

DOLGU BARAJ GRANÜLER ZEMİNLERİNDE İÇSEL STABİLİTE POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Sadettin TOPÇU^{1*}, Evren SEYREK²

¹ Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, İnşaat Bölümü, Kütahya
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-1306-2502>

² Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kütahya
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-4373-6723>

Anahtar Kelimeler	Öz
Dolgu baraj Sızma İçsel erozyon Sufüzyon Granüler filtre	<i>Dolgu barajların uzun dönemli güvenliği, sızma akımının gerçekleştiği zeminlerin içsel stabilitesine bağlıdır. Sufüzyon/sufozyon, kohezyonsuz zeminlerde görece ince malzemelerin, iri malzemelerin arasındaki boşluklardan sızma akımıyla taşınması olarak tanımlanır. Sufüzyon/sufozyon mekanizmasına bağlı olarak gerçekleşen içsel stabilite bozulmasıyla, granüler filtrelerde geriye doğru erozyon(borulanma) veya boşluk suyu basıncındaki artışa bağlı olarak statik stabilite kaybı gözlemlenebilir. Sufüzyonun gerçekleşebilmesi için iki koşul vardır: Sızma akımının yeterli hidrolik eğime sahip olması ve malzemenin granülometrisinin danelerin taşınmasına elverişli olması. Granüler filtrelerin tasarım ve planlanmasında sufüzyon mekanizmasının önceden belirlenebilmesi için bazı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada, dane çapı dağılım eğrisini kullanarak içsel stabilite potansiyelini belirleyen Istomina, Kezdi, Kenney ve Lau ile Burenkova metotları karşılaştırılmıştır. Eskişehir ili sınırları içerisinde yer alan Gökpınar Barajı'nın yarı-geçirimli malzeme sahasındaki plastik olmayan zeminler üzerinde yapılan çalışmaya göre, yöntemlerin uygulama esasları birbirine benzedikçe aynı değerlendirme sonucunu bulma oranları artmaktadır.</i>

ASSESSMENT OF INTERNAL STABILITY POTENTIAL IN EMBANKMENT DAM GRANULAR SOILS

Keywords	Abstract
Embankment dam Seepage Internal erosion Suffusion Granular filter	<i>The long-term safety of embankment dams depends on the soil's internal stability where seepage occurs. Suffusion/suffosion transports relatively fine materials through the voids between coarse materials by seepage flow in cohesionless soils. Backward erosion (piping) or a loss of static stability can be observed due to increased pore water pressure in granular filters with internal stability deterioration due to the suffusion/suffosion mechanism. There are two conditions for suffusion to occur: The seepage flow must have sufficient hydraulic gradient, and the granulometry of the material must be suitable for the transport of the grains. Some approaches have been developed to predetermine the suffusion mechanism in designing and planning granular filters. In this study, Istomina, Kezdi, Kenney-Lau, and Burenkova methods that determine the internal stability potential of soil using the particle size distribution curve have been compared. According to the study carried out on non-plastic (N.P) soils in the semi-permeable material field of Gökpınar Dam, which is located within the borders of Eskişehir province, the rates of finding the same evaluation result increase as the application principles of the methods are similar.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 19.09.2023

Submission Date : 19.09.2023

Kabul Tarihi : 27.12.2023

Accepted Date : 27.12.2023

* Sorumlu yazar: sadettin.topcu@dpu.edu.tr
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1362774>

1. Giriş

Dolgu barajlar içme suyu, tarımsal sulama, enerji üretimi ve taşkın kontrolü için altyapı hizmeti sunan mühendislik yapılarıdır. Ancak kalitesiz inşaat üretimi, yetersiz kontrol ve bakım nedeniyle üstten aşma veya

içsel erozyon modlarında göçebilmektedirler (Seyrek ve Topçu, 2022). Baraj yıkılmasıyla gelişen taşkınlar can ve mal kayıplarına neden olmaktadır. Kil çekirdekli kaya dolgu baraj olan Gouhou Barajı'nın içsel erozyon modunda göçmesiyle oluşan taşkın nedeniyle 300 kişi hayatını kaybetmiştir (Zhang ve Chen, 2006).



