



## Sonlu Farklar Yöntemi Kullanılarak Geçirimsiz Baraj Tabanına Yerleştirilen Palplanş Perdesinin Yerinin Belirlenmesi

### Determination of the Location of the Sheet Pile Wall Placed within the Impermeable Dam Base Using the Finite Difference Method

Bariş Kaçak<sup>1</sup>, Ertuğrul Ordu<sup>2\*</sup>, Reşat Mutlu<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 59860, Tekirdağ, Türkiye

<sup>2</sup>Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 59860, Tekirdağ, Türkiye

<sup>3</sup>Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, 59860, Tekirdağ, Türkiye

**Başvuru/Received:** 28/08/2023 **Kabul/Accepted:** 02/01/2024 **Çevrimiçi Basım/Published Online:** 31/01/2024

**Son Versiyon/Final Version:** 31/01/2024

#### Öz

Yeraltı suyu akımlarında, akımın zemin danelerine uyguladığı kuvvet, yer çekiminin zemin danelerine uyguladığı kuvvetten büyük ise suyun zeminden çıktığı bölgede kaynama (boiling) olayı gerçekleşmektedir. Bunu önlemek için önerilen başlıca yöntemler, akım yolu uzunluğunun artırılması veya kaynama riskinin olduğu bölgede ağırlık filtresi kullanılmasıdır. Geçirimsiz barajlarda barajın memba (giriş) bölümünde geçirimsiz bir tabaka oluşturularak veya baraj altına geçirimsiz palplanş perde yapılarak akış yolu uzunluğunun artırılması mümkündür. Ancak geçirimsiz bir barajın altında palplanş perdelerin inşası maliyetli ve zordur. Bu çalışmada baraj duvarı altındaki palplanş duvar, barajın memba bölgesi ile mansap (çıkış) bölgesi arasında çeşitli konumlara yerleştirilerek mansaptaki sızıntı hızı değeri sonlu farklar yöntemiyle analiz edilmiştir. Hidrolik yükün gradyanı alınarak, düşeydeki sızıntı hızı değeri ve kaynamaya karşı güvenlik sayıları bulunmuştur. Sonuç olarak, barajın çıkış bölgesine yerleştirilen palplanş perdesinin düşeydeki sızıntı hızını en aza indirdiği ve bundan dolayı kaynamaya karşı düşey güvenlik sayısını maksimize eden çözüm olduğu görülmüştür.

#### Anahtar Kelimeler

“Sızıntı Analizi, Kaynama Olayı, Palplanş Perde, Sonlu Farklar Yöntemi, Sızıntı Analizi”

#### Abstract

In groundwater flows, if the force exerted by the flow on the soil particles is greater than the force exerted by gravity on the soil particles, boiling occurs in the area where the water exits the ground. The main methods recommended to prevent this are increasing the flow path length or using a gravity filter in the area where there is a risk of boiling. In impermeable dams, it is possible to increase the length of the flow path by creating an impermeable layer in the upstream (entrance) section of the dam or by constructing an impermeable sheet pile curtain under the dam. However, the construction of sheet pile walls under an impermeable dam is costly and difficult. In this study, the sheet pile wall under the dam wall was placed in various positions between the upstream region and the downstream (outlet) region of the dam, and the leakage rate value at the downstream was analyzed by the finite difference method. Vertical seepage rate values and safety numbers against vertical boiling have been found by taking the gradient of the hydraulic head. It has been seen that the sheet pile wall placed in the exit zone of the dam is the solution that minimizes the leakage rate, and, therefore, maximizes the vertical safety number against boiling.

#### Key Words

“Seepage analysis, Boiling Phenomenon, Sheet pile wall, Finite Difference Method, Seepage Analysis”

## 1. Giriş

Gözenekli ortam veya sızıntı yoluyla akışkan hareketi, su projelerinin tasarımında çok önemli olan birincil konulardandır (Cedergren, 1997). Çok uzun yıllardır, yeraltı suyu ve gözenekli ortam akışı üzerine yapılan bilimsel araştırmalar, inşaat sektörü dahil olmak üzere farklı sektörlerde giderek önem kazanmıştır (Şen, 2017).

Suyun zemin boşluklarındaki hareketi, kısaca yeraltı suyu akışının tanımı olarak kabul edilmektedir (Fetter, 2018). Yeraltı suyunun gözenekli ortam yoluyla zemin boşluklarındaki hareketi mekanik olarak gerçekleşmektedir (Schwartz & Zhang, 2002). Akışın yönü, suyun mekanik enerjisinin daha yüksek olduğu alanlardan daha düşük olduğu alanlara doğrudur (Harr, 1991) (Zijl & Nawalany, 1993). Çok sayıda araştırmacı, bu fiziksel olayları tanımlayan temel denklemleri kullanarak bu tür problemler için analitik çözümler üretmişlerdir (Banerjee & Muleshkov, 1992) (Bruch Jr & Fernandez Sainz, 1972) (He, 1998) (Ilyinsky vd., 1998) (Ozkan & Adrian, 2008) (Rezk & Senoon, 2011). Bu tür problemlerin analitik çözümleri, sayısal teknikleri doğrulamayı mümkün kılmaktadır. Gözenekli ortam içerisindeki akış problemlerini çözmek için çeşitli sayısal çözüm yöntemleri geliştirilmiştir (Chen vd., 2008) (Fadaei-Kermani vd., 2019) (France vd., 1971) (Lacy & Prevost, 1987) (Sharif & Wiberg, 2002) (J. Wang vd., 2003) (Zienkiewicz vd., 1966). Gözenekli ortam içerisindeki akış denklemleri, sonlu farklar tekniği (FDM) ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak başarıyla çözülebilmektedir (Fukuchi, 2016) (H. F. Wang & Anderson, 1995) (Simpson & Clement, 2003) (Kaliakin, 2018) (Ps & Balan, 2014) (Ahmadi vd., 2018). Bu iki teknik, yeraltı suyu akışını hesaplamak için kullanılmış ve serbest yüzeylerin, akış alanlarının en etkili şekilde ele alınmasına olanak sağlamışlardır.

Son yıllarda, sayısal modeller çoğunlukla su akışının karakterizasyonu için yapılan tahminleri formüle etmek ve süreç kavrayışını iyileştirmek için kullanılmış ve ayrıca yeraltı suyu için yapılan simülasyonlarda ciddi rol oynamaktadır (Toro, 2013) (Huyakorn, 2012) (Peyret & Taylor, 2012). Sayısal model çalışmaları, zemindeki gözenekli ortamdan geçen su akışının karakterizasyonunda teorik ve uygulamalı bilgiyi ilerletmek için en etkili yöntemlerden birisi olup bu çalışmalar her zaman deneysel ölçümlerle karşılaştırılmalı ve kalibre edilmelidir (Yousefi, Sedghi-Asl, vd., 2016) (Sedghi-Asl vd., 2022) (Yousefi, Parvizi, vd., 2016). Gözenekli ortamlardaki akış problemlerinin gerçek davranışının doğru çözülebilmesi için mevcut sayısal modeller ve sınır koşulları üzerinde daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç duyulduğu görülmektedir.

Sızma kuvveti olarak bilinen kuvvet, su zemine sızdığı anda zemin danelerine basınç uygulamaktadır. (Mariño & Luthin, 1982). Suyun birim hacim ağırlığı ile çarpılan hidrolik eğim, zeminin birim hacmi başına kuvvet olan sızıntı basıncını vermektedir (Harr, 1991) (Reddi, 2003). Ağırlığı nedeniyle zeminin tolere edebileceğinden daha büyük bir sızma kuvvetine maruz kaldığında ise kaynama olayını meydana getirmektedir (Polubarinova-Kochina, 2015) (Pachepsky, 2004). Bu olay kil örtüler, bentler ve barajlar da dahil olmak üzere bentlerin altında veya içinde borulanma oluşmasına neden olabilmekte ve ayrıca şev kaymasına da sebep olabileceği bilinmektedir (Cedergren, 1997) (Peng vd., 2016) (Chowdhury vd., 2009). Sızıntı, bir toprak baraj tasarlanırken dikkate alınması gereken çok önemli faktörlerden birisidir (Adamo vd., 2020) (Klohn, 1979). Aşırı sızıntı, barajın güvenliğini tehdit edebilmekte ve yıkılmasına neden olabilmektedir (Narita, 2000) (Kirra vd., 2015). Ayrıca, baraj su depolanması için kullanıldığında ise suyun baraj gövdesinden geçtiği zaman sızma olayı meydana gelebilmektedir (Lerner, 1986) (Sherard & Dunnigan, 1985). Sızıntı olayında temel sorun, sızıntının belirli bir barajı nasıl etkilediğini ve sızıntının barajın güvenliğini olumsuz etkilememesi için varsa hangi önlemlerin alınması gerektiğini ayırt etmeye çalışmaktır (Hunter & Fell, 2003) (Zheng vd., 2021) (Hnang, 1996). Literatürde, Foster vd. (2000a, 2000b) dolgu barajların göçmelerindeki problemlerin yaklaşık %40'ına borulanmanın neden olduğunu belirtmişlerdir.

Kil örtülerin ve palplanşların, barajların altındaki sızıntı akışı üzerindeki etkileri ilk olarak Terzaghi tarafından incelenmiştir. Sızıntı akışıyla ilgili konularda, "kritik hidrolik gradyan veya eğim" ifadesinin açıklaması da Terzaghi (Terzaghi, 1922) tarafından yapılmış olup ilerleyen yıllarda, analitik teknikler kullanılarak, Bennett (1946) yaptığı çalışmada sonlu ve sonsuz uzunluktaki kil örtülerin barajların arkasındaki sızıntı akışı üzerindeki etkisini incelenmiştir (Bennett 1946). McNamee (1949) yaptığı çalışmada sızıntı akışına bağlı göçmenin iki çeşidinin olduğunu belirtmiştir; bunlardan ilki daha büyük bir temel malzemesi kütlelerini içeren genel göçme olup diğeri ise borulanma veya kaynama şeklini alabilen ve en kısa sızıntı yolu içerisindeki palplanşın yakınındaki bir noktadan kaynaklanan yerel göçmedir (McNamee 1949). United States Bureau of Reclamation (1987) yapılan bir çalışmada Sızıntı kayıplarını ve borulanma olasılığını azaltmak için memba kil örtüsünün uzunluğunun memba tarafındaki su yüksekliğinin en az on katı olması tavsiye edilmektedir (United States Bureau of Reclamation, 1987). G. C. Mishra & Reddy (1983) yaptıkları çalışmada koordinat dönüştürme yöntemi kullanılarak, homojen anizotropik bir temel üzerinde oturan hidrolik yapıların çıkış hidrolik gradyanının yatay uzunluğu boyunca hesaplamak için analitik bir yöntem literatürde geliştirilmiştir (G. C. Mishra & Reddy 1983).

