil Mechanics Properties. Soils Engineering Rep. No. EM 643. Washington, DC: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- Hjeldness, E. I., Lavania, B. V., 1980, Cracking, leakage, and erosion of earth dam materials, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 106(ASCE 15220), 117-135.
- ICOLD, C. (2012). Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations, Draft Bulletin, International Commission on Large Dams, Paris, France, 164, 288 p.
- Lefebvre, G., Rohan, K., Milette, J.P., 1986, Erosivity of intact clay: Influence of the natural structure, *Canadian Geotechnical Journal*, 23(4), 427-434.
- Lewis D., Schmidt, N., 1977, Erosion of unsaturated clay in a Pinhole Test, J. Sherard and R. Decker (Eds), in *Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 260-273.
- Moore, W. L. and F. D. Masch Jr. 1962, Experiments on the Scour Resistance of Cohesive Sediments, *Journal of Geophysical Research* 67, no. 4 (April): 1437–1446.
- Nguyen, V. N., J. R. Courivaud, P. Pinettes, H. Souli, and J. M. Fleureau. 2017, Using an Improved Jet-Erosion Test to Study the Influence of Soil Parameters on the Erosion of a Silty Soil, *Journal of Hydraulic Engineering* 143, no. 8 (August): 04017018.
- Paige-Green, P., 2008, Dispersive and erodible soils – Fundamental differences, SAIEG/SAICE Problem Soils Conference, 59-67.
- Regazzoni, P. L. and D. Marot. 2011, Investigation of Interface Erosion Rate by Jet Erosion Test and Statistical Analysis, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 15, no. 8 (January): 1167–1185.
- San Lim, S., Khalili, N., 2009, An improved rotating cylinder test design for laboratory measurement of erosion in clayey soils, *Geotechnical testing journal*, 32(3), 1-7.
- Shainberg, I. and G. J. Levy, 2005, Flocculation and Dispersion, In *Encyclopedia of Soils in the Environment*, edited by D. Hillel, Elsevier, 2005, 27–34.
- Sherard, J. L., R. S. Decker, and N. L. Ryker. 1972, Piping in Earth Dams of Dispersive Clay, In *Performance of Earth and Earth-Supported Structures*, 589. New York: American Society of Civil Engineers.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., Decker, R.S., 1976 a, Identification and nature of dispersive soils, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 102, No. GT4, 298-312.
- Sherard, J.L., Steele, E.F., Decker, R.S., Dunnigan, L.P., 1976 b, Pinhole test for identifying dispersive soils, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 102(1), 69-85.
- Topçu, S., 2020, Comparative Analysis of Internal Erosion Behaviour for Fine Grained Soils Under Different Stress State, DOCTORAL DISSERTATION, Department of Civil Engineering, Eskişehir Osmangazi University, 181 p.

- Topçu, S., Tosun, H., 2021, Determination of Dispersive Erosion Resistance in Fine-Grained Soils with Newly Developed Test Equipment. Geotechnical Testing Journal, 45(1).
- Turgut, A., N. S. Isik, and K. E. Kasapoglu. 2017, Investigation of factors Affecting the Dispersibility of Clays and Estimation of Dispersivity, Bulletin of Engineering Geology and the Environment 76, no. 3 (November): 1051–1073.
- U.S. Bureau of Reclamation, 1990, Determining Dispersibility of Clayey Soils by the Crumb Test Method, USBR 5400, Denver, CO: U.S. Bureau of Reclamation.
- U.S. Bureau of Reclamation, 1990, USBR 5405, Determining Dispersibility of Clayey Soils by the Double Hydrometer Test Method, Denver, CO: U.S. Bureau of Reclamation.
- U.S. Bureau of Reclamation, 1990, USBR 5410, Determining Dispersibility of Clayey Soils by the Pinhole Test Method, Denver, CO: U.S. Bureau of Reclamation.
- U.S. Bureau of Reclamation. 2015, Internal Erosion Risks for Embankments and Foundations, Technical Report IV-4. Denver, CO: U.S. Bureau of Reclamation.
- Velde, B. B. and A. Meunier, 2008, The Origin of Clay Minerals in Soils and Weathered Rocks, Berlin/Heidelberg: Springer, Verlag Berlin Heidelberg.
- Wan, C. F. and R. Fell. 2002, Investigation of Internal Erosion and Piping of Soils in Embankment Dams by the Soil Slot Erosion Test and the Hole Erosion Test. UNICIV Report No. R-412, New South Wales: University of New South Wales, School of Civil and Environmental Engineering.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
τ_{cr}	Kritik kayma gerilmesi	Q_2	2 mm delik çapında ölçülen debi
$\dot{\epsilon}$	Erozyon oranı	Q_3	3 mm delik çapında hesaplanan debi
V_{ϕ}	Çıkış borusundaki akım hızı	Q_4	4 mm delik çapında ölçülen debi
g	Yer çekimi ivmesi	t_2	Erozyonun başladığı an
$\Sigma\Delta h$	Toplam enerji kaybı	t_3	Delik çapının 3 mm olduğu an
ρ_d	Kuru yoğunluk	t_4	Erozyonun sonlandığı an
k_s	Pürüzlülük yüksekliği	i	Enerji çizgisi eğimi
$\Delta h_{sürtünme}$	Delikteki sürtünme enerji kaybı	ΣV	Delikten geçen akımın kümülatif hacmi