

**SERBEST YÜZEYLİ SIZMA PROBLEMLERİNİN  
ÇÖZÜMÜ İÇİN PRATİK BİR YAKLAŞIM**

Mustafa Tamer AYVAZ  
Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Temmuz-2004

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Mustafa Tamer AYVAZ'ın Serbest Yüzeyle Sızma Problemlerinin Çözümü İçin Pratik Bir Yaklaşım başlıklı İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi 21.06.2004 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı – Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. Mustafa TUNCAN	
Üye	: Prof. Dr. Halil KARAHAN	
Üye	: Prof. Dr. Ahmet TUNCAN	
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Hakan ŞİRİN	
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Mustafa TOMBUL	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 14.07.2004. tarih ve 24/3... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü  
Prof. Dr. Altuğ İFTAR  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Müdürü

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### SERBEST YÜZEYLİ SIZMA PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ İÇİN PRATİK BİR YAKLAŞIM

MUSTAFA TAMER AYVAZ

Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa TUNCAN

2004, 92 sayfa

Bu çalışmada, toprak dolgu barajlarda meydana gelen serbest yüzeyle sızma olayı incelenmiştir. Sızma olayına ait kısmi diferansiyel denklemler, zamana bağlı olarak sonlu farklar yöntemi ile değişken zemin özellikleri göz önünde bulundurularak açılmış ve belirtilen sınır koşulları altında elektronik tablolama programı ile çözülmüştür. Serbest yüzeyle sızma olayında baraj gövdesindeki ıslak ve kuru bölgeler arasında oluşan varyasyonel eşitsizlikleri ortadan kaldırmak amacıyla çıkarılan sonlu fark denklemleri genişletilmiş basınç yöntemiyle modifiye edilmiştir. Geliştirilen model ile literatürde çözülmüş olan örnekler çözülmüş ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Çözülen her örneğe ait detaylı bilgi, ilgili bölümler içerisinde sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Toprak Dolgu Baraj, Serbest Yüzeyle Sızma, Sonlu Farklar Yöntemi, Varyasyonel Eşitsizlikler, Genişletilmiş Basınç Yöntemi

## **ABSTRACT**

**Master of Science Thesis**

### **A PRACTICAL APPROACH FOR SOLVING FREE-SURFACE SEEPAGE PROBLEMS**

**MUSTAFA TAMER AYVAZ**

**Anadolu University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Program**

**Supervisor: Prof. Dr. Mustafa TUNCAN**

**2004, 92 pages**

**In this study, free-surface (unconfined) seepage problem in the earth-fill dams is investigated. The partial differential equations relating to seepage problem are discretized with finite differences method considering transient conditions and variable soil properties. The discretized equations are solved using spreadsheet under the given boundary conditions. In order to prevent variational inequalities occurred between dry and saturated zones of the dam, discretized finite difference equations are modified using extended pressure method. Five examples given in the literature are solved using the developed method and good agreement obtained. More information about solutions are presented in the related sections.**

**Keywords: Free-Surface (Unconfined) Seepage, Earth-Fill Dam, Finite Differences Method, Variational Inequalities, Extended Pressure Method**

ANNEMİN HATIRASINA...

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasında verdiği desteklerden dolayı baőta danışman hocam Prof. Dr. Mustafa TUNCAN'a, tez jürimde görev alan Prof. Dr. Halil KARAHAN, Prof. Dr. Ahmet TUNCAN, Yrd. Doç. Dr. Hakan ŞİRİN ve Yrd. Doç. Dr. Mustafa TOMBUL'a, konu ile ilgili dökümanları bana gönderen University of Southern California' dan Jean-Pier BARDET ve The University of Texas at Austin' den J. Tinsley ODEN'e, eğitimim süresince beni sürekli destekleyen babam A. Turan, ablam Őule ve ağabeylerim Boğaç ve Fatih AYVAZ'a ve eőim Canan AYVAZ'a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	iv
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	v
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	vii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	ix
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	x
<b>1. AMAÇ ve KAPSAM</b> .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Önceki Çalışmalar .....	4
<b>2. MATEMATİK MODEL</b> .....	8
2.1. Genel Matematik Model .....	8
2.1.1. Özgül Depolama Katsayısı.....	13
2.2. Serbest Yüzeyle Sızıntı .....	15
<b>3. SAYISAL ÇÖZÜMLEME</b> .....	20
3.1. Sonlu Farklar Metoduna Genel Bakış .....	20
3.2. İki Boyutlu Sızıntı Denkleminin Sonlu Farklar Metodu İle Açılması .....	22
3.3. Ardışık Değerleri Yumuşatma (Successive Over-Relaxation ) Tekniği ....	31

<b>4. MODEL GELİŞTİRİLMESİ.....</b>	<b>33</b>
4.1. Çözüm Bölgesinin Elektronik Tablolama Programında Modellenmesi ....	33
4.2. Elektronik Tablolara İteratif Hesaplama İçin İzlenecek Yol .....	35
<b>5. SAYISAL UYGULAMALAR.....</b>	<b>40</b>
5.1. İzlenecek Yol .....	40
5.2. Uygulama 1 .....	45
5.3. Uygulama 2 .....	49
5.4. Uygulama 3 .....	54
5.5. Uygulama 4 .....	58
5.6. Uygulama 5 .....	63
<b>6. TARTIŞMA ve SONUÇLAR.....</b>	<b>68</b>
6.1. Tartışma .....	68
6.2. Sonuçlar .....	69
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>70</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>74</b>
EK-1 Visual Basic Editörde yazılan makrolara ait kodlamalar .....	74
EK-2 Uygulama 1'e ait ETP denklemleri ve çıktıları .....	76
EK-3 Uygulama 2'ye ait ETP denklemleri ve çıktıları .....	79
EK-4 Uygulama 3'e ait ETP denklemleri ve çıktıları .....	82
EK-5 Uygulama 4'e ait ETP denklemleri ve çıktıları .....	86
EK-6 Uygulama 5'e ait ETP denklemleri ve çıktıları .....	89



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
2.1. $x, y$ ve $z$ yönlerinde akıma maruz kalmış elemanter bir zemin elemanı.....	8
2.2. Serbest yüzeyli iki boyutlu sızıntı problemi (Bardet ve Tobita 2002).....	15
3.1. $f(x)$ fonksiyonunun sonlu parçalara ayrılmış hali (Bardet 1997) .....	20
3.2. Sonlu fark denklemlerinin elde edilmesinde kullanılan grid geometrisi ....	22
3.3. Geçirimsiz alt tabaka için kullanılan grid geometrisi .....	26
3.4. Baraj gövdesindeki geçirimsiz yüzeyler için kullanılan grid geometrisi ....	29
4.1. Genel olarak kabul edilen baraj gövdesi .....	34
4.2. Elektronik tablolama programında barajın modellenmesi .....	34
4.3. Maksimum iterasyon ve değişimin verilmesi .....	37
4.4. ETP ile iteratif hesaplama algoritmasına ait akış diyagramı.....	38
5.1. Kabul edilen baraj geometrisi ve sınır koşulları .....	40
5.2. Kabul edilen kesitin ETP de modellenmiş hali .....	42
5.3. D46 hücresi için basınç yüksekliğinin zamana bağlı değişimi .....	47
5.4. Uygulama 1 için farklı zamanlarda serbest su yüzeyinin durumu .....	48
5.5. Uygulama 1 için serbest su yüzeylerinin karşılaştırılması.....	48
5.6. Uygulama 2 için kabul edilen geometri ve sınır koşulları .....	50
5.7. Uygulama 2'nin ETP'de modellenmiş hali.....	51
5.8. D26 hücresi için basınç yüksekliğinin zamana bağlı değişimi .....	52
5.9. Uygulama 2 için farklı zamanlarda serbest su yüzeyinin durumu .....	53
5.10. Uygulama 2 için serbest su yüzeylerinin karşılaştırılması.....	53
5.11. Uygulama 3 için kabul edilen geometri ve sınır koşulları .....	54
5.12. Uygulama 3'ün ETP'de modellenmiş hali.....	56

5.13.	D32 hücresi için basınç yüksekliğinin zamana bağlı değişimi .....	57
5.14.	Uygulama 3 için farklı zamanlarda serbest su yüzeyinin durumu .....	57
5.15.	Uygulama 3 için serbest su yüzeylerinin karşılaştırılması .....	58
5.16.	Uygulama 4 için kabul edilen geometri ve sınır koşulları .....	59
5.17.	Uygulama 4'ün ETP'de modellenmiş hali .....	60
5.18.	D25 hücresi için basınç yüksekliğinin zamana bağlı değişimi .....	61
5.19.	Uygulama 4 için farklı zamanlarda serbest su yüzeyinin durumu .....	62
5.20.	Uygulama 4 için serbest su yüzeylerinin karşılaştırılması .....	62
5.21.	Uygulama 5 için kabul edilen geometri ve sınır koşulları .....	64
5.22.	Uygulama 5'in ETP'de modellenmiş hali .....	65
5.23.	D45 hücresi için basınç yüksekliğinin zamana bağlı değişimi .....	66
5.24.	Uygulama 5 için farklı zamanlarda serbest su yüzeyinin durumu .....	67
5.25.	Uygulama 5 için serbest su yüzeylerinin karşılaştırılması .....	67
EK-2.1.	İteratif hesaplama sonucu elde edilen basınç yüksekliği değerleri .....	77
EK-2.2.	ETP üzerinde serbest su yüzeyinin bulunması .....	78
EK-3.1.	İteratif hesaplama sonucu elde edilen basınç yüksekliği değerleri .....	80
EK-3.2.	ETP üzerinde serbest su yüzeyinin bulunması .....	81
EK-4.1.	İteratif hesaplama sonucu elde edilen basınç yüksekliği değerleri .....	84
EK-4.2.	ETP üzerinde serbest su yüzeyinin bulunması .....	85
EK-5.1.	İteratif hesaplama sonucu elde edilen basınç yüksekliği değerleri .....	87
EK-5.2.	ETP üzerinde serbest su yüzeyinin bulunması .....	88
EK-6.1.	Uygulama 5 için kabul edilen permeabilite dağılımı .....	90
EK-6.2.	İteratif hesaplama sonucu elde edilen basınç yüksekliği değerleri .....	91
EK-6.3.	ETP üzerinde serbest su yüzeyinin bulunması .....	92

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
EK-1.1. Genişletilmiş basınç yöntemi terimlerini hesaplamak için yazılan makro .....	74
EK-1.2. Serbest su yüzeyinin bulunması için yazılan makro .....	75

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

- $q$  : Debi ( $m^3/sn/m$ )
- $v$  : Akım hız vektörü ( $m/gün$ )
- $\Delta x$  :  $x$  yönündeki grid aralığı ( $m$ )
- $\Delta y$  :  $y$  yönündeki grid aralığı ( $m$ )
- $\Delta z$  :  $z$  yönündeki grid aralığı ( $m$ )
- $\Theta$  : Hacimsel su muhtevası
- $t$  : Zaman ( $gün$ )
- $dt$  : Zaman adımı ( $gün$ )
- $m$  : Zaman adımı sayısı
- $A$  : İntegrali alınan kapalı yüzey
- $V$  : İntegrali alınan kapalı hacim
- $\rho$  : Suyun yoğunluğu
- $n$  : İntegrali alınan yüzey yada hacme dik birim vektör
- $K_x$  :  $x$  yönündeki permeabilite vektörü ( $m/gün$ )
- $K_y$  :  $y$  yönündeki permeabilite vektörü ( $m/gün$ )
- $K_z$  :  $z$  yönündeki permeabilite vektörü ( $m/gün$ )
- $\mathbf{K}$  : Permeabilite matrisi ( $m/gün$ )
- $h$  : Hidrolik yükseklik ( $m$ )
- $p$  : Basınç yüksekliği ( $m$ )
- $m_w$  : Akifer sistemindeki sıkışabilirlik katsayısı
- $u_w$  : Boşluk suyu basıncı

- $\gamma_w$  : Suyun birim hacim ağırlığı ( $kN/m^3$ )  
 $S_s$  : Birim uzunluk için özgül depolama katsayısı ( $1/m$ )  
 $S$  : Akifer için özgül depolama katsayısı  
 $\mathbf{S}$  : Özgül depolama katsayısı matrisi  
 $b$  : Akifer kalınlığı ( $m$ )  
 $\rho$  : Suyun yoğunluğu ( $kN.s^2/m^2$ )  
 $g$  : Yerçekimi ivmesi ( $m/s^2$ )  
 $\alpha$  : Suya doymun zeminin sıkışabilirlik katsayısı  
 $\beta$  : Suyun sıkışabilirlik katsayısı  
 $n$  : Porozite  
 $\Omega_k$  : Baraj gövdesindeki kuru bölge  
 $\Omega_d$  : Baraj gövdesindeki doymun bölge  
 $v'$  : Düzenlenmiş sızıntı hızı ( $m/gün$ )  
 $H(p)$  : Heaviside fonksiyonu  
 $H_\varepsilon(p)$  : Penaltılaştırılmış Heaviside fonksiyonu  
 $\varepsilon$  : Penaltı katsayısı  
 $w$  : Yumuşatma katsayısı  
 $e_0$  : Serbest su yüzeyi üzerindeki basınç yüksekliği ( $m$ )  
 $N$  :  $x$  yönündeki grid aralığı sayısı  
 $M$  :  $y$  yönündeki grid aralığı sayısı  
 $E_{maks,1}$  : İki iterasyon arasındaki en büyük değişiklik kriteri  
 $E_{maks,2}$  : İki zaman iterasyonu arasındaki en büyük değişiklik kriteri  
 $TOL$  : En büyük değişiklik

