

Eğimli palplanş ve temel zemini özelliklerinin hidrolik yapı altındaki sızmaya etkisi

Hasan G. MOHAMED*, Necati AĞIRALIOĞLU

İTÜ İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Bu çalışmada, baraj altındaki sızmalarla ilgili çıkış yük eğimi ve kaldırma kuvveti gibi önemli parametrelerin belirlenmesi bir matematik modelle incelenmiştir. Bunlardan başka temel zemini özelliklerinin de borulanma veya alttan kaldırmaya dolayısıyla yapının sağlamlık riskine etkileri vardır. Yapının altına yerleştirilen palplanşlar bu tehlikelerin azaltılmasında etkili olur. Bu amaçla, sonlu farklar metoduna dayanan bir nümerik çözüm geliştirilerek homojen olmayan ve anizotrop bir temel için baraj altındaki basınç yükleri özellikle eğimli palplanş durumu için hesaplanmıştır. Modelin geçerliliği analitik çözümlerle karşılaştırılmıştır. Analitik çözümler sadece izotrop ve homojen zeminler ile sonsuz derinlikli geçirimsiz zeminler için mevcuttur. Sonuçların iyi bir uyum içinde oldukları belirlenmiştir. Bu çalışmanın hedefi palplanş eğim açısının, zeminin k_x/k_z sızma katsayısı oranlarının ve palplanş derinliğinin çıkış yük eğimine ve kaldırma basıncına etkilerini incelemektir.

Anahtar Kelimeler: Baraj, sonlu farklar, nümerik model, borulanma, sızma, palplanş.

Effects of inclined cut-offs and foundation soil on seepage flow beneath a hydraulic structure

Abstract

In the study of confined seepage through pervious soils beneath water retaining structures, the exit gradient and the uplift pressure are among the important quantities that need to be assessed by the designers. These quantities, in addition to the foundation soil characteristics, play a great role in determining the safety of such structures against failure due to piping or uplift. Cut-offs like sheet piles can be provided to reduce such quantities, resulting in an appreciable saving in dimensions of the structure. For these reasons, a numerical model, employs the finite difference technique, is developed to solve for the piezometric head distribution within the pervious foundation soil beneath a dam (or weir) with inclined sheet pile(s). The validity of the developed model is examined by comparing its results with the available analytical solution, for the case of a homogeneous and isotropic soil having an infinite depth. The comparison showed an excellent agreement. The objective of the present study is to investigate the effects of the slope angle of the sheet pile, θ , the variation of horizontal to vertical permeability ratio, k_x/k_z , and the sheet pile to foundation soil depths ratio, s/FD , on exit gradient and uplift pressure. The exit gradient and uplift pressure are evaluated graphically in non-dimensional form and are shown to be affected by changing the above mentioned parameters.

Keywords: Dam, finite difference, numerical model, piping, seepage, sheet pile.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Hasan MOHAMED. mohamedh@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 68 45.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış "Effects of inclined cut-offs and foundation soil on seepage flow beneath a hydraulic structure" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 01.09.2004 tarihinde dergiye ulaşmış, 15.12.2004 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Baraj yerlerindeki temel zemininde kum ve çakıl karışımı en çok karşılaşılan durumdur. Genellikle bu tür zeminlerde iki ana problemle karşılaşılır ve bunların tasarımcılar tarafından çözümü istenir : (1) Sızma kayıplarını önlemek veya en aza indirmek, (2) Çıkış yük eğimi ve kaldırma kuvveti etkisini belirlemek ve kontrol etmek. Mansap taraftaki çıkış yük eğimi, i_e , kritik hidrolik eğime yaklaşırsa, temel zemininde bozulma ve kaldırma başlar (Terzaghi ve Peck, 1967). Borulanmayı önlemek için, mansap tarafta ortaya çıkacak sızma suyunun hızını güvenli bir değere kadar azaltmak gerekir. Bu ise sızma boyunu uzatmakla başarılabilir. Bu uzatma metotlarından biri, düşey veya eğimli çelik palplanş şeklinde sapma duvarları öngörmeğdir. Bununla birlikte literatürde eğimli palplanşlarla ilgili pek az yayın mevcuttur. Verigin (1940), konform tasvir uygulayarak sonsuz derinliği olan geçirimli bir zemine çakılacak eğimli palplanşlar etrafındaki sızma akışını incelemiştir. Polubarinova-Kochina (1962) sonsuz derinliği olan geçirimli zeminde eğimli sapma duvarı için hidrodinamik akım ağını vermişlerdir. Bununla birlikte, Abbas (1994) konform transformasyonu kullanmıştır ve düz baraj temeli altında homojen ve izotrop, sonsuz derinliği olan zeminde mansap topuğunda eğimli bir palplanş durumu için sızma akımını çözmüştür. Belli bir derinliği olan homojen ve izotrop zeminler için Abbas'ın (1994) çözümüne dayanan tasarım eğrileri çok açık ve faydalıdır. Ancak bu çözümler, izotrop ve homojen olmayan, sınırlı derinliği olan geçirimli zemin durumları için geçerli değildir. Sonlu farklar veya sonlu elemanlar bu tür problemleri kolay ve

hassas çözmek için her durumda kullanılabilir. Bu çalışmada, Şekil 1'de şeması verilen bir baraj altındaki eğimli palplanş durumu için sızma akımını çözmek üzere nümerik teknikler kullanılmıştır. Böylece palplanş eğim açısı (θ), yatay ve düşey geçirimsizlik oranı (k_x/k_z) ve palplanş boyunun temel zemini derinliğine oranının (s/FD), etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir.

Temel denklemler

İki boyutlu kararlı akımın genel denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x(x,z)\frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z(x,z)\frac{\partial h}{\partial z}) = 0 \quad (1)$$

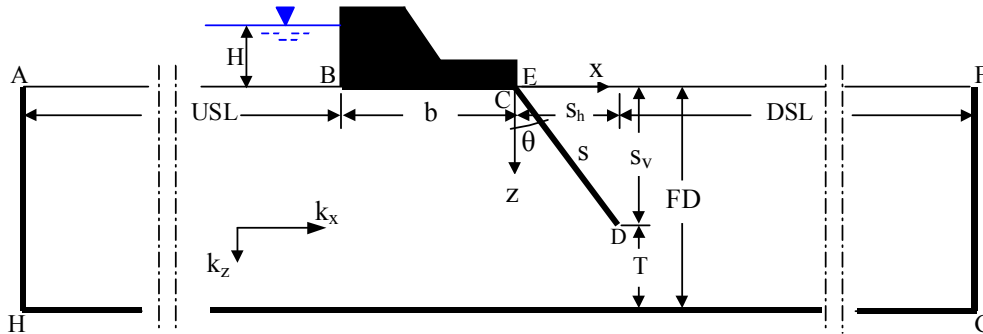
şeklindedir. Burada h piyezometrik yük; x ve z kartezyen sistemde koordinatlardır.