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

İçsel erozyon, Topçu (2020) tarafından şu şekilde tanımlanmaktadır: “İnşaat mühendisliği toprak işleri uygulamalarında, zemin içinde yer alan görece ince malzemelerin, sızma ortamında bulunan boşluklardan veya değişik faktörlerin etkisi ile dolgu içinde oluşan çatlaklardan sızma ve yerçekimi kuvvetleri etkisi altında taşınması ve bu işleme bağlı olarak ortamda su taşınmasına neden olan boşlukların oluşmasıdır” (s. 46). İçsel erozyonun geriye doğru erozyon (borulanma), kaçak erozyonu, toplam geriye doğru erozyon, kontak erozyonu ve sufüzyon/sufozyon olmak üzere beş farklı biçimi vardır (USBR, 2019). Granüler zeminlerde ince malzemelerin iri malzemelerin arasından sızma akımıyla taşınarak zemin iskeletinde geriye sadece iri malzemelerin kalması olayına sufüzyon/sufozyon adı verilir. Bu malzeme taşınımı sonrası hacimsel değişiklik meydana geliyorsa sufozyon; gelmiyorsa sufüzyon adı verilir (Bonelli, 2013). Sufüzyon/sufozyon olayının gelişebileceği zeminler aynı zamanda içsel stabilitesi olmayan zeminler olarak tanımlanır. Milano şehrindeki bir barajda sufüzyon olayı barajın temelinde görülmüştür. Temeldeki görece ince malzemenin taşınmasıyla temelde farklı oturmalar meydana gelmiştir (Cividini vd., 2009). Charles (2001) içsel erozyonun görüldüğü 42 vakanın 20’sinde dolguda oyuklar gözlemlendiğini ve bunlardan birinde de şev göçmesinin gerçekleştiğini bildirmiştir. 1968 yılında inşa edilmiş WAC Bennet Barajı’nda 1996 yılında gerçekleşen sufüzyon olayı neticesinde 2.5 m çapında ve 7 m derinliğinde krette oyuk gözlemlenmiştir (Flores-Berrones vd., 2011). Dolgu barajların granüler filtre tasarımı zeminlerin içsel stabilite potansiyeli dikkate alınması gerekli olan bir tasarım kriteridir (GEO, 1993; ICOLD, 1994; FEMA, 2015). Bunun yanında özellikle heyelan set göllerinin kontrolsüz bir şekilde oluşan doğal seddelerinde de araştırılması gereken bir konudur (Chang, 2012). Sufüzyonun geliştiği zeminlerde porozite artışıyla birlikte permeabilite artabilmekte ve zaman içinde sufüzyon mekanizması geriye doğru erozyona (borulanma) evrilebilmektedir. Diğer taraftan sufüzyon, taşınan ince malzemenin daneler arasındaki mevcut boşlukları doldurmasıyla birlikte tıkanmalara neden olması sebebiyle boşluk suyu basınçlarının artmasına neden olarak statik stabilitenin bozulmasına neden olabilmektedir.

Granüler zeminlerin içsel stabilite potansiyeli geometrik koşullar (dane çapı ve dağılımı, boşluk boyutu, dağılımı ve şekli), mekanik koşullar (sıkıştırma derecesi, kohezyon, efektif gerilme) ve hidrolik koşullar (sızma akımının hidrolik eğimi, yönü, boşluk sıvısının kimyasal özellikleri) dikkate alınarak kontrol edilir (Schuler, 1995). Zeminlerin içsel stabilite potansiyeli pratik olarak dane çapı dağılımı üzerinden belirlenmekte olup birçok araştırmacı sufüzyon/sufozyon potansiyelinin belirlenmesinde farklı yöntemler geliştirmişlerdir (USACE, 1953; Kenney ve Lau, 1985; Fannin ve Moffat, 2006; Wan ve Fell, 2008; Indraratna vd., 2011). Dane

çapı dağılımı eğrisine göre genel olarak, yatay ince kesime ve dikey kaba kesime sahip iyi derecelenmiş zeminler ile boşluklu derecelenmiş zeminlerin içsel stabilitelerinin olmayacağı belirlenmiştir. Sufüzyonun başlaması için sızma akımının yeterli hidrolik eğime sahip olması gerekir. Bu hidrolik eğim kritik hidrolik eğim (i_{cr}) olarak adlandırılır. Yapılan deneysel çalışmalarda yukarı yönlü sızma akımlarındaki kritik hidrolik eğimin aşağı yönlü ve yatay sızma akım durumlarına göre daha büyük olduğu belirlenmiştir (Adel vd., 1988). İçsel stabilitenin bozulduğu kritik hidrolik eğim için efektif gerilmelerin sıfır olarak kabul edildiği yaklaşımlar bulunmaktadır (Terzaghi, 1939; Skempton and Brogan, 1994). Bunun yanında efektif gerilmelerin de dikkate alındığı kritik hidrolik eğim hesabı geliştirilmiştir (Li ve Fannin, 2012). İçsel stabilite potansiyelinin değerlendirilmesinde efektif gerilmenin dikkate alınmadığı kritik hidrolik eğim yaklaşımları sadece yukarı yönlü sızma akımı durumunda kullanılır.

