

İnce Daneli Zeminlerde İçsel Erozyon Test Ekipmanlarının Gelişim Sürecine Genel Bakış

Sadettin Topçu¹

Hasan Tosun²

Özet

Dolgu barajların dolgu ve temel kısımlarında meydana gelen içsel erozyon bu barajların uzun ve kısa dönemli davranışında güvenliğini tehdit etmektedir. Özellikle çeşitli etkilerle dolguda oluşan memba-mansap doğrultusundaki çatlaklarda meydana gelen içsel erozyon biçimlerinden olan kaçak erozyonunda ince daneli zeminlerin taşınması gerçekleşir. Bu malzeme taşınımıyla birlikte ortaya çıkan su kaçağı bu yapıların stabilitesini bozarak göçmeye kadar varan felaketlere neden olabilmektedir. Kaçak erozyonu, çatlakların derinliği, genişliği ve çatlak içerisindeki gelişen akımın hidrolik eğimi gibi hidrolik parametrelerle kontrol edilebilmektedir. Bunun yanında dolgu barajların geçirimsiz perdesinde kullanılan ince daneli zeminlerin içsel erozyon direnci de bu işlem de kontrol faktörlerindedir. İnce daneli zeminlerin içsel erozyon direnci malzeme taşınımının başladığı akımın hızıyla ilişkili kritik kayma gerilmesi ve malzeme taşınımının hızını gösteren erozyon oranı parametreleri ile belirlenebilmektedir. Şimdiye kadar ince daneli zeminlerin içsel erozyon direnci ve bu kontrol faktörüne etki eden kimyasal, mekanik ve geoteknik özellikler birçok test ekipmanı ile araştırılmıştır. Bu bölümde bu test ekipmanlarının tarihsel gelişimi, test ekipmanı detayları ve yapılan çalışmalar sunulacaktır.

1. Giriş

Erozyon, doğada çeşitli fiziksel etkiler (rüzgâr, su, buzul vs.) ile yer malzemelerinin bir yerden bir yere taşınma işlemidir. Doğal bir süreç olarak bilinen erozyon, özellikle mühendislik yapıları için bir problemdir.

1 Dr.Öğr. Üyesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, sadettin.topcu@dpu.edu.tr, ORCID: 0000-0003-1306-2502

2 Prof.Dr., Mudanya Üniversitesi, hasantosun26@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9481-7956

Akarsularda köprü ayaklarının ve liman-iskele yapılarında keson kazıkların diplerinin oyulması, dolgu barajlarda yüzeysel ve içsel malzeme taşınımı vb. neticesinde erozyon direk mühendislik yapılarının stabilitelerini ve işlevlerini tehdit etmektedir. Erozyon, meydana geldiği ortama göre iki kategoride tanımlanmaktadır: Yüzeysel erozyonu ve İçsel erozyon. Bu işlemin, yerin yüzeyinde yağmur, rüzgar, akarsu ve buzul gibi değişik fiziksel etkiler sonucu oluşmasına “**yüzeysel erozyonu**” adı verilir. Yüzeysel erozyonu, aynı zamanda zemin-kaya oluşumunda görülen döngüde doğal bir süreçtir. Yüzeysel erozyonu, insan yapısı toprak yapılarında (karayolu ve demiryolu dolguları ile sulama kanalları toprak kaplamalarında vb.) da meydana gelebilmektedir.

İnşaat mühendisliği toprak işleri uygulamalarında, zemin içinde yer alan ince daneli malzemelerin, sızma ortamında bulunan boşluklardan veya değişik faktörlerin etkisi ile dolgu içinde oluşan çatlaklardan basınçlı boru akımı etkisi altında taşınması ve bu işleme bağlı olarak ortamda su taşınmasına neden boşlukların oluşması, genel olarak “**içsel erozyon**” olarak tanımlanır. İçsel erozyonda yüzeysel erozyonundan farklı olarak malzemelerin taşınması sadece su akımı ile gerçekleşir. Bu su akımı bazen sızma akımı iken bazen de çatlaklarda basınçlı boru akımı şeklinde olabilmektedir. İçsel erozyon, özetele su tutan dolgu yapılarında dolgu ve temellerindeki malzemelerin sızma ve basınçlı boru akımıyla taşınmasıdır. İçsel erozyon, su depolayan yapılarda kendini su kaçağının görülmesiyle belli eder. Bu iki farklı erozyon tipinde de erozyona neden olan suyun kimyasal özellikleri ile erozyona uğrayan zeminlerin fiziko-kimyasal içerikleri erozyonla taşınan malzeme miktarını büyüklüğünü belirlemekte ve işlemin oluşma hızını etkilemektedir.

İçsel erozyon, üstten aşma gibi dolgu baraj göçme modlarından sayılır. Dolgu barajların yaklaşık %30~50'sinin içsel erozyon sonucu göçtüğü bilinmektedir (Foster vd., 2000). İçsel erozyon beş farklı biçimde gerçekleşir. Dolgu barajlarda içsel erozyon biçimlerinin meydana geldikleri yer, zemin türü ve içsel erozyona neden olan akım tipi özet halinde tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. İçsel erozyon biçimleri ve özellikleri

İçsel erozyon biçimi	Meydana geldiği yer		Zemin türü		Akım tipi	
	Dolgu	Temel	Kohezyonlu	Kohezyonsuz	Sızma	Basınçlı boru akımı
Borulanma	✓	✓		✓	✓	✓
Toplam geriye doğru erozyon	✓			✓	✓	
Kaçak erozyonu	✓	✓	✓			✓
Kontak Erozyonu	✓	✓	✓	✓	✓	
Süfüzyon/Sufozyon	✓	✓		✓	✓	

Tablo 1’de verilen içsel erozyon biçimlerinden kaçak erozyonu, dolgu barajlarda özellikle enine ve yatay çatlakların duvarlarını aşındırarak gelişen içsel erozyon biçimidir. Bunun yanında 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.

Bu çalışmada kaçak erozyon mekanizmasıyla gelişen içsel erozyon için ince daneli zeminlerin erozyon dirençlerinin belirlenebilmesi için geliştirilen test ekipmanları ve bu test ekipmanlarıyla yapılan çalışmalar sunulacaktır. Kaçak erozyonunun meydana geldiği kohezyonlu (ince daneli) zeminlerin erozyon direnci, erozyonun başladığı “**kritik kayma gerilmeleri (τ_c)**” ve erozyonla malzeme taşınımının ne kadar hızlı gerçekleştiğini gösteren “**erozyon oranı (\dot{E})**” ile belirlenir. Erozyon direnci; kritik kayma gerilmeleri arttıkça ve/veya erozyon oranı azaldıkça; artar.

2. Test Ekipmanları ve Yapılan Çalışmalar

Zeminlerin erozyon davranışının incelenmesinde çok çeşitli deney ekipmanları kullanılmıştır. Bu deney sistemlerinde geçmişten bugüne ciddi oranda bir gelişme kaydedilmiştir. Başlangıçta açık kanallarda gerçekleştirilen araştırmalar, özellikle ölçüm teknolojilerindeki gelişmeler ile dolgu barajlardaki çatlaklarda ve boşluklarda meydana gelen içsel erozyon davranışının benzerinin laboratuvar ortamında oluşturulmasını sağlamıştır. Kaçak erozyonunda zeminlerin erozyon direnci ile ilgili yapılan çalışmalar zemin örneklerinde oluşturulan delik, çatlak ve yarık gibi basınçlı boru akımının geçebileceği malzemeler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çatlaklarda

oluşan akım boru hidroliğinin temel prensipleriyle açıklanmıştır. Erozyon direnci parametreleri; akımın debi ölçümlerine ve basınçlı akımın geçtiği çatlağın/boşluğun değişen boyutuna bağlı olarak değerlendirilmiştir. Erozyon test sistemleri iki başlık halinde incelenecektir.

