

Kil zeminler üzerine inşa edilen dairesel batardolarda hidrolik taban göçmesi davranışının sayısal analizi

Ozan SUBAŞI*

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Müh. Fak. İnşaat Müh. Böl., Terzioğlu Yerleşkesi, Çanakkale.

Geliş Tarihi (Received Date): 27.01.2026

Kabul Tarihi (Accepted Date): 07.07.2026

Öz

Yeraltı suyu ile nehir, göl ve deniz gibi yüzey sularının bulunduğu ortamlarda temel ve kazı imalatlarının geçici olarak kuru koşullarda gerçekleştirilmesi amacıyla inşa edilen batardolarda, su seviyesinin batardo tabanı kotunun üzerinde kalması durumunda taban altında oluşan potansiyel fark, hidrolik taban göçmesi mekanizmasını tetikleyebilmekte; bu da efektif gerilmelerin azalmasına ve zemin mukavemetinde önemli kayıplara yol açabilmektedir. Bu çalışmada, su seviyesinin yüksek olduğu durumlarda, kil zeminlerde inşa edilen dairesel batardolarda hidrolik taban göçmesi davranışı, eksenel simetri varsayımı altında gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri ile incelenmiştir. Analizlerde, zemin kohezyonundaki değişimlerin ve batardo geometrisinin yeraltı suyu hidrolik yükü, boşluk suyu basıncı ve hidrolik eğim dağılımları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, hidrolik taban göçmesi davranışının zemin kohezyonu ile batardo geometrisinin birlikte etkisi altında şekillendiğini ve batardo yarıçapının hidrolik stabiliteyi belirleyen baskın bir parametre olduğunu göstermektedir. Ayrıca, batardonun iki tarafı arasındaki göçmeye neden olan kritik su seviyesi farkının zemin kohezyonundaki artışla birlikte yükseldiği, ancak bu etkinin özellikle daha büyük batardo yarıçaplarında belirginleştiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Batardo, hidrolik taban göçmesi, kil zeminler, sonlu eleman analizi, yeraltı suyu akımı

Numerical analysis of hydraulic heave failure in circular cofferdams constructed on clay soils

Abstract

In environments where groundwater and surface waters such as rivers, lakes, or seas are present, cofferdams are constructed to temporarily provide dry conditions for foundation

* Ozan SUBAŞI, ozan.subasi@comu.edu.tr/ozansb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6931-0590>

and excavation works. When the water level remains above the cofferdam base elevation, the hydraulic head difference developing beneath the base may trigger hydraulic heave failure mechanisms, leading to a reduction in effective stresses and a significant loss of soil strength. In this study, the hydraulic heave failure behavior of circular cofferdams constructed on clay soils under high groundwater conditions is investigated using finite element analyses performed under the assumption of axial symmetry. The analyses evaluate the influence of variations in soil cohesion and cofferdam geometry on the distribution of groundwater hydraulic head, pore water pressure, and hydraulic gradient. The results indicate that hydraulic heave failure behavior is governed by the combined effects of soil cohesion and cofferdam geometry, with cofferdam radius identified as a dominant parameter controlling hydraulic stability. Furthermore, it is shown that the critical water level difference causing hydraulic heave failure between the two sides of the cofferdam increases with increasing soil cohesion, while this effect becomes more pronounced for larger cofferdam radii.

Keywords: Cofferdam, hydraulic heave, clay soils, finite element analysis, groundwater seepage

1. Giriş

Yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu zeminlerde gerçekleştirilen derin kazılar veya nehir, göl ve deniz gibi yüzey sularının bulunduğu ortamlarda inşa edilen batardo yapıları, taban stabilitesinin korunması açısından en kritik geoteknik mühendisliği uygulamaları arasında yer almaktadır. Taban kotu altında gelişen su basıncı dağılımı ve akım rejimi, bu tür yapıların güvenliği üzerinde doğrudan belirleyici bir rol oynar. Bu nedenle, kazı taban kotu ile yeraltı suyu seviyesi arasındaki hidrolik farkın hem kazı çukurlarının hem de batardoların tasarım süreçlerinde son derece dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir.

Derin kazılarda ve batardo yapılarında karşılaşılan başlıca hidrolik sorunlardan biri olan hidrolik taban göçmesi, taban kotu altında oluşan hidrolik farkın zemin kolonunda yukarı yönlü bir akım oluşturarak efektif gerilmeyi azaltmasıyla meydana gelmektedir. Bu nedenle, taban altındaki potansiyel farktan kaynaklanan etkinin doğru bir şekilde tanımlanması güvenli tasarım için büyük bir önem teşkil etmektedir. Hidrolik taban göçmesinin belirlenmesinde yaygın biçimde kullanılan Terzaghi yaklaşımında, olası göçme mekanizması, batardo perdesinin kazı tabanı altındaki gömülme derinliğine (D) eşit yükseklikte ve kazı tarafında yer alan dikdörtgen prizmatik bir zemin bloğu ile temsil edilir. Kritik durumda, bu zemin bloğunun tabanında etkili olan yukarı yönlü kaldırma kuvvetleri, zemin bloğunun ağırlığını dengelemektedir. Bu varsayımlar altında zemin bloğu için düşey kuvvet dengesi Denklem 1’de verildiği şekilde yazılır [1, 2].

$$D\gamma' = \Delta h_{av}\gamma_w \quad (1)$$

Denklemden γ' zeminin efektif birim hacim ağırlığı, Δh_{av} Terzaghi göçme yüzeyi tabanı altındaki ortalama hidrolik yük farkını ve γ_w ise suyun birim hacim ağırlığını ifade etmektedir. Bu denklemden, taban kabarmasının başladığı sınır durum için kritik hidrolik eğim Denklem 2’de verilmiştir.

$$i_{cr} = \gamma'/\gamma_w \quad (2)$$

Bu ifade, taban göçmesinin yukarı yönlü akım kuvvetlerinin zemin ağırlığını aştığı durumda meydana geldiğini açık bir biçimde göstermektedir. Batardolarda kazı tabanı altındaki sızma alanında etkili olan ortalama hidrolik eğim (i_{av}), hidrolik yük farkının perde gömülme derinliğine oranı olarak Denklem 3 yardımıyla tanımlanır.

$$i_{av} = \Delta h_{av} / D \quad (3)$$

Terzaghi yaklaşımına göre batardo tabanının hidrolik stabilitesi Denklem 4’te de verildiği gibi, ortalama hidrolik eğimin (i_{av}), kritik hidrolik eğimden (i_{cr}) küçük olması koşuluna bağlıdır [1, 2].

$$i_{av} < i_{cr} \quad (4)$$

Yukarı detayları açıklanan Terzaghi yaklaşımı, basitliği ve muhafazakar yapısı nedeniyle günümüzde halen batardo tasarımında yaygın olarak kullanılmakla birlikte; düşük permeabiliteli zeminlerdeki karmaşık akım alanlarını, kohezyon etkilerini, dilatans ve gerçekçi zemin-yapı etkileşimini dikkate almamaktadır. Bu nedenle modern geoteknik mühendisliği uygulamalarında, Terzaghi yaklaşımı çoğunlukla ön değerlendirme aracı ve referans kriter olarak kullanılmakta; nihai tasarım aşamasında ise sayısal ve hidro-mekanik etkileşimleri dikkate alan analizlerle desteklenmektedir [3, 4].