Tanaka & Verruijt (1999) yaptıkları çalışmada palplanşların arkasındaki tek tabakalı izotropik kumlu bir zeminin sızıntı göçmesi olayını hem deneysel hem de sonlu elemanlar yöntemi (FEM) yardımıyla sayısal olarak analiz etmişlerdir (Tanaka & Verruijt 1999). Ayrıca, literatürde Tanaka & Yokoyama (2006) yaptıkları çalışmada dairesel kesme duvarı ile tek ve çift palplanşlı duvarlar için ekstra palplanşların etkisini incelemiş olup, çift palplanşlı duvarda taban zeminindeki sızıntı göçmesinin nedenleri de Tanaka vd. (2012) tarafından araştırılmıştır (Tanaka vd. 2012). Pratama & Ou (2018) yaptıkları çalışmada, kaynama neticesinde oluşan kum göçmelerine karşılık güvenlik faktörü değerlerini açıklığa kavuşturmak ve sızıntı göçme mekanizmasını tahmin edebilmek için geleneksel akım ağı yöntemini ve sayısal analizi kullanarak bir dizi sayısal analiz gerçekleştirmişlerdir (Pratama & Ou 2018). Zemin içerisinde bir su akımı meydana geldiğinde ve akım yöreğiminin tersi yönünde ise kaynama olayı meydana gelebilmektedir. Suyun akış yolu uzatılarak veya kaynamanın mümkün olduğu bölgede ağırlık filtresi kullanılarak kaynama olayı önlenmektedir. Ayrıca, alternatif olarak, bir toprak

doglu barajın memba kısmında geçirimsiz bir tabaka oluşturularak veya bir barajın altına geçirimsiz bir palplanş duvar inşa edilerek de kaynama problemi önlenmektedir. Bununla birlikte, bir barajın altına geçirimsiz bir palplanş duvar inşa etmenin pahalı ve zaman alıcı bir süreç olduğu bilinmektedir. Bundan dolayı, palplanş duvar inşasının nereye yerleştirileceği ve boyutlarının optimizasyonu çok önem arz etmektedir (Cedergren, 1997).

Bu çalışmada, geçirimsiz bir baraj duvarı altındaki Palplanş perdesi sırasıyla barajın memba bölgesi duvar tarafı ile mansap bölgesi duvar tarafı arasında bulunan 17 farklı konuma yerleştirilmiş olup su sızması problemi kalıcı halde Laplace denklemi kullanılarak ve uygun sınır şartlarını seçerek modellenmiş, sonlu farklar yöntemi ile bu konumlar için Laplace problemi çözülmüştür. Bulunan hidrolik potansiyel işlenerek gradyanı alınmış, bu gradyanı kullanarak perdenin incelenen tüm konumları için çıkış bölgesindeki düşey sızıntı hızı değeri ve düşeydeki kaynama karşısında güvenlik sayıları hesaplanmış ve palplanş perdesinin sızıntı hızı değeri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

## 2. Temel Bilgiler

Bu kısımda konu ile ilgili temel kavramlar kısaca açıklanmıştır.

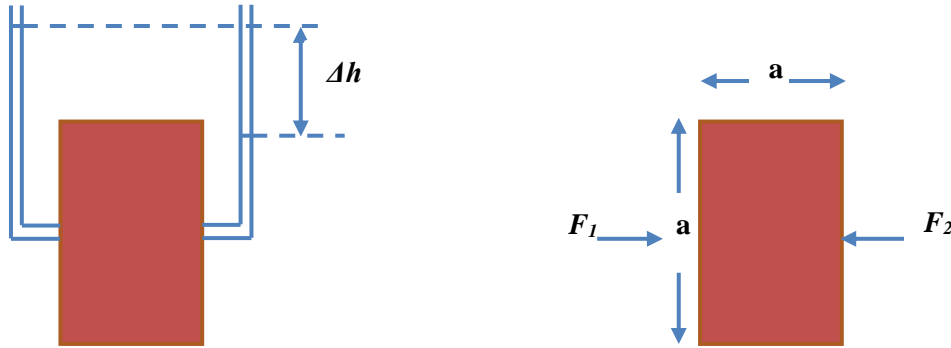
### 2.1 Sızma Kuvveti ve Kaynama Olayı

Şekil 1’de görülen geometri için zemin danesine sol taraftan etkiyen suyun basınç kuvveti ( $F_1$ ) ile sağ taftan etkiyen suyun basınç kuvveti ( $F_2$ ) bileşkesi ( $F$ ) yüzey alana etkiyen suyun ağırlığına ( $\Delta h\gamma_w a^2$ ) eşit olacaktır. Birim hacme dik olarak etkiyen bu bileşke kuvvet, sızma kuvveti ( $j$ ) olarak tanımlanır (John A. Cherry & R. Allan Freeze, 1979).

$$F = F_1 - F_2 = \Delta h\gamma_w a^2 \quad (1)$$

$$j = \frac{F}{a^3} = \frac{\Delta h\gamma_w a^2}{a^3} = \frac{\Delta h\gamma_w}{a} = i\gamma_w \quad (2)$$

Burada  $F$  suyun basınç kuvveti,  $j$  sızma kuvveti,  $\Delta h$  hidrolik yük kaybı,  $\gamma_w$  suyun birim hacim ağırlığı,  $a$  zemin kütlelerinin akışa paralel uzunluğu ve  $i$  hidrolik eğimdir.



Şekil 1. Hidrolik yük farkı ve sızıntı kuvveti ilişkisi (UZUNER, 2007).

### 2.2 Akıcı Kum ve Borulanma

Yerçekimi kuvvetine göre ters yönde etki eden sızma kuvveti, tanelerin efektif basıncı ile batık hacim ağırlığının azalmasına neden olur. Efektif basıncı sıfır olan kohezyonlu zeminin, kisme mukavemeti bulunmaz. Bu durumda katı bir görünümü olan zemin kütlesi, akışkan özelliği gösterir (D. Holtz & D. Kovacs, 1981). Akıcı kum durumuna gelen zemin kütlesi yük taşıyamaz ve bunun üzerinde yürüyen insanlar aşağıya doğru çekildiğini algılar. Akıcı kumun emme kuvveti yoktur ve belirtilen durum, tamamen yerçekimi kuvvetinden ileri gelir. Gerçekte akıcı kum alanları, kararlı bir potansiyele sahiptir. Ancak bu alanların gerçek taşıma kapasitesine ulaştırılması için sızma kuvvetinin yukarıya doğru etkisinin ortadan kaldırılması veya azaltılması gerekir. Sızma kuvveti, drenaj veya sızmaya karşı kullanılan palplanş vb. yapılarla kontrol edilir (Donald P. Coduto, 1999). Yerçekimi kuvvetine göre ters yönde etkili olan sızma kuvveti zemin kütlelerinin batık hacim ağırlığından daha fazla bir miktara ulaştıktan sonra, zemindeki ayrık taneler hareket eder. Bu olaya borulanma veya kaynama denir.

### 2.3. Kritik Hidrolik Eğim

Kaynama anında Şekil 2’de gösterilmiş birim hacimli bir zemin elemanına etkiyen düşey kuvvetlerin denge durumu göz önüne alınırsa;

$$\gamma_d - \gamma_w - i\gamma_w = 0 \quad (3)$$

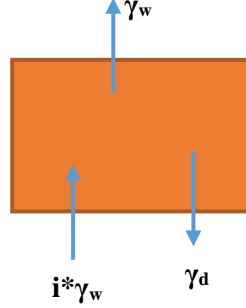
Olarak yazılabilir. Burada  $\gamma_d$  suya doymun zeminin birim hacim ağırlığı,  $i$  hidrolik eğim ve  $\gamma_w$  suyun birim hacim ağırlığıdır. Denklem (3)’ten  $i$  çekilirse elde edilecek olan hidrolik eğim kritik hidrolik eğim olarak isimlendirilir ve  $i_{cr}$  ile gösterilir:

$$i_{cr} = (\gamma_d - \gamma_w)/\gamma_w \quad (4)$$

Denklem. 4,

$$i_{cr} = (G_s - 1)*(1 - n) \quad (5)$$

şeklinde de yazılabilir. Burada  $G_s$  dane özgül ağırlığı ve  $n$  porozitedir.



Şekil 2. Birim hacim ağırlıklı zeminin sızma kuvvetiyle dengelendiği durum (Donald P. Coduto, 1999)

Borulanma veya kaynamaya karşı güvenlik katsayısı ( $F_s$ ) kritik hidrolik eğimin çıkıştaki hidrolik eğime oranı ile elde edilir (denklem. 6). Güvenli tarafta kalabilmek için bu oranın yani hidrolik yapılarının güvenliği için güvenlik sayısının 3–4 arasında olması uygundur. Geçici yapılar için bu sayı 1,5–2 arasında alınabilir (John A. Cherry & R. Allan Freeze, 1979).

$$F_s = i_{cr}/i_{çıkış} \quad (6)$$

Kaynama olayını önlemek için akış hızı azaltılır veya kaynama riski olan bölgeye ağırlık filtresi uygulanır. Akış hızını azaltmak için Darcy (1856) temiz kumlarda akış hızının hidrolik eğimle doğru orantılı olduğunu deneysel olarak gösterdi (Denklem 7). Hidrolik eğim değerinin de akım yolu uzunluğu ile ters orantılı olduğu Denklem 8 de görülebilir.