2.1. Yüzey Erozyon Test Ekipmanları

2.1.1. Kanal Erozyon Testi

Bu deneyde, açık bir kanala serilen zeminlerin üzerinden su akımı geçirilerek zeminlerin erozyon davranışı incelenmiştir. Gibbs (1962) tarafından kil zeminlerin hidrolik taşınım kuvvetleri, bu deney ile belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan numunelerin büyük çoğunluğu, düşük plastisiteli silt ve kil (ML ve CL) türü zeminlerdir. Araştırmacı, 45 farklı zeminin erozyon davranışını inceleyerek erozyon davranışını; plastisite, yoğunluk ve dane çapı dağılımları ile ilişkilendirmiştir. Elde ettiği verilere göre; zeminlerin erozyona karşı direncini gösteren kritik kayma gerilmesi değerleri; 0.72-2.87 Pa arasında değişmiştir. Kil zeminlerin; siltli ve killi kumlara göre erozyona karşı direnci yüksektir. Plastisite indisi, erozyon direncinde başlıca etkenlerden biridir. Kumlu ve çakıllı zeminlerde dane çapı dağılımı; erozyona karşı direncin belirlenmesinde yüksek oranda etkilidir. İnce daneli zeminlerin erozyona karşı direncinin belirlenmesinde, dane çapı dağılımının plastisite indisine göre etkisi daha azdır. Zeminlerin yoğunluğu, erozyona karşı direncin belirlenmesinde çok belirleyici değildir. Likit limitin (LL) zeminlerin erozyona karşı direncinin belirlenmesinde yoğunluğa göre daha etkili bir faktör olduğu ve yüksek likit limite sahip zeminlerin erozyona karşı dirençlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Yazar, yapılan deneylerden elde edilen verilere; zeminlerin tanımlanmasında kullanılan plastisite kartının A hattına bağlı olarak erozyon potansiyelinin değerlendirilebildiği bir yaklaşım önermiştir.

Aynı deney Lyle ve Smerdon (1965) tarafından kanala gevşek bir şekilde yerleştirilen malzemenin deneyden önce doygun hale getirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Deneylerde zeminler sıkıştırılmadığı için su muhtevası ve yoğunluklar kontrol edilememiştir. Kanalda gözle görülür önemli bir erozyon görüldüğü andaki kritik taşınım kuvvetleri kritik hidrolik kayma gerilmeleri olarak dikkate alınmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, boşluk oranı (e) ve plastisite indisi (PI) ile kritik kayma gerilmeleri arasında ilişkiler önerilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen verilere göre: kritik kayma gerilmelerinin tipik değeri 0.96 Pa olarak bulunmuştur. Kritik kayma gerilmesi değeri boşluk oranıyla doğrusal olarak değişmektedir. Kritik kayma gerilmesi değeri; plastisite indisi arttıkça artmaktadır.

Kandiah ve Arulanandan (1974) tarafından Yolo killeri üzerinde kanal erozyon deneyleri yapılmıştır. Deneylerde % 11 kil, % 49 silt ve % 40 kum olan ve mineral içeriği montmorillonit, kaolinit, mika ve vermikülitten oluşan zeminler, sodyum adsorbsiyon oranı (SAR) ve toplam çözünmüş tuz oranı (TDS) bilinen solüsyonla karıştırılmıştır. Doymun ve doymun olmayan zemin örnekleri kanal erozyon deneyinde değerlendirilirken; sadece suya doymun olan zeminler daha sonra değinilecek Dönen Silindirik Erozyon Testinde ele alınmıştır. Buna göre: erozyon oranı, kayma gerilmeleri arttıkça artmaktadır. Farklı SAR değerlerinde hem dönen silindirik deneyi hem de kanal deneyinden elde edilen kritik kayma gerilme değerleri benzerdir; ancak erozyon oranı, dönen silindirik erozyon deneyinde daha büyük elde edilmiştir. Karıştırılan solüsyondaki TDS'nin artmasıyla kritik kayma gerilmesi değerleri düşmektedir. Buna rağmen erozyon oranı artarken SAR değerleri de yükselmektedir. Düşük SAR değerlerine sahip doymun numunelerde, su muhtevasının kritik kayma gerilme değeri üzerine etkisi çok düşüktür. Sadece kritik kayma gerilme değeri aşıldığı zaman erozyon oranı, su muhtevasının artmasıyla artmaktadır. Doymun olmayan zemin numunelerinde kritik kayma gerilmesi değerleri su muhtevasına bağlıdır. Su muhtevası arttıkça şişme oranları düşmüş, kritik kayma gerilmeleri artmıştır.

Arulanandan ve Perry (1983) yapılan deneylerde elde edilen kritik kayma gerilmesi değerlerini; dielektrik dispersiyon kavramı ve bu kavrama paralel olarak boşluk sıvısının SAR ve erozyona neden olan sıvının TDS'sine bağlı olarak tahmin etmişlerdir. Dielektrik dispersiyon, kil mineralojisi ve miktarına bağlıdır ve katyon değişim kapasitesinin (CEC) fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Deneyler sonucunda kritik kayma gerilmesinin; kil mineralojisinden, ağırlıkça kil yüzdesinden, erozyona neden olan sıvının kimyasal içeriğinden, pH değerinden, sıcaklık ve organik madde varlığından etkilendiği belirtilmiştir. Aynı kayma gerilmelerinde erozyon oranları; erozyona neden olan sıvının TDS'si düştükçe artmaktadır. Baraj örneklerinde (29 adet) yaptıkları çalışmalar sonucunda; genel olarak kritik kayma gerilme değeri $\tau_c \leq 0.4$ Pa bulunan barajlarda borulanma olayı yaşanmıştır. Tam tersi $\tau_c > 0.4$ Pa'dan büyük olduğu barajlarda borulanma olayı yaşanmamıştır. Dispersif olmayan bazı zeminlerin, düşük erozyon direncine sahip oldukları belirlenmiştir. Yapmış oldukları bu çalışmayla zeminleri erozyon potansiyeli bakımından kritik kayma gerilmesine bağlı olarak üç kategoriye ayırmışlardır (**Kategori 1:** $\tau_c \leq 0.4$ Pa, Erozyon direnci düşük zeminler; **Kategori 2:** $0.4 < \tau_c < 0.9$ Pa, Orta derecede erozyon direnci olan zeminler; **Kategori 3:** $\tau_c \geq 0.9$ Pa, Erozyon direnci yüksek zeminler).

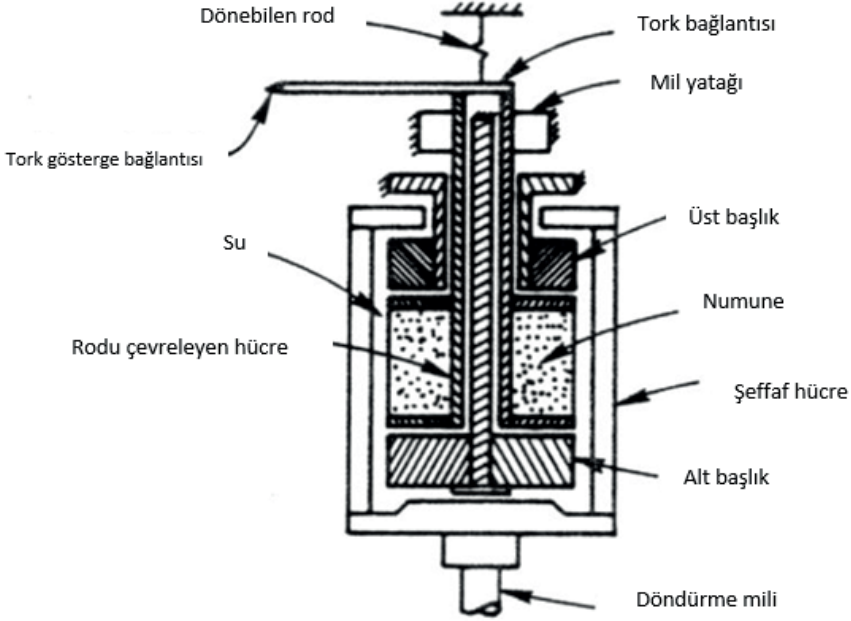
Shaikh vd. (1988a), suya doymun olmayan sıkıştırılmış Sodyum-Montmorillonit kilinde deneyler yapılmıştır. Silis karıştırılarak elde edilen

numunelerde değişik yüzdelerde (kuru ağırlıkça % 100, 70, 40 ve 10) Na-Montmorillonit kili kullanılmıştır. Numuneler; 700 kPa altında statik olarak farklı su muhtevalarında (± 5 % optimum su muhtevasında) sıkıştırılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre: her numune için erozyon oranı sabittir. Erozyon oranı ile kayma gerilmeleri arasındaki ilişki doğrusaldır ve eğri orijinden başlamaktadır. Kritik kayma gerilmesi, suya doymun olmayan Na-Montmorillonit kil zeminleri için sıfırdır. Erozyon oranı için bir katsayı belirlenmiştir. Bu katsayı zeminlerdeki kil oranı arttıkça düşmektedir. Yani kil oranı arttıkça erozyon oranı azalmaktadır. Erozyon oranı katsayısı, numunelerin Veyn kesme dayanımı arttıkça azalmaktadır. Ancak yazarlar bu genellemenin tüm zeminler için yapılamayacağını belirtmişlerdir. Zeminlerin sıkıştırılması esnasındaki su muhtevasının net bir şekilde erozyon oranını etkilediği görülmüştür.