Sonlu farklar çözümü

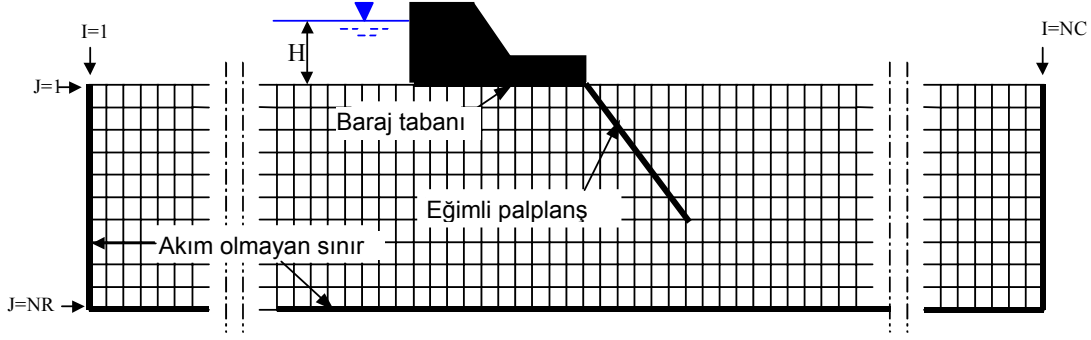
Sonlu farklar çözümü, şimdiye kadar pek çok ders kitabında (Rushton ve Redshaw, 1978; Remson vd., 1971) tanımlanmıştır. Bununla birlikte bu tanımları aşağıdaki kısa paragrafla tekrar vermek faydalı olabilir. Şekil 2'de gösterildiği gibi sonlu farklar yaklaşımında, türevler, düğüm noktaları arasında alınan farklarla yer değiştirilir. Böylece, üniform olmayan aralıklar için :

$$h_{i,j} = \frac{Ah_{i+1,j} + Bh_{i-1,j} + Ch_{i,j-1} + Dh_{i,j+1}}{E} \quad (2)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada $h_{i,j}(i, j)$ düğüm noktasındaki basınç yüküdür. Burada:



Şekil 1. Sızma problemi fiziksel karakteristiklerinin şematik tanımı



Şekil 2. Sonlu fark ağının şeması

$$A = \frac{k_{x_1}}{\Delta x_i (\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} \quad (3)$$

$$B = \frac{k_{x_2}}{\Delta x_{i-1} (\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} \quad (4)$$

$$C = \frac{k_{z_1}}{\Delta z_{j-1} (\Delta z_j + \Delta z_{j-1})} \quad (5)$$

$$D = \frac{k_{z_2}}{\Delta z_j (\Delta z_j + \Delta z_{j-1})} \quad (6)$$

$$E = A + B + C + D \quad (7)$$

$$k_{x_1} = \frac{(k_x)_{i+1,j} + (k_x)_{i,j}}{2} \quad (8)$$

$$k_{x_2} = \frac{(k_x)_{i-1,j} + (k_x)_{i,j}}{2} \quad (9)$$

$$k_{z_1} = \frac{(k_z)_{i,j-1} + (k_z)_{i,j}}{2} \quad (10)$$

$$k_{z_2} = \frac{(k_z)_{i,j+1} + (k_z)_{i,j}}{2} \quad (11)$$

dir.

(2) Denklemi, geliştirilen bilgisayar programının özünü oluşturur. Çözüm alanındaki her bir (i,j) iç noktasında, (2) Denklemi şeklinde bir denklem mevcuttur. Her bir iç nokta için böyle bir denklem yazarak bir cebrik denklemler takımı elde etmek mümkündür.

İstenen basınç yüklerini bulmak için bu denklem takımı sınır şartlarına göre çözülür. Sınırdaki gerekli sonlu fark denklemlerini türetmek için, Şekil 3'te görülen i,j köşe noktasının etkili olduğu kısım içindeki akım için Darcy Kanunu kullanılır (Remson vd., 1971). Bunun için $\sum Q = 0$ bağıntısına dayanan süreklilik ilkesi esas alınarak ve Darcy Kanunu kullanılarak:

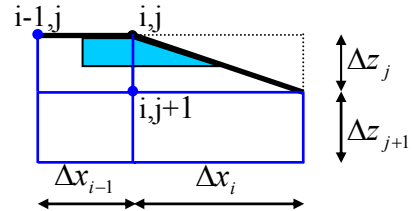
$$h_{i,j} = \frac{Ah_{i-1,j} + Bh_{i,j+1}}{A + B} \quad (12)$$

bağıntısını yazmak mümkündür. Burada:

$$A = \frac{k_{x_2} \Delta z_j}{\Delta x_{i-1} (\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} \quad (13)$$

$$B = \frac{k_{z_2}}{\Delta z_j} \quad (14)$$

dir.



Şekil 3. Köşe sınır düğümünün etki alanı

Benzer ifadeler diğer sınır düğüm noktaları için de türetilir. İç ve sınır düğüm noktaları için uygulanan sonlu fark formlarının özeti Şekil 4'te verilmiştir.

- İç düğüm noktaları için

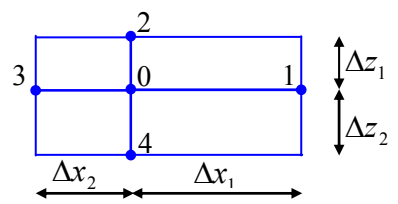
$$h_0 = (Ah_1 + Bh_3 + Ch_2 + Dh_4) / E$$

$$A = k_{x1} / (\Delta x_1 * (\Delta x_1 + \Delta x_2))$$

$$B = k_{x2} / (\Delta x_2 * (\Delta x_1 + \Delta x_2))$$

$$C = k_{z1} / (\Delta z_1 * (\Delta z_1 + \Delta z_2))$$

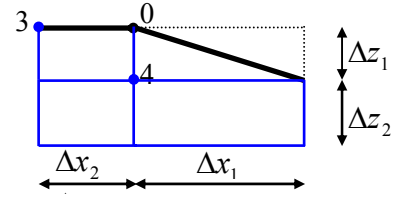
$$D = k_{z2} / (\Delta z_2 * (\Delta z_1 + \Delta z_2))$$

$$E = A + B + C + D$$


- Köşe düğüm noktaları için (Baraj tabanı ile eğimli topuk enjeksiyon perdesi arasındaki)

$$h_0 = (Ah_3 + Bh_4) / (A + B)$$

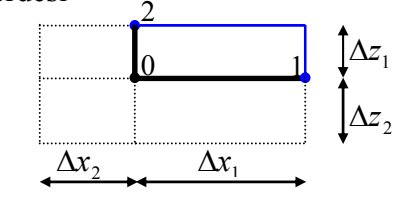
$$A = k_{x2} \Delta z_1 / (\Delta x_2 * (\Delta x_1 + \Delta x_2))$$