Son yıllarda gerilme koşullarının sufüzyon mekanizması üzerine etkisi bazı araştırmacılar tarafından fark edilmiştir (Fell ve Fry 2007; Richards ve Reddy 2007; Moffat ve Fannin 2011). Moffat ve Fannin (2011) efektif gerilmelerin artmasıyla içsel erozyonu başlatan kritik hidrolik eğimlerin arttığını belirtmişlerdir.

Bu çalışma kapsamında; Eskişehir il sınırları içerisinde yer alan Gökpınar Barajı’nın yarı-geçirimli malzeme sahalarındaki granüler zeminlerin içsel stabilite potansiyeli dane çapı dağılımı eğrileri kullanılarak dört farklı yaklaşıma göre belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Materyal

Bu çalışmada Gökpınar Barajı’ndaki granüler filtre inşaatında kullanılan non-plastik (N.P) yarı-geçirimli malzemelerin içsel stabilite potansiyeli belirlenecektir. Kil çekirdekli kaya dolgu tipinde inşa edilen Gökpınar Barajı, sulama ve içme suyu amaçlı kullanılacaktır. Gökpınar Barajı’nın proje özellikleri Tablo 1’de verilmektedir. Gökpınar Barajı, Eskişehir ili Günyüzü İlçesi Kayakent Beldesine bağlı Sakarya Mahallesi’nin 2.5 km güneybatısında ve Gökpınar deresi üzerindedir (Şekil 1).

Tablo 1. Gökpınar barajına ait proje karakteristikleri

Gövde şevleri (mamba-mansap)	1.0D/1.8Y
Kret kotu (m)	812.00
Talveg kotu (m)	784.00
Temel kotu (m)	759.00
Talvegten yüksekliği (m)	28.00
Temelden yüksekliği (m)	53.00
Kret genişliği (m)	10.00
Kret uzunluğu (m)	528.41
Maksimum su seviyesi (m)	810.93
Normal su seviyesi (m)	808.15
Minimum su seviyesi (m)	787.58

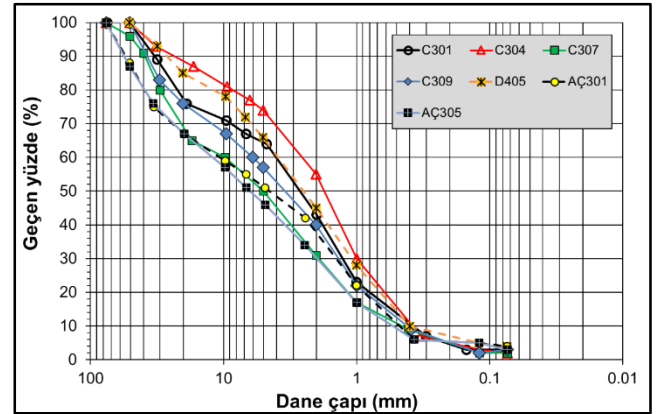


Şekil 1. Proje sahası ve yer bulduru haritası

Gökpinar Barajı projesi kapsamında yarı-geçirimli malzemenin karşılanması amacı ile planlama çalışmalarında C ve D olmak üzere iki adet malzeme sahası belirlenmiştir. Yarı-geçirimli malzeme sahası olarak öncelikle C malzeme sahasının kullanılması, ihtiyacın artması durumunda ise alternatif olarak önerilen D geçirimli malzeme sahasının kullanılması uygun görülmüştür. C malzeme sahasında 11 adet, D malzeme sahasında ise 10 adet araştırma çukuru açılmıştır. C ve D malzeme sahasları için malzeme rezervleri sırasıyla 940.000 m³ ve 330.000 m³ olarak hesaplanmıştır. Malzeme sahaslarından alınan örnekler üzerinde elek analizi, özgül gravite, su emme deneyi, Los Angeles aşınma deneyi, sodyum sülfat (Na₂SO₄) don kaybı deneyi, organik madde ve kil toprakları deneyleri yapılmıştır. İçsel stabilite potansiyeli belirlenecek non-plastik granüler malzemelerin elek analizi sonucu elde edilen dane çapı dağılım eğrileri ve diğer laboratuvar deney sonuçları sırasıyla Şekil 2 ve Tablo 2'de gösterilmektedir. Malzeme örnekleri üzerinde gerçekleştirilen organik madde tayini deneyinde de olumlu sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

Yarı-geçirimli malzeme örneklerinde özgül gravite 2.65'ten büyük olmalı kriterini sağlamaktadır. Los Angeles deneyi için 100 turda en fazla % 10, 500 turda ise en fazla % 40 aşınma kaybı olmalıdır. Buna göre D405 örneği dışında yarı-geçirimli malzemenin Los Angeles aşınma kaybı değerleri bu limitler içerisinde.