Yeraltı suyu akımının kazı tabanı altında oluşturduğu hidrolik koşulların doğru biçimde değerlendirilmesi, özellikle düşük geçirimsiliğe sahip veya drenaj kapasitesi sınırlı zeminlerde taban stabilitesinin güvenilir şekilde belirlenmesi açısından kritik öneme sahiptir. Kohezyonlu zeminlere yönelik analitik çalışmalar, artan hidrolik farkın efektif gerilmeyi hızla azaltarak drenajın kısıtlı olması durumunda kabarma göçmesinin ani bir şekilde ortaya çıkabileceğini öne sürmüşlerdir [5]. Hidrolik taban göçmesi sürecini deneysel ve kuramsal olarak inceleyen çalışmalar, akım rejiminin zemin içerisindeki gerilme dağılımını değiştirerek göçmeyi tetikleyebildiğini ortaya koymuştur [6]. Kohezyonsuz zeminlerde ise kritik hidrolik eğimin yalnızca teorik bir eşik değil, üç boyutlu akım ortamlarında pratik bir tasarım ölçütü olduğu belirtilmiştir [7]. Ayrıca eksenel simetrik sonlu eleman analizleri, dairesel kazılarda kabarma davranışının Terzaghi yaklaşımıyla genel olarak uyumlu olmasına rağmen akım alanı ve gerilme dağılımının geometri ve malzeme parametrelerindeki değişimlere karşı oldukça duyarlı olduğunu göstermektedir [8].

Derin kazı projelerinde iksa sistemleri çevresindeki yeraltı suyu akım rejimi; taban kabarması, borulanma ve efektif gerilme kayıpları gibi stabilite risklerini doğrudan belirlemektedir. Literatürde sızma kaynaklı göçme sınırlarını hesaplamak için önerilen yaklaşımlar, kritik hidrolik yük kayıplarının tahmininde belirgin farklılıklar sergilemektedir. Bu eksikliği gidermek adına, açık sonlu farklar yöntemi (FLAC-2D) kullanılarak gerçekleştirilen analizler, yukarı yönlü akım etkisindeki kumlu zeminlerde kaynama ve kabarma mekanizmalarını tetikleyen sınır koşullarını ortaya koymaktadır [9]. Öte yandan, düşük kohezyonlu kumlarda yapılan parametrik incelemeler, çok küçük kohezyon değerlerinin bile kritik potansiyel farkını artırarak kabarma direncini anlamlı biçimde değiştirdiğini ve bu etkinin özellikle dairesel planlı kazılarda daha belirgin hale geldiğini öne sürmektedir [10].

Asimetrik batardolarda yeraltı suyu akımının iki ayrı rejime ayrılabilmesini ortaya koyan analizler, basitleştirilmiş tasarım kabullerinin gerçek akım davranışını çoğu durumda

yeterince temsil edemediğini göstermektedir [11]. Dairesel kazılar için eksenel simetri altında geliştirilen üç boyutlu tasarım grafiklerinin, farklı tabaka kalınlıklarında hidrolik taban göçmesi güvenliğinin nicel olarak değerlendirilmesine olanak sağlaması ise önemli bir metodolojik ilerleme sunmaktadır [12]. Buna karşılık kare ve dikdörtgen planlı batardolarda üç boyutlu akım etkisinin iki boyutlu varsayımlarda belirgin biçimde ihmal edildiği ve güvenilir debi ile çıkış eğimi tahminleri için daha gelişmiş çözümlere ihtiyaç duyulduğu vurgulanmaktadır [13]. Tabakalı zeminlerde yürütülen araştırmalar ise kabarma davranışının, tabakalar arası permeabilite farkları ve sınır koşullarının etkisiyle homojen zeminlere kıyasla önemli ölçüde farklılaştığını göstermektedir; model deneyleri ve sayısal analizler, bu farklılıkların potansiyel kaybının dağılımını ve göçme mekanizmasının konum ile şeklini belirgin biçimde etkilediğini ve kritik akım yollarının çoğunlukla tabaka sınırlarında yoğunlaştığını ortaya koymaktadır [14,15]. Ayrıca kırmataş kolonlarla iyileştirilmiş tabakalı profillere yönelik ileri düzey sonlu eleman analizleri, tabaka kalınlığı ve rijitlik oranlarının drenaj kapasitesi ile yük transferi üzerinde belirleyici olduğunu ve iyileştirme etkinliği ile kabarma güvenliğinin tabakalanma özelliklerine son derece duyarlı olduğunu göstermektedir [16].

Derin alüvyonlar üzerinde inşa edilen batardolarla ilgili yapılan bir çalışma, farklı permeabiliteye sahip tabakaların oluşturduğu akım ağlarının ileri analitik yöntemlerle değerlendirilmesi gerektiğini ve bu durumun tasarım güvenliği açısından son derece kritik bir öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır [17]. Yapıların inşası sırasında maruz kaldıkları değişen su seviyesi koşulları altında yapılan kapsamlı sızıntı analizleri ise, Hong Kong'daki büyük ölçekli projelerden elde edilen saha verileriyle, tasarım sürecinde 2B yaklaşımların çoğu durumda akım davranışını eksik yansıttığını ve gerçekçi modelleme için gelişmiş numerik yöntemlere ihtiyaç duyulduğunu göstermiştir [18]. Ayrıca, memba tarafındaki batardolarda yürütülen sayısal ve saha gözlemlerine dayalı incelemeler, su seviyesi değişimlerinin serbest yüzey geometrisini ve kabarma eğilimini önemli ölçüde etkilediğini, özellikle yüksek su yükleri altında batardo perdelerinin performansının doğrudan akım rejimiyle belirlendiğini ortaya koymaktadır [19].

Hidrolik taban göçmesi mekanizması, literatürde farklı zemin türleri, batardo geometrileri ve akım koşulları altında ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Buna karşın, su seviyesinin kazı tabanı üzerinde olduğu kil zeminlerde, hidrolik yük farkının geometri ve kohezyon etkileşimine bağlı değişimi ile bu değişimin taban güvenliği üzerindeki etkisi sınırlı düzeyde araştırılmıştır. Özellikle dairesel kazılarda eksenel simetri kabulü altında potansiyel farkın gerçekçi biçimde modellenmesi, permeabilitesi düşük kil zeminlerde drenajın sınırlı olması nedeniyle hem akım alanını hem de efektif gerilme dağılımını önemli ölçüde değiştirmektedir. Buna karşın, literatürde kohezyon değerinin ve kazı genişliğinin potansiyel fark üzerindeki birleşik etkisini sistematik biçimde inceleyen sayısal analizlerin yetersiz olduğu, mevcut çalışmaların ise çoğunlukla ya homojen akım koşullarını ya da yalnızca kohezyonsuz zeminleri ele aldığı görülmektedir. Su seviyesinin kazı taban kotundan yüksek olduğu kil zeminlerde, taban altında gelişen potansiyel farkın geometri ve zemin parametrelerine duyarlı bir davranış sergilediği bilinmekle birlikte, özellikle dairesel geometriye sahip batardolarda bu etkinin zemin kohezyonu ve dairesel batardo yarıçapı ile olan ilişkisi yeterince ayrıntılı biçimde araştırılmamıştır. Bu kapsamda, eksenel simetri yaklaşımıyla idealize edilmiş dairesel bir batardo modeli sonlu eleman yöntemiyle analiz edilerek, potansiyel farkın farklı kohezyon değerleri ve batardo yarıçapları altında nasıl değiştiği sistematik olarak incelenmiştir. Çalışmanın genel çerçevesi; literatür altyapısı, malzeme parametreleri,