## Alt ve Üst İndisler

- $x$  :  $x$  eksenini boyunca mevcut eksen koordinatı
- $y$  :  $y$  eksenini boyunca mevcut eksen koordinatı
- $z$  :  $z$  eksenini boyunca mevcut eksen koordinatı
- $w$  : Su
- $s$  : Spesifik
- $v$  : Boşluk
- $d$  : Doygun
- $k$  : Kuru
- $\varepsilon$  : penaltılaştırılmış değişken
- $i$  : Hesap yapılan noktanın  $x$  eksenindeki karşılığı
- $j$  : Hesap yapılan noktanın  $y$  eksenindeki karşılığı
- $m$  : İşlem yapılan anda bulunulan zaman iterasyonu
- $n$  : İşlemin bulunduğu iterasyon
- $maks$  : maksimum

## 1. AMAÇ ve KAPSAM

### 1.1. Giriş

Toprak dolgu barajlar, düşük işlem gerektiren tabii durumdaki malzemelerden yapılabildiği için yaygın olarak yapılan bir baraj türüdür. Ayrıca bu barajlar, diğer tiplere göre çözümü daha kolay zemin problemlerine sahiptir. Bu problemler arasında en önemlilerinden biri de baraj gövdesinde meydana gelen sızma olayıdır. Barajın memba tarafında bulunan su, sahip olduğu potansiyelden dolayı baraj gövdesinden mansap tarafına doğru sızar. Her ne kadar sızma olayının önüne geçmek için baraj gövdesi minimum boşluk oranı olacak şekilde tasarlanırsa da, mevcut potansiyelden dolayı sızma hatları oluşmaktadır.

Doğadaki birçok olay gibi sızma olayı da matematiksel olarak “*Kısmi Diferansiyel Denklem (KDD)*” lerle ifade edilebilmektedir. Sızma olayının çözümü aslında belirli sınır koşulları altında ilgili KDD’nin çözümüdür. Zaman içerisinde gerek sızma olayına gerekse başka olaylara ait KDD’lerin çözülmesi için çeşitli çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çözüm yöntemleri kendi içerisinde analitik ve sayısal çözüm yöntemleri olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Analitik çözüm yöntemleri, çözüm bölgesinin ideal, homojen ve basit geometriye sahip olması durumunda kullanılabilir (He 1998). Çözüm bölgesinin kompleks, heterojen ve karmaşık geometriye sahip olması durumunda ise, ilgili KDD’lerin çözümü ancak sayısal çözüm yöntemleri ile olabilmektedir. KDD’lerin

çözümü için geliştirilmiş birçok sayısal çözüm yöntemi vardır. Bunlara literatürde yaygın olarak karşılaşılan “Sonlu Farklar Metodu (*SFM*)” (Trescott ve Larson 1977; McDonald ve Harbough 1988; Wang ve Chunmaio 1998; Bakker 1999), “Sonlu Elemanlar Metodu (*SEM*)” (France 1974; Grupta ve ark. 1984; Li ve Yang 2000; Mazzia ve Putti 2002) ve “Sınır Elemanlar Metodu (*SINEM*)” (Harrouni ve ark. 1997a; Harrouni ve ark. 1997b; Harrouni ve ark. 1997c; Eldho ve Rao 1997) örnek olarak verilebilir. Bu çözüm yöntemlerinin birbirlerine göre birçok avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Örneğin *SFM* homojen olmayan çözüm bölgelerinde kolaylıkla programlanabildiği ve anlaşılabilirliği kolay olduğu için *SEM*'e göre daha avantajlıdır. Ancak, *SFM*'de çözüm bölgesi ağırlıklı olarak kare yada dikdörtgen grid ağına bölüldüğü için düzensiz sınır bölgelerinde hassas sonuç verememesine karşın, *SEM*'de çözüm bölgesi kare, üçgen gibi farklı boyutlara sahip elemanlardan oluşabilmekte daha iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Buna karşın, *SEM* kullanılarak sistemin programlanması *SFM*'ye göre oldukça karmaşıktır ve problemin çözülmesi de bu karmaşıklığa dayanarak uzun sürmektedir. *SINEM*'le ise her türlü problem sayısal olarak çözülebilmekte ancak yöntem olarak ağır matematiksel ifadelerin çözümünü gerektirdiğinden dolayı *SFM* ve *SEM*'e göre çözüm algoritmasının oluşturulması daha zor olmaktadır.

Günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile kompleks, nonlinear terimler içeren KDD'ler bile bilgisayar yardımıyla kolaylıkla çözülebilmektedir. Ancak, ilgili KDD'lerin verilen sınır koşulları altında sayısal çözüm yöntemleri ile çözülebilmesi için kompleks kodlar içeren bilgisayar programlarına gereksinim vardır. Bu tip programlarla uğraşmak ise, gerek zaman, gerek emek ve gerek te



maliyet bakımından oldukça külfet gerektirmektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında konuyla ilgili KDD'ler Elektronik Tablolama Programı (ETP) kullanılarak çözülecektir.

ETP'nin mühendislik alanında kullanımı son on yıl içerisinde oldukça popüler olmuştur. Bu programları kullanarak günümüze kadar, kısmi diferansiyel denklemlerin zm (Hagler 1987), ısı iletim denklemlerinin zm (Gvirtzman ve Garfunkel 1996), serbest yüzeyli sızıntı problemlerinin zm (Bardet ve Tobita 2002) gibi çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

ETP'nin, sayısal ve görsel kolaylık, hızlı hesaplama kapasitesi gibi işlemleri kolaylaştırıcı birçok özelliği vardır. Bu programların en önemli özelliklerinden biri de kolay ve kullanışlı grafik arayüzlerine sahip olmalarındır. zm bölgesi içerisindeki parametrelerde yapılan en ufak değişiklik bile grafik arayüzü sayesinde anında çizdirilmiş grafiğe aktarılmaktadır.

Toprak dolgu barajlarda meydana gelen sızma olayının incelenmesinde gerek sonlu farklar, gerekse sonlu elemanlar yönteminde olsun, mevcut çözüm bölgesi içerisinde çok bilinmeyenli denklem sistemleri vardır. Bu denklem sistemlerinin çözümünde yoğun matris işlemleri ortaya çıkmaktadır. Oysa ki ETP kullanılarak yoğun matris işlemleri yerine, herhangi bir başlangıç değerinden başlayarak denklem sistemi iteratif hesaplama tekniği ile kolaylıkla çözülebilmektedir. Bu ise gerek CPU zamanı, gerek se emek açısından kullanıcıya büyük kolaylık sağlamaktadır.

Bu tezin amacı doğrultusunda, toprak dolgu barajların gövdesinde oluşan serbest yüzeyli sızma problemi, SFM ile ETP kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürde daha önce verilmiş olan çeşitli örneklerle karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleri ile iyi uyum sağladığı ortaya çıkmıştır.

## 1.2. Önceki Çalışmalar

Toprak dolgu barajlarda meydana gelen sızma probleminin 19. yüzyıldan bu yana çeşitli araştırmacılar tarafından incelendiği görülmektedir. Bunun yanında, sızma olayı zaman içerisinde yeraltı suyu modellemesi problemlerinde de incelenmiştir. Sonuç olarak her iki olaya ait matematiksel ifadelerin aynı olmasından dolayı bu konu ile ilgili çalışmalardan da detaylı bilgi elde edilebilmektedir. Konuyla ilgili yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda ele alınmıştır.

Chakib ve ark. (2003), homojen olmayan bir barajı optimal şekil tasarımı yaklaşımına dayanarak SEM ile çözmüştür. Burada baraj gövdesine ait permeabilite değerlerini bir fonksiyon olarak tanımlamış ve çözüm algoritmasını bu fonksiyonu dikkate alarak geliştirmiştir.

He (1998), Darcy kanununu modifiye ederek sızıntı probleminin yaklaşık olarak analitik çözümünü gerçekleştirmiştir. Yaptığı çalışma sonucu değişken iterasyon yöntemi adı verilen bir çözüm yöntemi geliştirmiş ve bu çözüm yöntemini literatürde verilen çeşitli örneklerle karşılaştırmıştır.

Leontiev ve Huacasi (2000), sızma akımının sayısal çözümünü gerçekleştirmek için bir matematiksel programlama tekniği geliştirmiştir. Sayısal çözüm yöntemi olarak sınır elemanlar metodunu kullanmışlar ve geliştirdikleri programlama yöntemini iki ve üç boyutlu gözenekli ortamlara uygulamışlardır.

Xu ve ark. (2003), toprak dolgu barajlarda, doymuş ve doymuş olmayan sızıntı akımları için ters problem olarak optimal hidrolik tasarım işlemini gerçekleştirmişlerdir. Ters problem işlemi olarak çözüm bölgesinin her noktasında, optimal çözümü sağlayacak zemin parametrelerinin tayinini gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, doymuş çözüm bölgesini ve malzeme maliyetini minimize edecek performans indeksi adı verilen bir parametre tanımlamışlardır.

Zhang ve ark. (2001), geliştirdikleri model ile toprak ve kaya dolgu barajlardaki sızıntı olayı için SEM'deki iterasyon işlemini tüm çözüm bölgesi boyunca yapmak yerine sadece suyun mansap tarafında baraj gövdesinden çıktığı yüzeyde yaptırarak klasik SEM çözümlerine göre daha pratik ve etkili bir çözüm elde etmişlerdir. Sızıntı suyunun serbest yüzeyini ise direkt olarak boşluk suyu basıncı değişimden elde etmişlerdir.

Sharif ve Wilberg (2002), stabilize edilmiş sonlu eleman şemasını Arakesit Yakalama Tekniği (*Interface Capturing Technique*) ile formülize ederek, gözenekli ortam için iki ve üç boyutlu Navier-Stoke's denklemlerini çözmüşlerdir.

Geliştirdikleri çözüm yöntemi ile literatürde verilen bazı homojen, izotrop ve izotermal toprak dolgu baraj örneklerini çözmüş ve iyi sonuç elde etmişlerdir.

Park (2000), Element-Free Galerkin (EFG) Metodu ile SEM'i kombine ederek yeraltı suyu ve çözünen madde akımını incelemiştir. Ayrıca geliştirdiği algoritma ile çeşitli kısmi diferansiyel denklemlerin de çözümünü gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda EFG yönteminin heterojen akifer sistemlerinde oldukça iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Li ve ark. (2003), Element-Free Metodunu (EFM) kullanarak iki boyutlu sızıntı analizi yapan bir model geliştirmişlerdir. Yapılan çalışmada serbest yüzey üzerindeki hesap yapılan noktalar, oluşturulan grid ağından bağımsızdır. Ayrıca bu noktalar serbest yüzeyin hesabı sırasında gerekli yerlere eklenebilmekte, taşınabilmekte ve gerekirse kaldırılabilir.

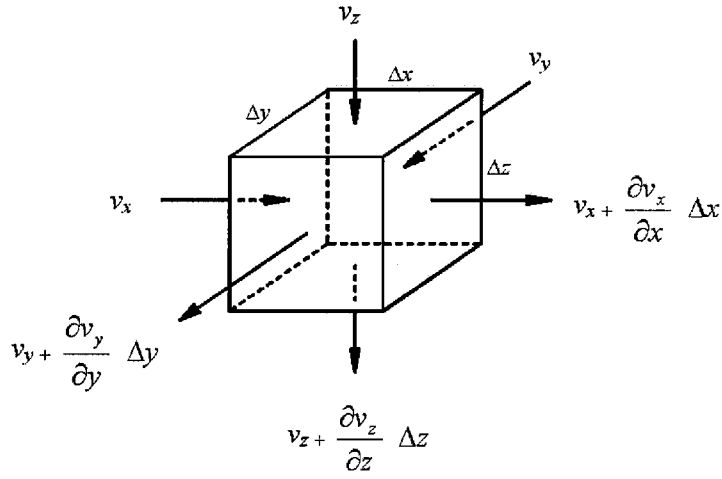
Pentland ve ark. (2001), SEM'i kullanarak çözüm yapan FlexPDE adındaki denklem çözücü ile iki ve üç boyutlu sızıntı problemleri ve ısı yayılımı problemlerini çözmüşler ve çözümlerini de yine SEM kullanarak çözüm yapan Seep/W (sızıntı analizi programı) ve Temp/W (ısı yayılımı analizi programı) programları ile karşılaştırmışlardır. Yapılan bu çalışma sonucunda, incelenen problem her ne konuda olursa olsun, matematiksel olarak doğru bir biçimde ifade edildiği takdirde incelenen konuyla ilgili özel programlara gereksinim olmadığı ortaya çıkmıştır.