Na₂SO₄ don kaybı (%) değerleri kum için % 10; çakıl için % 12 olmalıdır. Malzemeler kullanım limitleri açısından uygundur. Kil toprakları (%) ise kum için en fazla 1; çakıl için 2.5 önerilmektedir. Malzeme örnekleri yine tasarım ve uygulama kriterleri açısından uygundur.



Şekil 2. Dikkate alınan granüler örnekler için dane dağılım eğrileri

2.2 Metot

Çalışma kapsamında dikkate alınan granüler malzemelerin içsel stabilite potansiyeli dane dağılım eğrisi üzerinden belirlenmiştir. Bu esasa göre oluşturulan ve detayları aşağıda verilen dört farklı yaklaşım dikkate alınmıştır. Bu yaklaşımlardan ikisinde üniformite faktörü tarif ederek değerlendirme yapılırken, diğer ikisi ise doğrudan dane çapı dağılımı eğrisi kullanılmaktadır.

Tablo 2. Laboratuvar deney sonuçları

Örnek No.	Özgül Gravite		Los Angeles (% Kayıp)				Na ₂ SO ₄ Don Kaybı (%)					Kil Topakları (%)		USCS Sınıfı
	İnce Agregata (kum)	Kaba Agregata (çakıl-moloz)	İnce Agregata		Kaba Agregata		Tek dane sınıfları (mm)					Kum	Çakıl	
			100 Tur	500 Tur	100 Tur	500 Tur	2.00-4.76	4.76-9.5	9.50-19.0	19.0-37.5	37.5-63.0			
C301	2.70	2.69	7.7	29.9	8.3	34.7	0.6	0.6	1.1	0.7	1.1	0.53	0.25	SW
C304	2.71	2.69	9.9	30.2	8.6	35.3	0.7	0.8	0.9	1.0	0.9	0.88	0.62	SW
C307	2.70	2.72	6.9	29.7	7.7	36.2	1.0	1.0	0.9	0.9	1.2	0.62	0.51	GP
C309	2.70	2.69	7.5	30.0	8.7	34.1	0.7	0.6	0.9	0.8	1.1	0.28	0.12	SP
D405	2.59	2.67	8.5	25.9	11.9	37.7	1.0	0.9	1.1	0.8	1.0	0.92	0.46	SP
AÇ301	2.66	2.67	6.3	25.7	7.1	29.5	0.7	0.8	0.9	0.9	1.1	1.22	0.32	GP
AÇ305	2.68	2.66	4.1	4.9	5.8	7.1	0.5	0.6	0.6	0.8	0.9	0.28	0.19	GP

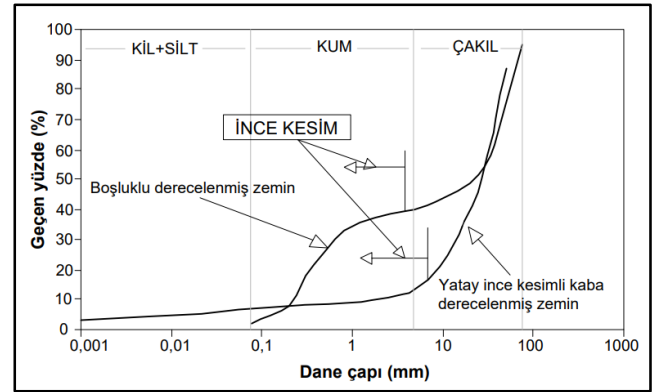
2.2.1. Istomina (1957) kriteri

Granüler zeminlerin içsel stabilite potansiyelinin değerlendirilmesinde en basit yaklaşım olarak ön plana çıkmaktadır. Kumlu-çakıllı zeminlerde içsel stabilite potansiyelinin belirlenebilmesi için üniformluk katsayısına ($C_u = d_{60}/d_{10}$) bağlı geometrik bir kriter tanımlanmıştır (Kovacs, 1981). Buna göre; $C_u < 10$ ise stabil zemin; $C_u \geq 10$ ise stabil olmayan zemin olarak belirtilmektedir (d_{60} = Malzemenin % 60'ının geçtiği dane çapı. d_{10} = Malzemenin % 10'unun geçtiği dane çapı).

2.2.2. Kezdi (1979) kriteri

Bu yaklaşımın temelini Terzaghi (1939) tarafından belirtilen filtrasyon kriteri oluşturmaktadır. Bu kriter gere göre taban malzemesi filtre malzemesinde oluşan boşluklardan geçemez. Bu yöntemde granüler zeminler görece ince ve kaba zeminlere ayrılarak iki farklı bileşen olarak göz önünde tutulur (Şekil 3).