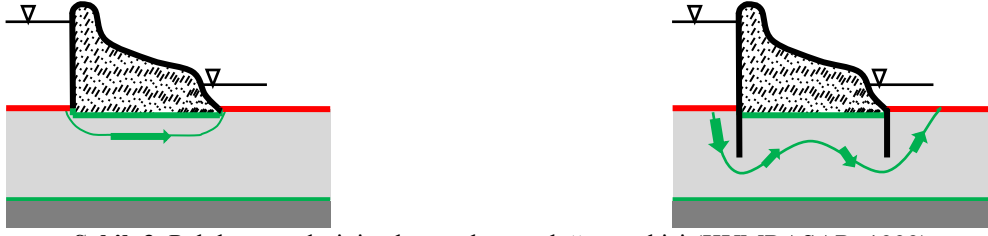
$$v = -ki \quad (7)$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad (8)$$

$$v = -k \frac{\Delta h}{L} \quad (9)$$

Burada  $k$  zemine ait geçirimsizlik katsayısı,  $\Delta h$  Hidrolik yük kaybı,  $L$  akım yolu uzunluğudur.

Akış hızını azaltmak için akım yolu uzunluğunun artırılması gerektiğini Denklem 9’da gösterilmiştir. Akım yolu uzunluğunu arttırmak için palplanş perdesi (betondan su veya zeminin akmasını önlemek için yapılan perde) kullanarak veya zemin yüzüne geçirimsiz bir tabaka oluşturarak mümkündür. Şekil 3’te palplanş perdesinin nasıl kullanıldığına yani akım yolunu nasıl uzattığına dair bir örnek görülebilir. Bu çalışma sadece palplanş perdesi analizi için yapılmıştır.



Şekil 3. Palplanş perdesinin akım yolu uzunluğuna etkisi (KUMBASAR, 1999)

### 3. İki Boyutta Sonlu Farklar Yöntemiyle Difüzyon Denkleminin Çözümü

Zeminde akımın kararlı olduğu, zemin geçirimsizliğinin her noktada ve tüm yönlerde eşit (homojen izotrop) olduğu ve Kartezyen koordinat sisteminde incelenen problemin z doğrultusundaki uzunluğunun x ve y doğrultusundaki uzunluğa göre çok büyük olduğu kabul edildiği için, z doğrultusunda birim uzunlukta analiz yapılacak olup, sızıntı 2 boyutta (sadece x'e ve y'ye bağlı olduğu varsayılarak) incelenmiştir. Üç boyutta izotropik ortamda difüzyon denklemi

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \Delta u = \alpha \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (10)$$

Şeklinde verilir. Burada u hidrolik potansiyeldir. 2 boyutta difüzyon denklemi z'den bağımsız olacağından

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \Delta u = \alpha \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (11)$$

olur. Kararlı durum için;

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

ve

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (13)$$

olacağından, Bu durumda; Denklem 11,

$$\Delta u = 0 \quad (14)$$

şekline indirgenir. Denklem 14, homojen-izotrop ortamdaki kararlı akışın denklemidir. Sonlu farklar yöntemi kullanılarak, hidrolik potansiyelin x ve y'ye bağlı ikinci dereceden kısmi türevleri

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{u(x + \Delta x, y) - 2u(x, y) + u(x - \Delta x, y)}{\Delta x^2} = 0 \quad (15)$$

ve

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{u(x, y + \Delta y) - 2u(x, y) + u(x, y - \Delta y)}{\Delta y^2} = 0 \quad (16)$$

şeklinde yaklaşık olarak elde edilebilir. Denklem 15 ve 16, Denklem 14'te yerine konulduğunda;

$$\Delta u = \frac{u(x + \Delta x, y) - 2u(x, y) + u(x - \Delta x, y)}{\Delta x^2} + \frac{u(x, y + \Delta y) - 2u(x, y) + u(x, y - \Delta y)}{\Delta y^2} = 0 \quad (17)$$

Denklemleri elde edilir. Eğer  $\Delta x \neq \Delta y$  alınırsa,

$$A = \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad (18)$$

olmak üzere, Denklem (17)'den (x,y) noktasındaki hidrolik potansiyel u(x,y) çekilirse

$$u(x, y) = \frac{A^2(u(x, y + \Delta y) + u(x, y - \Delta y)) + u(x - \Delta x, y) + u(x + \Delta x, y)}{2(1 + A^2)} \quad (19)$$

Eğer  $\Delta x = \Delta y$ , alınırsa, (x,y) noktasındaki hidrolik potansiyel,

$$u(x, y) = \frac{u(x + \Delta x, y) + u(x - \Delta x, y) + u(x, y + \Delta y) + u(x, y - \Delta y)}{4} \quad (20)$$

olarak bulunur.

Akış hızı Darcy yasasıyla hesaplanabilir:

$$\vec{v} = -k \text{grad}(u) \quad (21)$$

Burada  $k$  zemine ait geçirimsizlik katsayısıdır.  $\vec{v}$  akış hız vektörüdür.  $\vec{v}_x$ ,  $\vec{v}_y$  ve  $\vec{v}_z$  hız vektörünün Kartezyen koordinatlardaki bileşenleridir. Problem iki boyutta inceleneceği için  $\vec{v}_z$  sıfıra eşittir.

Akış gradyanı şu şekilde hesaplanır:

$$\text{gradu} = \frac{\partial u}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial u}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial u}{\partial z} \vec{e}_z \quad (22)$$

Denklem (22)'deki  $\frac{\partial u}{\partial x}$  ve  $\frac{\partial u}{\partial y}$  kısmi türevleri nümerik olarak hesaplanırsa, Kartezyen koordinatlardaki sızıntı gradyanının bileşenleri

$$v_x = -k \frac{\partial u}{\partial x} \cong k \frac{u(x, y) - u(x + \Delta x, y)}{\Delta x} \quad (23)$$

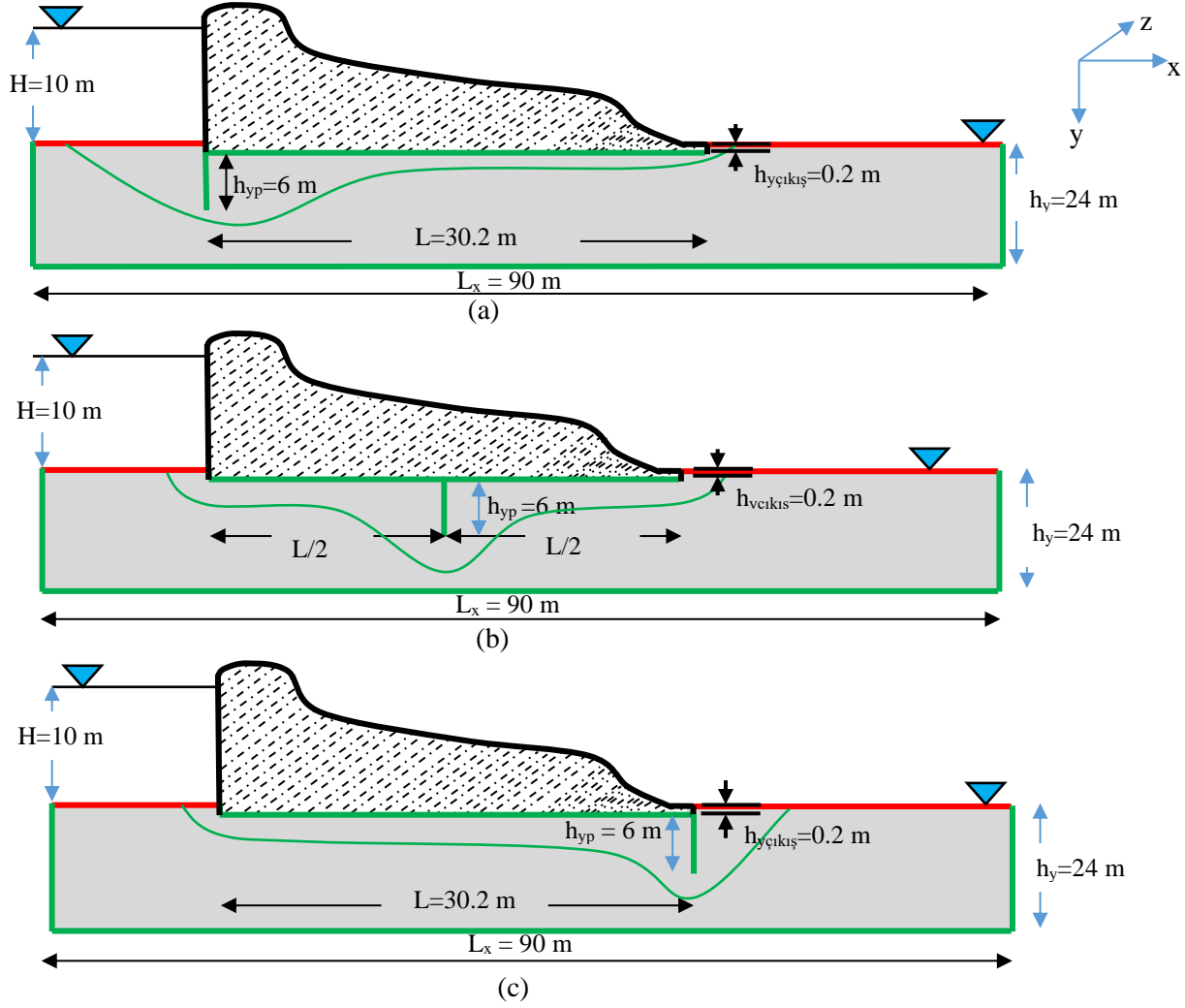
ve

$$v_y = -k \frac{\partial u}{\partial y} \cong - \frac{u(x, y) - u(x, y + \Delta y)}{\Delta y} \quad (24)$$

şekilde bulunur.