Naba ve ark. (2002), kararlı ve geçiş hali durumlarında, değişken doygunluğa sahip, iki boyutlu ve anizotropik bir ortam için geliştirilmiş boyutsuz bir formülasyon kullanarak, SEM ile sızıntı olayını incelemişlerdir. Geliştirilmiş olan boyutsuz formülasyon sayesinde, kapilarite etkisini dikkate alarak doygun ve doygun olmayan kısımların sınırı bulunmaktadır. Bu sınırın bulunması, serbest su yüzeyinin yerinin tespit edilmesi için gereklidir. Geliştirilen bu model dikdörtgen ve trapez şekillerinde iki kesit üzerinde uygulanmıştır.

## 2. MATEMATİK MODEL

### 2.1. Genel Matematik Model

Şekil 2.1'de  $x$ ,  $y$  ve  $z$  yönlerinde akıma maruz kalmış elemanter bir zemin elemanı görülmektedir. Bu zemin elemanında  $x$ ,  $y$  ve  $z$  yönlerindeki permeabilitenin değişken olduğu kabul edilsin.



Şekil 2.1.  $x$ ,  $y$  ve  $z$  yönlerinde akıma maruz kalmış elemanter bir zemin elemanı

Akışkanlar için genel süreklilik denkleminde;

$$q = vA \quad (2.1)$$

burada:

$$q = \text{debi } [L^3 / T]$$

$$v = \text{akım hızı } [L / T]$$

$$A = \text{akım yönüne dik kesit alanı } [L^2]$$

Denklem (2.1)'e dayanarak Şekil 1.1'de gösterilen elemanter zemin elemanı için  $x$  yönünde elemana giren ve çıkan debiler sırasıyla;

$$q_{\text{giriş}}^x = v_x \Delta y \Delta z \quad (2.2)$$

$$q_{\text{çıkış}}^x = \left( v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z \quad (2.3)$$

$y$  yönünde giren ve çıkan debiler;

$$q_{\text{giriş}}^y = v_y \Delta x \Delta z \quad (2.4)$$

$$q_{\text{çıkış}}^y = \left( v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} \Delta y \right) \Delta x \Delta z \quad (2.5)$$

$z$  yönünde giren ve çıkan debiler;

$$q_{\text{giriş}}^z = v_z \Delta x \Delta y \quad (2.6)$$

$$q_{\text{çıkış}}^z = \left( v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \Delta z \right) \Delta x \Delta y \quad (2.7)$$

Kütlenin korunumu kanununa dayanarak;

$$\sum q_{\text{giriş}} - \sum q_{\text{çıkış}} = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.8)$$

burada,  $\Theta$ , hacimsel su muhtevası,  $t$  ise zamandır. Denklem (2.8)'den yola çıkarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$\begin{aligned} & v_x \Delta y \Delta z + v_y \Delta x \Delta z + v_z \Delta x \Delta y - \left( v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z - \left( v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} \Delta y \right) \Delta x \Delta z - \left( v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \Delta z \right) \Delta x \Delta y \\ &= \frac{\partial \Theta}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \end{aligned} \quad (2.9)$$

Denklem (2.9)'da birbirini götüren terimleri sadeleştirerek aşağıdaki denklem elde edilebilir.

$$-\left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) (\Delta x \Delta y \Delta z) = \frac{\partial \Theta}{\partial t} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (2.10)$$

buradan da yine sadeleştirme işlemi yapılarak,

$$-\left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (2.11a)$$

yada,

$$-div(\rho \mathbf{v}) = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (2.11b)$$

$$-\int_V \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \cdot dV = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (2.11c)$$



şekillerinde yazılabilir. Burada,  $\rho$ , suyun yoğunluğu (sabit edilmiştir),  $V$ , kapalı hacim,  $n$ ,  $V$  ye dik birim vektör,  $\mathbf{v}$  hız matrisi ve  $h$  ise toplam hidrolik yük vektörüdür.

Denklem (2.11a)'da ki her hız terimine Darcy Kanunu'nun uygulanmasıyla,

$$v_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.12)$$

$$v_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2.13)$$

$$v_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.14)$$

denklemleri elde edilir. Sonuç olarak Denklem (2.11) aşağıdaki gibi genel formda yazılabilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (2.15)$$

benzer şekilde Darcy Kanunundan;

$$\mathbf{v} = -\mathbf{K} \cdot \text{grad}(h) \quad (2.15a)$$

yazılabilir. Burada,  $\mathbf{K}$ , permeabilite matrisidir (yatay ve düşey yön dışındaki bileşenler ihmal edilmiştir). Denklem (2.15)'de geçen hacimsel su muhtevasında

meydana gelecek bir değişim, boşluk suyu basıncındaki değişimle yakından ilgilidir. Bu özelliğten yola çıkarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$\partial\Theta = m_w \partial u_w \quad (2.16)$$

burada,  $m_w$ , özgül depolama eğrisinin eğimidir (http-1). Buradan yola çıkarak toplam hidrolik yük aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$h = \frac{u_w}{\gamma_w} + z \quad (2.17)$$

burada,

$u_w$  = boşluk suyu basıncı,

$\gamma_w$  = suyun birim hacim ağırlığı,

$z$  = yükseklik

tir. Denklem (2.17) düzenlenerek aşağıdaki formda yazılabilir:

$$u_w = \gamma_w (h - z) \quad (2.18)$$

Denklem (2.18)'deki ifadeyi Denklem (2.16)'da yerine koyarak;

$$\partial\Theta = m_w \gamma_w \partial (h - z) \quad (2.19)$$

denklemini elde edilir. Denklem (2.19)'u da Denklem (2.15)'te yerine koyarak;

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = m_w \gamma_w \frac{\partial (h-z)}{\partial t} \quad (2.20)$$

denklemini elde edilir.  $z$  yüksekliği sabit olduğundan türevi sıfıra eşit olacaktır.

Dolayısıyla Denklem (2.20), son revize edilmiş haliyle aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = m_w \gamma_w \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.21)$$

### 2.1.1. Özgül Depolama Katsayısı

Yeraltı suyu problemleri ile serbest yüzeyli sızıntı problemleri matematiksel olarak aynı denklemlere sahip olduğu için akiferler için çoğunlukla yapılan işlemler sızıntı problemleri için de geçerlidir. Özgül depolama katsayısı terimi, yeraltı suyu modellenmesinde akiferlerin tanımlanması için yaygın olarak kullanılan terimlerden biridir.

Özgül depolama katsayısı  $S$  aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$S = S_s b \quad (2.22)$$

burada,  $S_s$ , birim uzunluk özgül depolama katsayısı ve  $b$  basınçlı akiferin kalınlığıdır. Birim uzunluk için özgül depolama katsayısı;

$$S_s = \rho g(\alpha + n\beta) \quad (2.23)$$

olarak tanımlanır (http-1). Burada;

$\rho$  = suyun yoğunluğu

$g$  = yerçekimi ivmesi

$\alpha$  = suya doymun zeminin sıkışabilirlik katsayısı

$\beta$  = suyun sıkışabilirlik katsayısı

$n$  = porozite

dir. Bunun yanında, özgül depolama katsayısı,  $\gamma_w.m_w$  ifadesine eşittir. Buradan yola çıkarak;

$$m_w = (\alpha + n\beta) \quad (2.24)$$

eşitliği yazılabilir. Denklem (2.23) ve (2.24) arasındaki ilişkiden de;

$$m_w = \frac{S_s}{\gamma_w} \quad (2.25)$$

eşitliği ortaya çıkmaktadır. Elde edilen bütün eşitliklerden anlaşılacağı gibi  $m_w$  ifadesi, boşluk suyu basıncı değişiminden dolayı akifer sisteminin tümünde oluşan sıkışabilirliği ifade etmektedir.

Denklem (2.25)'den yola çıkarak Denklem (2.21) aşağıdaki gibi yazılabilir:

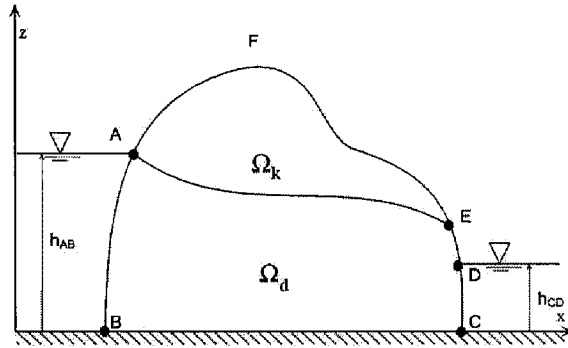
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.26)$$

Sonuç olarak, Denklem (2.26) aşağıdaki genelde yazılabilir:

$$\text{div}(\mathbf{K} \cdot \text{grad}(h)) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.27)$$

## 2.2. Serbest Yüzeyle Sızıntı

Serbest yüzeyle iki boyutlu sızıntı problemi genel olarak Şekil 2.2'de gösterildiği gibi tanımlanabilir.



Şekil 2.2. Serbest yüzeyle iki boyutlu sızıntı problemi (Bardet ve Tobita 2002)

Burada,  $ABCDE$  noktaları ile kuşatılmış alan doygun bölgeyi ( $\Omega_d$ ), AFE ile kuşatılmış alan ise bilinmeyen kısım olan kuru bölgeyi ( $\Omega_k$ ) göstermektedir. Şekil 2.2’de gösterilen kesit için ilgili denklem ve sınır koşulları aşağıdaki gibidir:

$$-div(\mathbf{v}) = S_s \frac{\partial p}{\partial t} \quad \text{ve} \quad p \geq 0 \quad (\Omega_d \text{ içinde}) \quad (2.28)$$

$$\mathbf{v} = -\mathbf{K}.grad(p + z) \quad (2.29)$$

$$p = 0 \quad (\Omega_k \text{ içinde}) \quad (2.30)$$

$$p = h_{AB} - z \quad (AB \text{ üzerinde}) \quad \text{ve} \quad p = h_{CD} - z \quad (CD \text{ üzerinde}) \quad (2.31)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (BC \text{ üzerinde}) \quad (2.32)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = 0 \quad \text{ve} \quad p = 0 \quad (AE \text{ üzerinde}) \quad (2.33)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{v} \leq 0 \quad \text{ve} \quad p = 0 \quad (DE \text{ üzerinde}) \quad (2.34)$$

Burada;  $p$ , basınç yüksekliği,  $\mathbf{n}$ , sınıra dik olan birim vektör matrisi,  $h_{AB}$  ve  $h_{CD}$ , sırasıyla memba ve mansap taraflarındaki su yükseklikleridir. Genellikle serbest yüzeyli sızma analizi problemlerinde bilinmeyen olarak hidrolik yük ( $h$ ) yerine basınç yüksekliği ( $p$ ) alınır. Basınç yüksekliği, boşluk suyu basıncı ve suyun birim

hacim ağırlığı ile  $p = u / \gamma_w$  şeklinde bir ilişki içerisindedir (Bardet ve Tobita 2002).

Serbest yüzeyli sızma problemini çözmek için önerilen sayısal çözüm yöntemleri arasında, ilgili KDD' ye Darcy Kanununun uygulanmasıyla çözüm bölgesinde yer alan ıslak ve kuru bölgeler arasındaki geçişte varyasyonel eşitsizlikler (*variational inequalities*) ortaya çıkmaktadır (Bardet ve Tobita 2002). Bu eşitsizlikleri önlemek amacıyla geliştirilen çözüm yöntemlerinin en etkililerinden biri "Genişletilmiş Basınç (*Extended Pressure*)" (Brezis ve ark. 1978) yöntemidir. Genişletilmiş Basınç yöntemi ile çözüm bölgesi içerisindeki ıslak ve kuru bölgeleri birbirinden ayıran sınır çizgisi olan serbest su yüzeyi kolaylıkla bulunabilmektedir. Brezis ve ark. (1978) ile Oden ve Kikuchi (1980) geliştirilmiş basınç yöntemi ile Darcy Kanununu (Denklem (2.11d)) aşağıdaki gibi düzenlemişlerdir:

$$\mathbf{v}' = -\mathbf{K}[\mathit{grad}(p) + H(p)\mathit{grad}(z)] \quad (2.35)$$

burada,  $\mathbf{v}'$ , düzenlenmiş sızma hızı matrisi,  $H(p)$  ise Heaviside fonksiyonudur ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$H(p) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } p \geq 0 \\ 0 & \text{eğer } p < 0 \end{cases} \quad (2.36)$$

Eğer  $p$  pozitif değer alırsa Denklem (2.35), Denklem (2.29)'a eşit olmaktadır. Genişletilmiş basınç yönteminde, Denklem (2.31), (2.32) ve (2.35) ile belirtilen sınır koşullarının, aşağıdaki denklem ve sınır koşulu ile birlikte düşünülmesiyle yeni bir sınır değer problemi ortaya çıkmaktadır.

$$p = 0 \quad (DEFA \text{ üzerinde}) \quad (2.37)$$

$$\operatorname{div}(\mathbf{v}') = S_s \frac{\partial p}{\partial t} \quad (AE \text{ üzerinde}) \quad (2.38)$$

İncelenen serbest yüzeyli sızıntı problemi, genel olarak birden çok optimal çözüme sahiptir. İncelenen problemin tekil (*unique*) çözümünü elde etmek amacıyla problemin çözüm alanının kısıtlanması gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmek amacıyla “Penaltı Yaklaşımı (*Penalty Approach*)” adı verilen yöntemle çözüm alanı sınırlandırılır. Tekil çözüm elde etmek amacıyla, Heaviside fonksiyonunun aşağıdaki  $H_\varepsilon$  parçalı fonksiyonu ile değiştirilmektedir. (Bardet ve Tobita 2002):

$$H_\varepsilon(p) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } p \geq \varepsilon \\ p / \varepsilon & \text{eğer } p < \varepsilon \end{cases} \quad (2.39)$$

burada,  $\varepsilon$ , kısıtlama miktarını belirleyen penaltı katsayısıdır. Denklem (2.39)'da görüldüğü gibi,  $\varepsilon$  değeri Heaviside fonksiyonuna bağımsız bir değişken olarak



eklenmiştir. Oden ve Kikuchi (1980), serbest yüzeyli sızma denkleminin  $\varepsilon$ 'un sıfırdan büyük her değeri için tekil bir çözümü olduğunu ve geliştirilen bu çözüm algoritmasının ancak  $\varepsilon$  değerinin grid aralığına eşit ve büyük değerler almasıyla mümkün olacağını ileri sürmüşlerdir.