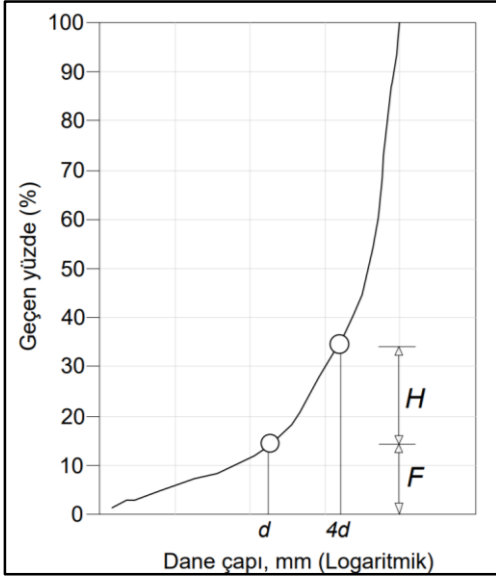
Dane çapı dağılım eğrisinde kaba kesim olarak belirlenen malzeme, ince kesim olarak belirlenen malzeme için filtre görevini yapabilirse bu malzemenin tamamı için stabil zemin olduğu kabulü yapılır. Bu yöntemde dane çapı dağılımı eğrisi isteğe bağlı olarak kaba ve ince kesime ayrılır. Eğer $(d_{15c}/d_{85f})_{maks} < 4$ ise granüler zeminin içsel stabilitesinin sağladığı değerlendirilir (d_{15c} : Kaba kesimin % 15'inin geçtiği dane çapı. d_{85f} : İnce kesimin % 85'inin geçtiği dane çapı). Kezdi kriteri laboratuvarında deneysel çalışmalarla desteklenmemiş bir içsel stabilite değerlendirme yöntemidir.



Şekil 3. Dane çapı dağılımı eğrisine göre Kezdi Metodu'nun uygulanması (Wan ve Fell, 2008)

2.2.3. Kenney ve Lau (1985, 1986) kriteri

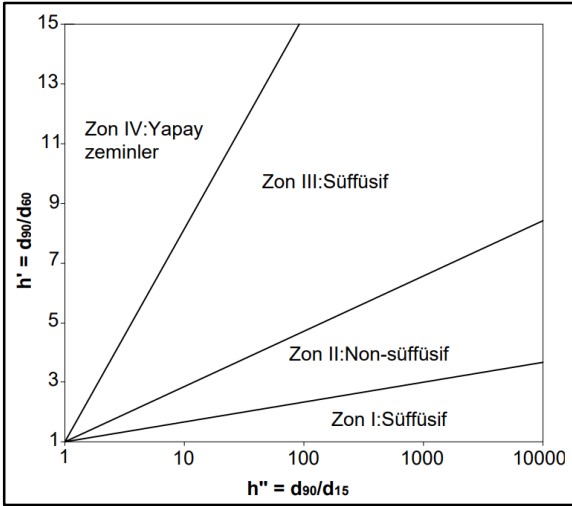
Silt içeriği olmaksızın, en fazla 100 mm dane çapına sahip kohezyonsuz kum-çakıl içerikli zemin örnekleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda Şekil 4'te gösterildiği gibi dane çapı d ve $4d$ arasında olan malzeme (ağırlıkça yüzde geçeni H olan) yeterli değil ise d çapından daha ince olan malzeme (Ağırlıkça yüzde geçeni F olan) muhtemelen süzyon mekanizması ile taşınacaktır. $(H/F)_{min}$ sınır değeri başlangıçta 1.3 olarak belirlenmiştir. Fakat Milligan (1986), Ripley (1986) ile Sherard ve Dunnigan (1986) tarafından yapılan kapsamlı bir tartışma sonucunda bu sınır değeri 1.0'a düşürülmüştür. Bu çalışma kapsamında da $(H/F)_{min}$ değeri 1.0 olarak dikkate alınmıştır. Diğer bir ifade ile $(H/F)_{min} < 1$ ise malzeme stabil olmayan zemin olarak değerlendirilmiştir. $(H/F)_{min}$ elde edilirken $C_u > 3$ olan zeminler için $F \leq \% 20$; $C_u \leq 3$ olan zeminler için ise $F \leq \% 30$ olarak dikkate alınmaktadır.



Şekil 4. Kenney-Lau içsel stabilite değerlendirme kriteri

2.2.4. Burenkova (1993) kriteri

Burenkova tarafından yapılan deneysel çalışmalarda kohezyonsuz, % 10'dan az silt içeriği olan ve en fazla 100 mm dane çapına sahip kum-çakıl karışımı zeminler kullanılmıştır. Üç farklı dane çapı (d_{90} , d_{60} ve d_{15}) dikkate alınarak iki üniformite faktörüne ($h' = d_{90}/d_{60}$, $h'' = d_{90}/d_{15}$) bağlı olarak granüler zeminlerin içsel stabiliteleri bir tasarım kartı ile değerlendirilebilmektedir (Şekil 5).