$$B = k_{z2} / \Delta z_1$$


- Köşe düğüm noktaları için (Baraj tabanı ve düşey topuk enjeksiyon perdesi arasındaki. Temel kayasının sağ ve sol köşe düğümlerindeki)

$$h_0 = (Ah_1 + Bh_2) / (A + B)$$

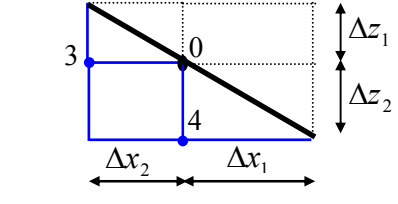
$$A = k_{x1} \Delta z_1 / \Delta x_1$$

$$B = k_{z1} \Delta x_1 / \Delta z_1$$


- Eğimli enjeksiyon perdesi sağ ve sol tarafı için

$$h_0 = (Ah_3 + Bh_4) / (A + B)$$

$$A = k_{x2} / (\Delta x_2 * (\Delta x_1 + \Delta x_2))$$

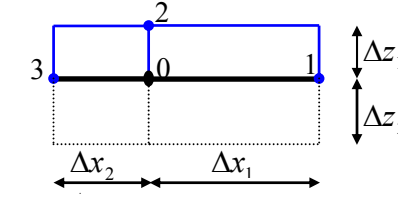
$$B = k_{z2} / (\Delta z_2 * (\Delta z_1 + \Delta z_2))$$


(1) Baraj tabanı sağ, sol ve alt sınırları için
 (2) Düşey enjeksiyon perdesinin sol ve sağ tarafları için

$$h_0 = (Ah_1 + Bh_3 + Ch_2) / (A + B + C)$$

$$A = k_{x1} \Delta z_1 / (\Delta x_1 * (\Delta x_1 + \Delta x_2))$$

$$B = k_{x2} \Delta z_1 / (\Delta x_2 * (\Delta x_1 + \Delta x_2))$$

$$C = k_{z1} / \Delta z_1$$


Şekil 4. İç ve sınır noktalarında sonlu fark denklemleri

Nümerik model

Belirlenen sınır şartlarına göre temel denklemin çözümü için FORTRAN 77 kullanılarak bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Bu program, basınçlı sızma için Rushton ve Redshaw (1978) tarafından verilene oldukça benzemektedir. Bununla birlikte, her bir θ eğim açısına göre uygun sınır şartlarının ortaya konabilmesi için program değiştirilmiştir. Bu şartların, baraj tabanındaki şartlar değiştikçe, değiştirilmeleri gerekir. Bu program ardışık tekrar içermektedir ve çözümün yakınsaklığı kontrol edilmiştir. Ardışık tekrar metodlarında, bilinmeyen yükler için başlangıçta rastgele değerler alınmaktadır. Bununla birlikte ilk basınç yükleri için değerler esas alındığından (2) Denklemi bütün iç noktaları için yeterli değildir. $h_{i,j}$ değerlerini düzeltmek için, $h_{i,j}$ değeri aşağıdaki bağıntıya göre düzeltilir ve ardışık işleme geçilir.

$$(h_{i,j}^n)_{corr} = \omega h_{i,j}^n + (1 - \omega)(h_{i,j}^{n-1})_{corr} \quad (4)$$

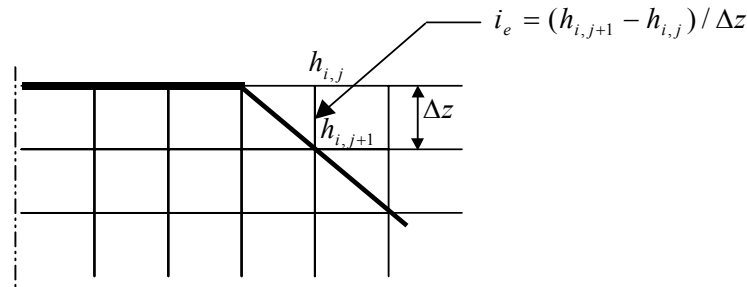
Burada n ardışık tekrar seviyesi, ω relaksasyon faktörü ($1 \leq \omega \leq 2$)'dir. Yeni basınç yükleri ile işleme devam edilir ve $(h_{i,j}^{n-1})_{corr}$, $(h_{i,j}^n)_{corr}$ 'ya eşit oluncaya kadar iterasyona (ardışık tekrar) devam edilir. Böylece öngörülen hassaslığa, yani iki iterasyon seviyesi arasındaki farkın belirlenen seviyenin altına düşmesine kadar işlemler tekrarlanır. Eğer yakınsaklık kriteri sağlanırsa program sona erer ve sonuçlar yazdırılır. Nümerik çözümden bulunan sonuçlar (1) bütün iç noktalarda $(h_{i,j})$ basınç yükleri, (2) basınç yüklerinden hesaplanacak olan mansap çıkışı boyunca ortaya çıkan çıkış yük eğimleri (i_e)'dir.

Nümerik çözümün işlemlerini tanımlamak için Şekil 2'de gösterilen baraj kesiti seçilmiştir. Bu çalışmada olduğu gibi ince bir enjeksiyon perdesi seçilmesi durumunda, enjeksiyon perdesi yakınında ek bazı ağ düğüm noktaları alınmalıdır. Bu ek düğüm noktalarının enjeksiyon perdesi menba ve mansabında, farklı basınç yükleri olması gerekir. Enjeksiyon perdesi altındaki noktalarda ise basınç yükü aynı olmalıdır.

Baraj homojen ve izotrop olmayan bir zemin üzerinde oturmaktadır. Baraj tabanında baştan topuğa kadar geçirimsiz bir sınır vardır. Bu zeminin derinliği sınırlıdır ve yapısı belli bir geçirimsizlik oranı olan kumdan oluşmuştur. Permeabilite oranı, $k_x/k_z = 1, 5, 10, \text{ ve } 20$ alınmıştır. Anizotropluğun asal yönlerinin x ve z koordinat sistemindeki yönler olduğu esas kabul edilmiştir. Menba su yüksekliği sabit, mansap su yüksekliği ise sıfırdır. Geometriyi ve çalışma alanının tanımlayan bütün parametreler gerekli giriş verileridir. Çıkış verileri ise çözüm alanında önceden tanımlanan bütün noktalardaki basınç yüklerini içeren tablo değeridir. Bu tablolarda, mansap taraftaki bütün noktalardaki çıkış yük eğimleri de verilmiştir. Çıkış eğimi, i_e , Şekil 5'te gösterildiği gibi, çıkışa en yakın iki noktanın basınç yükü değerleri farkının aradaki Δz düşey mesafesine oranlanması ile bulunmuştur (Griffiths ve Fenton, 1998).