2.1.2. Dönen Silindirik Erozyon Testi

Bu testte, su dolu hücre içerisine yerleştirilen zemin numunesinin içinden geçen rod yardımıyla döndürülmesiyle zemin yüzeyinde meydana gelen erozyon davranışı incelenmiştir. Moore ve Masch (1962), dönen silindirik erozyon testinde yaptıkları çalışmalarda % 60 kil (montmorillonit) ve % 40 kumdan oluşan sıkıştırılmış zeminleri kullanmışlardır. Yapılan deneylerin sonuçlarına göre kritik kayma gerilmesinin tipik değeri 9.6-14.4 Pa arasında değişmiştir. Arulanandan vd. (1973); Masch vd. (1963) tarafından yapılan dönen silindirik erozyon testini modifiye ederek geliştirmişlerdir (Şekil 1). Deneyler Yolo zeminleri üzerinde yapılmıştır. Yolo zeminleri, % 46 kum; % 35 silt ve % 19 kil içeriğine sahiptirler. Kil mineralojileri; montmorillonit, kaolinit, mika ve vermikülitten oluşmaktadır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre: Erozyon oranı kayma gerilmeleriyle doğrusal olarak değişmekte ve artmaktadır. Kritik kayma gerilmesi, SAR değerinin artmasıyla doğrusal olmayan bir şekilde azalmaktadır. Belirli bir SAR değerinde; kritik kayma gerilmesi, TDS arttıkça azalmaktadır. Belirli bir TDS'de, SAR değeri arttıkça kritik kayma gerilmesi doğrusal olmayan bir şekilde azalmaktadır. Boşluk sıvısının SAR değeri arttıkça veya TDS'si düştükçe; zeminin folükülasyon derecesi düşmekte ve partiküller arası bağlar zayıflamaktadır. Bununla beraber, zeminler erozyona karşı daha hassas hale gelmektedirler. Belirli bir SAR değerinde; su muhtevası ve TDS sabit tutulması halinde; erozyona neden olan sıvının, TDS'si arttıkça kritik kayma gerilmesi artmaktadır. Kritik kayma gerilmesi, aynı kil mineralojisinde SAR değerinin artmasıyla doğrusal olmayan bir şekilde azalmaktadır. Belirli bir SAR değerinde; ağırlıkça kil içeriğinin, TDS ve su muhtevasının sabit olduğu bir deney serisinde kritik kayma gerilmesi arttıkça dielektrik dispersiyon değeri

azalmaktadır. En yüksek şişme potansiyeline sahip olan montmorillonit kili, en yüksek kritik kayma gerilmesi değerini vermektedir.



Şekil 1. Arulanandan vd. (1973) tarafından geliştirilen dönen silindirik erozyon testi

Arulanandan vd. (1975), örselenip yoğurulmuş suya doymuş zeminlerin aşınabilirliğini, boşluk sıvısının içeriğine ve erozyona neden olan sıvının TDS'sine bağlı olarak dönen silindirik erozyon test ekipmanında incelemiştir. Deneyler, Yolo zeminleri üzerinde yapılmıştır. Boşluk sıvılarının içeriği; değişik SAR ve TDS'si farklı olan solüsyonların karışımıyla elde edilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre: Belirli TDS ve su muhtevasında erozyon oranı kayma gerilmelerinin artmasıyla doğrusal bir şekilde artmaktadır. Kritik kayma gerilmesi, SAR değerinin artmasıyla doğrusal olmayan bir şekilde azalmaktadır. Düşük SAR değerlerinde; kritik kayma gerilmesi, SAR değerinin çok az artış göstermesi halinde çok hızlı bir düşüş göstermektedir. Belirli bir SAR değerinde, kritik kayma gerilmesi TDS'nin artmasıyla artmaktadır. Zeminlerdeki zamana bağlı şişme oranı yüksekse, SAR değeri de yüksek elde edilmektedir. SAR değerinin yüksek olması; zeminlerin iç yapısının dağılması, yüksek oranda şişmesi ve partiküller arası bağlarının zayıf olması anlamına gelmektedir. Belirli bir SAR değeri, TDS ve belirli su muhtevasında; erozyona neden olan sıvının TDS'si arttıkça kritik kayma gerilmesi artmaktadır.

Sargunan (1977), konsolide edilmiş kohezyonlu zeminlerin, erozyon davranışını incelemiştir. Zemin numuneleri; ağırlıkça % 80 silt (Yolo zeminlerinden elde edilen) ve % 20 kil (Kaolinit veya İllit) karışımından elde edilmiştir. Zemin numunelerini, farklı TDS ve SAR değerlerinde incelemek için solüsyonlar kullanılmıştır. Deneylerde kontrol edilen parametreler; kil mineralojisi, katyon oranı ve TDS olmuştur. Erozyon deneyine tabi tutulan zemin numuneleri suya doygun halde iken konsolidasyon deneyi yapılmıştır. Deneylerden elde edilen verilere göre: Erozyon oranı kayma gerilmesine bağlı olarak doğrusal olarak değişmektedir. Kritik kayma gerilmesi, SAR değerindeki artışa bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde azalmaktadır. Belirli bir SAR değerinde, kritik kayma gerilmesi TDS'nin artmasıyla artmaktadır. Kritik kayma gerilmelerinin sıfır olduğu değerler için SAR değerleri elde edilmiştir.

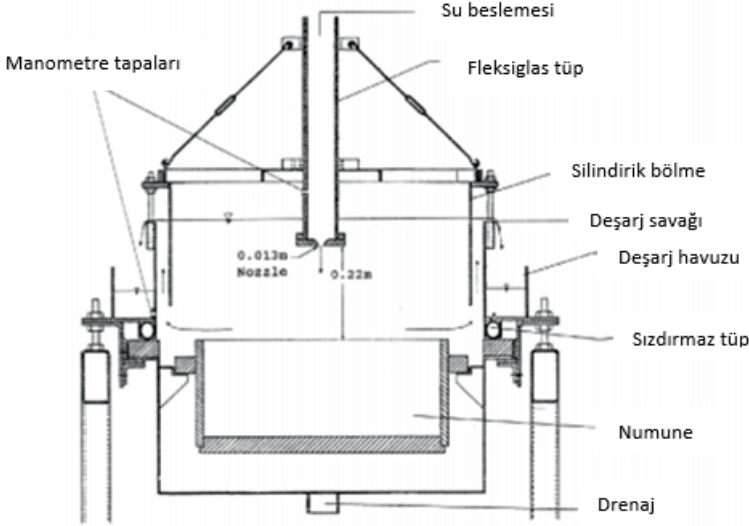
Chapuis ve Gaiten (1986) ile Chapuis (1986a, 1986b); dönen silindirik erozyon testini geliştirerek örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde deneyler yapmışlardır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre: Deney için numune hazırlama yöntemleri sonuçları etkilemiştir. Üç eksenli deney hücresinde konsolide edilerek hazırlanan numunelerin yüzeyleri pürüzsüz olmaktadır. Bu nedenden dolayı örselenmemiş numunelere göre erozyon dirençleri yüksek çıkmaktadır. Örselenmiş numunelerde konsolidasyon basıncı arttıkça kritik kayma gerilmesi artmaktadır. Erozyon oranı; kayma gerilmelerinin kritik kayma gerilmelerinden düşük olması durumlarında konsolidasyon basıncının artmasıyla azalmaktadır. Kritik kayma gerilmesi değerleri üç doğal kil için, 4.2-8.0 Pa arasında değişmiştir.