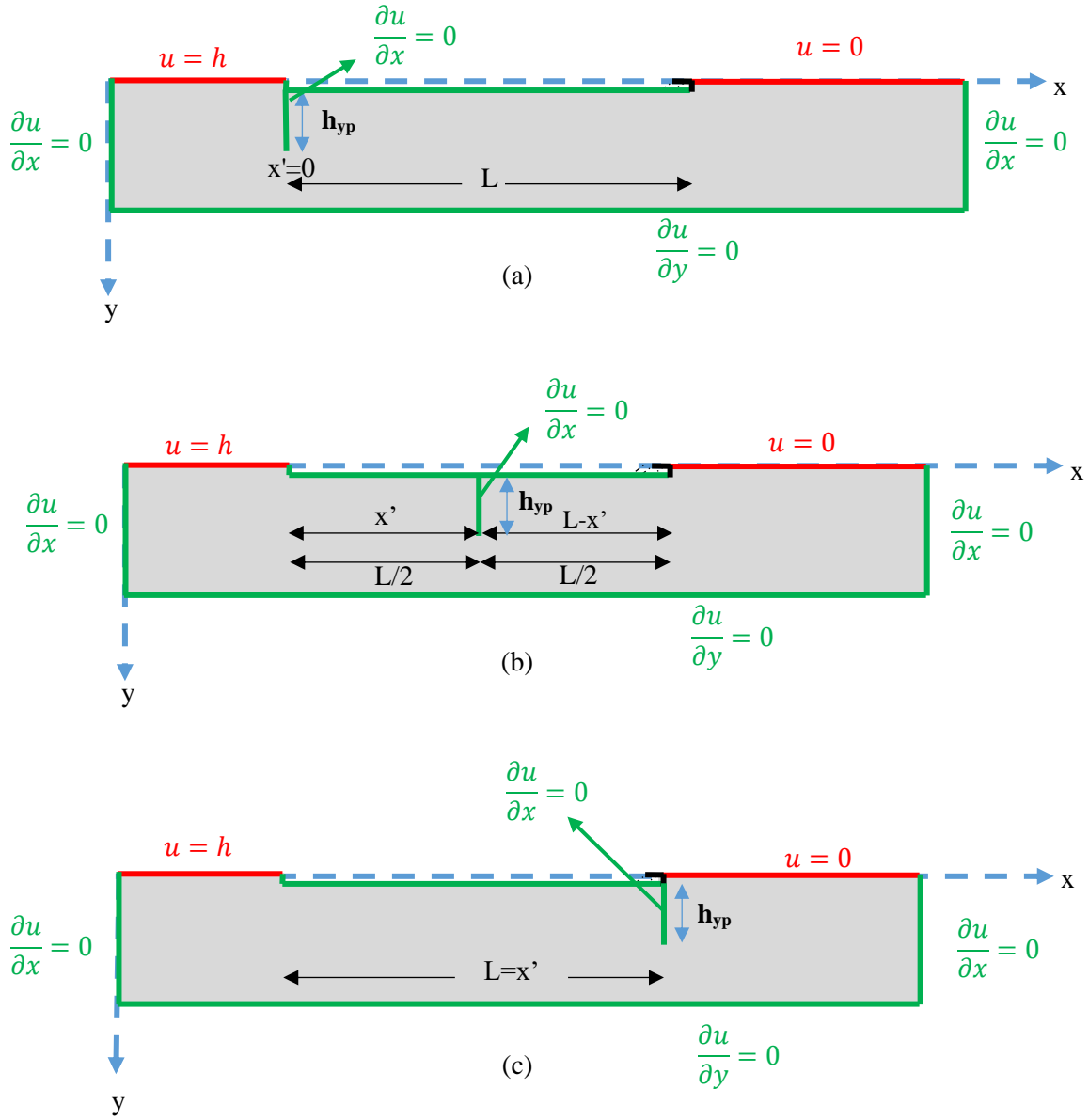
#### 4. İncelenen Problemin Tanımı

Şekil 4'te gösterilen geçirimsiz beton barajın altından sızan suyun barajın çıkış bölgesinde kaynama olayını önlemek üzere palplanş perdesinin kullanımı gösterilmiştir. Şekil 4'te örnek olarak sırasıyla yüksekliği  $h_{yp}$  olan palplanş perdesinin, geçirimsiz beton barajın giriş bölgesinde (Şekil 4.a), orta noktasında (Şekil 4.b) ve çıkış bölgesinde (Şekil 4.c) kullanımı gösterilmiştir. Artık kaynama olayının meydana gelmesi beklenen bölgedeki yani hidrolik eğimin maksimum değerinde olduğu bölgede sızıntı hızı ve kritik hidrolik eğim değerinin belirlenmesi ve karşılaştırılarak en güvenli durumun tespit edilmesi problemi sonlu farklar yöntemi kullanılarak çözülebilir.



**Şekil 4. a)** Geçirimsiz beton barajda palplanş perdenin giriş bölgesinde kullanımı; **b)** Geçirimsiz beton barajda palplanş perdenin orta bölgesinde kullanımı; **c)** Geçirimsiz beton barajda palplanş perdenin çıkış bölgesinde kullanımı

Bu çalışmada Palplanş perdesi Şekil 4'te verilenden daha fazla konuma, toplamda 17 farklı konuma yerleştirilerek inceleme yapılmıştır. Şekil 5'te palplanş perdenin yerleştirildiği 3 farklı konum için sonlu farklar yöntemini kullanmak için gerekli Dirichlet ve Neumann sınır şartları verilmiştir.  $x=0$ 'da  $u=h$  sınırı geçirimli olup Dirichlet sınır şartıdır.  $x=L_x$ 'de  $u=0$  sınırı geçirimsiz olup Dirichlet sınır şartıdır.  $x=0$ 'da ve  $x=L_x$ 'de  $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$  Neumann sınır koşulu geçerlidir yani bu sınırların  $x$  doğrultusunda geçirimsiz olduğu varsayılmıştır.  $y=h_y$ 'de  $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$  Neumann sınır koşulu geçerlidir yani bu sınırın  $y$  doğrultusunda geçirimsiz olduğu varsayılmıştır. Ayrıca palplanş perdenin tüm sınırları geçirimsiz kabul edilmiştir yani palplanş perde Neumann sınır koşuludur. Şekil 5'te Palplanş perdesinin yerleştirildiği konumu daha rahat göstermek için  $x'$  diye yeni bir konum tanımlanmıştır. Matlab'te bu problemin çözümü için gerekli sonlu farklar yöntemi kodlanmış ve yazılan Matlab kodları çalıştırılarak çözüm yapılmıştır.



Şekil 5. Geçirimsiz baraj ve palplanş perde sistemine ait sınır koşulları

### 5. Problemin Sonlu Farklar Simülasyonu

Çalışmada bu 17 farklı durum için sonlu farklar yöntemi kullanılarak yazılan Matlab kodları çalıştırılarak çözüm yapılmıştır. Çözümler Tablo 1’de verilen sabit parametreler ve perdenin değişen konumu kullanılarak yapılmıştır. Makalede yerden tasarruf amacıyla sadece Şekil 4’te görülen 3 konum için hidrolik potansiyel dağılımı verilmiştir. Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8’de görüldüğü üzere hidrolik yük kaybı 10 eş potansiyel aralıkta, her bir aralıkta 1 m hidrolik yük kaybederek çıkış yüzeyinde sıfıra ulaşmıştır. Bu üç şekilde palplanş perdenin sol geçirimsiz yüzeyi ile sağ geçirimsiz yüzeyi arasında yük kaybı incelendiğinde başlangıçta 10 m olan hidrolik yükün 2 metresini palplanş perdenin sağ ve sol yüzeylerin arasındaki mesafede kaybetmiştir. Palplanş perde çevresinde iki eş potansiyel çizgi arasındaki mesafe azalmasına rağmen bu aralıkta hidrolik yük değeri sabit olduğu için bu bölgede hidrolik eğim değeri artacaktır. Zeminin geçirimsizlik katsayısı (permeabilite) sabit olduğu için akış hızı azalacaktır (Denklem 9). Bu durum palplanş perdenin akış hızına olan etkisini göstermiştir.



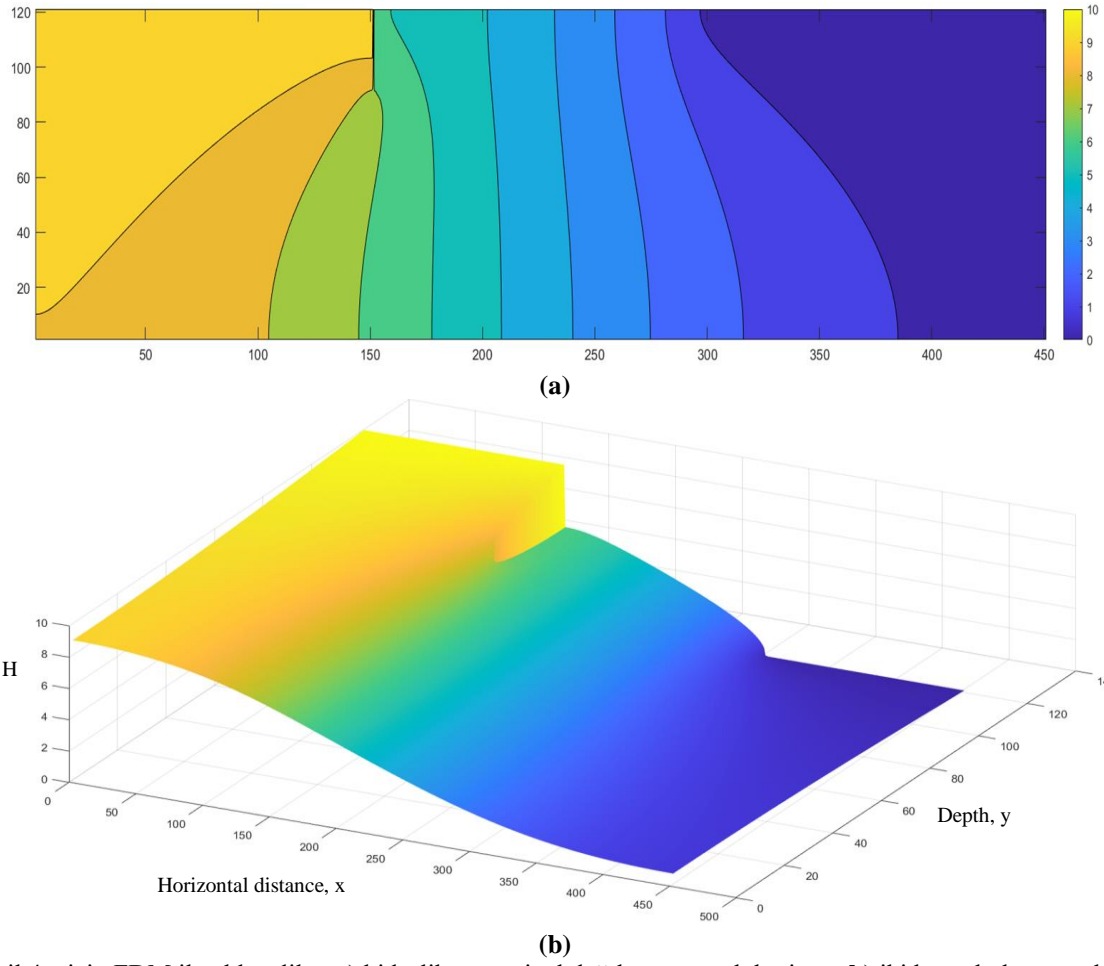
**Tablo 1.** Şekil 4'te kavramsal bir problem için kullanılacak sabit parametreler (KUMBASAR, 1999), ( Donald P. Coduto, 1999), (UZUNER, 2007), (John A. Cherry & R. Allan Freeze, 1979)