Sonuç olarak Brezis ve ark. (1978) tarafından geliştirilen genişletilmiş basınç yöntemiyle elde edilmiş serbest yüzeyli iki boyutlu sızma denklemi, Denklem (2.11c)'den yola çıkarak çözüm yapılan noktayı çevreleyen  $A$  alanı boyunca aşağıdaki gibi yazılabilmektedir:

$$-\int_A \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \cdot dA = \int_A \mathbf{K} \cdot \text{grad}(p) \cdot dA + \int_A K_z \cdot H_\varepsilon(p) \cdot n_z \cdot dA = S_s \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.40)$$

burada,  $A$ , kapalı alanı,  $\mathbf{K}$ , permeabilite matrisini,  $K_z$ ,  $z$  yönündeki permeabilite vektörünü,  $n_z$ ,  $z$  yönünde  $A$  'ya dik normal vektörünü göstermektedir.

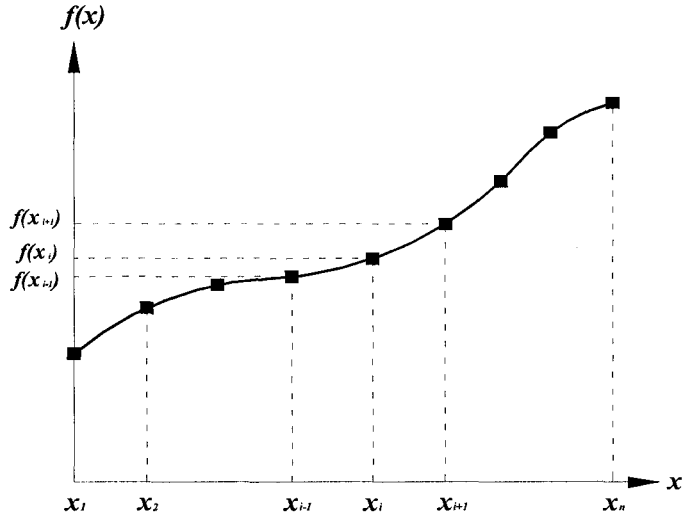
Denklem (2.40) ile aynı mantık ile serbest yüzeyli üç boyutlu sızıntı denklemi, çözüm yapılan noktayı çevreleyen  $V$  hacmi boyunca aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$-\int_V \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \cdot dV = \int_V \mathbf{K} \cdot \text{grad}(p) \cdot dV + \int_V K_z \cdot H_\varepsilon(p) \cdot n_z \cdot dV = S_s \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.41)$$

### 3. SAYISAL ÇÖZÜMLEME

#### 3.1. Sonlu Farklar Metoduna Genel Bakış

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, sürekli bir  $f(x)$  fonksiyonu  $x$  yönünde  $n$  sayıda sonlu parçalara ayrılabilir ve ayrılan her parçanın  $y$  yönünde bir karşılığı olduğu kabul edilsin. Eğer bu fonksiyonun diferansiyeli alınırsa,  $x$  yönünde Taylor serisine açılarak yazılmış hali aşağıdaki gibi olmaktadır (Bardet 1997):



Şekil 3.1.  $f(x)$  fonksiyonunun sonlu parçalara ayrılması (Bardet 1997)

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \frac{df}{dx}(x)\Delta x + \frac{1}{2!} \frac{d^2 f}{dx^2}(x)\Delta x^2 + \frac{1}{3!} \frac{d^3 f}{dx^3}(x)\Delta x^3 + \dots \quad (3.1)$$

Denklem (3.1),  $x$  değişkeni yerine  $x_i$  değişkeninin yazılmasıyla  $i+1$  ve  $i-1$  noktaları için aşağıdaki formatlarda yazılabilir:

$$f_{i+1} = f_i + \left. \frac{df}{dx} \right|_i \Delta x + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_i \Delta x^2 + \frac{1}{3!} \left. \frac{d^3 f}{dx^3} \right|_i \Delta x^3 + \dots \quad (3.2)$$

$$f_{i-1} = f_i - \left. \frac{df}{dx} \right|_i \Delta x + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_i \Delta x^2 - \frac{1}{3!} \left. \frac{d^3 f}{dx^3} \right|_i \Delta x^3 + \dots \quad (3.3)$$

$f$  fonksiyonun birinci mertebeden  $x$ 'e göre türevi denklem (3.2) ve (3.3)'ün taraf tarafa çıkarılmasıyla aşağıdaki gibi bulunabilmektedir:

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_i \approx \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x} \quad (3.4)$$

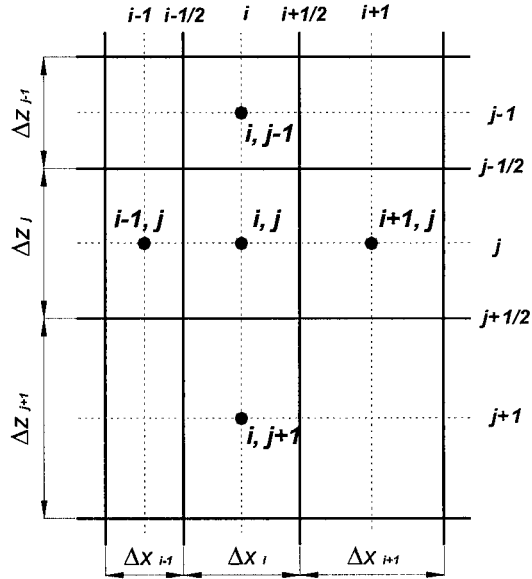
Benzer şekilde  $f$ 'in ikinci mertebeden türevi de denklem (3.2) ve (3.3)'ün taraf tarafa toplanmasıyla aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_i \approx \frac{f_{i+1} + f_{i-1} - 2f_i}{\Delta x^2} \quad (3.5)$$

Denklem (3.4) ve (3.5),  $f$  fonksiyonunun  $x$ 'e göre birinci ve ikinci mertebeden türevlerinin yaklaşık değerlerini vermektedir. Burada, alınan türevlerin kesin değerleri ile yaklaşık değerleri arasındaki hata miktarı doğrudan  $\Delta x$  ile ilgilidir.  $\Delta x$  boyutu sıfıra doğru yaklaştıkça hata miktarıda azalmaktadır.

### 3.2. İki Boyutlu Sızıntı Denklemine Sonlu Farklar Metodu İle Açılması

İki boyutlu sızıntı olayına ait sonlu fark denklemi, denklem (2.40)'ın ikinci mertebe türevler kullanılarak açılmasıyla elde edilmektedir. Bahsedilen bu sonlu fark denklemlerini elde edebilmek amacıyla geliştirilen grid geometrisi Şekil 3.2'de görülmektedir. Burada  $\Delta x$  ve  $\Delta z$ , hesap yapılan hücrenin sırasıyla  $x$  ve  $z$  yönlerindeki genişliklerini göstermektedir.



Şekil 3.2. Sonlu fark denklemlerinin elde edilmesinde kullanılan grid geometrisi

Şekil 3.2'de gösterilen grid geometrisi kullanılarak, denklem (2.40)'ta eşitliğin sağ tarafındaki birinci integral sonlu fark formunda kütle ve enerjinin korunumu prensiplerine dayanarak aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir:

$$\begin{aligned}
S_{i,j} \frac{p_{i,j}^{m+1} - p_{i,j}^m}{\Delta t} &= \left[ \frac{K_{i-1,j} \cdot \Delta x_{i-1} + K_{i,j} \cdot \Delta x_i}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} \right] \frac{p_{i-1,j}^m - p_{i,j}^m}{\left( \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \right)^2} - \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta x_i + K_{i+1,j} \cdot \Delta x_{i+1}}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \right] \frac{p_{i,j}^m - p_{i+1,j}^m}{\left( \frac{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}}{2} \right)^2} + \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{\Delta z_j + \Delta z_{j-1}} \right] \frac{p_{i,j-1}^m - p_{i,j}^m}{\left( \frac{\Delta z_j + \Delta z_{j-1}}{2} \right)^2} \\
&- \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j+1} \cdot \Delta z_{j+1}}{\Delta z_j + \Delta z_{j+1}} \right] \frac{p_{i,j}^m - p_{i,j+1}^m}{\left( \frac{\Delta z_j + \Delta z_{j+1}}{2} \right)^2}
\end{aligned} \quad (3.6)$$

23

Denklem (3.6)'da üzerinde  $\Downarrow$  işareti bulunan terimler denklemdeki bilinmeyenlerdir. Eğer incelenen değişken çözüm bölgesi içinde süreksiz ise zaman üzerindeki türevde orta değerler kullanılabilir (Saul'yev, 1964). Dolayısıyla üzerinde  $\Downarrow$  işareti bulunan terimlerin eşitliğin sol tarafında toplanmasıyla aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir:

$$\begin{aligned}
4 \cdot p_{i,j} \left\{ \left[ \frac{K_{i-1,j} \cdot \Delta x_{i-1} + K_{i,j} \cdot \Delta x_i}{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)^3} \right] + \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta x_i + K_{i+1,j} \cdot \Delta x_{i+1}}{(\Delta x_i + \Delta x_{i+1})^3} \right] + \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{(\Delta z_j + \Delta z_{j-1})^3} \right] + \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j+1} \cdot \Delta z_{j+1}}{(\Delta z_j + \Delta z_{j+1})^3} \right] + \left[ \frac{S_{i,j}}{4 \cdot \Delta t} \right] \right\} &= 4 \cdot \left\{ \left[ \frac{S_{i,j}}{4 \cdot \Delta t} \right] \cdot p_{i,j} \right\} \\
&\quad \downarrow CW \quad \downarrow CE \quad \downarrow CN \quad \downarrow CS \quad \downarrow CC \\
+ \left[ \frac{K_{i-1,j} \cdot \Delta x_{i-1} + K_{i,j} \cdot \Delta x_i}{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)^3} \right] \cdot p_{i-1,j} &+ \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta x_i + K_{i+1,j} \cdot \Delta x_{i+1}}{(\Delta x_i + \Delta x_{i+1})^3} \right] \cdot p_{i+1,j} + \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{(\Delta z_j + \Delta z_{j-1})^3} \right] \cdot p_{i,j-1} \\
&+ \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j+1} \cdot \Delta z_{j+1}}{(\Delta z_j + \Delta z_{j+1})^3} \right] \cdot p_{i,j+1}
\end{aligned} \quad (3.7)$$

Denklem (3.7)'deki  $CW$ ,  $CE$ ,  $CN$ ,  $CS$  ve  $CC$  terimleri ilgili ifadelerin kısaltılmış gösterimidir ve aşağıdaki gibidir:

$$CW = \left[ \frac{K_{i-1,j} \cdot \Delta x_{i-1} + K_{i,j} \cdot \Delta x_i}{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)^3} \right] \quad (3.8)$$

$$CE = \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta x_i + K_{i+1,j} \cdot \Delta x_{i+1}}{(\Delta x_i + \Delta x_{i+1})^3} \right] \quad (3.9)$$

$$CN = \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{(\Delta z_j + \Delta z_{j-1})^3} \right] \quad (3.10)$$

$$CS = \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j+1} \cdot \Delta z_{j+1}}{(\Delta z_j + \Delta z_{j+1})^3} \right] \quad (3.11)$$

$$CC = \left[ \frac{S_{i,j}}{4 \cdot \Delta t} \right] \quad (3.12)$$

İlgili kısaltmaların kullanılmasıyla, denklem (2.40)'ta eşitliğin sağ tarafındaki birinci integral sonlu fark formunda aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir:

$$p_{i,j} = \frac{CC \cdot p_{i,j} + CW \cdot p_{i-1,j} + CE \cdot p_{i+1,j} + CN \cdot p_{i,j-1} + CS \cdot p_{i,j+1}}{CC + CW + CE + CN + CS} \quad (3.13)$$

Denklem (2.40)'taki ikinci integralin sonlu fark karşılığı ise aşağıdaki gibi yazılabilmektedir:

$$\int_A K_z \cdot H_\varepsilon(p) \cdot n_z \cdot dS = \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{\Delta z_j + \Delta z_{j-1}} \right] H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j} + p_{i,j-1}}{2}; \varepsilon \right) \quad (3.14)$$

$$- \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j+1} \cdot \Delta z_{j+1}}{\Delta z_j + \Delta z_{j+1}} \right] H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j} + p_{i,j+1}}{2}; \varepsilon \right)$$

Denklem (3.6)'daki  $H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j} + p_{i,j-1}}{2}; \varepsilon \right)$  ve  $H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j} + p_{i,j+1}}{2}; \varepsilon \right)$  ifadeleri ikinci bölümde bahsedilen Heaviside Fonksiyonunun pratikteki uygulamaları için düzenlediği  $H_\varepsilon$  parçalı fonksiyondur.