2.1.3. Jet Erozyon Testi

Hazırlanan zemin numunesinin yüzeyine su jeti şeklinde suyun çarpmasıyla oluşan oyulmalara bağlı olarak erozyon davranışının incelendiği deney sistemidir. Dunn (1959), bu sistemle açık kanal tabanlarındaki kohezyonlu zeminlerin erozyon direncini araştırmıştır. Erozyonun başladığı kritik kayma gerilmeleri ile veyn kesme deneyinden elde edilen zeminlerin kesme dayanımı arasındaki ilişkinin verildiği çalışmalardan elde edilen sonuca göre; kritik kayma gerilmeleri ile veyn kesme deneyinden elde edilen drenajsız kesme dayanımları doğru orantılıdır.

Moore ve Masch (1962), yapılan deneylerde su jetini dik bir şekilde çapı 127 mm ve yüksekliği 102 mm olan bir zemin numunesine çarptırmışlardır. Sabit jet hızında numunenin 60 dakika boyunca oyulması sağlanmıştır. Her 10 dakikada bir kütle kaybı ölçülerek oyugun derinliği hesaplanmıştır. Her defasında su jetinin hızı artırılarak yukarıdaki prosedür tekrarlanmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda numunedeki oyulma derinliği; su jetinin yüksekliği, çapı, hızı, su jetinin uygulanma süresi, erozyona neden olan sıvının yoğunluğu, dinamik viskozitesi ile ilişkilendirilerek oyulma direncinin fonksiyonu belirlenmiştir. Hanson (1991,1992), deneyleri kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminler üzerinde şekil 2’de gösterilen deney sisteminde gerçekleştirmiştir.



Şekil 2. Jet erozyon test ekipmanı (Hanson'dan, 1991)

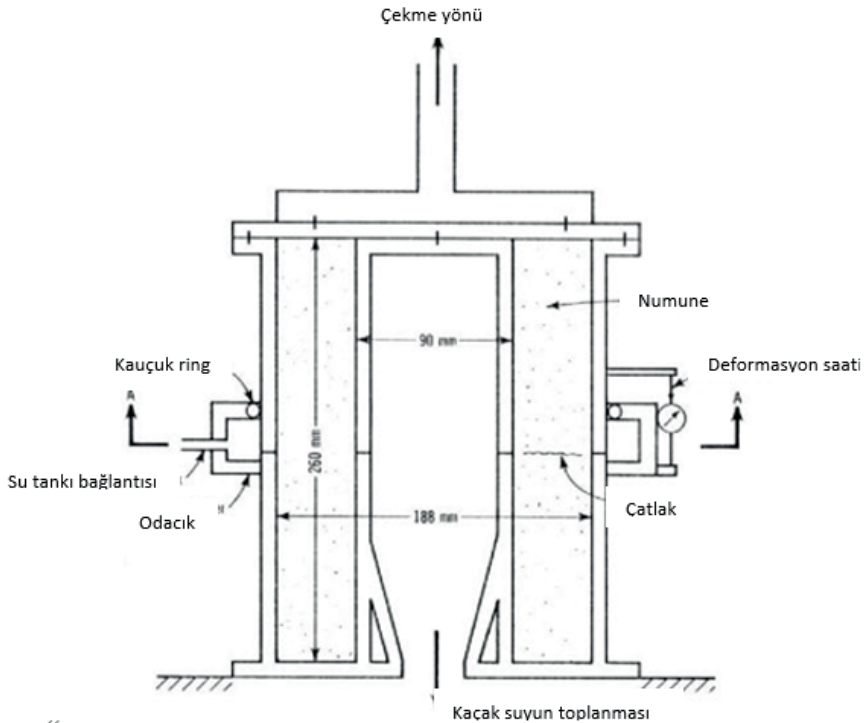
Hanson ve Robinson(1993), farklı kuru yoğunluklarda ve su muhtevalarında sıkıştırılan zeminlerin erozyon direncinin belirlenmesi için deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bulunan sonuçlar, kanal testinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deneylerin yapıldığı zeminler CL ve CL-ML'dir. Zeminler ağırlıkça % 34 kum, % 39 silt ve % 27 kil ihtiva etmektedirler. İğne deliği ve dağılma deneyi sonucunda zeminlerin % 44 oranında dispersif karakter gösterdiği görülmüştür. Zeminler hem dinamik hem de statik olarak farklı su muhtevaları ve kuru yoğunluklarda sıkıştırılmışlardır. Numuneler testlerden önce 20 saat suda bekletilmişlerdir. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre: belirli bir su muhtevasında sıkıştırılan numunelerde kuru yoğunluk arttıkça erozyon direncinde artış meydana gelmiştir. Aynı kuru yoğunluklarda, yüksek su muhtevası erozyon direncinde artış sağlamaktadır. Fakat suya doymun numunelerde yüksek su muhtevalarında erozyon direncinde azalma olmaktadır. Aynı su muhtevasına ve kuru yoğunluğa sahip numunelerin dinamik ve statik halde hazırlanmaları durumunda erozyon dirençlerinde çok az bir değişiklik olmaktadır. Jet erozyon testinden elde

edilen sonuçlar ile kanal testinden elde edilen sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

2.2. İçsel Erozyon Test Ekipmanları

2.2.1. Kaçak Erozyon Testi

Hjeldnes ve Lavania (1980) tarafından geliştirilen bu deney ekipmanında çatlak ve bu çatlakta oluşan kaçağın meydana getirdiği erozyon davranışı incelenmiştir. Deney ekipmanı şekil 3'de gösterilmiştir. Deneyde kullanılan zemin numuneleri, standart proktor metoduyla bilinen su muhtevalarında sıkıştırılmışlardır. Numunenin orta bölgesinde yatayda çatlak oluşturmak için zemin numunesi deney ekipmanı yardımıyla önceden belirlenmiş oranlarda çekme deformasyonuna maruz bırakılmıştır. Arzu edilen hidrolik eğimde su akımı verilerek çatlaktan meydana gelen kaçak ve erozyona uğramış malzeme miktarları ölçülmüştür.

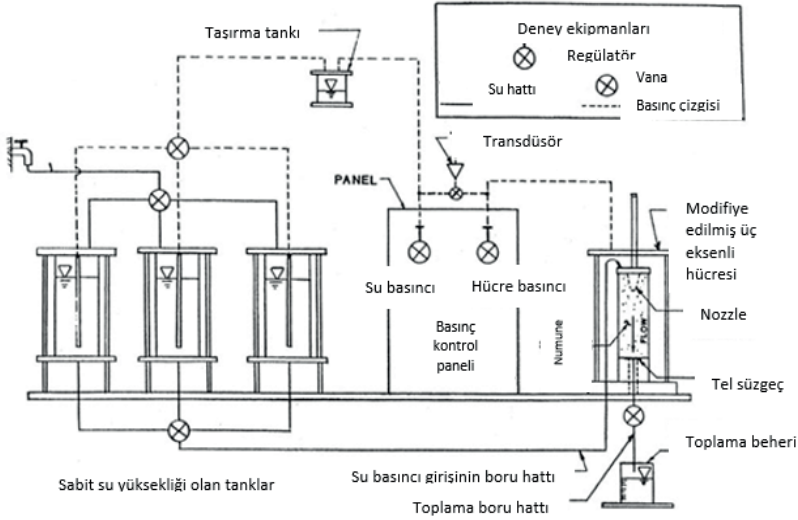


Şekil 3. Kaçak erozyon test ekipmanı (Hjeldnes ve Lavania, 1980)

İki farklı zemin türünde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre: Buzul morenlerinde oluşan çatlaklar kendi kendini iyileştirmişlerdir. Çatlakta meydana gelen erozyon zamanla azalmış ve durmuştur. $w_{opt} -3$ 'de kuru tarafta sıkıştırılmış zemin numuneleri, w_{opt} 'da sıkıştırılanlara göre daha küçük çekme deformasyonlarında çatlak oluşturmuş ve çatlaktan dolayı oluşan kaçak ve erozyon miktarı daha fazla olmuştur. Siltli-killi kum zeminlerde çatlağın kendi kendini iyileştirmesi görülmemiştir. Erozyon, belirli bir çekme deformasyonunda gelişmiş ve zamanla artmıştır. $w_{opt} +3$ 'de sıkıştırılan zeminlerde, erozyonda ani bir artış meydana gelerek numuneler dağılarak parçalanmıştır. $w_{opt} -3$ 'de sıkıştırılan zeminler, w_{opt} 'da sıkıştırılan zeminlere göre çatlağın gelişimi için daha büyük çekme deformasyonlarına maruz bırakılmıştır. $w_{opt} -3$ 'de sıkıştırılan zeminlerin erozyon oranı w_{opt} 'da sıkıştırılanlarla aynı olmuştur.