Zeminine ve Baraja ait Fiziksel özellikler	Sembol ve değeri
Dane özgül ağırlığı	$G_s = 2,65$
Porozite	$n = 0,5$
Kritik hidrolik eğim	$I_{cr} = (G_s - 1) * (1 - n) = 0,825$
Zeminin hidrolik iletkenlik katsayısı	$k = 0,05 \text{ cm/sn}$
Zemin elemanının akışa paralel uzunluğu	$h_{y_{çıkış}} = 20 \text{ cm}$
Palplanş perdesinin yüksekliği	$h_{yp} = 600 \text{ cm}$
Baraj taban uzunluğu	$L = 3020 \text{ cm}$
Sızma analizi yapılan zeminin düşey derinliği	$h_y = 2400 \text{ cm}$
Sızma analizi yapılan zeminin yatay uzunluğu	$L_x = 9000 \text{ cm}$
Barajın memba tarafında bulunan su yüksekliği	$H = 1000 \text{ cm}$

Şekil 4.a'da memba girişine yerleştirilen Palplanş perdesi görülebilir. Bu durum için, sonlu farklar kullanılarak elde edilen hidrolik potansiyelin eşpotansiyel yüzeyleri, yatay ve düşeydeki yük dağılımı sırasıyla Şekil 6.a ve Şekil 6.b'de gösterilmiştir. Şekil 6.b'de palplanş perdesinin sol tarafında hidrolik yük kaybının x doğrultusunda birim mesafede hemen hemen sabit kaldığı, y doğrultusunda ise doğrusal kabul edilebilecek bir şekilde azaldığı görülmektedir. Palplanş perdesinin sağ tarafında, x doğrultusunda baraj tabanında hidrolik yük kaybı yani birim mesafede hidrolik yük değişim miktarı azalarak, y doğrultusunda ise doğrusala yakın bir şekilde gerçekleşmiştir. Tablo 2'de elde edilen sonuçlar incelendiğinde barajın sağ geçirimsiz duvarının bulunduğu zemin yüzeyi ile bu yüzeyin 0,2 m derinliğindeki seviyede ( $h_{y_{çıkış}}$ ) meydana gelen hidrolik yük kaybı ( $\Delta h_{çıkış}$ ), sızıntı hızı ( $V_{(ç)}Sızıntı$ ) ve çıkış bölgesindeki hidrolik eğim ( $I_{çıkış}$ ) değerleri Matlab programında hesaplanmıştır. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde güvenlik sayısı (Fs) istenilen güvenlik sayısı değerini ( $Fs > 3$ ) sağlamamaktadır.

Şekil 4.b'da duvarın altına orta noktasında yerleştirilen Palplanş perdesi görülebilir. Bu durum için, hidrolik potansiyelin eşpotansiyel yüzeyleri ve sonlu farklar kullanılarak elde edilen yatay ve düşeydeki yük dağılımı sırasıyla Şekil 7.a ve Şekil 7.b'de gösterilmiştir. Şekil 7.b'de ise Barajın sol tarafında hidrolik yük kaybı x doğrultusunda birim mesafede hemen hemen sabit kaldığı, y doğrultusunda ise doğrusal kabul edilebilecek bir şekilde azaldığı görülmektedir. Palplanş perdesinin sol yüzeyi ile barajın sol yüzeyi arasındaki bölgede, x doğrultusunda baraj tabanında hidrolik yük kaybı artarak gerçekleşmiş, hidrolik yük kaybı y doğrultusunda ise doğrusal kabul edilebilecek bir şekilde azalmıştır. Palplanş perdesinin sağ tarafında, x doğrultusunda baraj tabanında hidrolik yük kaybı birim mesafede hidrolik yük değişim miktarı azalarak, y doğrultusunda ise doğrusala yakın bir şekilde hidrolik yük kaybı gerçekleşmiştir. Tablo 3'te elde edilen sonuçlar incelendiğinde barajın sağ geçirimsiz duvarının bulunduğu zemin yüzeyi ile bu yüzeyin 0,2 m derinliğindeki seviyede ( $h_{y_{çıkış}}$ ) meydana gelen hidrolik yük kaybı ( $\Delta h_{çıkış}$ ), sızıntı hızı ( $V_{(ç)}Sızıntı$ ) ve çıkış bölgesindeki hidrolik eğim ( $I_{çıkış}$ ) değerleri Matlab programında hesaplanmıştır. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde güvenlik sayısı (Fs) istenilen güvenlik sayısı değerini ( $Fs > 3$ ) sağlamamaktadır.

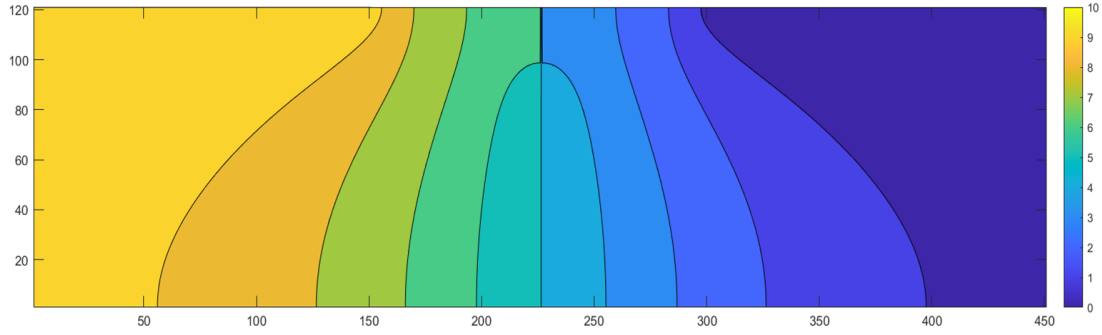
Şekil 4.c'de duvarın altına orta noktasında yerleştirilen Palplanş perdesi görülebilir. Bu durum için, hidrolik potansiyelin eşpotansiyel yüzeyleri ve sonlu farklar kullanılarak elde edilen yatay ve düşeydeki yük dağılımı sırasıyla Şekil 8.a ve Şekil 8.b'de gösterilmiştir. Şekil 8'de Barajın sol tarafında hidrolik yük kaybı x doğrultusunda birim mesafede hemen hemen sabit kaldığı, y doğrultusunda ise doğrusal kabul edilebilecek bir şekilde azaldığı görülmektedir. Palplanş perdesinin sol yüzeyi ile barajın sol yüzeyi arasındaki bölgede, x doğrultusunda baraj tabanında hidrolik yük kaybı artarak gerçekleşmiş, hidrolik yük kaybı y doğrultusunda ise doğrusal kabul edilebilecek bir şekilde azalmıştır. Palplanş perdesinin sağ tarafında, x doğrultusunda hidrolik yük kaybı birim mesafede hemen hemen sabit kaldığı, y doğrultusunda ise doğrusala yakın bir şekilde hidrolik yük kaybı gerçekleşmiştir. Tablo 4'te elde edilen sonuçlar incelendiğinde barajın sağ geçirimsiz duvarının bulunduğu zemin yüzeyi ile bu yüzeyin 0,2 m derinliğindeki seviyede ( $h_{y_{çıkış}}$ ) meydana gelen hidrolik yük kaybı ( $\Delta h_{çıkış}$ ), sızıntı hızı ( $V_{(ç)}Sızıntı$ ) ve çıkış bölgesindeki hidrolik eğim ( $I_{çıkış}$ ) değerleri Matlab programında hesaplanmıştır. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde güvenlik sayısı (Fs) istenilen güvenlik sayısı değerini ( $Fs > 3$ ) sağlamaktadır.