Şekil 5. Burenkova içsel stabilite değerlendirme tasarım kartı (Burenkova, 1993)

3. Bulgular ve Tartışma

Gökpınar Barajı'nın yarı-geçirimli malzeme sahasındaki non-plastik yedi adet granüler malzeme örneği üzerinde yapılan elek analizi sonrasında ortaya çıkan

granülometri eğrileri kullanılarak Tablo 3'de özet olarak verilen parametreler elde edilmiştir.

Tablo 3'de özetlenen ilgili parametreler yardımıyla Istomina (1957), Kezdi (1979), Kenney ve Lau (1985;1986) ve Burenkova (1993) yöntemleri kullanılarak granüler zeminlerin içsel stabilite potansiyelleri belirlenmiş ve Şekil 6'da verilen sonuçlar elde edilmiştir.

Dört farklı yaklaşım içinde en tutucu değerlendirmeler Burenkova yöntemiyle yapılmıştır. En az tutucu değerlendirmeler ise Kenney-Lau metoduyla yapılmaktadır. Burenkova yedi örnekten bir tanesi için stabil zemin değerlendirmesi yaparken; tam tersi Kenney-Lau yönteminde ise sadece bir örnek için stabil olmayan zemin tespiti yapılmaktadır. Sonuçların birbirine en yakın belirlendiği yöntem ikilileri sırasıyla Burenkova-Istomina ile Kezdi-Kenney ve Lau yöntemleridir. Bunun sebebi olarak bu ikililerin içsel stabilite potansiyelini belirlerken temel esaslarının benzere yakın olmasıdır. Kezdi ile Kenney-Lau yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçların benzer birbirine yakın ifadeler içermesi ile açıklanabilir. İkisi de görece kaba malzemenin ince malzemeyi boşluklarında tutarak filtreleme görevini yaptığını kabul etmektedir. Bu iki yöntemde de belirlenen çapların birbirinin 4 katı olması bu filtrasyon kriterinin de aynı şekilde göz önünde tutulduğunu ifade etmektedir. Yine Burenkova ve Istomina yöntemlerinde dane çapı dağılım eğrisinde üniformluk katsayısı (C_u), kaba kesimin eğimi (h') ve eğrinin genel eğimi (h'') gibi anahtar düzeyinde önemli benzer değerler dikkate alındığı unutulmamalıdır.

İçsel stabilite potansiyeli belirlenirken esas olarak farklı prosedürleri uygulayan Kezdi ve Istomina yaklaşımlarının bazı malzeme örneklerinde benzer değerlendirme sonucunu vermesi dikkati çekmektedir. Esas olarak farklı prosedürleri kullanan yöntemlerden Kenney-Lau ile Burenkova ise birbirinden çok farklı sonuçlar sunmaktadır. Bunun sebebi olarak Burenkova yönteminin geliştirilmesi esnasında kullanılan tüm zemin örneklerinin $(H/F)_{min} = 0.17-0.77$ değerlerinin 1'den küçük olduğu gösterilebilir. Diğer bir ifade ile Burenkova yöntemi belirlenirken kullanılan tüm malzeme örnekleri, Kenney-Lau yaklaşımına göre stabil olmayan zemin grubuna girmektedir.

Kezdi ve Istomina yaklaşımları özellikle malzemede $C_u \geq 20$ değerleri için ortak bir şekilde aynı değerlendirme sonucunu bulmaktadırlar. Bu üniformluk katsayısı değerleri için her iki yaklaşımda da malzemeler içsel stabilitesi olmayan zeminler olarak tanımlanmaktadır.

Tablo 3. İçsel stabilite potansiyelinin belirlenmesinde kullanılan parametreler

Parametre	C301	C304	C307	C309	D405	AÇ301	AÇ305
d ₁₀ (mm)	0.4	0.38	0.47	0.42	0.40	0.49	0.51
d ₁₅ (mm)	0.6	0.50	0.80	0.60	0.50	0.65	0.81
d ₃₀ (mm)	1.3	1.00	1.90	1.40	1.10	1.50	2.00
d ₆₀ (mm)	4.2	2.60	10.00	6.00	3.90	10.10	10.30
d ₉₀ (mm)	33.0	23.0	39.0	38.0	26.0	55.0	58.0
C _u	10.5	6.84	21.28	14.29	9.75	20.61	20.20
h'	7.86	8.85	6.50	6.33	2.60	14.10	5.74
h''	56.90	46.00	48.75	63.33	52.00	84.62	71.60
(H/F) _{min}	1.17	1.95	1.45	1.33	1.25	0.50	1.00
(d _{15c} /d _{85f}) _{maks}	3.60	2.70	4.52	3.55	2.86	6.50	9.23