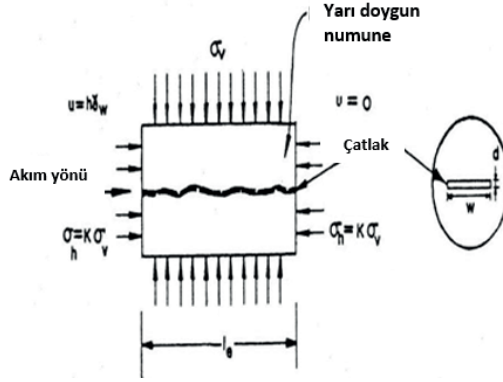
2.2.2. Üç Eksenli Erozyon Testi

Sanchez vd. (1983) tarafından geliştirilen deney ekipmanında beş farklı dolgu barajın çekirdek zeminleri üzerinde deneyler yapılmıştır. Geleneksel üç eksenli test cihazının modifiye edilmesi ile elde edilen deney sistemi Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4. Üç Eksenli Erozyon Test Ekipmanı'nın şematik gösterimi (Sanchez vd.,1983)

Zemin numuneleri, çapı 7,1 cm ve yüksekliği 5,5 cm olan yandan açılabilir kalıplarda sıkıştırılarak hazırlanmıştır. İnce bir bıçak yardımıyla numunelerde yükseklik boyunca yarık(çatlak) oluşturulmuştur (Şekil 5).

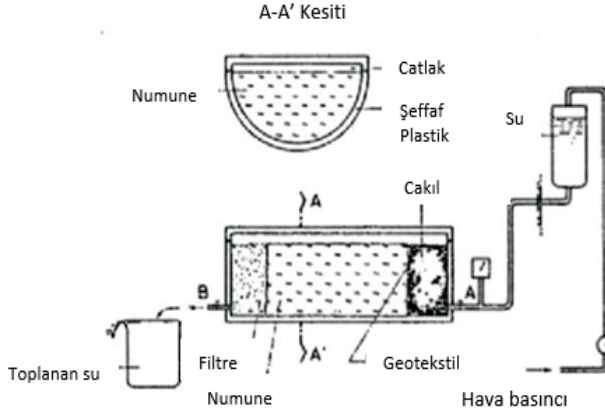


Şekil 5. İnce bir bıçak yardımıyla oluşturulan yarık (Sanchez vd., 1983)

Erozyonu sağlayan suyun yarıktan ilerleyebilmesi için nozle kullanılmıştır. Deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlara göre: optimum su muhtevasında siltlerde sıkıştırılma esnasında elde edilen yoğunluğun erozyona etkisi düşüktür. Killerde ise yoğunluk azaldıkça erozyon oranı artmaktadır. Sıkıştırma su muhtevası, siltlerin erozyonunda önemli bir etkidir. Killer de ise çok da önemli olmadığı görülmüştür. Zemin numuneleri, optimum ve ıslak tarafta sıkıştırıldığında erozyon azalmaktadır. Tam tersi kuru tarafta hazırlanan numunelerde ise erozyon artmaktadır. Erozyon oranı, erozyonu sağlayan sıvının TDS'sinin azalmasıyla artmaktadır. Bu artış, silt zeminlerde kil zeminlere göre daha kayda değer görülmüştür.

2.2.3. Çatlak Erozyon Testi

Maranha das Neves (1987,1989) tarafından geliştirilen deney sistemi şekil 6'da gösterilmiştir. Sıkıştırılan zeminler, düşey eksenleri boyunca ortadan ikiye kesilerek yarım silindir şeklinde zemin numuneleri elde edilmiştir. Yarım silindir zeminler; şeffaf permeametrelerin içerisine üst taraflarında 5 veya 2,5 mm boşluk kalacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Giriş akımının olduğu bölgeye çakıl ve geotekstiller yerleştirilerek üniform akım elde edilmeye çalışılmıştır. Akımın zemin numunelerinden çıkış noktasına filtre yerleştirilmiştir. Permeametrenin eğimi değiştirilerek deneyler yapılmıştır.

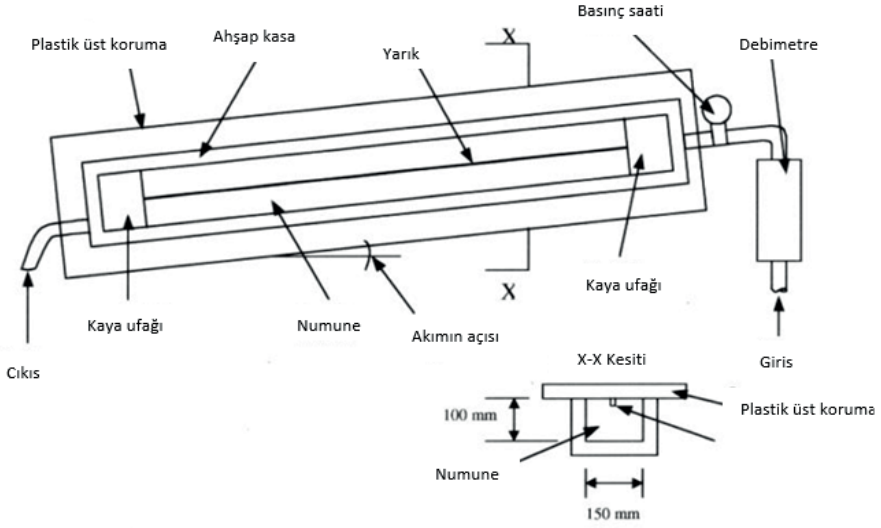


Şekil 6. Çatlak Erozyon Test Ekipmanı (Maranba das Neves, 1987)

Düşük akım hızlarında, permeametrenin eğimi erozyonu etkilemektedir. Muhafazakâr bir şekilde tasarlanan filtre, çatlağın kendi kendini iyileştirmesine kadar görevini yapamamıştır. Bu çalışmada özellikle deney süresinin deney sonuçlarının kıyaslanmasında önemli bir etken olacağı kabul edilmiştir.

2.2.4. UNSW (University of New South Wales) Yarık Erozyon Testi

Cedeno (1998) tarafından tasarlanan ekipmanla, dolgu barajlarda meydana gelen borulanma türü içsel erozyon araştırılmıştır (Şekil 7). Deneyler, sıkıştırılmış doygun olmayan zeminlerin yarılp deney sistemine yerleştirilmesiyle yapılmıştır. Orta plastisiteli, kumlu çakıllı kil zeminler üzerinde deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan zeminlerin özellikleri; orijini şeyl olan kalıntı zeminlerdir. İğne deliği deneyi karakteristikleri D1 ve D2'dir. Dağılma deneyi sınıfı K2'dir.



Şekil 7. UNSW yarık erozyon test ekipmanının şematik gösterimi (Cedeno, 1998)

Deneyler sonucunda elde edilen sonuçlara göre: ıslak tarafta hazırlanan ve sıkıştırılırken kompaksiyon enerjisinin fazla uygulandığı zeminlerde borulanma tipi erozyona karşı direnç yüksektir. Kuru tarafta hazırlanan ve sıkıştırılırken kompaksiyon enerjisinin düşük tutulduğu zeminlerde borulanma tipi erozyon direnci düşüktür. Su akımının durdurulup, yeniden başlatılmasıyla erozyon oranında ani bir artış elde edilmiştir. Deneyde zemin numunesinin tam yatay olmaması yani yatayla açı verilmesi erozyon oranını etkilemektedir.