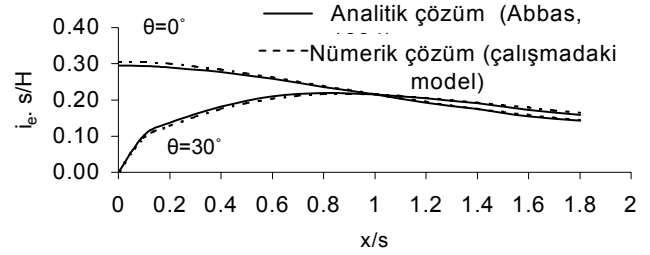
Sonuçların karşılaştırılması

Sunulan nümerik modelin geçerliliği, homojen ve izotrop olan ve sonsuz derinliği bulunan bir hal için analitik olarak elde edilen sonuçlarla (Abbas, 1994) bu çalışmadan bulunan sonuçlar

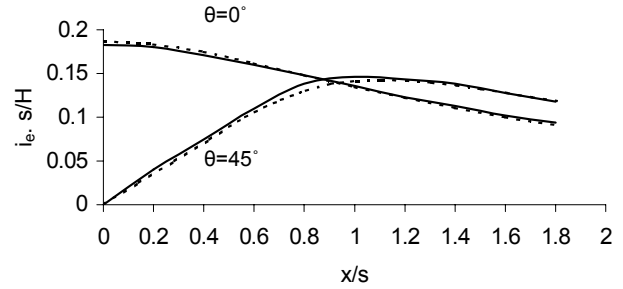


Şekil 5. Çıkış yük eğimi (i_e)'nin nümerik hesaplamasını gösteren şema

karşılaştırılarak gösterilmiştir. Nümerik çözümde, geçirimli temel kalınlığının baraj taban genişliğine oranı 2'den fazla ise, yani $FD/b > 2$ için, her iki çözümde bulunan sonuçların birbirleri ile çok iyi bir uyum içinde olduklarını söylemek gerekir. Mansap uçtaki çıkış yük eğimi için karşılaştırma Şekil 6'da, kaldırma basıncı için Şekil 7'de verilmiştir. Bu karşılaştırmada Şekil 1'deki C noktası gibi önemli noktalar için toplam yük farkının yüzdesi kullanılmıştır. Burada h_c C noktasındaki piyozometrik yüküdür. Basitlik ve kolay sunuş için, iki enjeksiyon perdesi açısına karşı gelen çıkış yük eğimleri için sadece iki eğri verilmiştir. ($b/s = 1$ için $\theta = 0^\circ, 30^\circ$ ve $b/s = 5$ için $\theta = 0^\circ, 45^\circ$). Burada b baraj taban genişliği ve s ise palplanş boyudur. x ise mansap topuğundan itibaren mansaba doğru mesafedir. Nümerik modelle tahmin edilen çıkış yük eğimi ve kaldırma basıncı değerleri konform analiz ile elde edilen değerle oldukça iyi bir uyum halindedir (Bütün θ açısı ve b/s oranı kombinasyonları için). Karşılaştırmalar çıkış yük eğimlerinde en büyük farkın % 9.6; ve kaldırma basıncında ise en büyük farkın % 7.9 olduğunu göstermiştir. Bu farklar aşağıdaki yollarla daha da azaltılabilir: (1) İki ardışık tekrar arasındaki yük değerlerinin hata toleransı daha küçük seçilmekle (mevcut modeldeki tolerans = 0.0001'dir); (2) en uygun temel derinliği (FD) seçilerek (böylece sonsuz zemin derinliğine yaklaşılar), (3) Sonlu fark ağının büyüklüğünü azaltarak. Ağ büyüklüğü ve sınır ağı, çıkış yük eğimlerinin ve kaldırma kuvvetlerinin belirlenmesini sağlamak ve modelin hesaplama zamanını azaltmak için, optimize edilmiştir. Değişik menba ve mansap uzunlukları kullanılarak ağın sınırları belirli mesafelerde takım oluşturmuşlardır. Bu uzunluklar baraj taban uzunluğuna bağlı olarak modelde hesaplanmıştır (yani $USL = N_1 b$ ve $DSL = N_2 b$ 'dir). Burada N_1 ve N_2 baraj taban uzunluğuna göre bu uzunlukların kaç kat uzun olduklarını gösteren tam sayılardır. Model sonuçlarından görülmüştür ki, eğer bu sınırlar baraj genişliğinin dört katından büyük veya ona eşit mesafede oluşturulursa, hesap sınırlarının etkisi minimum olmaktadır.

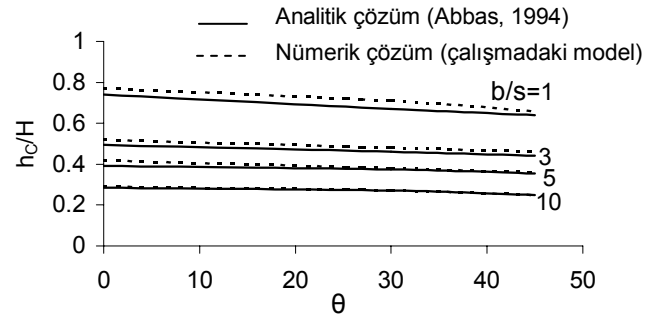


(a)



(b)

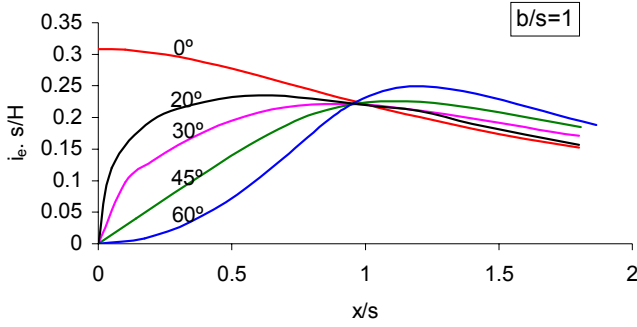
Şekil 6. Farklı θ değerleri için $i_e s/H$ ile x/s oranının değişiminin nümerik ve analitik metotlarla karşılaştırılması (Burada $k_x/k_z=1$):
(a) $b/s=1$ için ve (b) $b/s=5$ için



Şekil 7. Farklı (b/s) değerleri için θ ile h_c/H arasındaki bağıntıları için nümerik ve analitik sonuçların karşılaştırılması