Sonuç olarak denklem (3.13) ve (3.14)'ün toplanmasıyla serbest yüzeyli sızıntı olayının sonlu fark formundaki yazılımı aşağıdaki gibi olmaktadır:

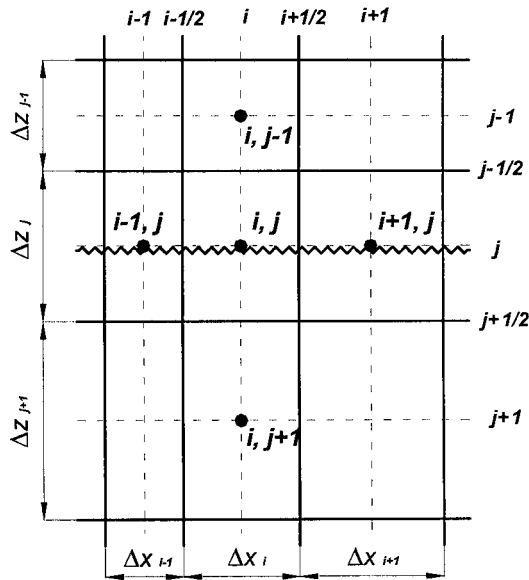
$$p_{i,j} = \frac{1}{CC + CS + CE + CN + CS} \left( CC \cdot p_{i,j} + CW \cdot p_{i-1,j} + CE \cdot p_{i+1,j} \right. \\ \left. + CN \cdot p_{i,j-1} + CS \cdot p_{i,j+1} + \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{\Delta z_j + \Delta z_{j-1}} \right] H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j} + p_{i,j-1}}{2}; \varepsilon \right) \right) \quad (3.15)$$

$$- \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j+1} \cdot \Delta z_{j+1}}{\Delta z_j + \Delta z_{j+1}} \right] H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j} + p_{i,j+1}}{2}; \varepsilon \right) \left. \right)$$

Çıkarılan denklemlerde dikkat edilmesi gereken noktalardan biri de permeabilitenin çözüm alanı boyunca değişken kabul edildiğidir. Bu sayede çözüm bölgesi boyunca istenildiği gibi permeabilite değişimi kabul edilebilecektir. Denklem (3.15)'te ilgili kısaltmaların yapılmasıyla;

$$\begin{aligned}
p_{i,j} = & \frac{1}{CC + CS + CE + CN + CS} \left\langle CC \cdot p_{i,j} + CW \cdot p_{i-1,j} + CE \cdot p_{i+1,j} \right. \\
& + CN \cdot \left[ p_{i,j-1} + (\Delta z_j + \Delta z_{j-1})^2 H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j} + p_{i,j-1}}{2}; \varepsilon \right) \right] \\
& \left. + CS \cdot \left[ p_{i,j+1} - (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})^2 H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j} + p_{i,j+1}}{2}; \varepsilon \right) \right] \right\rangle
\end{aligned} \tag{3.16}$$

denklemleri elde edilmektedir. Ancak, denklem (3.16), çözüm bölgesinin sadece orta noktalarında kullanılabilir. Buna karşın sınır koşulları değiştiği için barajın oturduğu geçirimsiz alt tabaka ile baraj gövdesinde yapılabilecek geçirimsiz yüzeyler için de benzer şekilde denklemler çıkarmak gerekmektedir. Geçirimsiz alt tabakadaki sonlu fark denklemini elde etmek için kullanılan grid geometrisi Şekil 3.3'te görülmektedir.



Şekil 3.3. Geçirimsiz alt tabaka için kullanılan grid geometrisi



Denklem (2.40)'ta eşitliğin sağ tarafındaki birinci integral geçirimsiz alt tabaka için aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir:

$$S_{i,j} \frac{p_{i,j}^{m+1} - p_{i,j}^m}{\Delta t} = \left[ \frac{K_{i-1,j} \cdot \Delta x_{i-1} + K_{i,j} \cdot \Delta x_i}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} \right] \frac{p_{i-1,j}^m - p_{i,j}^m}{\left( \frac{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i}{2} \right)^2} - \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta x_i + K_{i+1,j} \cdot \Delta x_{i+1}}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \right] \frac{p_{i,j}^m - p_{i+1,j}^m}{\left( \frac{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}}{2} \right)^2} + \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{\Delta z_j + \Delta z_{j-1}} \right] \frac{p_{i,j-1}^m - p_{i,j}^m}{\left( \frac{\Delta z_j + \Delta z_{j-1}}{2} \right)^2} \quad (3.17)$$

27

Denklem (3.17)'de üzerinde  $\Downarrow$  işareti bulunan terimler denklemdeki bilinmeyenlerdir. Eğer incelenen değişken çözüm bölgesi içinde süreksiz ise zaman üzerindeki türevde orta değerler kullanılabilir (Saul'yev, 1964). Dolayısıyla üzerinde  $\Downarrow$  işareti bulunan terimlerin eşitliğin sol tarafında toplanmasıyla aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir:

$$4 \cdot p_{i,j} \cdot \left\{ \left[ \frac{K_{i-1,j} \cdot \Delta x_{i-1} + K_{i,j} \cdot \Delta x_i}{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)^3} \right] + \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta x_i + K_{i+1,j} \cdot \Delta x_{i+1}}{(\Delta x_i + \Delta x_{i+1})^3} \right] + \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{(\Delta z_j + \Delta z_{j-1})^3} \right] + \left[ \frac{S_{i,j}}{4 \cdot \Delta t} \right] \right\} = 4 \cdot \left\{ \left[ \frac{S_{i,j}}{4 \cdot \Delta t} \right] \cdot p_{i,j} \right. \\ \left. + \left[ \frac{K_{i-1,j} \cdot \Delta x_{i-1} + K_{i,j} \cdot \Delta x_i}{(\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)^3} \right] \cdot p_{i-1,j} + \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta x_i + K_{i+1,j} \cdot \Delta x_{i+1}}{(\Delta x_i + \Delta x_{i+1})^3} \right] \cdot p_{i+1,j} + \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{(\Delta z_j + \Delta z_{j-1})^3} \right] \cdot p_{i,j-1} \right\} \quad (3.18)$$

Sonuçta, denklem (2.40)'ta eşitliğin sağ tarafındaki birinci integral sonlu fark formunda geçirimsiz alt tabaka için aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir:

$$p_{i,j} = \frac{CC \cdot p_{i,j} + CW \cdot p_{i-1,j} + CE \cdot p_{i+1,j} + CN \cdot p_{i,j-1}}{CC + CW + CE + CN} \quad (3.19)$$

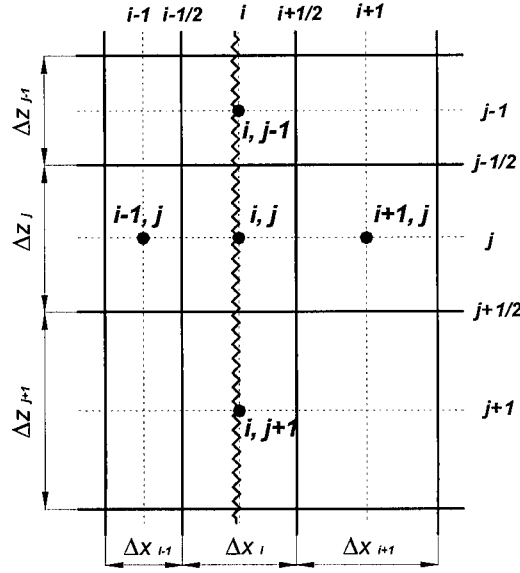
Denklem (2.40)'taki ikinci integralin geçirimsiz alt tabaka için sonlu fark karşılığı ise aşağıdaki gibi yazılabilmektedir:

$$\int_A K_z \cdot H_\varepsilon(p) \cdot n_z \cdot dS = \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{\Delta z_j + \Delta z_{j-1}} \right] \cdot H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j} + p_{i,j-1}}{2}; \varepsilon \right) \quad (3.20)$$

Sonuç olarak geçirimsiz alt tabaka için geliştirilen sonlu fark denklemini aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$p_{i,j} = \frac{1}{CC + CS + CE + CN} \left\langle CC \cdot p_{i,j} + CW \cdot p_{i-1,j} + CE \cdot p_{i+1,j} + CN \cdot \left[ p_{i,j-1} + (\Delta z_j + \Delta z_{j-1})^2 H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j} + p_{i,j-1}}{2}; \varepsilon \right) \right] \right\rangle \quad (3.21)$$

Benzer şekilde, baraj gövdesinde yapılabilecek geçirimsiz yüzeyler için (palplanj perde, diyafram duvar, v.b.) çıkarılacak denkleme ait grid geometrisi Şekil 3.4'de görülmektedir.



Şekil 3.4. Baraj gövdesindeki geçirimsiz yüzeyler için kullanılan grid geometrisi

Bu grid yapısından yola çıkarak, denklem (2.40)'ta eşitliğin sağ tarafındaki birinci integral sonlu fark formunda aşağıdaki şekilde yazılmaktadır:

$$\begin{aligned}
 S_{i,j} \frac{\Downarrow p_{i,j}^{m+1} - p_{i,j}^m}{\Delta t} &= - \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta x_i + K_{i+1,j} \cdot \Delta x_{i+1}}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \right] \frac{\Downarrow p_{i,j}^m - p_{i+1,j}^m}{\left( \frac{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}}{2} \right)^2} \\
 + \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{\Delta z_j + \Delta z_{j-1}} \right] &\frac{\Downarrow p_{i,j-1}^m - p_{i,j}^m}{\left( \frac{\Delta z_j + \Delta z_{j-1}}{2} \right)^2} \\
 - \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j+1} \cdot \Delta z_{j+1}}{\Delta z_j + \Delta z_{j+1}} \right] &\frac{\Downarrow p_{i,j}^m - p_{i,j+1}^m}{\left( \frac{\Delta z_j + \Delta z_{j+1}}{2} \right)^2}
 \end{aligned} \quad (3.22)$$

Denklem (3.22)'de üzerinde  $\Downarrow$  işareti bulunan terimler bilinmeyenleri göstermektedir. Bu terimlerin eşitliğin sol tarafında toplanmasıyla aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir:

$$\begin{aligned}
4.p_{i,j} \cdot \left\{ \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta x_i + K_{i+1,j} \cdot \Delta x_{i+1}}{(\Delta x_i + \Delta x_{i+1})^3} \right] + \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{(\Delta z_j + \Delta z_{j-1})^3} \right] \right\} &= \\
&\downarrow \text{CE} \qquad \qquad \qquad \downarrow \text{CN} \\
& \\
+ \left\{ \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j+1} \cdot \Delta z_{j+1}}{(\Delta z_j + \Delta z_{j+1})^3} \right] + \left[ \frac{S_{i,j}}{4 \cdot \Delta t} \right] \right\} &4 \cdot \left\{ \left[ \frac{S_{i,j}}{4 \cdot \Delta t} \right] \cdot p_{i,j} + \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta x_i + K_{i+1,j} \cdot \Delta x_{i+1}}{(\Delta x_i + \Delta x_{i+1})^3} \right] \cdot p_{i+1,j} \right. \\
&\downarrow \text{CS} \qquad \qquad \qquad \downarrow \text{CC} \\
& \\
+ \left. \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{(\Delta z_j + \Delta z_{j-1})^3} \right] \cdot p_{i,j-1} + \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j+1} \cdot \Delta z_{j+1}}{(\Delta z_j + \Delta z_{j+1})^3} \right] \cdot p_{i,j+1} \right\} & \\
\end{aligned} \tag{3.23}$$