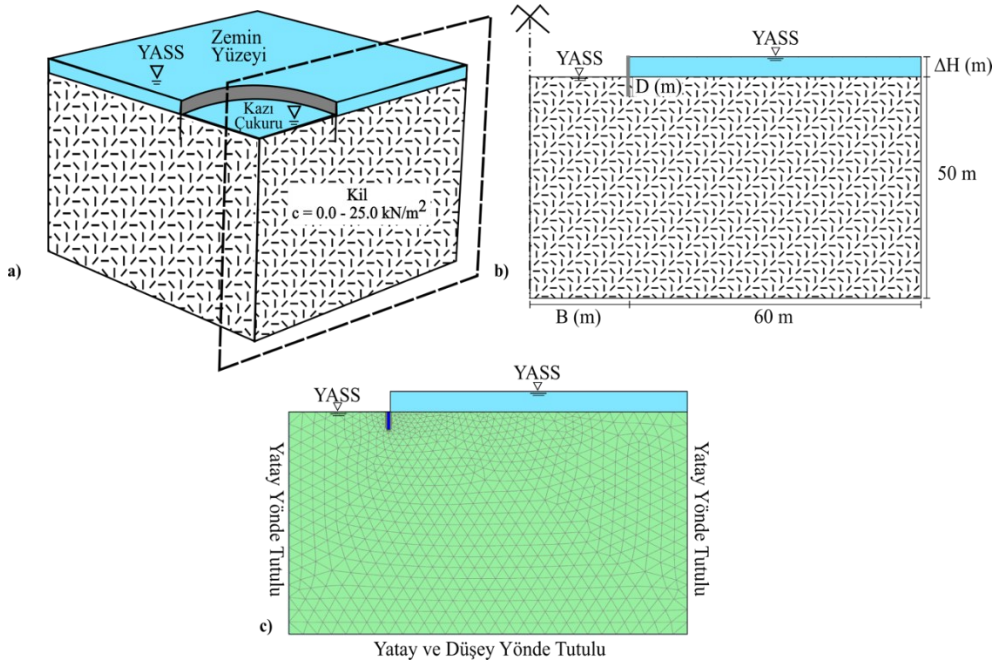
sayısal modelleme yaklaşımı ve parametrik değerlendirme adımlarını kapsayacak şekilde Şekil 1’de şematik olarak özetlenmiştir.

Literatürdeki Boşluk Dairesel kazılarda kazı tabanı kabarmasının genişlik-kohezyon etkisi literatürde sınırlı sayıda çalışma mevcuttur.	Malzeme Farklı kohezyon değerlerinde kil Rijit ve geçirimsiz batardo duvar	İncelenen Parametreler Kohezyon, (c) 0-25 kN/m ² Batardo genişliği, (b/d) b/d=0.5/1.0/2.5/5.0/10.0
Analizler Plaxis 2D Eksenel simetri Hardening bünye denklemi 15 Düğüm noktalı üçgen eleman Dairesel batardo.	Sonuçlar ΔH , b/d ile artar. Düşük b/d’de davranış geometri kontrollüdür. Kohezyon etkisi yüksek b/d’de belirgindir.	

Şekil 1. Çalışmanın grafiksel özeti.

2. Sayısal analizler

Bu çalışmada, yeraltı suyu seviyesinin yüksek olduğu kil zeminlerde inşa edilen daireysel bir batardonun tabanında oluşabilecek hidrolik taban göçmesi ve borulanma mekanizmalarını incelemek amacıyla eksenel simetri kabulü altında Plaxis 2D 2024.2.0.1144 (2024) yazılımıyla sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir [20]. Sayısal analizlerde kohezyonun ve daireysel batardo yarıçapının, potansiyel farka bağlı olarak oluşabilecek taban kabarması ve borulanma mekanizmaları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 2’de, sayısal analizlerde kullanılan idealize zemin modeli ve eksenel simetrik sonlu eleman yaklaşımı kapsamında oluşturulan zemin kesiti sunulmaktadır.



Şekil 2. Sayısal analiz modeli, a) 3 boyutlu model, b) Eksenel simetrik zemin kesiti, c) Sonlu eleman ağı.

Şekil 2a’da, tamamı kil tabakasından oluşan üç boyutlu daireysel batardo sistemi gösterilmektedir. Bu üç boyutlu modelden, daireysel batardodan geçen düşey bir düzlem

boyunca kesit alınarak eksenel simetri varsayımı altında iki boyutlu zemin profili elde edilmiş ve Şekil 2b’de sunulmuştur. Bu kesitte zemin kalınlığı 50 m olarak tanımlanmıştır. Dairesel batardonun yarıçapı B (m) ile ifade edilmiş ve parametrik olarak B/D oranına bağlı şekilde seçilmiştir. Batardonun zemin içerisine gömülme derinliği D (m) sabit alınmış ve 4 m olarak tanımlanmıştır. İki kot arasında oluşan ve göçmeye neden olan hidrolik yük farkı ise ΔH (m) ile gösterilmiş olup, bu değer sayısal analizler sonucunda elde edilmiştir.

Modelin yatay sınırının, akım ve gerilme koşullarını etkilememesini sağlamak amacıyla batardo arkasında 60 m mesafe tanımlanmıştır. Şekil 2c’de ise bu zemin kesiti için oluşturulan sonlu eleman ağı görülmekte olup, ağ yapısı kazı tabanı ve batardo çevresinde hidrolik eğimlerin ve gerilme değişimlerinin beklenildiği bölgelerde yoğunlaştırılarak hem hidrolik taban göçmesi hem de olası borulanma mekanizmalarının güvenilir biçimde temsil edilmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, farklı dairesel batardo yarıçapları için gerçekleştirilen tüm analizlerde 15 düğüm noktalı üçgen elemanlardan oluşan ve çok ince olarak tanımlanan bir ağ sıklığı kullanılmıştır. Yanal yatay yönde, taban ise hem yatay hem de düşey yönde ötelenmeye karşı sabitlenmiş, modelin yanal ve taban sınırları geçirimsiz olarak kabul edilmiştir. Batardo duvarı, yerinde sabitlenmiş, rijit ve geçirimsiz, kalınlığı ihmal edilebilir bir plaka olarak modellenmiştir.

Sayısal analizlerde kil zemin için Hardening Soil bünye modeli kullanılmış olup, modele ait malzeme parametreleri mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kabul edilen değerlere dayandırılmıştır. Hardening Soil bünye modeli, yükleme, boşaltma ve yeniden yükleme aşamalarında farklı rijitlik tepkilerini ayırt edebilme yeteneği sayesinde, karmaşık hidrolik ve mekanik koşullar altında zemin davranışının daha gerçekçi bir şekilde temsil edilmesine imkan sağlamaktadır [21,22]. Doğal birim hacim ağırlığı 21 kN/m³ olarak alınan zemin için hem referans sekant deformasyon modülü (E_{50}^{ref}) hem de ödometre deneyine dayalı tanjant modülü (E_{oed}^{ref}) 5000 kN/m² olarak tanımlanmıştır. Referans yükleme-boşaltma modülü (E_{ur}^{ref}), E_{50}^{ref} modülünün üç katı olacak şekilde 15 000 kN/m² olarak belirlenmiştir. Zemin davranışının elastik sınırlar altındaki hacimsel değişimlerini temsil eden Poisson oranı 0.2 olup, gerilme-bağımlı rijitlikte kullanılan m üssü 0.5 olarak seçilmiştir [23]. Referans gerilme düzeyi (p_{ref}) 100 kN/m² olarak tanımlanmıştır. Kullanılan Hardening Soil bünye modeli parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1’de görüldüğü üzere, çalışma kapsamında kil zeminlerde kohezyonun etkisini değerlendirebilmek amacıyla söz konusu parametre için 5–25 kN/m² aralığında değerler atanmıştır. Kayma mukavemeti açısı 25°, dilatasyon açısı ise hacimsel genişleme beklenmediği için 0° olarak alınmıştır. Batardo duvarı ile zemin arasındaki arayüz davranışı, yapı–zemin etkileşimini gerçekçi biçimde temsil etmek amacıyla $\delta=2\varphi/3$ ile sürtünme oranı ile modellenmiştir. Eksenel simetri kabulü altında gerçekleştirilen sonlu eleman analizleriyle, dairesel bir batardonun yukarı yönlü su akımı etkisindeki hidrolik stabilitesini değerlendirmek amaçlanmıştır. Sayısal modelle, kil zeminlerde taban olan kohezyon ile dairesel batardo yarıçapının, hidrolik taban göçmesi ve borulanma mekanizmaları üzerindeki etkileri sistematik olarak araştırılmıştır. Analizlerde fiziksel tutarlılığı sağlamak amacıyla batardonun gömülme derinliği D = 4 m olarak sabit tutulmuş; dairesel batardo yarıçapı (B) ise gömülme derinliğiyle orantılı beş farklı durumda ele alınarak B/D = 0.5, 1.0, 2.5, 5.0 ve 10.0 değerleri için değerlendirmeler yapılmıştır. Kil zemin tabakasının kohezyonu ise 5–25 kN/m² aralığında, 5 kN/m²’lik

artışlarla değiştirilerek her bir kombinasyon için analizler tekrarlanmış ve bu parametrelerin göçme mekanizmaları üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