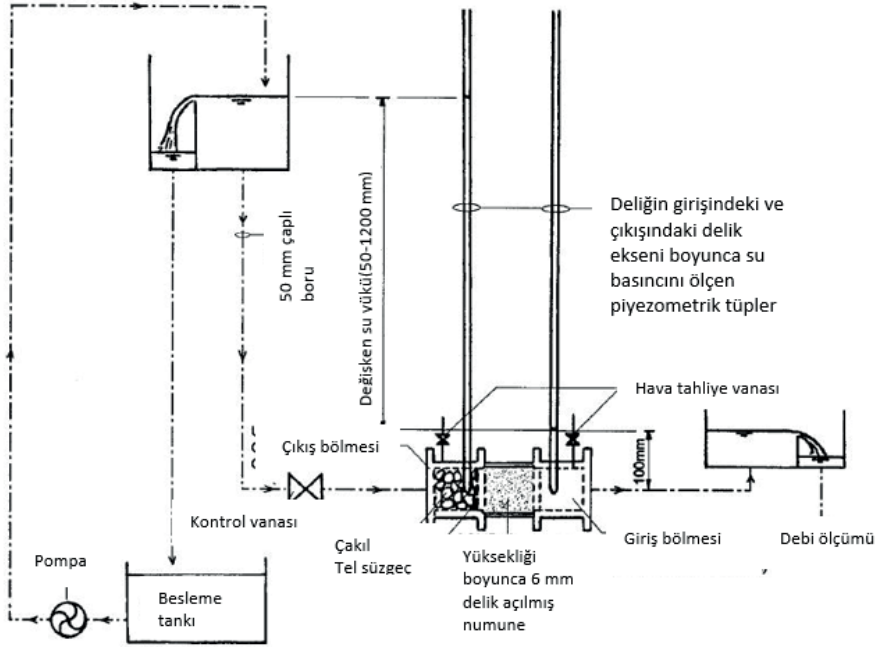
Wan ve Fell (2002) , UNSW yarık erozyon testini delik erozyon testiyle birlikte yaparak ikisi arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmışlardır. İki deneyden de elde edilen sonuçlar; $r^2=0.93$ gibi yüksek regresyon katsayısı oranında birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Bu elde edilen sonuçlarla birlikte; özellikle yarık erozyon testine göre daha ucuz, kolay ve az malzemenin kullanıldığı delik erozyon testinin zeminlerin erozyon direncinin araştırılmasında kullanılması önerilmiştir.

2.2.5. Delik Erozyon Testi

Christensen ve Das (1973) tarafından ilk olarak geliştirilen sistem, belirli bir su muhtevasında hazırlanan kohezyonlu zemin numunelerinin yükseklik doğrultusunda belirli bir çapta delinmesi ve bu delikten belirli su yüksekliğindeki su akımının geçirilmesi esasına dayanmaktadır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre: erozyon mekanizması üç aşamada

gerçekleşmektedir. Birinci aşamada erozyon oranı zamanla azalmaktadır. İkinci aşamada ise kararlı ve dengede bir erozyon oranı görülmektedir. Üçüncü aşamada ise, erozyon oranında hızlı bir artış olmaktadır. Kararlı ve denge durumundaki erozyon oranını, kayma gerilmeleri ile ilişkilendirildiğinde çift doğrusallı bir grafik elde edilmektedir. Sabit bir sıcaklıkta ve sabit kayma gerilmelerinde, sıkıştırma su muhtevasının arttırılması erozyon oranını azalmaktadır. Sabit bir sıcaklıkta, sabit sıkıştırma su muhtevasında ve kayma gerilmelerinde erozyona neden olan sıvının sıcaklığının arttırılması ile erozyon oranı artmaktadır. Erozyon oranı, zeminin içeriğine, ağırlıkça kil yüzdesine ve kil mineralojisine bağlı olarak değişmektedir. Suya doymun killerde; yoğunluğun artmasıyla erozyona karşı direnç artmamıştır. Numuneler deneye hazırlanırken deliğin yüzeyindeki oluşan pürüzlülük, yoğunluğun etkisini gölgelemiştir.

Wan ve Fell (2002), Christensen ve Das (1973) tarafından geliştirilen deney sistemini daha da geliştirerek çalışmalar gerçekleştirmişlerdir (Şekil 8). Zemin numunelerinin kuru yoğunluğu; standart proktor deneyinden elde edilen maksimum kuru yoğunluğa oranı % 90-98 sıklık oranlarında olacak şekilde hazırlanmıştır. Zeminler, $w_{opt}-3$, w_{opt} ve $w_{opt}+3$ su muhtevalarında sıkıştırılmışlardır. Deneylerde kullanılan su; Sidney'nin çeşme suyudur. Numunelerin ortasındaki delik el matkabıyla 6 mm çapında olacak şekilde açılmıştır. Deneylerde dispersif ve dispersif olmayan zemin numuneleri kullanılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre: zeminlerin erozyona karşı gösterdikleri direnç, erozyon oranı indeksi (I) ifade edilmiştir. Erozyon oranı indeksi (I) değeri 1 ile 6 arasında değişmektedir. Zeminler bu indekse göre gruplandırılmıştır (Tablo 2). Hızlı bir şekilde erozyona uğrayan zeminler düşük erozyon oranı indeksine sahip olmaktadır.



Şekil 8. Delik erozyon test sisteminin şematik gösterimi (Wan ve Fell, 2002)

Yüksek su muhtevalarında (ıslak tarafta) sıkıştırılan ve büyük kuru yoğunluğa sahip zeminler; düşük su muhtevalarında (kuru tarafta) sıkıştırılan ve küçük kuru yoğunluğa sahip zeminlere göre daha büyük erozyon oranı indeksi değeri vermektedirler. Bazı plastik olmayan iri daneli zeminler, kuru tarafta sıkıştırıldığında ve yüksek kuru yoğunluğa sahip olduğunda yüksek erozyon oranı indeksi vermektedirler.

Tablo 2. Erozyon oranı indeksi (I)

Grup No.	Erozyon Oranı İndeksi (I)	Açıklama
1	< 2	Aşırı hızlı
2	2-3	Çok hızlı
3	3-4	Az hızlı
4	4-5	Az yavaş
5	5-6	Çok yavaş
6	> 6	Aşırı yavaş

Smektit ve vermikülit gibi kil minerallerinin bulunmaması durumunda ve demir oksit gibi bağlayıcı malzemelerin varlığında ince daneli zeminlerin

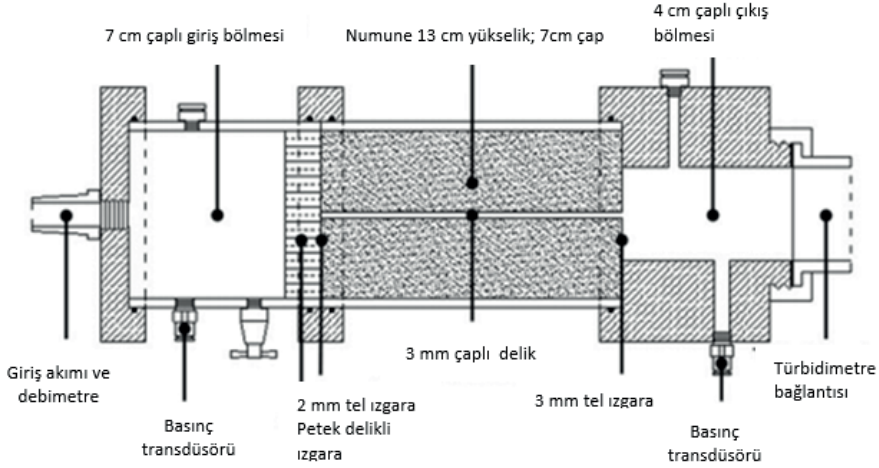
erozyon direnci artmaktadır. Deneylerde bulunan ve erozyonun başlamasını sağlayan kritik kayma gerilmesi değerleri; bir barajda borulanma erozyonun başlama olasılığının değerlendirilmesinde dikkate alınabilir.

Lim (2006), delik erozyon sisteminde numunelerin deneye hazırlanmasında değişikliklere gitmiştir. Mevcut delik açılırken, delik etrafındaki yoğunlaşma ve zeminlerin delik çeperine bulanıp yüksek erozyon direnci göstermesini engellemek için daha keskin auger matkap ucu kullanmıştır. Delik boyunca üniform bir erozyon davranışının görülebilmesi için zemin numuneleri 3 tabaka yerine 5 tabaka halinde sıkıştırılmışlardır. Deney esnasında numunelerin sadece su içinde kalmasından dolayı oluşan yani akımın olmadığı durumdaki erozyon davranışının dikkate alınması için bazı düzeltmelere gidilmiştir. Toplamda 139 deney; 9 doğal kil ve 5 yapay zemin karışımlarında gerçekleştirilmiştir. Elde ettiği verilere göre, delik erozyon test sonuçlarının zeminlerin erozyon davranışında sınırlı bir bilgi sunduğunu belirtmiştir.