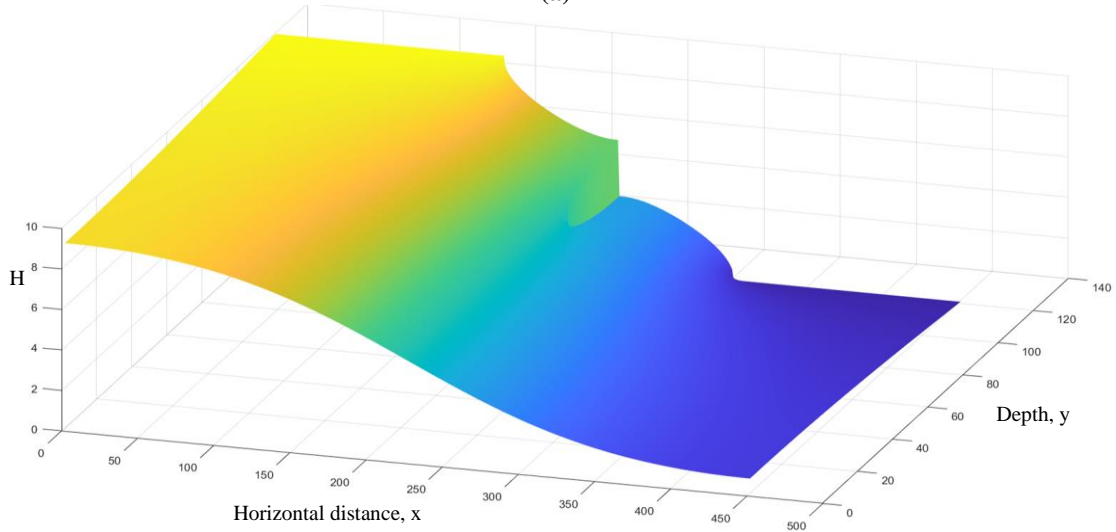
**Şekil 6.** Şekil 4.a için FDM ile elde edilen **a)** hidrolik potansiyel dağılımının renk haritası; **b)** iki boyutlu konuma bağlı hidrolik potansiyel dağılımı

**Tablo 2.** Palplanş perdenin konumunun Şekil 4.a'da olması durumu için sonlu farklar yöntemiyle hesaplanan sonuçlar

Hesaplanılan Büyüklüğün Adı	Hesaplanılan Büyüklüğün Formülü	Hesaplanılan Büyüklüğün Değeri
y doğrultusunda Çıkıştaki sızıntı hızı	$Vy_{(\zeta)Sızıntı}$ (cm/sn)	0,0932
y doğrultusunda Çıkıştaki hidrolik eğim	$\dot{I}_{y_{\text{çıkış}}} = \dot{I}_{\text{max}} = (Vy_{(\zeta)Sızıntı} * n) / k = \Delta h_{y_{\text{çıkış}}} / h_{y_{\text{çıkış}}}$	0,9319
Kaynama olayının beklendiği bölgede Zemin elemanındaki yük kaybı	$\Delta h_{y_{\text{çıkış}}}$ (m)	0,1864
y doğrultusunda Kaynamaya karşı güvenlik sayısı	$F_{s,y} = \dot{I}_{cr} / \dot{I}_{y_{\text{çıkış}}}$	0,885



(a)

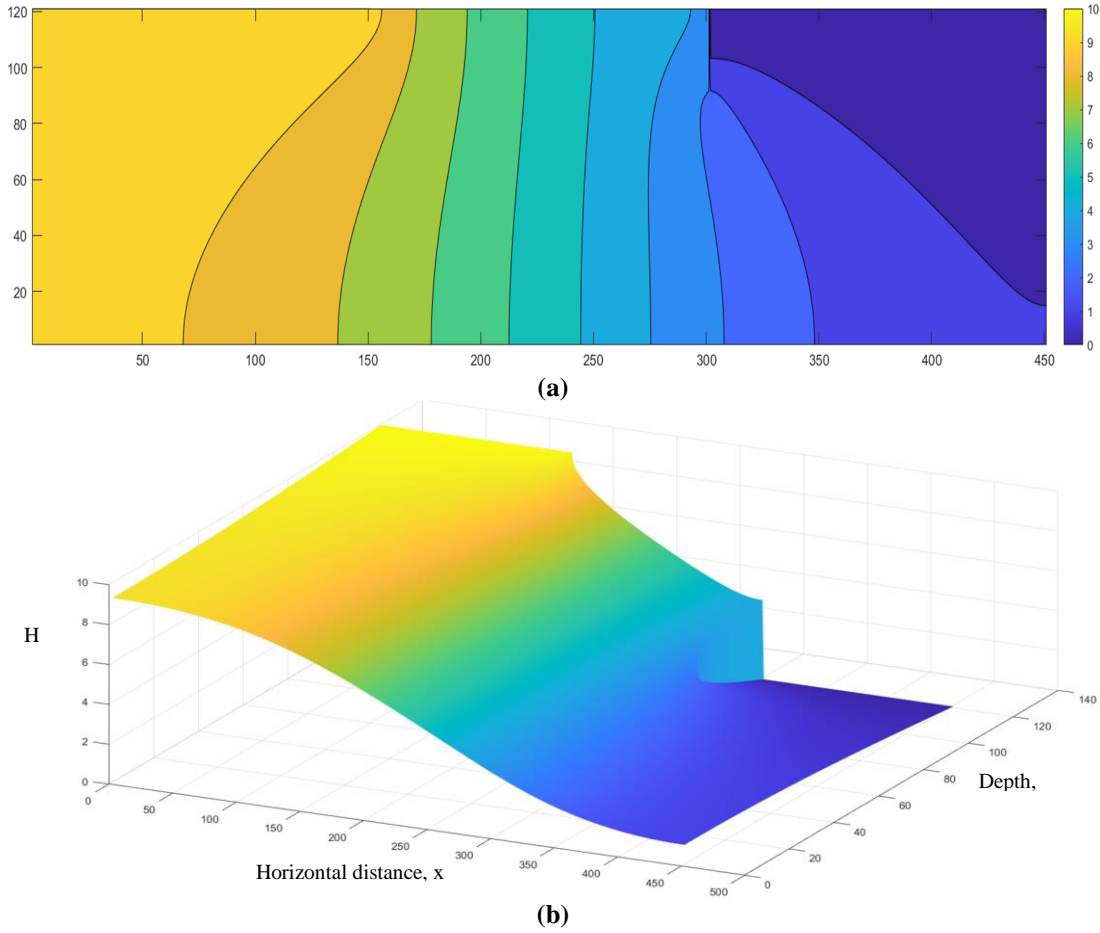


(b)

**Şekil 7.** Şekil 4.b için FDM ile elde edilen **a)** hidrolik potansiyel dağılımının renk haritası ve eş potansiyel yüzeyleri(aralıkları); **b)** iki boyutlu konuma bağlı hidrolik potansiyel dağılımı

**Tablo 3.** Palplans perdenin konumunun Şekil 4.b'de olması durumu için sonlu farklar yöntemiyle hesaplanan sonuçlar

Hesaplanan Büyüklüğün Adı	Hesaplanan Büyüklüğün Formülü	Hesaplanan Büyüklüğün Değeri
y doğrultusunda Çıkıştaki sızıntı hızı	$V_{y(\zeta)Sızıntı}$ (cm/sn)	0,0988
y doğrultusunda Çıkıştaki hidrolik eğim	$\dot{I}_{y_{çıkış}} = \dot{I}_{max} = (V_{y(\zeta)Sızıntı} * n) / k = \Delta h_{çıkış} / h_{y_{çıkış}}$	0,9880
Kaynama olayının beklendiği bölgede Zemin elemanındaki yük kaybı	$\Delta h_{çıkış}$ (m)	0,1976
y doğrultusunda Kaynamaya karşı güvenlik sayısı	$F_{s_y} = \dot{I}_{cr} / \dot{I}_{y_{çıkış}}$	0,835



**Şekil 8.** Şekil 4.c için FDM ile elde edilen **a)** hidrolik potansiyel dağılımının renk haritası ve eşpotansiyel yüzeyleri(aralıkları); **b)** iki boyutlu konuma bağlı hidrolik potansiyel dağılımı

**Tablo 4.** Palplans perdenin konumunun Şekil 4.c’de olması durumu için sonlu farklar yöntemiyle hesaplanan sonuçlar

Hesaplanan Büyüklüğün Adı	Hesaplanan Büyüklüğün Formülü	Hesaplanan Büyüklüğün Değeri
y doğrultusunda Çıkıştaki sızıntı hızı	$V_{y(\zeta)Sızıntı}$ (cm/sn)	0,0267
y doğrultusunda Çıkıştaki hidrolik eğim	$\dot{I}_{y_{çıkış}} = \dot{I}_{max} = (V_{y(\zeta)Sızıntı} * n) / k = \Delta h_{çıkış} / h_{y_{çıkış}}$	0,2667
Kaynama olayının beklendiği bölgede Zemin elemanındaki yük kaybı	$\Delta h_{çıkış}$ (m)	0,0533
y doğrultusunda Kaynamaya karşı güvenlik sayısı	$F_{s_y} = \dot{I}_{cr} / \dot{I}_{y_{çıkış}}$	3,093

Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8 durumları için Matlab’te hesaplanan Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4’te verilen sonuçlarda hidrolik yük kaybı değerleri çıkış bölgesinin y doğrultusunda 20 cm altındaki ızgara bölümü kullanılarak hesaplanmıştır. Bu mesafedeki hidrolik yük kaybı en küçük değerini, palplans perdenin mansap (çıkış) bölgesinde kullanıldığı durumda (Şekil 8) almaktadır. Hidrolik yük kaybı en büyük değerine ise palplans perdenin barajın memba (giriş) bölümünde kullanıldığı durumda (Şekil 6) ulaşmıştır.