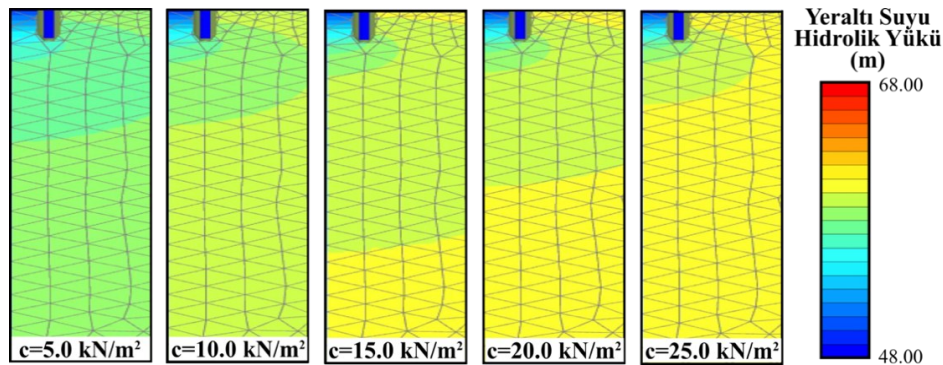
Tablo 1. Malzemenin mekanik özellikleri

Parametre	γ_n (kN/m ³)	E_{50}^{ref} (kN/m ²)	E_{oed}^{ref} (kN/m ²)	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)	ν (-)	m (-)	p_{ref} (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	Ψ (°)	δ (°)
Değer	21	5000	5000	15000	0.2	0.5	100	5 -25	25	0	2 ϕ /3

Bu çalışmada gerçekleştirilen sayısal analizler, hidrolik–mekanik olarak eşlenik bir sonlu eleman çerçevesi içinde kurgulanmış ve sızıntı akımı altında gelişen kabarma veya borulanma gibi göçme mekanizmalarının kontrollü biçimde modellenebilmesi amacıyla iki aşamalı bir hesap süreci izlenmiştir. Birinci aşamada K0 analizi gerçekleştirilmiş, başlangıç gerilme koşulları elde edilmiştir. İkinci aşamada ise batardo taban kotundaki su seviyesi sabit tutularak iki kot arasında oluşan hidrolik fark ΔH (m) 0.01 m’lik artışlarla kademeli olarak yükseltilmiştir. Bu artırımlar, modelde hidrolik yükün kontrollü biçimde artırılmasını sağlamış ve analiz, sistemin nihai duruma ulaştığı, yani sızıntı akımı kaynaklı göçme mekanizmasının başladığını gösteren koşul elde edilene kadar sürdürülmüştür. Bu yöntem, hem potansiyel farkın göçme davranışı üzerindeki etkisinin hassas bir şekilde yakalanmasına hem de kabarma/borulanma rejiminin gelişim sürecinin aşamalı olarak izlenmesine olanak tanımaktadır.

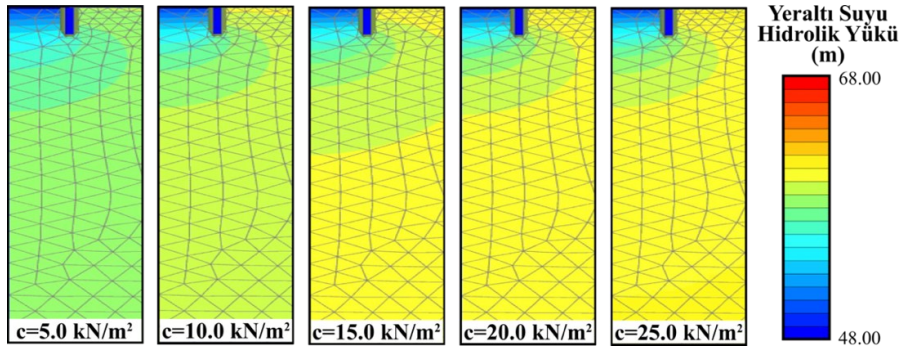
3. Sayısal analiz sonuçları ve tartışma

Bu bölümde eksenel simetri varsayımı altında modellenen dairesel batardoya ilişkin sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar, yeraltı suyu akımına bağlı hidrolik taban göçmesi davranışını açıklayan temel parametreler yardımıyla değerlendirilmiştir. Analizlerde batardonun iç ve dış kısmındaki su seviyesi arasındaki fark (ΔH , m) değerleri belirlenmiş, oluşturulan zemin kesitinde hidrolik yük, boşluk suyu basıncı ve hidrolik eğim dağılımları zemin kohezyonu ile batardo geometrisine bağlı olarak incelenerek stabilite üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Bu sayede su seviyesine bağlı göçme mekanizmaları akım–gerilme etkileşimi çerçevesinde değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen yeraltı suyuna bağlı hidrolik yük dağılımları Şekil 3-7’de verilmiştir. Yeraltı suyu hidrolik yükü dağılımları incelendiğinde, batardonun iki tarafında tanımlanan sınır su seviyeleri nedeniyle, duvarın sağında daha yüksek, kazı tarafında daha düşük hidrolik yük alanının geliştiği görülmektedir. Bu nedenle, kazı tabanına doğru akım ağı oluşmasının yanı sıra, hidrolik yük konturlarının dairesel batardo yarıçapına ve kohezyona bağlı olarak nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır.