Farrar vd. (2007), Wahl vd. (2008) delik erozyon test sistemini hidrolik ölçümler açısından geliştirmişlerdir. Akımın debisini 10°lik bir açığa sahip V tipindeki bir savakla ölçmüşlerdir. Deliğin başlangıcındaki su yükünün 5400 mm'ye çıkabilmesi sağlanmıştır. Deliğin başındaki ve sonundaki akımın basıncı basınç transdüserleriyle ölçülmüştür. Örselenmiş ve örselenmemiş 10 farklı zemin üzerinde deneyler yapılmıştır. Delik erozyon sisteminin sert zeminlerde uygulanmasının zor olduğu belirtilmiştir. Delik girişindeki yetersiz su basıncından dolayı delikte meydana gelen tıkanmaların etkisiyle sert zeminlerin farklı noktalarında göçmeler ve oyulmalar meydana gelmiştir. Delik erozyon test sonuçlarını, jet erozyon testiyle kıyasladıklarında her zaman jet erozyon testinden elde edilen erozyon dirençlerinin, delik erozyonundakilere göre daha az olduğu belirlenmiştir.

Bonelli vd. (2006), Bonelli ve Brivois (2008); mevcut delik erozyon test sistemi üzerinden verilerin analiz edilmesi için yeni bir model geliştirmişlerdir. Böylelikle erozyon karakteristiklerinin, interpolasyona ve ölçüme gerek kalmadan belirlenmesini sağlamışlardır. Marot vd. (2011); delik erozyon testinden elde edilen verileri analiz etmek için yeni bir metod geliştirmişlerdir. Bu metod ile akımın yük kaybına ve erozyona uğrayan malzeme miktarına bağlı olarak zeminleri erozyon direncine göre sınıflandırmışlardır. Luthi (2011), numunenin ortasındaki deliği sonradan açmak yerine numune hazırlanırken kalıbın ortasına rod yerleştirmiştir. Bu rodu, numune sıkıştırıldıktan sonra numune içerisinden çekilerek delik oluşturulmuştur. Bunun yanında deliğin çıkış kısmına pitot tüpü yerleştirilerek akımın hızı ölçülmüştür. Böylelikle delik çapı ve çeperlerinde oluşan kayma gerilmeleri direk hesaplanabilmiştir.

Haghghi vd. (2013); Wan ve Fell (2002) tarafından geliştirilen delik erozyon test sistemini modifiye etmişlerdir. Deney sisteminde numunenin yerleştirildiği hücre ve bağlantı detayları şekil 9'da gösterilmektedir.



Şekil 9. Numunenin yerleştirildiği hücre ve bağlantı detayları (Haghghi vd., 2013)

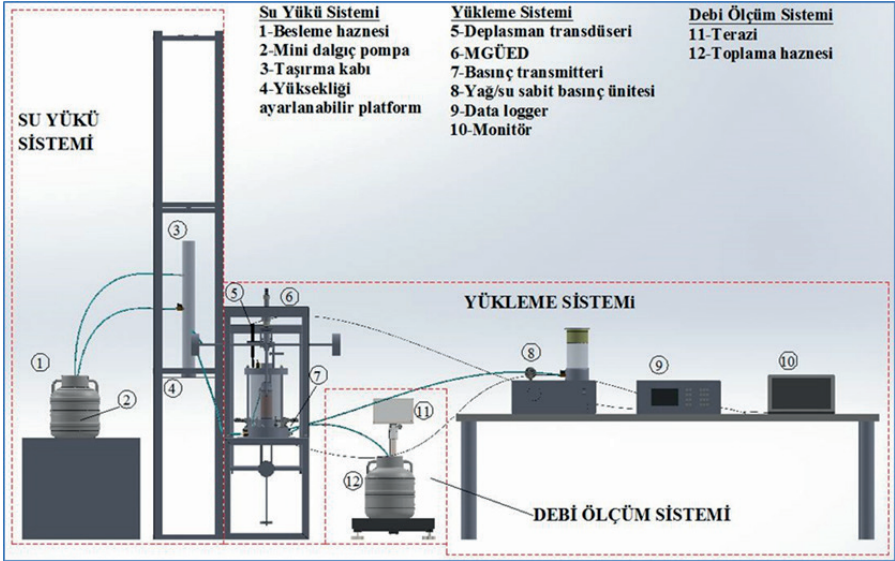
Delige giren ve çıkan suyun basıncının transdüsörlerle ölçülmesi sağlanmıştır. Delige giren suyun basıncı, hava ile basınçlandırılmış 80 litrelik su tankıyla sağlanmıştır. Böylelikle erozyon boyunca deliğin girişindeki ve çıkışındaki basınç farkı sürekli sabit tutulmuştur. Belirli oranlarda karıştırılmış kaolin kili, silt ve kum zeminler deneylerde kullanılmıştır. Başlangıçtaki delik 3 mm olarak açılmıştır. Erozyona uğrayan malzeme miktarı ve buna bağlı olarak delik çapının değişimi deliğin çıkışında kullanılan türbidimetre yardımıyla hidrolik akım hipotezlerinden bağımsız bir şekilde belirlenmiştir.

Mehenni vd. (2016), geliştirdikleri yeni delik erozyon test sistemiyle kil (kaolinit ve bentonit), çimento ve kireç ile iyileştirilen silt zeminlerin içsel erozyon davranışlarını incelemişlerdir. Yeni geliştirilen delik erozyon test sisteminde delige giren suyun basıncı 650 kPa'ya kadar çıkabilirken delik yüzeyinde oluşan hidrolik kayma gerilmeleri de 10.000 Pa'ya kadar çıkabilmektedir. Bu çalışmaya göre: kil ile iyileştirilen silt zeminlerde, erozyon oranı düşmüştür. Aynı oranda bentonit ve kaolinit kullanıldığında erozyon katsayısı bentonit kullanımında daha fazla düşmektedir. Silt zeminlerin kireç ile iyileştirilmesi erozyon dirençlerini artırmıştır. Kritik kayma gerilmesi değerleri artmıştır. Erozyon direncindeki bu artışa kür süresinin bir etkisi olmamıştır. Çimento ile iyileştirme kritik kayma gerilmelerinin artışına neden olmuştur. Erozyon direncindeki bu artış, kullanılan çimento oranı

yüzdesiyle doğrusal olarak artmaktadır. Yüksek oranda çimento kullanımı küçük erozyon katsayılarının elde edilmesiyle sonuçlanmıştır. % 3 çimento katkı oranı, kısa sürede etkisini gösterirken daha fazla orandaki çimento katkısında yüksek erozyon direncine ulaşabilmek için kür süresinin daha uzun tutulmasını gerektirmektedir.

2.2.6. Gerilme Kontrollü Üç Eksenli İçsel Erozyon Testi

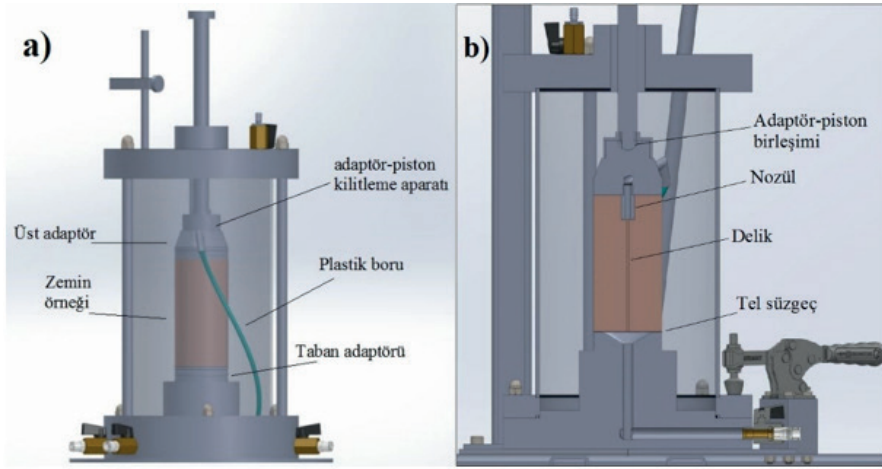
Topçu ve Tosun (2022) tarafından ince daneli zeminlerin erozyon direncinin belirlenebilmesi için yeni bir test ekipmanı geliştirilmiştir (Şekil 10). Bu test ekipmanında aynı zamanda ince daneli zeminlerin, gerilme koşulları altındaki erozyon davranışları da incelenebilmektedir. Su yükü sisteminde silindirik 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.