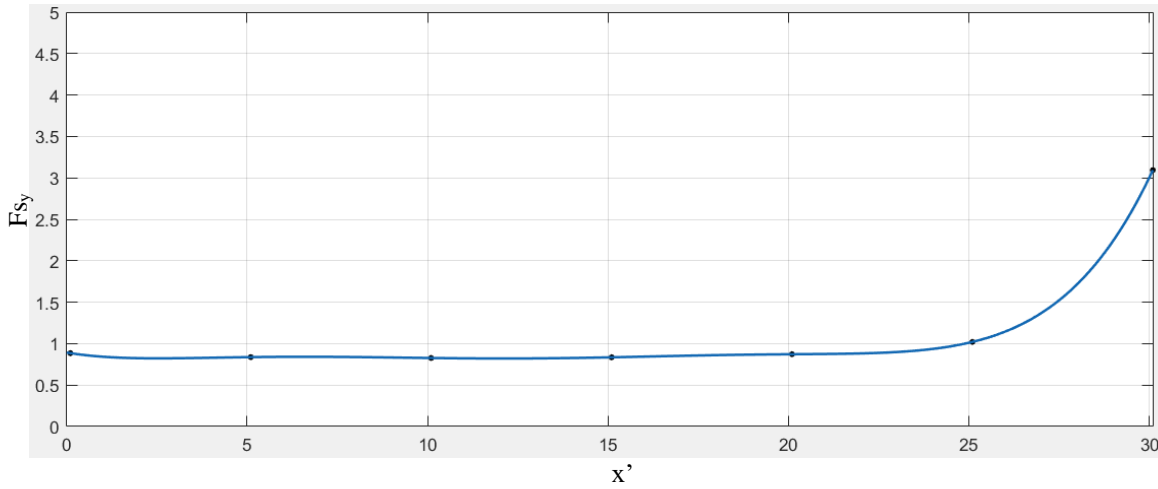
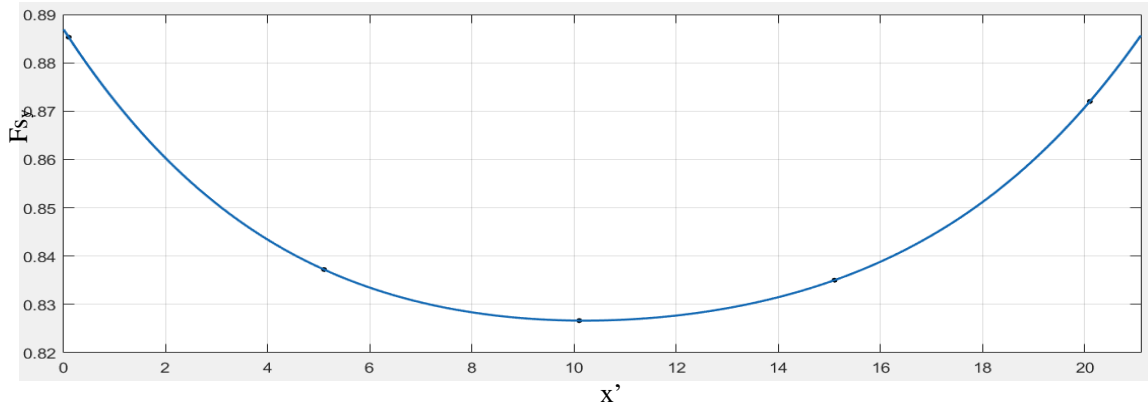
Sonlu farklar kullanılarak Parplans perdesinin tüm konumları için hesaplanan düşeydeki kaynak çıkış hızları ve düşey güvenlik katsayıları Tablo 5’te verilmiştir. Palplans perdesinin konumuna göre Kaynamaya karşı düşey yöndeki güvenlik sayısının değişimi Şekil 9’da görülebilir. Bu çalışmanın başında bu fonksiyona bir eğri uydurularak, eğri uydurulan bu fonksiyonu maksimum yapan konumun bulunması amaçlanmıştır. Ama Şekil 9’da ve minimum olduğu noktanın daha iyi görülmesi amacıyla büyütülmüş Şekil 10.a’da görüldüğü üzere Kaynamaya karşı düşey yöndeki güvenlik sayısının x’ konumuna göre önce monoton olarak azalmakta ve x’=10 metreda minimum olmaktadır. Kaynamaya karşı düşey yöndeki güvenlik sayısının bu aralıkta sürekli birden küçük kaldığı görülebilir. Şekil 9’da minimum noktanın oluşmasının ardından Kaynamaya karşı düşey yöndeki güvenlik sayısının x’ konumuna göre x’=L olana kadar monoton olarak artmaktadır. Bundan dolayı türev almaya gerek görülmemiştir. Kaynamaya karşı düşey yöndeki güvenlik sayısının değişimi daha iyi görülmesi amacıyla büyütülerek Şekil 10.b’de verilmiştir. Kaynamaya karşı düşey yöndeki güvenlik sayısının aldığı maksimum değer 3,093 olarak hesaplanmıştır. Yani düşey yöndeki güvenlik sayısının güvenlik katsayısı sürekli arttığı için Palplans perde baraj duvarının en sağ tarafına konulduğunda maksimum değerini almış olur.

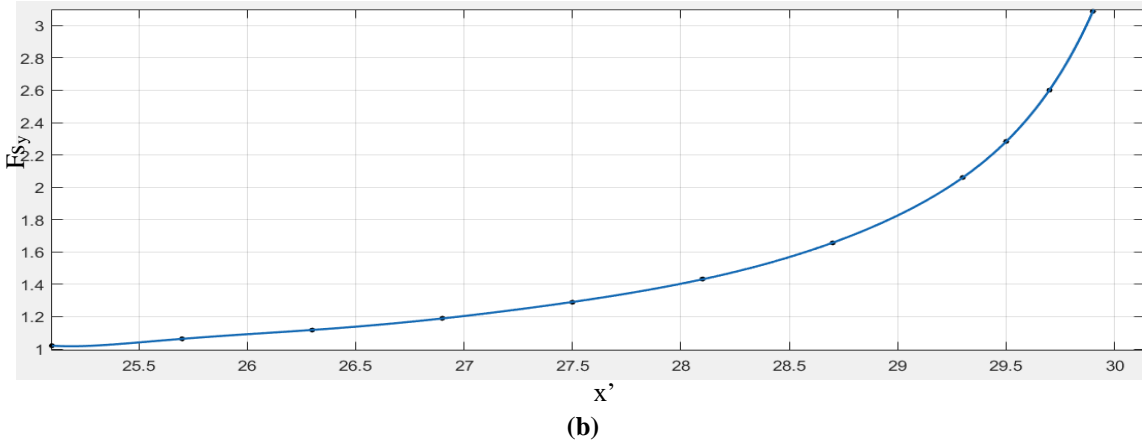
**Tablo 5.** Palplıns perdenin tüm konumları için sonlu farklar yöntemiyle hesaplanan düşey kaynak çıkış hidrolik eğimleri ve kaynamaya karşı güvenlik sayıları

Konum No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$x'$ (m)	0,1	5,1	10,1	15,1	20,1	25,1	25,7	26,3	26,9	27,5	28,1	28,7	29,3	29,5	29,7	29,9	30,1
$V_{y(\epsilon)Sızıntı}$ (cm/sn)	0,093	0,098	0,1	0,099	0,095	0,081	0,078	0,074	0,069	0,064	0,058	0,053	0,048	0,043	0,038	0,033	0,028
$\dot{I}_{yçıkış}$	0,932	0,985	0,998	0,988	0,946	0,885	0,837	0,772	0,723	0,665	0,616	0,558	0,509	0,451	0,392	0,334	0,275
$F_{Sy}$	0,885	0,84	0,83	0,84	0,87	1,02	1,06	1,12	1,19	1,29	1,43	1,66	2,06	2,28	2,6	3,08	3,093

**Tablo 6.** Palplıns perdenin eşit aralıklı (5m) konumları için sonlu farklar yöntemiyle hesaplanan düşey kaynak çıkış hızları düşey hidrolik eğim değerleri ve hızlar için kaynamaya karşı güvenlik sayıları

Konum No	1	2	3	4	5	6
$x'$ (m)	0,1	5,1	10,1	15,1	20,1	25,1
$V_{y(\epsilon)Sızıntı}$ (cm/sn)	0,0932	0,0985	0,1	0,099	0,095	0,081
$\dot{I}_{yçıkış}$	0,9319	0,9854	0,998	0,988	0,9461	0,8082
$F_{Sy}$	0,885288	0,837223	0,826653	0,83502	0,872001	1,020787

**Şekil 9.** Kaynamaya karşı güvenlik sayısının ( $F_{Sy}$ ) Parplıns perdesinin konumuna ( $x'$ ) göre değişimi**(a)**



**Şekil 10. a)** Minimum noktasının daha iyi görülmesi için büyütülmüş (Konum No 1-5) Kaynamaya karşı güvenlik sayısının Parplans perdesinin konumuna ( $x'$ ) göre değişimi; **b)** Minimum noktası sonrası monoton artışın daha iyi görülmesi için büyütülmüş (Durum No 5-16) Kaynamaya karşı güvenlik sayısının Parplans perdesinin konumuna ( $x'$ ) göre değişimi

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada önce kaynama probleminin çözülmesi için gerekli olan sonlu farklar çözümü türetilmiş ve ardından baraj tabanı altına yerleştirilmiş palplans perdenin konumu değiştirilerek, konuma göre güvenlik katsayısının değişimi eğrileri çizdirilmiştir. Çalışmada y doğrultusunda kaynama olayının analizi için gerekli hesaplar yapılmıştır. Geçirimsiz beton barajın altından sızan suyun, barajın çıkış bölgesinde kaynama olayını meydana getirmemesi için geçirimsiz palplans perdeyle akım yolu uzatılarak suyun sızıntı hızı yavaşlatılmıştır. Kullanılan perdenin uzunluğu sabit tutulup baraj duvarının altında 17 farklı yerde konumlandırılarak, kaynama olayının meydana gelmesi beklenen bölgede yani barajın çıkış bölgesinde yatay ve düşey sızıntı hızının değişimini incelenmiştir. Perdenin giriş bölümünde, orta bölümünde ve çıkış bölümünde olan davranışı daha detaylı olarak incelenerek sunulmuştur. Bu 17 hesaplanan durum için yatay ve düşey sızıntı hızları ile bölgedeki kritik hidrolik eğim değeri hesaplanarak düşey yönde kaynamaya karşı güvenlik sayısı belirlenmiştir. Palplans perdesinin memba(giriş) bölgesinden, mansap(çıkış) bölgesine doğru yer değiştirilerek konumlandırıldığında çıkıştaki hidrolik eğim değerinin sürekli azalmadığı görülmüştür. Memba bölümünden barajın yaklaşık orta kısmına doğru yer değiştirilerek konumlandırıldığında çıkıştaki hidrolik eğim değerinin arttığı görülmüştür. Barajı yaklaşık orta bölümünden mansap bölümüne doğru yer değiştirilerek konumlandırıldığında ise çıkıştaki hidrolik eğim değeri azalmıştır. Çıkıştaki hidrolik eğim değerinin en yüksek olduğu durum palplans perdenin barajın yaklaşık orta bölümünde konumlandırıldığı durumdur. Palplans perdesinin çıkış bölgesinde kullanımının (Şekil 4.c) kaynamaya karşı en güvenli durum olduğu görülmüştür. Palplans perdesinin Barajın duvarının altında giriş ve orta bölgelerde kullanımı durumunda kaynamaya karşı güvenlik sayısının sağlanması için bu bölgelerde kullanılan palplans perde uzunluğunun artırılması gerekecektir. Bu durum zaman ve ekonomik açıdan istenmeyen bir durumdur. Aynı güvenlik katsayısı baz olarak alınırsa en ekonomik çözüm perdenin çıkış bölgesine yerleştirilmesidir. Ayrıca barajın girişine ve ortasına palplans perde eklemektense çıkışına eklenilmesi işçilik açısından daha kolaydır ve baraj bitikten sonra bile yapılıp eklenilebilir. Benzeri bir problemin alttaki geçirimsiz tabaka çok derinde olduğunda yani  $h_y$  çok büyük olduğunda incelenmesi gelecekte yapılabilecek yeni bir araştırma konusu olabilir.