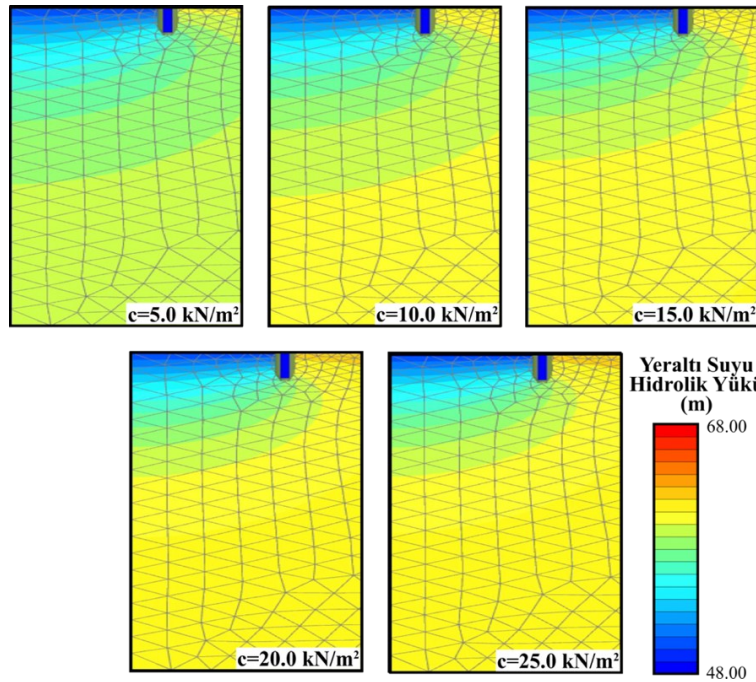


Şekil 3. B/D=0.50 için yeraltı suyu hidrolik yük dağılımı

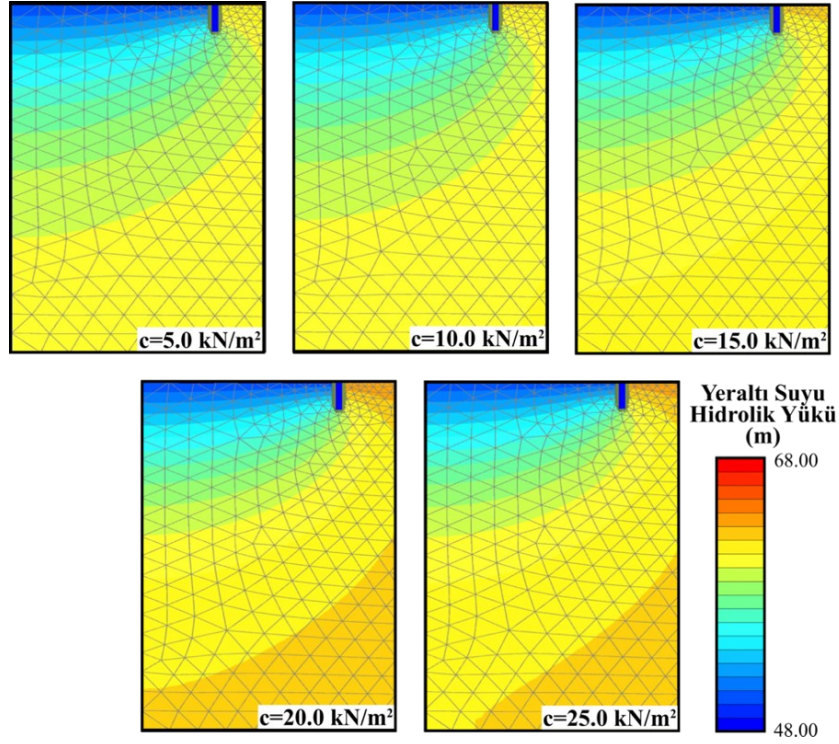
Düşük B/D oranlarında, dairesel batardo perdesinin uç bölgesine yakın kesimlerde konturların belirgin biçimde kavislenerek eğrisel bir geçiş bölgesi oluşturduğu görülmektedir. Bu kavislenme, hidrolik yükün daha hızlı değiştiği ve hidrolik alanın geometrik olarak sınırlı bir bölgede yoğunlaştığına işaret etmektedir. Aynı geometrilerde kohezyon arttıkça bu dairesel kavisli alanın boyutunun küçülmesi hidrolik yük geçişinin batardo yarıçapının sınırlı olması nedeniyle daha dar bir bölgede tamamlandığını göstermektedir. B/D oranı arttıkça, dairesel batardo geometrisine bağlı olarak konturların daha geniş bir alana yayıldığı ve perde ucu civarındaki kavisli bölgenin göreceli etkisinin azaldığı görülmektedir. Bu durum, batardo yarıçapının artmasıyla hidrolik yük farkının daha geniş bir hacme yayılarak aktarılmasına ve hidrolik yük alanının daha çok genel bir hidrolik gradyan karakteri kazanmasına karşılık gelmektedir. Sonuç olarak bu görseller, düşük B/D oranlarında hidrolik yük alanının batardo perdesi ucu çevresinde daha belirgin biçimde şekil değiştirdiğini, kohezyon artışıyla bu yerel kavislenme alanının küçülme eğilimi gösterdiğini ve büyük yarıçaplı dairesel batardolarda hidrolik yük geçişinin daha yayılı ve düzenli bir dağılıma yaklaştığını ortaya koyarak, hidrolik taban göçmesi açısından kritik hale gelebilecek yerel hidrolik koşulların özellikle dar geometrilerde daha hassas olduğu görülmüştür.



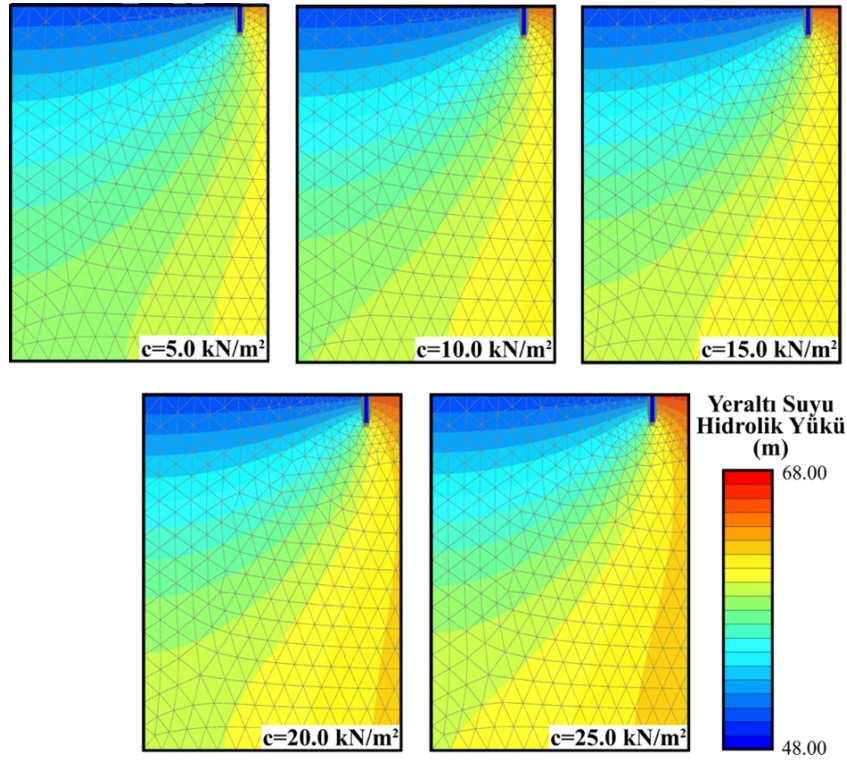
Şekil 4. B/D=1.00 için yeraltı suyu hidrolik yük dağılımı