Palplanş açısının (θ) etkisi

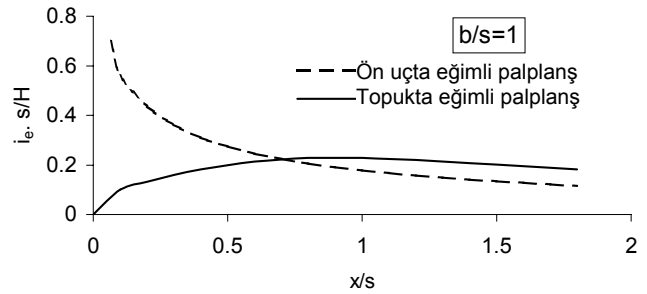
Bilgisayar uygulamaları ile bulunan basınç yükü dağılımı ve Abbas'ın (1994) açıklamalarından anlaşıldığına göre Şekil 1'in E noktasındaki çıkış eğimi, $\theta = 0^\circ$ durumu dışında, sıfırdır. E noktasının ötesinde çıkış yük eğimi bir maksimum değere ulaşmakta ve oradan baraj topuğundan uzaklaştıkça azalmaktadır. Bu durum $b/s=1$ seçilerek çizilmiş ve Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Farklı θ değerleri ve $k_x/k_z=1$ ve $b/s=1$ için çıkış yük eğiminin x/s ile değişimi

Bu şekil çeşitli eğim açılarının (θ) çıkış yük eğimine etkisini göstermektedir. Ayrıca bu şekilden görülmektedir ki çıkış yük eğimi maksimuma ulaştıktan sonra, bu çıkış yük eğimi, $\theta = 0^\circ$ den yaklaşık $\theta = 30^\circ$ 'ye varıncaya kadar azalır ve daha büyük θ açılarında artar. Baraj topuğunda çıkış yük eğimi, palplanş eğimi arttıkça azalmaktadır. Baraj topuğundan $x/s \cong 0.85$ boyutsuz mesafeden sonra, çıkış yük eğimi her bir palplanş açısı için mesafe arttıkça azalmaktadır. Bununla birlikte, açı artarken çıkış yük eğimi de artmaktadır. Sonuç olarak borulanmaya karşı emniyet katsayısı artmaktadır. Mansap tarafa doğru enjeksiyon perdesini 30° den az eğimli yapmak, böyle bir emniyet katsayısını arttırdığı için topukta eğimli bir palplanş yerleştirmenin faydalı olacağı söylenebilir. Model diğer $b/s = 3, 5$ ve 10 değerleri ile denince de aynı karakteristik gidiş izlenmiştir. Bilindiği gibi b/s artarken, çıkış yük eğimi azalmıştır. Aynı şekilde $b/s = 1$ için çıkarılan esas sonuçlar diğer değerler için de uygulanabilir. Şekil 7'den görüldüğü üzere, toplam yük farkının yüzdesi şeklinde ifade edilen C noktasındaki kaldırma basıncı, palplanş eğimi artarken azalır. Bununla birlikte basınçtaki bu azalış küçüktür. Maksimum azalış $b/s=1$ durumunda olur ve $\theta = 0^\circ$ ile 45° arasında değişince bu azalış yaklaşık % 13'tür. Sonuç olarak baraj tabanının menba ucuna eğimli bir palplanş çakmak tavsiye edilmez. Mansapta menbaya doğru eğimli palplanş için de aynı durum geçerlidir. Böyle bir durum, matematik olarak sonsuz bir hız ile birlikte barajın ucunda bir tekillik meydana getirir. Böylece çıkış yük eğimi eğrisi, sonsuz bir eğim ve topuğa çok yakın kısımda kararsız zemin şartları göstererek, topuğun hemen yakınında düşeye teğet olacaktır.

Baraja güvenlik sağlamak için baraj döşemesinin taban seviyesi basınçlı olmalı veya topuğuna bir palplanş çakılmalıdır. Buna bir örnek Şekil 9'da verilmiştir. Bu şekilde barajın menba ucuna ve topuğuna çakılan palplanşlar için çıkış yük eğimleri karşılaştırılmıştır. Palplanşın her iki yerde de menbaya veya mansaba doğru eğimli çakılması sıra ile incelenmiştir. Bu şekilde, topukta palplanş çakmanın topuk yakınındaki borulanma riskini azaltmadaki etkisi görülmektedir.



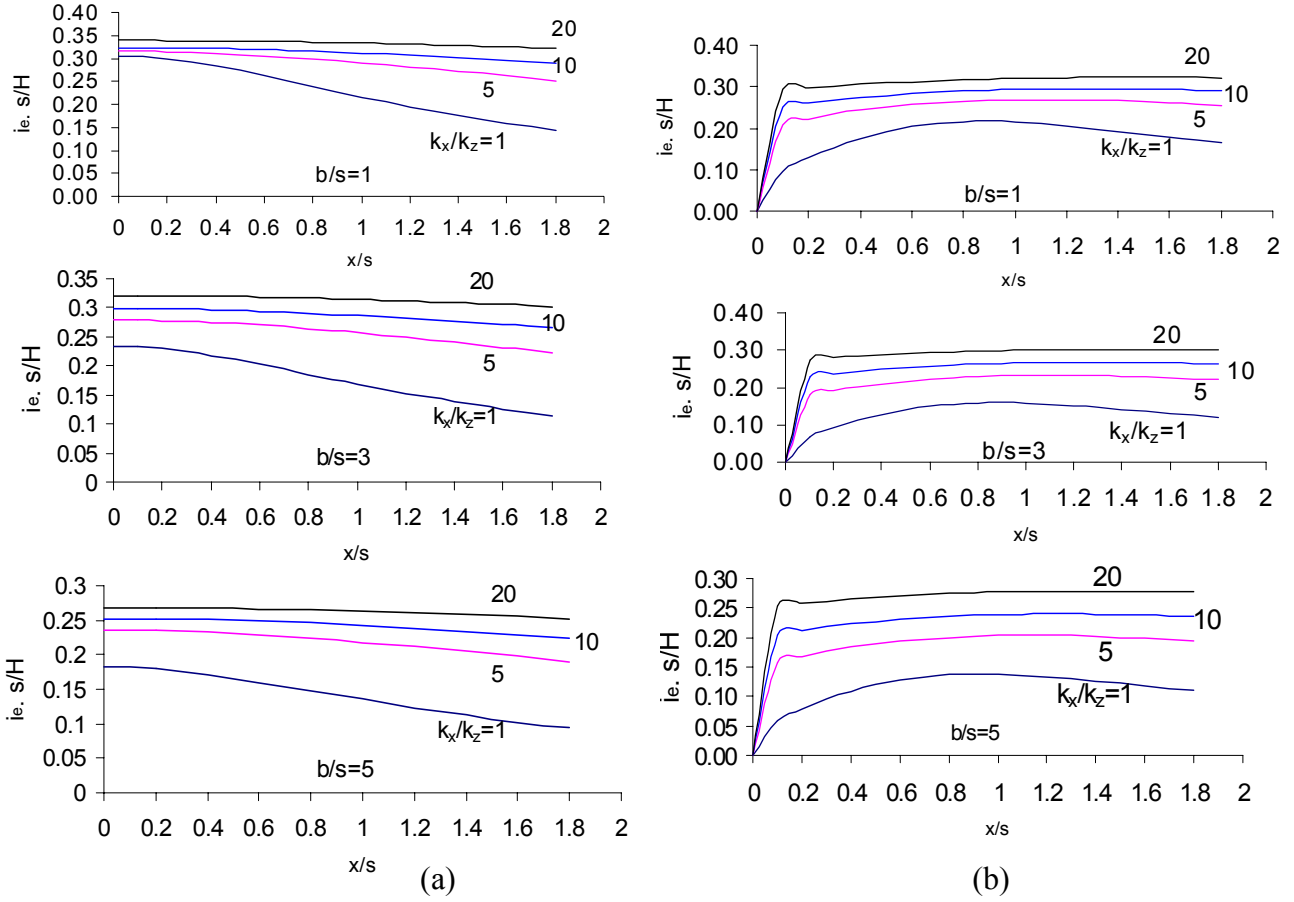
Şekil 9. Menba ucunda ve topukta palplanş çakılması durumunda $\theta = 30^\circ$, $k_x/k_z=1$ ve $b/s=1$ için çıkış yük eğiminin x/s ile değişimi