Metot	C301	C304	C307	C309	D405	AÇ301	AÇ305
Istomina (1957)	Stabil olmayan zemin	Stabil zemin	Stabil olmayan zemin	Stabil olmayan zemin	Stabil zemin	Stabil olmayan zemin	Stabil olmayan zemin
Kezdi (1979)	Stabil zemin	Stabil zemin	Stabil olmayan zemin	Stabil zemin	Stabil zemin	Stabil olmayan zemin	Stabil olmayan zemin
Kenney ve Lau (1985;1986)	Stabil zemin	Stabil zemin	Stabil olmayan zemin	Stabil zemin	Stabil zemin	Stabil olmayan zemin	Stabil zemin
Burenkova (1993)	Stabil olmayan zemin	Stabil olmayan zemin	Stabil olmayan zemin	Stabil olmayan zemin	Stabil zemin	Stabil olmayan zemin	Stabil olmayan zemin

Stabil zemin
 Stabil olmayan zemin

Şekil 6. Dikkate alınan örneklerin içsel stabilite değerlendirme sonuçları

4. Sonuçlar

Eskişehir Gökpınar Barajı'nın plastik olmayan granüler filtre malzemesinin süzüyon mekanizmasına bağlı içsel stabilite potansiyelinin dört farklı yöntemle (Istomina, Kezdi, Kenney-Lau, Burenkova yaklaşımları) değerlendirildiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmektedir:

- Granüler zeminlerde dört yaklaşım için içsel stabilite potansiyel değerlendirme sonuçları en tutucu olanı Burenkova yöntemidir.
- Granüler zeminler için içsel stabilitenin belirlendiği yaklaşımlarda uygulanan prosedürler birbirine benzedikçe malzemelerin stabilite tanımlama sonucunu aynı bulma oranı artmaktadır.
- Granüler zeminlerde süzüyona bağlı içsel stabilite potansiyelinin belirlenmesinde birden fazla ve farklı esasları olan yöntemlerin kullanılması ön tasarım açısından son derece önemlidir.
- Dane çapı dağılımı eğrisini kullanarak belirlenen içsel stabilitenin sağlanamadığı granüler filtre malzemeleri için süzüyonun tetikleneceği kritik hidrolik eğimler hesaplanmalıdır. Hesaplanan kritik hidrolik eğimlerin oluşamayacağı dolgu enkesit tasarımı ve geometrisi, nümerik modeller kullanılarak değerlendirilmelidir.

Teşekkür

Bu çalışmada dikkate alınan Gökpınar Barajı'na ait verileri paylaşan HMP İletişim İnşaat Enerji Taahhüt San. ve Tic. A.Ş. firmasına teşekkür ederiz.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; S. Topçu, literatür araştırması, bu çalışmaya ait analizlerin yapılması ve sonuçların yorumlanması; E. Seyrek, sonuçların yorumlanması ve makalenin oluşturulması konularında katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Adel, H. D., Bakker, K. J., ve Breteler, M. K. (1988). Internal stability of minestone. Proceedings of International Symposium on Modelling Soil-Water-Structure Interactions, Balkema, Rotterdam, 225-231.
- Bonelli, S. (2013). Erosion in geomechanics applied to dams and levees, ISTE Limited, London, UK.
- Burenkova, V., V. (1993). Assessment of suffosion in granular and graded soils. Filters in Geotechnical and