Şekil 5. B/D=2.50 için yeraltı suyu hidrolik yük dağılımı



Şekil 6. B/D=5.00 için yeraltı suyu hidrolik yük dağılımı

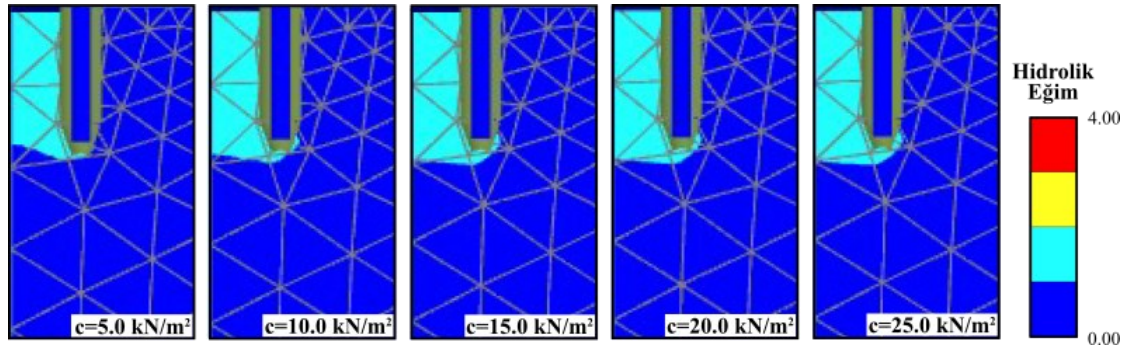


Şekil 7. B/D=10.00 için yeraltı suyu hidrolik yük dağılımı

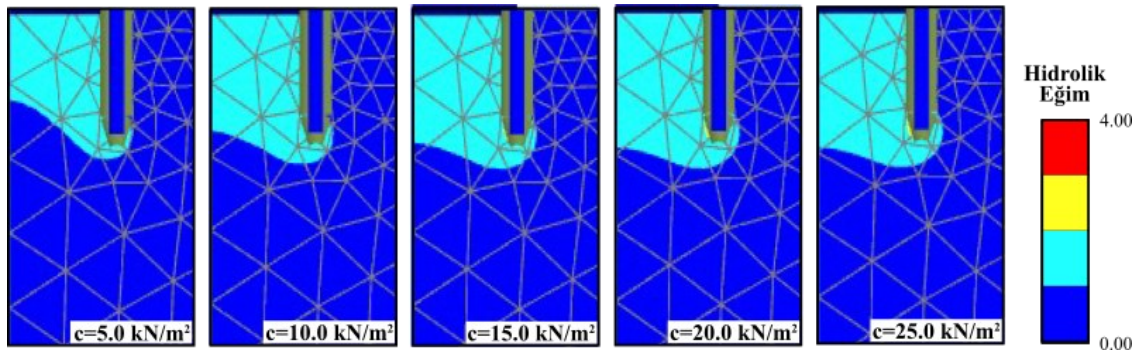
Yeraltı suyu hidrolik yükü dağılımları incelendiğinde, batardonun iki tarafında tanımlanan sınır su seviyeleri nedeniyle, perde dış tarafında daha yüksek, kazı tarafında ise daha düşük hidrolik yük alanının geliştiği görülmektedir. Bu nedenle şekiller, kazı tabanına doğru akım ağı oluşmasının yanı sıra, esas olarak hidrolik yük konturlarının

dairesel batardo yarıçapına ve zemin tabakasının kohezyonuna bağlı olarak nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır. Düşük B/D oranlarında, batardo perdesinin uç bölgesine yakın kesimde konturların belirgin biçimde kavislenerek oval bir geçiş bölgesi oluşturduğu görülmekte; bu kavislenme, hidrolik yükün daha hızlı değiştiği ve hidrolik alanın geometrik olarak sınırlı bir bölgeye işaret etmektedir. Aynı geometrilerde kohezyon arttıkça bu dairesel kavisli alanın boyutunun küçülmesi hidrolik yük geçişinin batardo yarıçapının küçüklüğü nedeniyle daha dar bir bölgede tamamlandığı göstermektedir. B/D oranı büyüdükçe, konturların dairesel olmak yerine daha eğrisel şekilde meydana geldiği duvar ucu civarındaki kavisli bölgenin göreceli etkisinin azaldığı izlenmektedir. Bu durum, dairesel batardo yarıçapının artmasıyla hidrolik yük farkının daha geniş bir hacme yayılarak aktarılmasına ve hidrolik yük alanının daha çok genel bir gradyan karakteri kazanmasına karşılık gelir. Sonuç olarak, düşük B/D oranlarında hidrolik yükün batardo perdesi ucu çevresinde daha belirgin biçimde şekil değiştirdiğini, kohezyonun artışıyla birlikte bu yerel kavislenme alanının küçülme eğiliminde olduğu görülmüştür. Büyük yarıçapa sahip batardolarda ise hidrolik yük geçişi daha yayılı ve düzenli bir dağılım sergilemektedir. Bu nedenle yerel hidrolik koşulların özellikle dar geometrilerde daha etkili olduğu görülmüştür.

Eksenel simetri altında gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen hidrolik eğimin zemin kesitindeki dağılımları tüm şekillerde aynı derinlik aralığı için Şekil 8–12’de verilmiştir. Şekillerin tamamında davranışın izlenebilmesi amacıyla batardo tabanının tamamı görsellere dahil edilmiştir. Tüm geometrilerde yüksek hidrolik eğim değerlerinin batardo duvarının ucunun hemen altında dar bir bölgede yoğunlaştığı, duvarın arka bölümünde ise hidrolik eğimin yer yer 1’den büyük değerlere ulaştığı görülmektedir. Şekil 8 ve 9’da verilen B/D oranlarının sırasıyla 0.50 ve 1.00 olduğu durumlarda, kazı tabanının tamamında hidrolik eğimin 1’den büyük değerler aldığı belirlenmiştir.