Temel malzemesi özelliklerinin etkisi

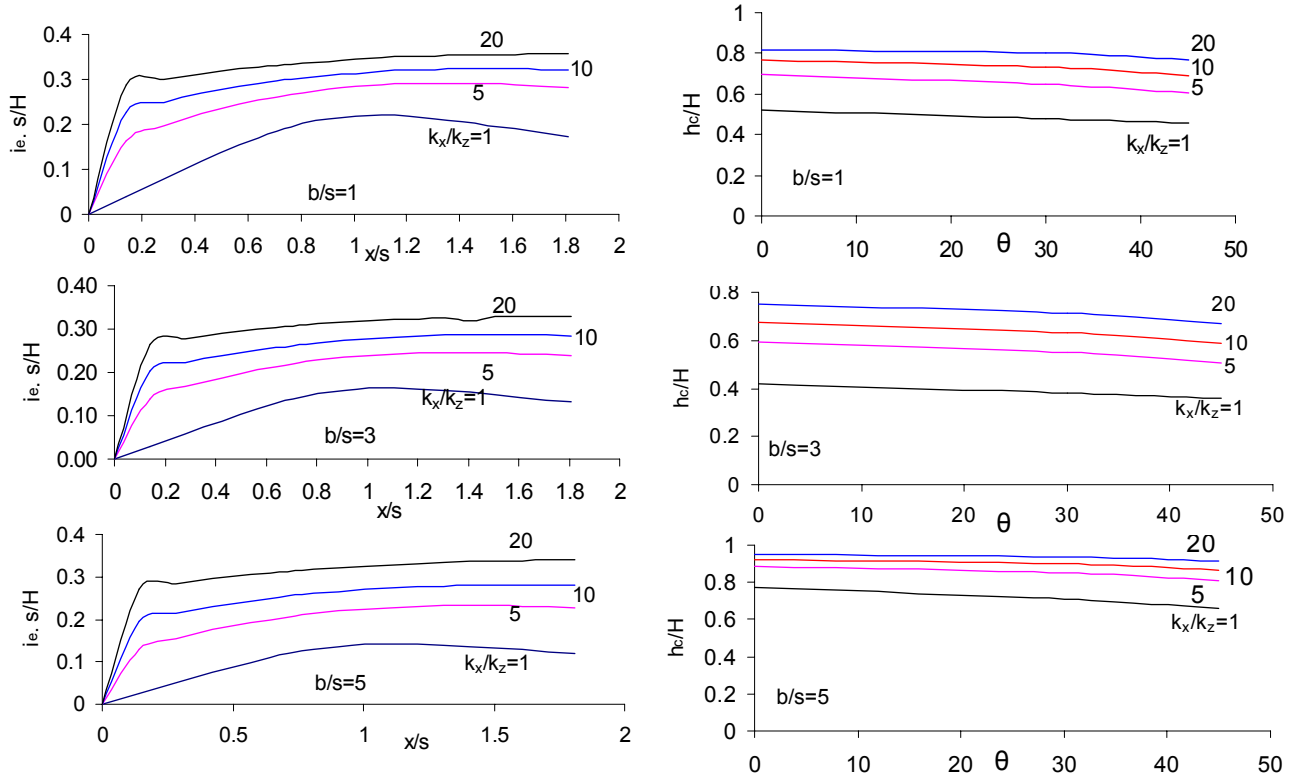
Anizotropluk oranının (k_x/k_z) etkisi

Anizotropluğun çıkış yük eğimine ve kaldırma basıncına etkisi sırasıyla Şekil 10, 11 ve 12'de açıkça gösterilmiştir. Tasarlanan anizotropluk oranları ile bulunan sonuçlar, Abbas (1994) tarafından izotrop ve homojen zemin durumu için bulunanlarla karşılaştırılınca, çıkış yük eğim değerlerindeki farklar görülmüştür. Bu farklar, $\theta=0^\circ$ için, küçük olmasına rağmen $x/s=1.8$ mesafesinde ve $k_x/k_z=10$ izotropluk halinde hemen hemen ikiye katlanmaktadır. Diğer θ değerleri için, çıkış yük eğimi, topuğa çok yakın kısımda sıfırdır. Topuktan $x/s=0.1$ kadar mesafede ve $k_x/k_z=10$ 'luk anizotropluk oranı için bu değer hızla artarak hemen hemen iki katına çıkmaktadır. Kaldırma basıncı için k_x/k_z değerleri değiştirilerek ve b/s değerleri sırasıyla 1, 3, ve 5 olarak sabit tutularak incelemeler yapılmıştır. Her durum için C noktasındaki kaldırma basıncı hesaplanmış ve palplanş eğimi ile değişimi Şekil 12'de gösterilmiştir.

Baraj altındaki sızma



Şekil 10. Çeşitli b/s değerleri için anizotropluk oranının (k_x/k_z), çıkış yük eğimine etkisi, (a) $\theta = 0^\circ$ (b) $\theta = 30^\circ$



Şekil 11. Çeşitli b/s değerleri için anizotropluk oranının (k_x/k_z), çıkış yük eğimine etkisi, $\theta = 45^\circ$

Şekil 12. Çeşitli b/s değerleri için anizotropluk oranının baraj tabanı ile palplanş topuğu arasındaki noktadaki kaldırma basıncına etkisi