Şekil 10. Test ekipmanı (Topçu ve Tosun, 2022)

MGÜED (Modifiye Edilmiş Gerilme Kontrollü Üç Eksenli Deney Cihazı) 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. Hücrenin test sırasında stabil halde durması için iki adet manivelalı kelepçe ile alt tablaya tutturulmuştur. Hücre, 70 ve 100 mm çaplı örnekler için kullanılabilen üç eksenli deney hücresidir. Hücre 1000 kPa su basıncına dayanıklı olacak şekilde pleksiglas malzemeden üretilmiştir. Hücrenin 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 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11. a) Hücre içerisine yerleştirilmiş zemin örneği b) Zemin örneğinin boyuna kesit detayı (Topçu ve Tosun, 2022)

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. 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 faydalanılmıştır. 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 laminer; $Re > 3000$ olduğu zaman ise akımın rejimi türbülanslı kabul edilmektedir. Test ekipmanındaki hidrolik modelin ve kapasitenin belirlenmesiyle ilgili diğer detaylar Topçu ve Tosun'da (2022) verilmektedir.

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.

3. Sonuçlar

Dolgu barajların ince daneli zeminlerle inşa edilen çekirdek zonunda değişik nedenlerle oluşan çatlaklarda gelişen kaçak erozyonu için, zeminlerin içsel erozyon dirençlerinin belirlenmesinde kullanılan test ekipmanları geçmişten günümüze doğru yukarıdaki bölümlerde anlatılmıştır.

İnce daneli zeminlerin erozyon dirençlerinin belirlenmesinde kullanılan hidrolik esaslar için zamanla açık kanal hidroliğinden boru hidroliğine geçilmiştir. Boru hidroliğinde de ölçüm teknolojilerindeki gelişmeye bağlı

olarak çok fazla ilerleme kaydedilmiştir. Bunun yanında test ekipmanları boyut olarak küçülürken aynı zamanda deneylerde kullanılan zemin örneği miktarları da azalmıştır. Özellikle son yıllarda dolgu barajlarda meydana gelen çatlakların içerisinde gelişen akımı benzeştirmek için yarı-model deney sistemleri geliştirilmiştir. Test ekipmanlarında ince daneli zeminlerin kimyasal, fiziksel, mekanik, indeks ve yükleme koşullarının içsel erozyon direncine etkisi üzerine çalışmalar yapılmıştır.

KAYNAKLAR

- Arulanandan, K., Loganathan, P., Krone, R. B., 1975, Pore and eroding fluid influences on surface erosion of soil, Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 101, No. GT1, 51-66.
- Arulanandan, K., Perry, E.B., 1983, Erosion in relation to filter design criteria in earth dams, *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(5), 682-698.
- Arulanandan, K., Sargunam, A., Loganathan, P., Krone, R. B., 1973, Application of chemical and electrical parameters to prediction of erodibility, In *Soil erosion: Causes and Mechanisms; Prevention and Control*, Highway Research Board, Special Report 135, 42-51.
- Bonelli, S., Brivois, O., 2008, The scaling law in the hole erosion test with a constant pressure drop. *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 32(13), 1573-1595.
- Bonelli, S., Brivois, O., Borghi, R., Benahmed, N., 2006, On the modelling of piping erosion, *Comptes Rendus Mécanique*, 334(8-9), 555-559.
- 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. (unpublished).
- Chapuis, R. P., 1986 a, Use of rotational erosion device on cohesive soils, *Transportation Research Record*, 1089, 23-28.
- Chapuis, R. P., 1986 b, Quantitative measurement of the scour resistance of natural solid clays, *Canadian geotechnical journal*, 23(2), 132-141.
- Chapuis, R.P., Gatien, T., 1986, An improved rotating cylinder technique for quantitative measurements of the scour resistance of clays. *Canadian geotechnical journal*, 23(1), 83-87.
- Christensen, R. W., Das, B. M., 1973, Hydraulic erosion of remolded cohesive soils. In *Soil Erosion: Causes and Mechanism; Prevention and Control*, Highway Research Board, Special Report 135, 8-19.
- Dunn, I. S., 1959, Tractive resistance of cohesive channels, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers*, 85(SM3), 1-214.
- Farrar, J. A., Torres, R. L., Erdogan, Z., 2007, Bureau of reclamation erosion testing for evaluation of piping and internal erosion of dams. In *Geotechnics of soil Erosion*, p. 1-10.
- Foster, M., Fell, R., Spannagle, M. 2000, The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 1000-1024.
- Gibbs, H.J., 1962, A Study of erosion and tractive force characteristics in relation to soil mechanics properties, U. S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, Report No. EM-643, 57 p. (unpublished).

- Haghighi, I., Chevalier, C., Duc, M., Guédon, S., Reiffsteck, P., 2013, Improvement of hole erosion test and results on reference soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(2), 330-339.
- Hanson, G. J., Robinson, K. M., 1993, The influence of soil moisture and compaction on spillway erosion, *Transactions of the ASAE*, 36(5), 1349-1352.
- Hanson, G.J., 1991, Development of a jet index to characterize erosion resistance of soils in earthen spillways, *Transactions of the ASAE*, 34(5), 2015-2020.
- Hanson, G.J., 1992, Erosion resistance of compacted soils, *Transportation Research Record* 1369, p.26-30.
- 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.
- Kandiah, A., Arulanandan, K., 1974, Hydraulic erosion of cohesive soils, National Research Council, Washington, D. C., Soil Properties, Transportation Research Board Record 497, 60-68.
- Lim, S.S., 2006, Experimental investigation of erosion in variably saturated clay soils, Doctoral Thesis, University of New South Wales, 182 p. (unpublished).
- Lüthi, M., 2011, A modified hole erosion test (het-p) to study erosion characteristics of soil, Doctoral dissertation, University of British Columbia, 133 p. (unpublished).
- Lyle, W.M., Smerdon, E.T., 1965, Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils, *Transactions, American Society of Agricultural Engineers*, 419-422.
- Maranha das Neves, E., 1987, Discussion report, Proceedings, 9th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin, Ireland, p.1367-1373.
- Maranha das Neves, E., 1989, Analysis of crack erosion in dam cores, The crack erosion test, de Mello Volume, Sao Paulo, Brazil, p.284-298.
- Marot, D., Regazzoni, P. L., Wahl, T., 2011, Energy-based method for providing soil surface erodibility rankings, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(12), 1290-1293.
- Masch, F.D., Jr., Espey, W.H., Jr., Moore, W.L., 1963, Measurements of the shear resistance of cohesive sediments. Proceedings of the Federal Inter-Agency Sedimentation Conference, Agricultural Research Service, Publication No. 970, Washington, D.C., p.151-155.
- Mehenni, A., Cuisinier, O., Masrouri, F., 2016, Impact of lime, cement, and clay treatments on the internal erosion of compacted soils, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(9), 1-12.

- Moore, W. L., Masch, F.D., Jr., 1962, Experiments on the scour resistance of cohesive sediments, *Geophysical Research*, 67(4), 1437-1446.
- Sanchez, R.L., Strutynsky, A.I., Silver, M.L., 1983, Evaluation of the erosion potential of embankment core materials using the laboratory triaxial erosion test procedure (No. WES/TR/GL-83-4), Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Geotechnical Lab, 339 p. (unpublished).
- Sargunan, A., 1977, Concept of critical shear stress in relation to characterization of dispersive clays. In *Dispersive clays, related piping, and erosion in geotechnical projects*. ASTM International, 390-397.
- Shaikh, A., Ruff, J.F., Abt, S.R., 1988 a, Erosion rate of compacted Na-montmorillonite soils, *Journal of geotechnical engineering*, 114(3), 296-305.
- Topçu, S., Tosun, H. 2022, Determination of Dispersive Erosion Resistance in Fine-Grained Soils with Newly Developed Test Equipment. *Geotechnical Testing Journal*, 45(1), 38-58.
- Wahl, T.L., Regazzoni, P., Erdogan, Z., 2008, Determining erosion indices of cohesive soils with the hole erosion test and jet erosion test (Hydraulic Laboratory (HL), No. DSO-08-05), Denver, Colorado, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, 62 p. (unpublished).
- Wan, C.F., Fell, R., 2002, Investigation of internal erosion and piping of soils in embankment dams by the slot erosion test and the hole erosion test-interpretative report, 325 p. (unpublished).