İlgili kısaltmaların kullanılmasıyla, denklem (2.40)'ta eşitliğin sağ tarafındaki birinci integral kabul edilen grid yapısı için aşağıdaki şekilde yazılmaktadır:

$$p_{i,j} = \frac{CC \cdot p_{i,j} + CE \cdot p_{i+1,j} + CN \cdot p_{i,j-1} + CS \cdot p_{i,j+1}}{CC + CE + CN + CS} \tag{3.24}$$

Sonuç olarak denklem (3.24) ve Denklem (3.14);ün toplanmasıyla, baraj gövdesinde yapılabilecek geçirimsiz yüzeyler için serbest yüzeyli sızma denklemi aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\begin{aligned}
p_{i,j} &= \frac{1}{CC + CE + CN + CS} \left\langle CC \cdot p_{i,j} + CE \cdot p_{i+1,j} + CN \cdot p_{i,j-1} + CS \cdot p_{i,j+1} \right. \\
&+ \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j-1} \cdot \Delta z_{j-1}}{\Delta z_j + \Delta z_{j-1}} \right] \cdot H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j} + p_{i,j-1}}{2}; \varepsilon \right) \\
&- \left. \left[ \frac{K_{i,j} \cdot \Delta z_j + K_{i,j+1} \cdot \Delta z_{j+1}}{\Delta z_j + \Delta z_{j+1}} \right] \cdot H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j} + p_{i,j+1}}{2}; \varepsilon \right) \right\rangle \tag{3.25}
\end{aligned}$$

Denklem (3.25)'te ilgili kısaltmaların yapılmasıyla aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{aligned}
p_{i,j} = & \frac{1}{CC + CE + CN + CS} \left\langle CC \cdot p_{i,j} + CE \cdot p_{i+1,j} \right. \\
& + CN \cdot \left[ p_{i,j-1} + (\Delta z_j + \Delta z_{j-1})^2 H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j} + p_{i,j-1}}{2}; \varepsilon \right) \right] \\
& \left. + CS \cdot \left[ p_{i,j+1} - (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})^2 H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j} + p_{i,j+1}}{2}; \varepsilon \right) \right] \right\rangle
\end{aligned} \tag{3.26}$$

### 3.3. Ardışık Değerleri Yumuşatma (Successive Over-Relaxation ) Tekniği

Ardışık Değerleri Yumuşatma (ADY) tekniği, Gauss-Seidel yönteminden türetilen ve genellikle lineer denklem sistemlerinin ( $Ax = b$ ) çözümünde kullanılan bir yöntemdir. Bu teknikte, bir önceki iterasyon ile o anda yapılan iterasyon belli bir ağırlık katsayısı ile çarpılır. Bu işlem sayısal çözümlemede yakınsama hızını önemli ölçüde arttırmaktadır. Örneğin denklem (3.16)'nın ADY versiyonu;

$$\begin{aligned}
p_{i,j}^{m+1} = & (1-w) \cdot p_{i,j}^m + \frac{w}{CC + CS + CE + CN + CS} \left\langle CC \cdot p_{i,j}^m + CW \cdot p_{i-1,j}^m + CE \cdot p_{i+1,j}^m \right. \\
& + CN \cdot \left[ p_{i,j-1}^m + (\Delta z_j + \Delta z_{j-1})^2 H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j}^m + p_{i,j-1}^m}{2}; \varepsilon \right) \right] \\
& \left. + CS \cdot \left[ p_{i,j+1}^m - (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})^2 H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j}^m + p_{i,j+1}^m}{2}; \varepsilon \right) \right] \right\rangle
\end{aligned} \tag{3.27}$$

Burada,  $w$  yumuşatma katsayısıdır ve hızlı yakınsama için değeri genellikle 1 ile 2 arasında alınır (Oden ve Kikuchi 1980). Burada  $p_{i,j}^m$ ,  $m$  nci iterasyondaki  $p_{i,j}$  değerini göstermektedir. Benzer şekilde denklem (3.21)'in ADY versiyonu;

$$p_{i,j}^{m+1} = (1-w) \cdot p_{i,j}^m + \frac{w}{CC + CS + CE + CN} \left\langle CC \cdot p_{i,j}^m + CW \cdot p_{i-1,j}^m + CE \cdot p_{i+1,j}^m \right. \\ \left. + CN \cdot \left[ p_{i,j-1}^m + (\Delta z_j + \Delta z_{j-1})^2 H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j}^m + p_{i,j-1}^m}{2}; \varepsilon \right) \right] \right\rangle \quad (3.28)$$

ve Denklem (3.26)'nın ADY versiyonu da:

$$p_{i,j}^{m+1} = (1-w) \cdot p_{i,j}^m + \frac{w}{CC + CE + CN + CS} \left\langle CC \cdot p_{i,j}^m + CE \cdot p_{i+1,j}^m \right. \\ \left. + CN \cdot \left[ p_{i,j-1}^m + (\Delta z_j + \Delta z_{j-1})^2 H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j}^m + p_{i,j-1}^m}{2}; \varepsilon \right) \right] \right. \\ \left. + CS \cdot \left[ p_{i,j+1}^m - (\Delta z_j + \Delta z_{j+1})^2 H_\varepsilon \left( \frac{p_{i,j}^m + p_{i,j+1}^m}{2}; \varepsilon \right) \right] \right\rangle \quad (3.29)$$

dur. Serbest yüzeyli sızıntı problemi için ADY algoritmasının stabilitesi ve yakınsaklığının matematiksel analizi bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Oden ve Kikuchi (1980), yaptıkları çalışmada ADY algoritmasını detaylı olarak açıklamış ve sistemin hızlı ve etkili bir yakınsamaya sahip olabilmesi için  $\varepsilon$  değerinin grid aralığından küçük olmaması gerektiğini vurgulamışlardır.

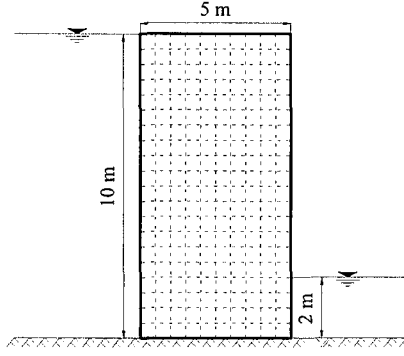
## 4. MODEL GELİŞTİRİLMESİ

### 4.1. Çözüm Bölgesinin Elektronik Tablolama Programında Modellenmesi

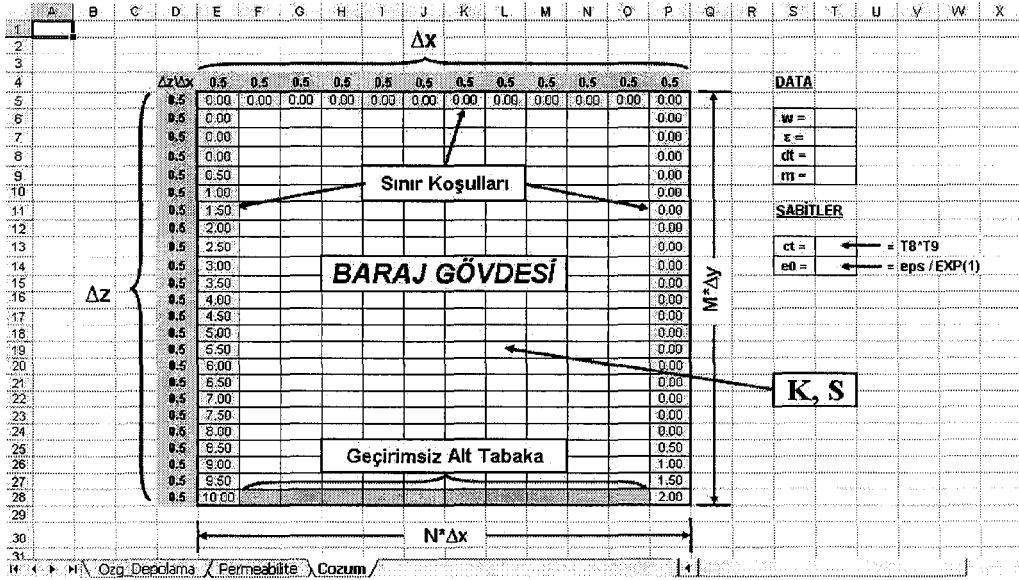
ETP kullanarak serbest yüzeyle sızıntı olayına ait sonlu fark denklemlerini çözmek için öncelikle çözüm bölgesi (*baraj gövdesi*)  $x$  ve  $z$  yönlerinde dikdörtgen gridlere ayrılır. Normalde işlemlerde kolaylık olması açısından grid boyları çözüm bölgesi boyunca eşit kabul edilir. Ancak bu çalışmada üçüncü bölümde grid boyutları değişken kabul edilebilecek şekilde sonlu fark denklemleri çıkarılmıştır. Böylece, herhangi bir süreksizlik olması durumunda yada çözümün daha detaylı incelenmesinin gerektiği yerlerde daha hassas sonuç elde edilebilmektedir.

Üçüncü bölümde, ilgili sonlu fark denklemlerinin çıkarılmasında kabul edilen grid geometrisinde hesap yapılan noktalar gridlerin orta noktaları olduğu için, çözüm bölgesinin ETP modelinde her bir hücrenin hesap yapılan orta noktaya karşılık geldiği kabul edilmiştir.

Şekil 4.1'de genel olarak kabul edilen bir barajın sınır koşulları ve gridlere ayrılmış hali, Şekil 4.2'de ise çözüm bölgesinin ETP'de modellenmiş hali görülmektedir. İncelenen örneğin geometrisine göre çözüm bölgesi kolaylıkla istenildiği gibi değiştirilebilmektedir.



Şekil 4.1. Genel olarak kabul edilen baraj gövdesi



Şekil 4.2. Elektronik tablolama programında barajın modellenmesi

Şekil 4.2'deki "Cozum" sayfasında  $\Delta x$  ile gösterilen hücreler (yani E4:P4 aralığı)  $x$  yönündeki grid aralıklarını,  $\Delta z$  ile gösterilen hücreler (yani D5:D28 aralığı) ise  $z$  yönündeki grid aralıklarını temsil etmektedir. "Sınır Koşulları" olarak gösterilen hücreler kabul ettiğimiz çözüm bölgesi için ilgili sınır şartlarını (su yükü v.b.), "Geçirimsiz Alt Tabaka" olarak gösterilen hücreler, baraj gövdesinin oturduğu geçirimsiz yüzeyi, "Baraj Gövdesi" olarak gösterilen hücreler ise



hesaplamaların yapılacağı orta noktaları göstermektedir. Üçüncü bölümde çıkarılan sonlu fark denklemlerinden denklem (3.22), “Baraj Gövdesi” olarak gösterilen hücrelerde (yani F6:O27 aralığında), denklem (3.23) ise “Geçirimsiz Alt Tabaka” olarak gösterilen hücrelerde (yani F28:O28 aralığında) hesaplanacaktır. Bu denklemler girdi olarak  $\Delta x$ ,  $\Delta z$ ,  $w$ ,  $\varepsilon$ ,  $dt$ ,  $m$ ,  $K$  ve  $S$  değerlerini aldığı için ilgili çalışma sayfasında bu parametrelerin yazıldığı hücreler tanımlanmıştır. Burada,  $dt$  değeri zaman adımını,  $m$  değeri ise toplam zamanı göstermektedir.  $K$  ve  $S$  matrisleri ise ilgili formüllerde kullanılacak permeabilite ve özgül depolama katsayısı değerlerini temsil etmektedir. Çıkarılan eşitliklerde bu değerler değişken olarak kabul edildiğinden dolayı bunları temsil etmek üzere “Permeabilite” ve “Ozg\_Depolama” adında iki çalışma sayfası daha oluşturulmuştur. “Cozum” sayfasında oluşturulan çözüm bölgesinin aynısı bu iki sayfada da oluşturulmuştur (yani her üç sayfada da çözüm bölgesi E5:P28 aralığında). Hücrelere ilgili denklemler yazılırken, gerekli olan parametre hangi sayfada ise o sayfaya basılır ve ilgili hücre seçilir. Bu işlem yapıldığında ilgili olan parametrenin bulunduğu hücre isminin başına bulunduğu sayfanın ismi gelecektir. Böylelikle birden çok sayfa ile aynı anda çalışma imkanı sağlandığından, olası karışıklıkların önüne geçilmektedir.