Temel zemini derinliğinin (FD) etkisi

Çıkış yük eğimi için θ , k_x/k_z , ve b/s sabit kabul edilerek temel zemini derinliği değiştirilerek diğer bazı incelemeler yapılmıştır. Hesaplamalar $\theta = 0^\circ$, $\theta = 30^\circ$, ve $\theta = 45^\circ$ açılık üç palplanş için baraj temel genişliğinin palplanş uzunluğuna oranı sırasıyla 1, 3 ve 5 alınarak yapılmış ve sonuçlar Şekil 13 ve 14'te sunulmuştur. Temel zemini derinliği artarken çıkış yük eğiminin arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, $s/FD < 0.2$ ise, çıkış yük eğimindeki değişimin ihmal edilebilecek mertebede olduğu hesaplamalardan görülmüştür. İncelemeler göstermiştir ki, temel zemin derinliğini belli bir sınır değerini ötesine artırmakla, çıkış yük eğiminde hiçbir değişim sağlanmaz. Bu sonuç Harza (1935)'nin ifadesi ile uyumludur. Bu görüş şöyle ifade edilebilir: Barajın altından akan su taban profiline bağlı olarak mümkün olan en kısa yol boyunca yoğun olarak akmaya eğilimlidir. Başka bir ifade ile, su baraj tabanında dar bir şeritten akar. Bu bakımdan, nümerik çözümde nispeten daha fazla derinliğin analitik çözümdeki sonsuz zemin derinliği durumu ile değiştirilmesinin kabulü mümkündür. Sızan akımın çoğu baraj temel profiline yakın kısma yoğunlaşacağı için hatanın büyük olmayacağı kabul edilir. Şekil 15'ten görüleceği üzere, Şekil 1'deki C noktası gibi bazı noktalarındaki basınç azalışı, palplanşın geçirimli tabakanın % 50'sinden fazla derine çakılmadığı durum dışında, geçirimli tabakanın sonlu kalınlığından fazla etkilenmemektedir. $s/FD \approx 0$ olması sonsuz kalın geçirimli tabakalı sınırlı duruma karşı gelmektedir. Ayrıca bu sınır eğriden ayrılmaların, $s/FD > 0.5$ oluncaya kadar, büyük olmayacağı gösterilmiştir. Bu $s/FD \approx 0$ için, eğimli palplanşlı barajda kaldırma basıncının hesabında bu sınır eğri kullanılabilir. Herhangi bir durumda, topuğuna eğimli palplanş çakılmış bir barajın pratikteki tasarımı açısından bu yaklaşım oldukça emniyetlidir. Fakat bu durumda gerçekte olacak olandan daha yüksek kaldırma basıncı meydana gelecektir.

Sonuçlar

Sonlu farklar yaklaşımı kullanılarak palplanş eğim açısının, (θ), anizotropluk oranının, (k_x/k_z)

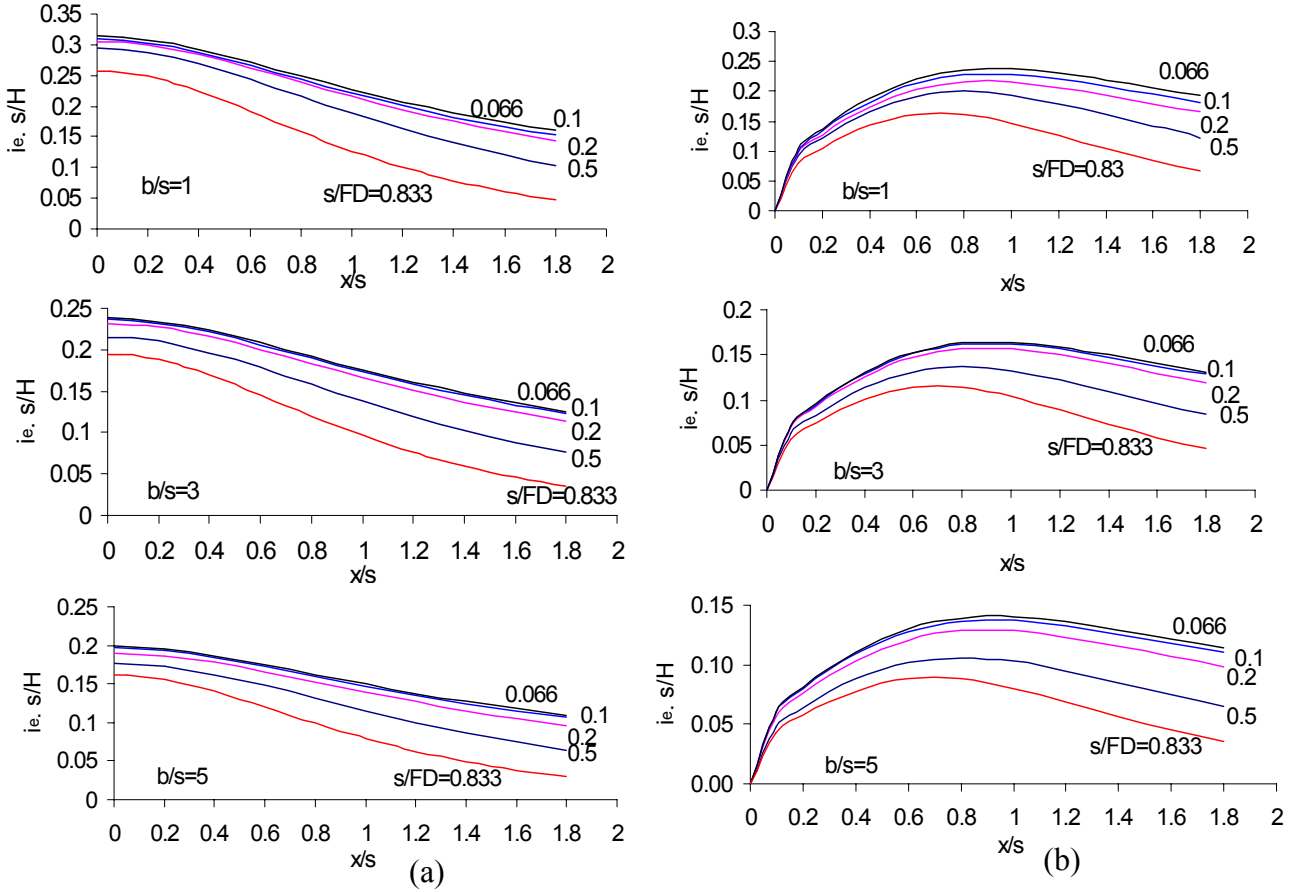
ve palplanş uzunluğunun geçirimli temel zemini derinliğine oranı, (s/FD) çıkış yük eğimine (i_e) ve topuk palplanşı ile iç köşe noktası arasındaki noktada kaldırma basıncına etkileri incelenmiştir. Bulunan sonuçlar θ , k_x/k_z , s/FD ve b/s 'nin farklı değerleri için boyutsuz formda grafik halinde sunulmuştur. Burada b baraj taban genişliğidir. Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

- Sonlu farklar metodu, konform tasvir ile bulunan sonuçlarla karşılaştırılabilir sonuçlar vermekte, anizotrop ve çeşitli derinlikli zeminlerde de uygulanabilir daha genel bir çözüm imkanı sağlamaktadır.