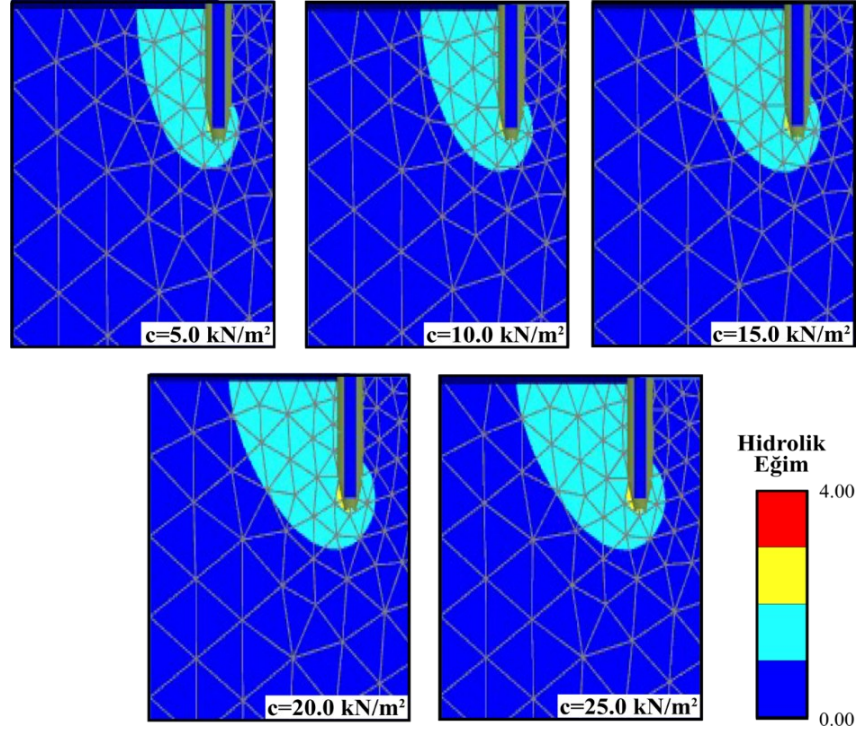


Şekil 8. B/D=0.50 için hidrolik eğim dağılımı

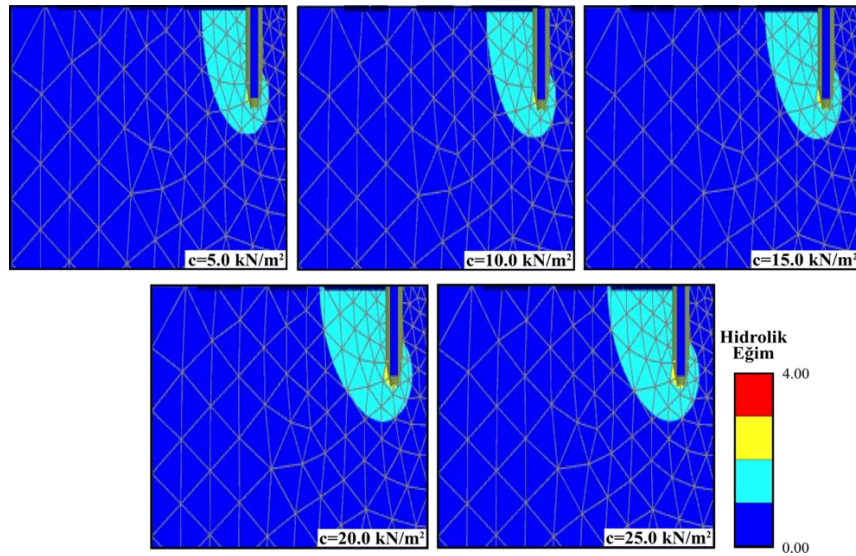


Şekil 9. B/D=1.00 için hidrolik eğim dağılımı

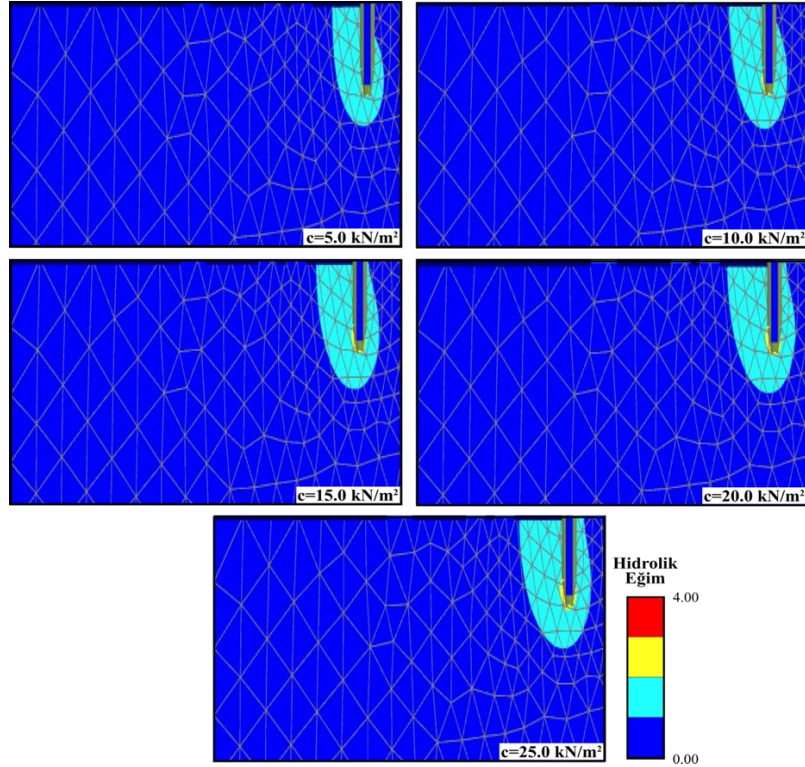
Buna karşılık Şekil 10, 11 ve 12’de sunulan $B/D = 2.50, 5.00$ ve 10.00 analiz sonuçlarında, hidrolik eğimin 1’den büyük olduğu bölgelerin batardo duvarının çevresinde sınırlı bir alanda kaldığı, batardo tabanının büyük bir bölümünde ise hidrolik eğimin 1’den küçük kaldığı gözlenmiştir. Düşük B/D oranlarında, hidrolik eğimin 1’den büyük olduğu bölgelerin ağırlıklı olarak batardo temelini yer aldığı tarafta yoğunlaştığı; B/D oranının artmasıyla birlikte bu bölgelerin batardo duvarının dış tarafına doğru yayıldığı görülmektedir. Çalışma kapsamında incelenen bir diğer parametre olan kohezyonun, düşük B/D oranlarında hidrolik eğimin 1’den büyük olduğu alanların oluşumunda belirleyici bir rol oynamadığı; ancak aynı B/D oranı için kritik bölgenin nihai geometrisinin kohezyon artışıyla birlikte genişlediği belirlenmiştir.



Şekil 10. $B/D=2.50$ için hidrolik eğim dağılımı

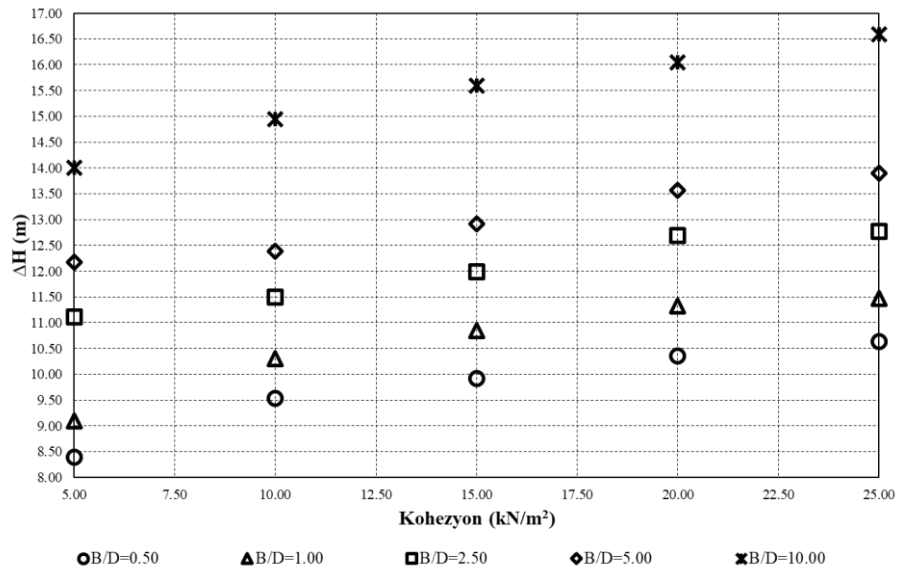


Şekil 11. $B/D=5.00$ için hidrolik eğim dağılımı



Şekil 12. B/D=10.00 için hidrolik eğim dağılımı

Batardo geometrisinin ve kohezyonun hidrolik stabilite üzerindeki birleşik etkisini değerlendirmek amacıyla, Şekil 13'te farklı B/D oranları için hidrolik yük farkı (ΔH) değerinin zemin kohezyonuna bağlı değişimi sunulmaktadır. Batardonun iki tarafı arasındaki su seviyesi farkının hem zemin kohezyonuna hem de batardo geometrisini tanımlayan B/D oranına duyarlı olduğu görülmektedir. Tüm B/D oranları için kohezyonun artmasıyla birlikte ΔH değerlerinin artması, kil zeminlerin yukarı yönlü sızıntıya karşı direncinin kohezyonla birlikte arttığını ve sistemin daha yüksek hidrolik yük farklarını taşıyabildiğini işaret etmektedir.

Şekil 13. Farklı B/D oranları için ΔH değerinin zemin kohezyonuna bağlı değişimi

Buna ek olarak, ΔH değeriindeki değişimin yalnızca zemin kohezyonuna bağlı olmadığı, batardo geometrisi tarafından da belirgin biçimde kontrol edildiği görülmektedir. Düşük B/D oranlarında ($B/D = 0.5$ ve 1.0) kohezyon artışına rağmen ΔH 'deki yükselmenin sınırlı kaldığı, buna karşılık daha yüksek B/D oranlarında ($B/D \geq 2.5$) kohezyon artışının ΔH üzerinde çok daha etkili olduğu görülmektedir. Aynı kohezyon değeri için B/D oranı arttıkça ΔH 'nin sistematik olarak artması, dairesel batardo yarıçapının hidrolik davranışı kontrol eden baskın bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır

Dairesel batardo yarıçapının artmasıyla birlikte akım çizgilerinin kazı tabanı altında daha geniş bir alana yayıldığı, buna bağlı olarak hidrolik taban göçmesinin gelişebilmesi için gerekli potansiyel farkın daha yüksek değerlere ulaştığı anlaşılmaktadır. Kohezyon ve geometri etkileşimi değerlendirildiğinde, zemin kohezyonundaki artışın hidrolik taban göçmesine karşı sağladığı katkının ancak yeterli geometrik yayılım koşullarında belirgin hale gelebildiği; düşük B/D oranlarında hidrolik davranışın büyük ölçüde geometri tarafından sınırlandırıldığı, yüksek B/D oranlarında ise zemin kohezyonu ile batardo geometrisinin birlikte belirleyici olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu değerlendirme, kil zeminlerde hidrolik taban göçmesi mekanizmasının yalnızca kritik bir hidrolik yük farkı ile değil, batardo yarıçapı ile de ilişkili olduğunu ve batardo tasarımında zemin mukavemet parametreleri ile geometrik oranların birlikte ele alınmasının gerektiğini ortaya koymaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, nehir, göl ve deniz gibi yüzey sularının bulunduğu ortamlarda inşa edilen dairesel batardolarda hidrolik taban göçmesi davranışı, eksenel simetri varsayımı altında gerçekleştirilen sonlu eleman analizleriyle ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Yeraltı suyu hidrolik yükü, boşluk suyu basıncı ve hidrolik eğim dağılımları ile batardonun iki tarafı arasındaki kritik su seviyesi farkı birlikte değerlendirilerek, zemin mukavemet parametreleri ile batardo yarıçapının hidrolik stabilite üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, kil zeminlerde hidrolik taban göçmesi güvenliğinin yalnızca malzeme özelliklerine değil, aynı zamanda batardo yarıçapına önemli ölçüde bağlı olduğunu göstermektedir. Çalışmada elde edilen başlıca bulgular aşağıda sıralanmıştır.