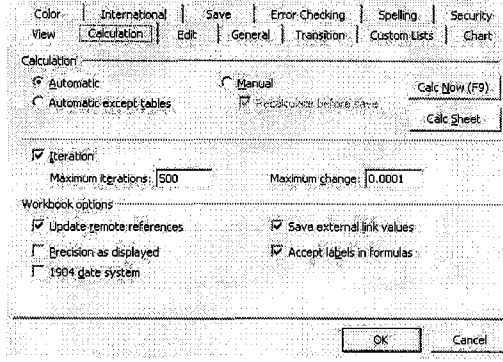
#### **4.2. Elektronik Tablolarla İteratif Hesaplama İçin İzlenecek Yol**

ETP’de bir hücreye yazılan eşitlik, başka bir hücreye yazılan eşitliğe yada değere referans verilebilir. İstenildiğinde referans verme işlemi hücreler arasında zincirleme olarak devam ettirilebilir. Bir hücreye yazılan eşitlik doğrudan doğruya yada dolaylı olarak kendi hücrelerini referans verir ise buna dögüsel başvuru yada çevirimli başvuru adı verilmektedir (Yılmaz 1999).

Döngüsel başvuru yapıldığında mevcut değerlere göre hücrelerin değerleri hesaplanır. Döngüsel başvuru yapılan hücredeki değer değiştiğinden dolayı hücre değerleri tekrar hesaplanır. Tekrar hesaplanma işlemine “Yenileme” (*Iteration*) adı verilir. Yenileme daha önceden belirtilen yenileme sayısına erişinceye kadar veya ard arda yapılan yenilemede hücreler arasındaki fark önceden verilen “En büyük değişiklik” (*Maximum Change*) değerinden küçük oluncaya kadar devam eder.

Bir eşitlikte döngüsel başvuru yapıldığında, ETP bir iletişim kutusu ile döngüsel başvuru yapıldığını bildirir. Bu iletişim kutusunda bu işlemin bir hata sonucu yapıp yapılmadığı ve bu konuda yardım istenip istenmediği sorulur. Döngüsel başvurunun bilerek yapıldığını belirten seçeneğe basıldığında döngüsel başvuru ETP tarafından kabul edilir.

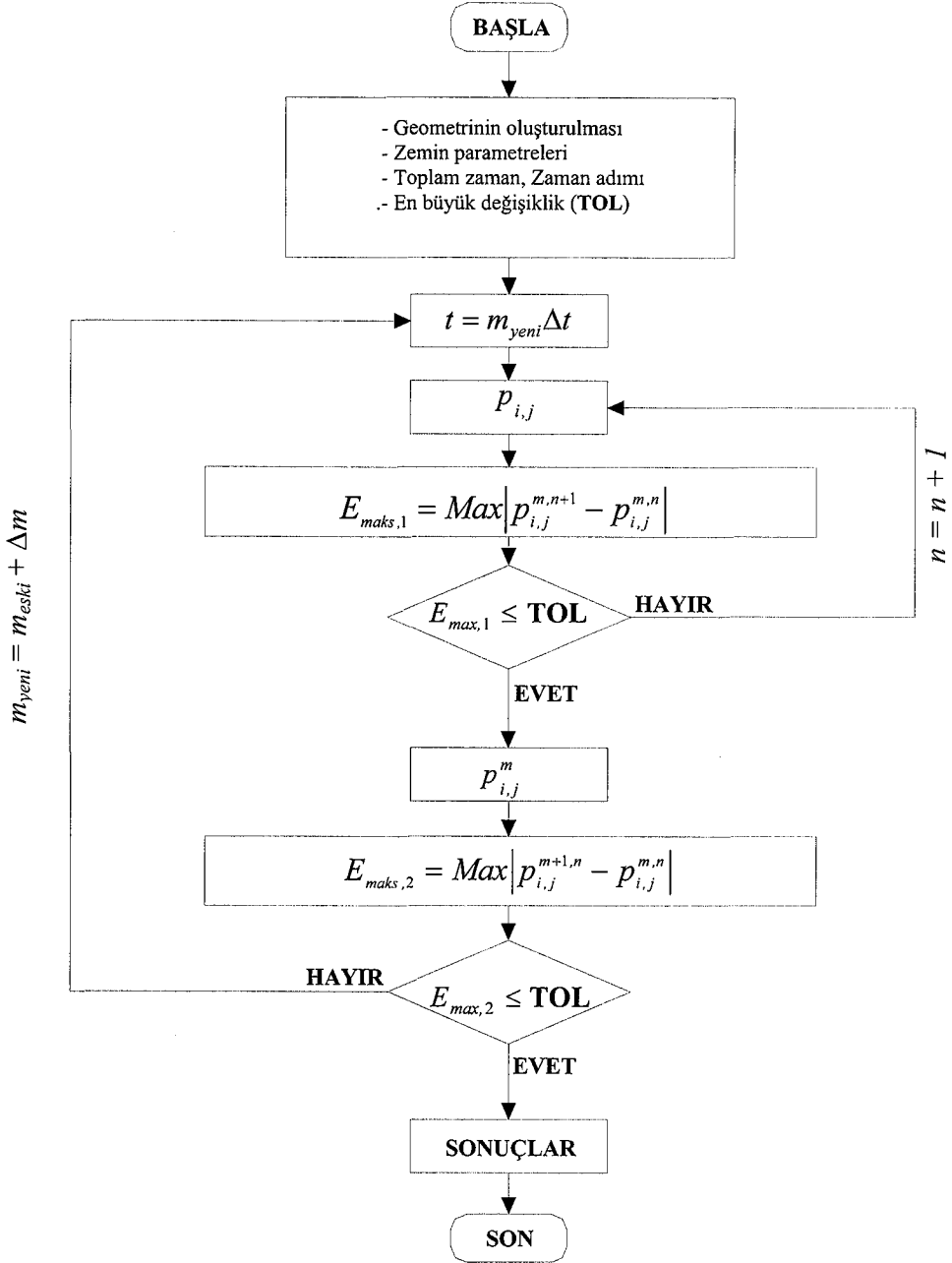
Döngüsel başvuru kısaca bir iterasyon işlemidir. Ancak iterasyon sayısı ve iki iterasyon arasındaki maksimum değişim işleme başlanmadan önce mutlaka verilmelidir. İterasyon sayısı (*Maximum Iterations*) ve en büyük değişikliğin (*Maximum Change*) verildiği pencere Şekil 4.3’te görülmektedir. İteratif hesaplama işlemini gerçekleştirmek için Şekil 4.3’deki pencerede “Yenileme” (*Iteration*) kutucuğunun işaretli olması gerekmektedir.



Şekil 4.3. Maksimum iterasyon ve değişimin verilmesi

Bu kutucuğun işaretlenmesinin ardından ilgili denklem çözüm bölgesi içindeki herhangi bir hücreye yazılır (örneğin Şekil 4.2 ele alınırsa, denklem (3.27), F6 hücresine, denklem (3.28), F28 hücresine). Bir hücreye yazılan denklem daha sonra ETP'nin "Kopyala/Yapıştır (*Copy/Paste*)" özelliği yardımıyla tüm çözüm bölgesine kopyalanır. Bu işlem yapıldığında, her hücredeki denklem komşu hücrelerle ilişkili olduğundan iterasyon başlar ve en büyük değişiklik (*Maximum Change*) şartı sağlanıncaya kadar hesaplama devam eder. Yapılan bu hesaplama algoritmasına ait akış diyagramı Şekil 4.4'te verilmektedir.

Şekil 4.4'den görüldüğü gibi çözüm algoritması iki döngüden oluşmaktadır. Bunlardan içteki döngü verilen zaman için en büyük değişim şartı sağlanıncaya kadar basınç yüksekliklerini hesaplar. Dıştaki döngü ise içteki döngü sonucu hesaplanan basınç yükseklikleri için zaman boyutunu kontrol eder.



Şekil 4.4. ETP ile iteratif hesaplama algoritmasına ait akış diyagramı

İç ve dış döngüler için en büyük değişiklik kriterleri aşağıdaki gibidir:

$$E_{maks,1} = \text{Max} |p_{i,j}^{m,n+1} - p_{i,j}^{m,n}| \quad (4.1)$$

$$E_{max,2} = Max |p_{i,j}^{m+1,n} - p_{i,j}^{m,n}| \quad (4.2)$$

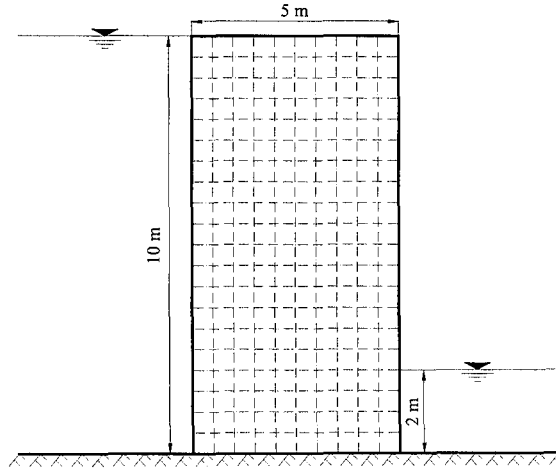
Yukarıda verilen her iki kriter sağlandıktan sonra, geliştirilen model ile her bir noktadaki basınç yükseklikleri kolaylıkla elde edilebilmektedir.

## 5. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu bölümde, geliştirilen çözüm algoritması, Bardet ve Tobita (2002), Borja ve Kishnani (1991), Lacy ve Prevost (1987), Oden ve Kikuchi (1980) tarafından ele alınan beş adet örnek çözülerek doğrulanmıştır. Her örneğe ait açıklamalar ve sonuçların karşılaştırmalı olarak gösterimi, ilgili örnek içerisinde detaylı olarak anlatılmıştır.

### 5.1. İzlenecek Yol

ETP de serbest yüzeyli sızma problemini incelemek amacıyla Şekil 5.1'deki gibi dikdörtgen bir baraj kesiti kabul edilsin.



Şekil 5.1. Kabul edilen baraj geometrisi ve sınır koşulları

Ele alınan dikdörtgen kesitin ETP'de modellenmiş hali Şekil 5.2'de görülmektedir. Görüldüğü gibi, sınırlardaki toplam hidrolik yük değerlerinin grid

uzunluklarına bağılı şekilde lineer olarak artmaktadır (C6:C46 ve Y38:Y46 arası). Diğer hücrelerdeki (C3:C5, C3:Y3 ve Y3:Y37 arası) toplam hidrolik yük değerleri sifıra eşittir. Genişletilmiş Basınç (*Extended Pressure*) Yönteminde, üst sınırlardaki küçük basınç değişimleri serbest su yüzeyinde büyük sapmalar meydana getirmektedir (Bardet ve Tobita 2002). Bu nedenle orijinal geometriye ilave olarak modelin üst sınırına üç adet daha satır ilave edilmiştir.

Çözüm işlemini gerçekleştirmek için öncelikle “Cozum” sayfası üzerinde oluşturulan model yapısının aynısı “Ozg\_Depolama” ve “Permeabilite” sayfalarında da oluşturulmuştur.

Bu uygulamanın çözülebilmesi için üçüncü bölümde çıkarılan Denklem (3.27) ve (3.28)’in ilgili hücrelere yazılması gerekmektedir. Ancak burada kolaylık olarak ilgili denklemlerin tüm hücrelere yazılması yerine ETP’nin “Kopyala/Yapıştır (*Copy/Paste*)” özelliğinden faydalanılarak tek bir hücreye yazılan denklem kopyalanarak tüm hücrelere yapıştırılmaktadır. Bu işlem yapıldığı zaman denklemlerde yer alan değişkenlerin satır ve sütun numaraları değişmekte ve her hücredeki denklem komşu hücrelerindeki değişkenleri girdi olarak almaktadır. ETP’nin bu özelliği zaman ve emek açısından kullanıcıya büyük kolaylık sağlamakta ve kompleks geometriye sahip kesitler bu sayede kolaylıkla oluşturulabilmektedir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
1																												
2	$\Delta z/\Delta x$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
3	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.25	0.00	0.00																									
5	0.25	0.00																										
6	0.25	0.00																										
7	0.25	0.25																										
8	0.25	0.50																										
9	0.25	0.75																										
10	0.25	1.00																										
11	0.25	1.25																										
12	0.25	1.50																										
13	0.25	1.75																										
14	0.25	2.00																										
15	0.25	2.25																										
16	0.25	2.50																										
17	0.25	2.75																										
18	0.25	3.00																										
19	0.25	3.25																										
20	0.25	3.50																										
21	0.25	3.75																										
22	0.25	4.00																										
23	0.25	4.25																										
24	0.25	4.50																										
25	0.25	4.75																										
26	0.25	5.00																										
27	0.25	5.25																										
28	0.25	5.50																										
29	0.25	5.75																										
30	0.25	6.00																										
31	0.25	6.25																										
32	0.25	6.50																										
33	0.25	6.75																										
34	0.25	7.00																										
35	0.25	7.25																										
36	0.25	7.50																										
37	0.25	7.75																										
38	0.25	8.00																										
39	0.25	8.25																										
40	0.25	8.50																										
41	0.25	8.75																										
42	0.25	9.00																										
43	0.25	9.25																										
44	0.25	9.50																										
45	0.25	9.75																										
46	0.25	10.00																										

w =	1.2
$\epsilon =$	0.25
dt =	1
m =	3600

ct =	3600
e0 =	0.092

Şekil 5.2. Kabul edilen kesitin ETP de modellenmiş hali



Denklem (3.27) ve (3.28)'de bulunan nonlineer  $H_\epsilon\left(\frac{P_{i,j} + P_{i,j-1}}{2}; \epsilon\right)$  ve  $H_\epsilon\left(\frac{P_{i,j} + P_{i,j+1}}{2}; \epsilon\right)$  terimlerini hesaplamak için, ETP altında çalışan “Visual Basic Editor” de bir makro programı yazılmıştır. Bu makroya ait Visual Basic kodlaması EK-1 içerisinde Çizelge EK-1.1’de verilmiştir. Şekil 5.2’deki D4 hücresine yazılan denklemde yer alan  $H_\epsilon\left(\frac{P_{i,j} + P_{i,j-1}}{2}; \epsilon\right)$  ifadesi, denklem yazılırken bileşen olarak “H((Cozum!D3+Cozum!D4)/2;eps)” şeklinde yazılmaktadır. Görüldüğü gibi yazılan kodlamada  $H_\epsilon$  parçalı fonksiyonu H ile ifade edilmiştir. İteratif hesaplama sırasında her bir iterasyonda ETP ile birlikte bu makro da çalışacaktır.