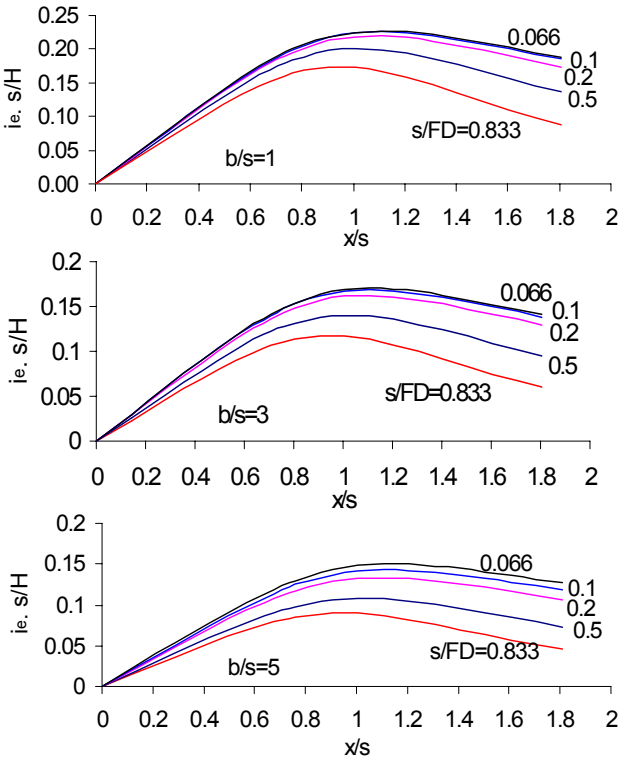
- Baraj topuğunda çıkış yük eğimi, palplanş eğimi arttıkça azalmaktadır. Baraj topuğundan $x/s \approx 0.85$ boyutsuz mesafeden sonra, çıkış yük eğimi her bir palplanş açısı için mesafe arttıkça azalmaktadır. Bununla birlikte, açı artarken çıkış yük eğimi de artmaktadır. Bu durumda borulanmaya karşı güvenlik katsayısı artmaktadır. Bunun için mansapta mansaba doğru 30° 'den az eğimli palplanş kullanmanın, güvenlik katsayısını artırmak açısından faydalı olduğu sonucuna varılabilir. Öte yandan, yapının topuğundan daha mansaba doğru oyulma tehlikesi kayabilecektir. Baraj tabanı ile palplanş topuğu arasındaki iç köşe noktasında kaldırma palplanş açısı artarken azalır. Fakat basınçtaki bu azalma küçüktür.

- Verilen bazı anizotropluk oranları için sonuçlar, homojen ve izotrop zemin sonuçları ile karşılaştırılmış ve aralarında farklar olduğu belirlenmiştir. Bu farklar $k_x/k_z = 10$ anizotropluk oranı için iki katına çıkmıştır. Çıkış yük eğimleri anizotropluk oranı artarken artmıştır. Benzer şekilde kaldırma basıncı, anizotropluk oranı artarken artmıştır.

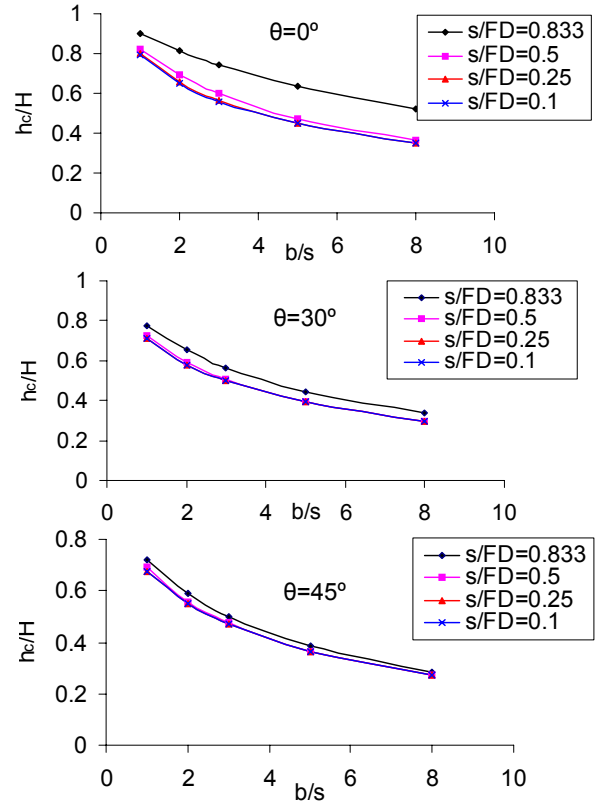
- Temel zemin derinliği artarken çıkış yük eğimi artmıştır. Bununla birlikte, $s/FD < 0.2$ için, çıkış yük eğimindeki değişimler ihmal edilebilir. Ayrıca, palplanş topuğu ile baraj tabanı arasındaki iç köşe noktasında, basınç düşmesi, palplanş geçirimli tabaka derinliğinin % 50'sinden fazla derine çakılmamışsa, geçirimli tabakanın sınırlı kalınlığından pek fazla etkilenmemektedir.



Şekil 13. Çeşitli θ değerleri için ve $k_x/k_z=1$ için FD'nin çıkış yük eğimine etkisi (a) $\theta = 0^\circ$ (b) $\theta = 30^\circ$



Şekil 14. Çeşitli θ değerleri için ve $k_x/k_z=1$ için FD'nin çıkış yük eğimine etkisi $\theta = 45^\circ$



Şekil 15. Çeşitli θ değerleri için ve $k_x/k_z=1$ için baraj tabanı ile palplanş topuğu arasındaki noktanın kaldırma basınçlarına FD'nin etkisi

Kaynaklar

- Abbas, Z. I., (1994). Conformal analysis of seepage below a hydraulic structure with an inclined cutoff, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **18**, 5, 345-353.
- Griffiths, D. V. ve Fenton, G. A., (1998). Probabilistic analysis of exit gradients due to steady seepage, *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**, 9, ASCE, 789-797.
- Harza, L. F., (1935). Uplift and seepage under dams on sand, *Transactions of American Society of Civil Engineers*, **100**, 1352.
- Polubarinova-Kochina, P. YA., (1962). *Theory of ground water movement*, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Remson, I., Hornberger, G. M., Molz, F. J., (1971). *Numerical methods in sub-surface hydrology with an introduction to the finite element method*, Wiley-Interscience, a division of John Wiley & Sons, Inc., 138-139.
- Rushton, K. R. ve Redshaw, S. C., (1978). *Seepage and groundwater flow*, John Wiley and sons, New York.
- Terzaghi, K. ve Peck, R. B., (1967). *Soil mechanics in engineering practice*, John Wiley and sons, New York, N.Y.
- Verigin, N. N., (1940). Seepage under dam foundations with inclined screens and cut-offs, *Journal of Hydraulic Construction*, 2.