- Eksenel simetrik sonlu eleman analizleri, kil zeminler üzerinde inşa edilen dairesel batardolarda hidrolik taban göçmesi davranışının zemin kohezyonu ile batardo yarıçapının birlikte kontrolünde geliştiğini ortaya koymuştur. Batardo yarıçapının gömülme derinliğine oranı (B/D), hidrolik stabilite açısından baskın bir tasarım parametresi olarak öne çıkmaktadır.
- Yeraltı suyu hidrolik yükü ve boşluk suyu basıncı dağılımları, düşük B/D oranlarında potansiyel farkların ve basınç artışlarının kazı tabanı altında lokal olarak yoğunlaştığını; yüksek B/D oranlarında ise bu etkilerin daha geniş bir hacme yayıldığını göstermiştir. Bu durum, küçük yarıçaplı dairesel batardolarda hidrolik taban göçmesi riskinin daha ani ve yerel, büyük yarıçaplı dairesel batardolarda ise daha yayılı bir karakter sergilediğini ortaya koymaktadır.
- Hidrolik eğim dağılımlarının, genellikle batardo perdesi ucu çevresinde yoğunlaştığı görülmüştür.
- Batardonun iki tarafı arasındaki kritik su seviyesi farkını temsil eden ΔH değerleri, hidrolik yük, boşluk basıncı ve hidrolik eğim dağılımlarından elde

edilen gözlemleri nicel olarak desteklemektedir. Kohezyon artışı tüm B/D oranlarında ΔH değerlerini artırmakla birlikte, düşük B/D oranlarında daha az artarken; yüksek B/D oranlarında ise daha belirgin biçimde artmaktadır.

- Analiz sonuçları, kil zeminlerde hidrolik taban göçmesi güvenliğinin tek bir kritik hidrolik eğim veya potansiyel fark değeri ile tanımlanamayacağını; bunun yerine, geometri ve kohezyon etkileşimiyle şekillenen bir alan problemi olarak ele alınması gerektiğini ortaya koymuştur. Bu yaklaşım, özellikle dairesel batardolar için daha gerçekçi ve güvenilir bir değerlendirme çerçevesi sunmaktadır.
- Elde edilen bulgular, kil zeminler üzerinde inşa edilen dairesel batardo tasarımında zemin kohezyonunun yanı sıra batardo yarıçapının da hidrolik stabilite açısından kritik bir tasarım değişkeni olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, mühendislik uygulamalarında dairesel batardo yarıçapı, gömülme derinliği ve zemin özelliklerinin birlikte değerlendirilmesi; sunulan sonuçların laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalar ve farklı boyutlarda gerçekleştirilecek ileri sayısal analizlerle desteklenmesi, özellikle kil zeminlerde inşa edilen dairesel batardolar için hidrolik taban göçmesi güvenliğine yönelik daha sağlam ve genellenebilir tasarım kriterlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Kaynaklar

- [1] Terzaghi, K., *Erdbaumechnik Auf Bodenphysikalischer Grundlage*, Franz Deuticke-Verlag, Leipzig and Wien, Germany/Austria, (1925).
- [2] Terzaghi, K. ve Peck, R. B., *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, (1968).
- [3] Říha, J., Petrula, L. ve Hala, M., Statistical analysis of experimentally determined critical hydraulic gradients for heave, *Géotechnique Letters*, 10, 2, 377–384, (2020).
- [4] Tanachaichoksirikun, P., Seeboonruang, U., Sirikaew, U. ve Horpeanchaoen, W., Assessing seepage behavior and hydraulic gradient conditions in the Lam Phra Phloeng earth fill dam, Thailand, *Water*, 18, 3, 406, (2026).
- [5] Wudtke, R. B. ve Witt, K. J., A static analysis of hydraulic heave in cohesive soil, *Proceedings, 3rd International Conference on Scour and Erosion*, 1–3, Amsterdam, (2006).
- [6] Wudtke, R. B., Failure mechanisms of hydraulic heave at excavations, *Proceedings, 19th European Young Geotechnical Engineers' Conference*, Győr, Hungary, (2008).
- [7] Koltuk, S. ve Azzam, R., Use of quicksand condition to assess the base stabilities of sheeted excavation pits against seepage failure in cohesionless soils, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 10, 8515–8526, (2019).
- [8] Koltuk, S. ve Fernandez-Steege, T., Evaluation of seepage failure by heave in homogeneous cohesionless soils using finite element method, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16, 10, 1201–1210, (2022).
- [9] Benmebarek, N., Benmebarek, S. ve Kastner, R., Numerical studies of seepage failure of sand within a cofferdam, *Computers and Geotechnics*, 32, 4, 264–273, (2005).
- [10] Subaşı, O., Effect of low cohesion in sandy soils on seepage-induced failure of circular sheeted excavation pits, *Geomechanics and Engineering*, 43, 4, 329, (2025).

- [11] Griffiths, D. V., Seepage beneath unsymmetric cofferdams, *Géotechnique*, 44, 2, 297–305, (1994).
- [12] Koltuk, S. ve Azzam, R., Design charts for circular-shaped sheeted excavation pits against seepage failure by heave, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60, 3, 421–426, (2016).
- [13] Madanayaka, T. A. ve Sivakugan, N., Simple solutions for square and rectangular cofferdam seepage problems, *Canadian Geotechnical Journal*, 56, 5, 730–745, (2019).
- [14] Koltuk, S., Song, J., Iyisan, R. ve Azzam, R., Seepage failure by heave in sheeted excavation pits constructed in stratified cohesionless soils, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13, 6, 1415–1431, (2019).
- [15] Koltuk, S., Fernandez-Steeger, T. M. ve Azzam, R., Einfluss der Bodenschichtung auf hydraulischen Grundbruch in Baugruben in nichtbindigen Böden, *Grundwasser*, 26, 3, 255–268, (2021).
- [16] Arama, Z. A., Numerical analysis of single rammed aggregate piers installed in stratified soil profiles, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22, 1, 133–148, (2020).
- [17] Zhou, S., Zheng, H. K., Chen, Y. F. ve Li, Y., Seepage flow analysis of cofferdam in deep overburden foundation, *Advanced Materials Research*, 864, 2340–2345, (2014).
- [18] Cheng, Y. M., Chen, F., Zhu, Z., Yuan, C. ve Li, L., Seepage analysis for construction, with applications to some projects in Hong Kong, *Geofluids*, 2021, 1, 6623816, (2021).
- [19] Erdem, E., Kolay, E., Yildirim, F. ve Çadır, C. C., The investigation of the seepage condition of an upstream cofferdam with computer simulations and field observations: The case study of Inandik Dam, Turkey, *Environmental Earth Sciences*, 83, 20, 583, (2024).
- [20] Bentley Systems, PLAXIS 2D, Version 2024.2.0.1144, Computer Software, Bentley Systems, Inc., Pennsylvania, USA, (2024).
- [21] Song, B., Liu, J. Y., Liu, Y. ve Hu, P., Generalization and implementation of hardening soil constitutive model in ABAQUS code, *Geomechanics and Engineering*, 36, 4, 355, (2024).
- [22] Hu, J. ve Du, Q., Parameter study and engineering verification of the hardening soil model with small-strain stiffness for loess in the Xi'an area, *Applied Sciences*, 15, 3, 1278, (2025).
- [23] Plaxis 2D Manual, Plaxis 2D Material Models Manual, Bentley Systems, Pennsylvania, USA, (2025).