- Hydraulic Engineering, Karlsruhe, Germany, 357–360.
- Chang, D. (2012). Internal erosion and overtopping erosion of earth dams and landslide dams, Ph. D. Thesis. The Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong.
- Charles, J., A. (2001). Internal erosion in European embankments dams. Proceedings of Hydropower 01, ICOLD European Symposium, Geiranger, Norway.
- Cividini, A., Bonomi, S., Vignati, G. C., Gioda, G. (2009). Seepage-induced erosion in granular soil and consequent settlements. International Journal of Geomechanics, 9(4): 187–194. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1532-3641\(2009\)9:4\(187\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2009)9:4(187)).
- Fannin, R. J., ve Moffat, R. (2006). Observations on internal stability of cohesionless soils. Geotechnique, 56(7): 497–500. doi: <https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.7.497>
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2015). Evaluation and monitoring of seepage and internal erosion, FEMA P-1032 Report, Washington DC, 576 s. Erişim adresi: https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-08/fema_p1032_eval_monitoring_seepage_internal_erosion.pdf
- Fell, R., Fry, J., J. (2007). The state of the art of assessing the likelihood of internal erosion of embankment dams, water retaining structures and their foundations. Internal Erosion of Dams and their Foundations. Taylor & Francis Group, London, 1–23.
- Flores-Berrones, R., Ramirez-Reynaga, M., Macari, E. J. (2011). Internal erosion and rehabilitation of an earth-rock dam, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137(2): 150–160. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000371](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000371)
- Geotechnical Engineering Office (GEO). (1993). Review of granular and geotextile filters. GEO Publication No. 1/93. Civil Engineering Department, Hong Kong. Erişim adresi: https://www.cedd.gov.hk/filemanager/eng/content_t_147/ep1_93.pdf
- ICOLD. (1994). Embankment dams: granular filters and drains. Bulletin No. 95, International Commission on Large Dams, Paris, France.
- Indraratna, B., Nguyen, V. T., ve Rujikiatkamjorn, C. (2011). Assessing the potential of internal erosion and suffusion of granular soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 137(5): 550–554. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000447](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000447)
- Kenney, T. C., ve Lau, D. (1985). Internal stability of granular filters. Canadian Geotechnical Journal, 22(2): 215–225. doi: <https://doi.org/10.1139/t85-029>
- Kenney, T. C., ve Lau, D. (1986). Internal stability of granular filters: Reply. Canadian Geotechnical Journal, 23(3): 420–423. doi: <https://doi.org/10.1139/t86-068>
- Kezdi, A. (1979). Soil physics-selected topics. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam.
- Kovacs, G. (1981). Seepage hydraulics. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company.
- Li, M., ve Fannin, R. J. (2012). A theoretical envelope for internal instability of cohesionless soil. Geotechnique, 62(1): 77–80. doi: <https://doi.org/10.1680/geot.10.T.019>
- Milligan, V. (1986). Internal stability of granular filters: Discussion. Canadian Geotechnical Journal, 23(3): 414–418. doi: <https://doi.org/10.1139/t86-066>
- Moffat, R., Fannin, R., J. (2011). A hydromechanical relation governing internal stability of granular soil. Canadian Geotechnical Journal, 48(3): 413–424. doi: <https://doi.org/10.1139/T10-070>
- Richards, K. S., Reddy, K. R. (2007). Critical appraisal of piping phenomena in earth dams, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66(4): 381–402. doi: <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0095-0>
- Ripley, C. F. (1986). Internal stability of granular filters: Discussion. Canadian Geotechnical Journal, 23(2): 255–258. doi: <https://doi.org/10.1139/t86-037>
- Schuler, U. (1995). How to deal with the problem of suffusion. Research and Development in the Field of Dams, 7(9), 145–159.
- Seyrek, E., ve Topcu, S. (2022). Prediction of earthquake-induced crest settlement of embankment dams using gene expression programming. Geomechanics and Engineering, 31(6), 637–651. doi: <https://doi.org/10.12989/gae.2022.31.6.637>
- Sherard, J. L., and Dunnigan, L. P. (1986). Internal stability of granular filters: Discussion. Canadian Geotechnical Journal, 23(3): 418–420. doi: <https://doi.org/10.1139/t86-067>

- Skempton, A. W., ve Brogan, J. M. (1994). Experiments on piping in sandy gravels. *Geotechnique*, 44(3): 449-460. doi: <https://doi.org/10.1680/geot.1994.44.3.449>
- Terzaghi, K. (1939). Soil mechanics: a new chapter in engineering science. *Journal of the Institution of Civil Engineers*, 12(7): 106-141.
- Topçu, S. (2020). İnce daneli zeminlerin farklı gerilme koşullarında içsel erozyon davranışının mukayeseli analizi (Doktora Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (1953). Filter experiments and design criteria. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Technical Memorandum, No. 3-360. Erişim adresi: <https://usace.contentdm.oclc.org/digital/api/collection/p266001coll1/id/2106/download>
- U.S. Bureau of Reclamation (USBR). (2019). IV-4. Internal erosion risks for embankments and foundations. Bureau of Reclamation U.S, Technical Report, 218 s. Erişim adresi: <https://www.usbr.gov/damsafety/risk/BestPractices/Chapters/D6-InternalErosionRisksForEmbankmentsAndFoundationsWithAppendices.pdf>
- Wan, C. F., ve Fell, R. (2008). Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(3): 401-407. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:3\(401\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:3(401))
- Zhang, L. M., ve Chen, Q. (2006). Seepage failure mechanism of the Gouhou rockfill dam during reservoir water infiltration. *Soils and Foundations*, 46(5): 557-568. doi: <https://doi.org/10.3208/sandf.46.557>