## Referanslar

- Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Laue, J., & Knutsson, S. (2020). Dam safety problems related to seepage. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 10(6), 191-239.
- Ahmadi, H., Salimi, H., & Hemmati, M. (2018). Analysis of seepage through earth dams by using finite difference numerical method and extended pressure technique. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 19(72), 1-14.
- Banerjee, S., & Muleshkov, A. (1992). Analytical solution of steady seepage into double-walled cofferdams. *Journal of engineering mechanics*, 118(3), 525-539.
- Bennett, P. T. (1946). The effect of blankets on seepage through pervious foundations. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 111(1), 215-228.
- Bruch Jr, J. C., & Fernandez Sainz, L. B. (1972). Analytical flow nets in channel seepage flows. *Water Resources Research*, 8(2), 519-524.
- Cedergren, H. R. (1997). *Seepage, drainage, and flow nets (C. 16)*. John Wiley & Sons.

- Chen, Y., Zhou, C., & Zheng, H. (2008). A numerical solution to seepage problems with complex drainage systems. *Computers and Geotechnics*, 35(3), 383-393.
- Chowdhury, R., Flentje, P., & Bhattacharya, G. (2009). *Geotechnical slope analysis*. Crc Press.
- Donald, P. C. (1999). *Geotechnical engineering: principles and practices*. Alan Apt, (206-268)
- Fadaei-Kermani, E., Shojaee, S., Memarzadeh, R., & Barani, G. (2019). Numerical simulation of seepage problem in porous media. *Applied Water Science*, 9, 1-8.
- Fetter, C. W. (2018). *Applied hydrogeology*. Waveland Press.
- Fontana, N. (2008). Experimental analysis of heaving phenomena in sandy soils. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(6), 794-799.
- Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. (2000a). A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 1025-1061.
- Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. (2000b). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 1000-1024.
- France, P. W., Parekh, C., Peters, J. C., & Taylor, C. (1971). Numerical analysis of free surface seepage problems. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 97(1), 165-179.
- Fukuchi, T. (2016). Numerical analyses of steady-state seepage problems using the interpolation finite difference method. *Soils and Foundations*, 56(4), 608-626.
- Harr, M. E. (1991). *Groundwater and seepage*. Courier Corporation.
- He, J.-H. (1998). Approximate analytical solution for seepage flow with fractional derivatives in porous media. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 167(1-2), 57-68.
- Hnang, T. (1996). Stability analysis of an earth dam under steady state seepage. *Computers & structures*, 58(6), 1075-1082.
- Hunter, G., & Fell, R. (2003). *The deformation behaviour of embankment dams*. University of New South Wales, School of Civil and Environmental Engineering.
- Huyakorn, P. S. (2012). *Computational methods in subsurface flow*. academic press.
- Ilyinsky, N., Kacimov, A., & Yakimov, N. (1998). Analytical solutions of seepage theory problems. Inverse method, variational theorems, optimization and estimates (a review). *Fluid dynamics*, 33(2), 157-168.
- Kaliakin, V. N. (2018). *Introduction to approximate solution techniques, numerical modeling, and finite element methods*. CRC Press.
- Kirra, M., Shahien, M., Elshemy, M., & Zeidan, B. (2015). Seepage and slope stability analysis of Mandali earth dam, Iraq: A case study. *International Conference on Advances in Structural and Geotechnical Engineering (ICASGE'15)*.(6–9 April 2015 Hurgada, Egypt).
- Klohn, E. J. (1979). *Seepage control for tailings dams*. Proceedings, First International Conference on Mine Drainage, Miller Freeman Publications, San Francisco, CA.
- Kumbasar V. Ve Kip F. (1999). Zemin mekaniği problemleri. *Çağlayan Kitabevi*, (91-159)
- Lacy, S. J., & Prevost, J. H. (1987). Flow through porous media: A procedure for locating the free surface. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 11(6), 585-601.
- Lerner, D. N. (1986). Leaking pipes recharge ground water. *Groundwater*, 24(5), 654-662.
- Mariño, M. A., & Luthin, J. N. (1982). *Seepage and groundwater*. Elsevier.
- McNamee, J. (1949). Seepage into a sheeted excavation. *Geotechnique*, 1(4), 229-241.

- Mishra, G. C., & Reddy, A. S. (1983). Exit gradient in anisotropic porous medium. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(6), 897-904.
- Narita, K. (2000). Design and construction of embankment dams. Dept. of Civil Eng., Aichi Institute of Technology.
- Ozkan, S., & Adrian, D. D. (2008). Analytical construction of transient flow nets in homogeneous and isotropic flow medium. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 134(6), 888-893.
- Pachepsky, Y. (2004). *Seepage In Soils: Principles and Applications*.
- Peng, M., Zhang, L., Chang, D., & Xu, Y. (2016). *Dam failure mechanisms and risk assessment*. John Wiley & Sons.
- Peyret, R., & Taylor, T. D. (2012). *Computational methods for fluid flow*. Springer Science & Business Media.
- Polubarinova-Kochina, P. Y. (2015). *Theory of ground water movement*. Princeton university press.
- Pratama, I. T., & Ou, C.-Y. (2018). Analysis of Sand Boiling Failure in Deep Excavations. 125-141.
- Ps, M. A., & Balan, T. A. (2014). Numerical analysis of seepage in Embankment dams. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* (, ICICE, vol. 4, 13-23.
- Reddi, L. N. (2003). *Seepage in soils: Principles and applications*. John Wiley & Sons.
- Rezk, M. A. E.-R. M., & Senoon, A. E.-A. A. A. (2011). Analytical solution of seepage through earth dam with an internal core. *Alexandria Engineering Journal*, 50(1), 111-115.
- Schwartz, F. W., & Zhang, H. (2002). *Fundamentals of ground water*. John Wiley & Sons.
- Sedghi-Asl, M., Parvizi, M., Azar, E., & Yousefi, M. (2022). Failure modeling of alluvial foundations due to boiling: Numerical modeling versus experiments. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 56(3), 249-255.
- Sharif, N. H., & Wiberg, N. (2002). Adaptive ICT procedure for non-linear seepage flows with free surface in porous media. *Communications in numerical methods in engineering*, 18(3), 161-176.
- Sherard, J. L., & Dunnigan, L. P. (1985). Filters and leakage control in embankment dams. 1-30.
- Simpson, M., & Clement, T. (2003). Comparison of finite difference and finite element solutions to the variably saturated flow equation. *Journal of hydrology*, 270(1-2), 49-64.
- Şen, Z. (2017). *Applied hydrogeology for scientists and engineers*. CRC Press.
- Tanaka, T., & Verruijt, A. (1999). Seepage Failure of Sand Behind Sheet Piles—The Mechanism and Practical Approach to Analyze—. *Soils and Foundations*, 39(3), 27-35.
- Tanaka, T., & Yokoyama, T. (2006). Effect of jet grouting under sheet piles on seepage failure stability of soil. 923-929.
- Tanaka, T., Takashima, W., Pham, T. T. H., Utra, K., & Uemura, N. (2012). A case study on seepage failure of bottom soil within a doublesheet-pile-wall-type ditch. *ICSE6 Paris*, 27-31.
- Terzaghi, K. (1922). Failure of dam foundations by piping and means for preventing it. *Die Wasserkraft, special forchheimer*, 17, 445-449.
- Toro, E. F. (2013). *Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: A practical introduction*. Springer Science & Business Media.
- United States. Bureau of Reclamation. (1987). *Design of small dams*. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- Wang, H. F., & Anderson, M. P. (1995). *Introduction to groundwater modeling: Finite difference and finite element methods*. Academic Press.
- Wang, J., Leung, C., & Chow, Y. (2003). Numerical solutions for flow in porous media. *International Journal for numerical and*



analytical methods in geomechanics, 27(7), 565-583.

Yousefi, M., Parvizi, M., & Sedghi-Asl, M. (2016). Laboratory Investigation the Effects of sheet pile on Seepage Control and sand boiling through Alluvial Foundation of hydraulic structures. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 48(3), 315-328.

Yousefi, M., Sedghi-Asl, M., & Parvizi, M. (2016). Seepage and boiling around a sheet pile under different experimental configuration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(12), 06016015.

Zheng, H., Shi, Z., Shen, D., Peng, M., Hanley, K. J., Ma, C., & Zhang, L. (2021). Recent advances in stability and failure mechanisms of landslide dams. *Frontiers in Earth Science*, 9, 659935.

Zienkiewicz, O., Mayer, P., & Cheung, Y. K. (1966). Solution of anisotropic seepage by finite elements. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 92(1), 111-120.

Zijl, W., & Nawalany, M. (1993). *Natural groundwater flow*. CRC Press.