Sonuç olarak denklem (3.27)’nin ETP formatında yazılmış hali:

$$\begin{aligned}
D4 = & (1-w)*D4+w*(((Ozg\_Depolama!D4*D4/(4*AB\$9)))+(((Permeabilite!C4*C\$2 \\
& +Permeabilite!D4*D\$2)/(Cozum!C\$2+D\$2)^3)*C4)+(((Permeabilite!D4*D\$2 \\
& +Permeabilite!E4*E\$2)/(D\$2+E\$2)^3)*E4)+(((Permeabilite!D3*\$B3+Permeabilite!D4 \\
& *\$B4)/(\$B3+\$B4)^3)*D3)+((Permeabilite!D4*\$B4+Permeabilite!D5*\$B5)/(\$B4+\$B5)^3) \\
& *D5+(((Permeabilite!D3*\$B3+Permeabilite!D4*\$B4)/(\$B3+\$B4)) \\
& *H((Cozum!D3+Cozum!D4)/2;eps)-((Permeabilite!D4*\$B4+Permeabilite!D5 \\
& *\$B5)/(\$B4+\$B5))*H((Cozum!D4+Cozum!D5)/2;eps)))/(((Permeabilite!C4 \\
& *Cozum!C\$2+Permeabilite!D4*Cozum!D\$2)/(Cozum!C\$2+Cozum!D\$2)^3) \\
& +((Permeabilite!D4*Cozum!D\$2+Permeabilite!E4*Cozum!E\$2)/(Cozum!D\$2 \\
& +Cozum!E\$2)^3)+((Permeabilite!D3*Cozum!\$B3+Permeabilite!D4 \\
& *Cozum!\$B4)/(Cozum!\$B3+Cozum!\$B4)^3)+((Permeabilite!D4 \\
& *Cozum!\$B4+Permeabilite!D5*Cozum!\$B5)/(Cozum!\$B4+Cozum!\$B5)^3) \\
& +(Ozg\_Depolama!D4/(4*AB\$9))))
\end{aligned} \tag{5.1}$$

ve denklem (3.28)’in ETP formatında yazılmış hali:

$$\begin{aligned}
D46 = & (1-w)*D46+w*(((Ozg\_Depolama!D46/(4*Cozum!$AB$9))*D46+((Permeabilite!C46 \\
& *Cozum!C$2+Permeabilite!D46*Cozum!D$2)/(Cozum!C$2+Cozum!D$2)^3)*Cozum!C46 \\
& +((Permeabilite!D46*Cozum!D$2+Permeabilite!E46*Cozum!E$2)/(Cozum!D$2 \\
& +Cozum!E$2)^3)*Cozum!E46+((Permeabilite!D45*Cozum!$B45+Permeabilite!D46 \\
& *Cozum!$B46)/(Cozum!$B45+Cozum!$B46)^3)*Cozum!D45+((Permeabilite!D45*$B45 \\
& +Permeabilite!D46*$B46)/($B45+$B46))*H((Cozum!D45+Cozum!D46)/2;eps)) \\
& /(((Ozg\_Depolama!D46/(4*Cozum!$AB$9))+((Permeabilite!C46*Cozum!C$2 \\
& +Permeabilite!D46*Cozum!D$2)/(Cozum!C$2+Cozum!D$2)^3)+((Permeabilite!D46 \\
& *Cozum!D$2+Permeabilite!E46*Cozum!E$2)/(Cozum!D$2+Cozum!E$2)^3) \\
& +((Permeabilite!D45*Cozum!$B45+Permeabilite!D46*Cozum!$B46)/(Cozum!$B45 \\
& +Cozum!$B46)^3)))
\end{aligned} \tag{5.2}$$

dir. Her iki denklemde de kalın olarak yazılmış ifadeler, yazılan makronun ETP formülüne aktarılış şeklini göstermektedir. Burada D4 ve D46 ifadeleri o hücrelerdeki basınç yüksekliklerini ifade etmektedir. Denklem (5.1) ve (5.2)'de yer alan “!” işaretleri, formülde diğer sayfalar referans verildiğinde ilgili sayfa adından sonra gelmektedir.

Model ETP’de oluşturulduktan sonra, Denklem (5.1), D4 hücresine ve denklem (5.2), D46 hücresine yazılır. Her iteratif hesaplamada olduğu gibi burada da çözüm bölgesinin bir başlangıç basınç yüksekliği değerine sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle başlangıç basınç yüksekliği değeri hesaplamaya başlamadan önce tüm çözüm bölgesine girilmelidir (D4:X46 arası D4 ve X46 hücreleri hariç). Bu işlemten sonra, D4 hücresi kopyalanarak D4:D45 aralığına, D4:D46 aralığı da D4:X46 aralığına yapıştırılır. Yapıştırma işlemi gerçekleştirildiğinde iteratif hesaplama süreci başlar ve verilen iterasyon sayısı ve/veya iki iterasyon arasındaki değişim değeri sağlanıncaya kadar devam eder.

Bardet ve Tobita (2002), dış sınırlar haricinde serbest su yüzeyi üzerindeki basınç yüksekliğinin daima sabit olduğunu ve değerinin  $p_w = \varepsilon / e$  olduğunu ileri sürmüşlerdir. Buradan yola çıkarak, hesaplanan basınç yüksekliklerinin  $\varepsilon / e$  ye eşit olduğu noktalardan eğri geçirilmesi ile serbest su yüzeyi bulunabilmektedir. Bu işlemi yapmak için, ETP’de yer alan “Visual Basic Editor” de yazılan makro programı EK-1 deki Çizelge EK-1.2 de verilmiştir. Yazılan bu kod, ETP hücrelerine “*InterL(e0;X;Z)*” olarak yazılmaktadır. Burada,  $e0$ ,  $\varepsilon / e$  değerini göstermektedir.

## 5.2. Uygulama 1

Bu uygulamada geliştirilen modeli doğrulamak amacıyla, homojen-izotrop, dikdörtgen kesitte bir baraj ele alınmıştır. Baraj, memba tarafında 10 m, mansap tarafında ise 2 m su yüksekliklerine sahiptir. Kabul edilen geometri ve sınır koşulları, bir önceki bölümde Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Ayrıca kesite ait tüm değişken değerleri aşağıda verilmiştir:

Baraj boyutları: 5 m x 10 m (dikdörtgen kesit)

Grid aralığı:  $\Delta x = \Delta y = 0.25$  m

Özgül depolama katsayısı:  $S_s = 0.01$  m<sup>-1</sup> (tüm hücrelerde sabit)

Permeabilite:  $K = 0.0000002$  m/gün (tüm hücrelerde sabit)

Zaman:  $m.\Delta t = 3600$  gün

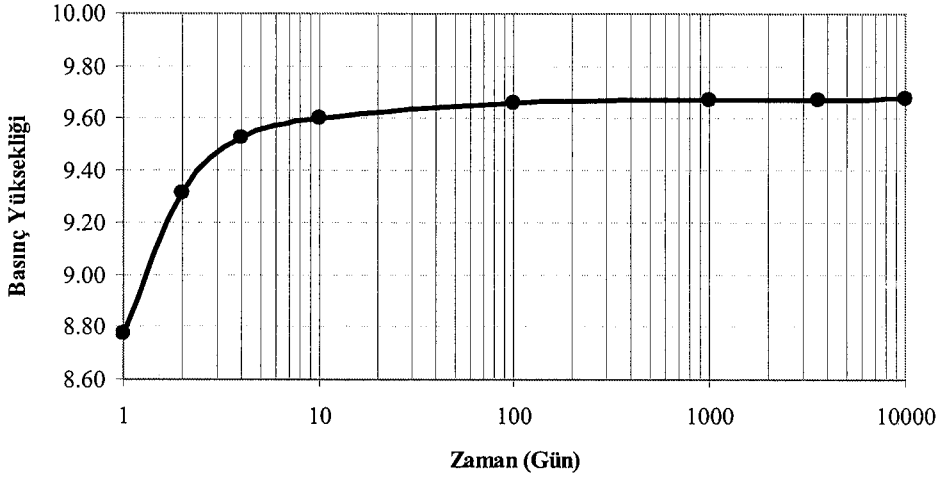
Yumuşatma katsayısı:  $w = 1.2$

Penaltı katsayısı:  $\varepsilon = 0.25$

Bu uygulamada permeabilite ve özgül depolama katsayısı değerleri sabit kabul edildiğinden dolayı, “Ozg\_Depolama” ve “Permeabilite” sayfalarındaki tüm hücrelere yukarıda verilen değerleri girilmiştir.

Şekil 5.1’de gösterilen kesitin ETP’de modellenmiş hali Şekil 5.2’de görülmektedir. Bu uygulamada başlangıç basınç yüksekliği değeri, iç hücreler için  $p = 0.00 \text{ m}$ , geçirimsiz alt tabaka için  $p = 0.30 \text{ m}$  seçilmiştir. Üçüncü bölümde çıkarılan denklem (3.27) ve (3.28)’in, bu uygulama için ETP formatında yazılmış hali EK-2’de verilmiştir. Sonuç olarak EK-2’de verilen Denklem (EK-2.1) ve denklem (EK-2.2)’nin kopyalanıp çözüm bölgesine yapıştırılmasıyla iteratif hesaplama süreci başlamakta ve maksimum iterasyon ve/veya en büyük değişim değerleri sağlanıncaya kadar devam etmektedir. İteratif hesaplama sonucu elde edilmiş basınç yüksekliği değerleri EK-2 içinde Şekil EK-2.1’de görülmektedir.

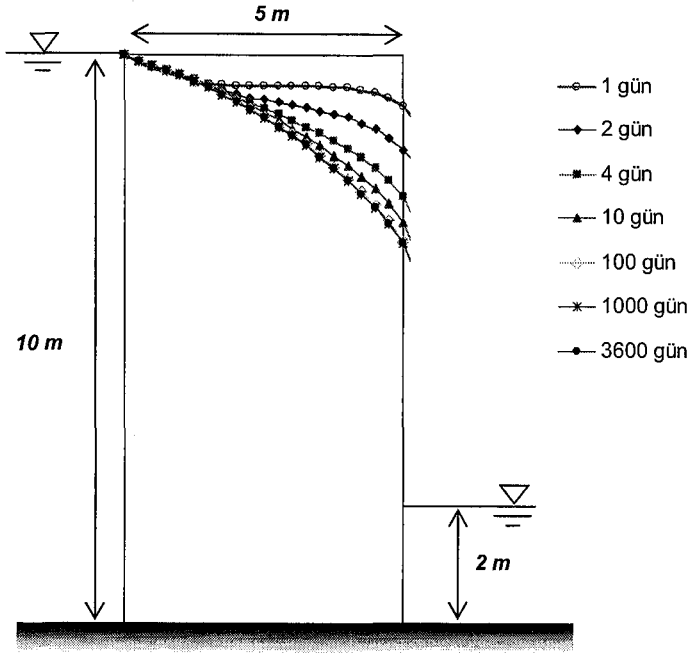
Bardet ve Tobita (2002), Borja ve Kishnani (1991), Lacy ve Prevost (1987), Oden ve Kikuchi (1980) bu örneği kararlı durum (*steady-state*) için çözmüşlerdir. Oysa ki, bu tezde geliştirilen modele ait denklemler zamana bağlıdır (*time-dependent*). Yapılan denemeler sonucunda bu örnek farklı zaman adımları için çözülmüştür. Şekil EK-2.1’deki D46 hücresine ait basınç yüksekliği değerleri Şekil 5.3’te görülmektedir. Şekil 5.3’te dikkat edilmesi gereken nokta, basınç yüksekliği değerinin 1000 günden sonra kararlı duruma ulaştığıdır. Buradan yola çıkarak, basınç yüksekliği değerinin, 1000 günden büyük zaman adımları için çözümü, bize kararlı durum için çözümü vermektedir. Bu nedenle bu uygulama çözülmürken zaman olarak 3600 gün kabul edilmiştir.



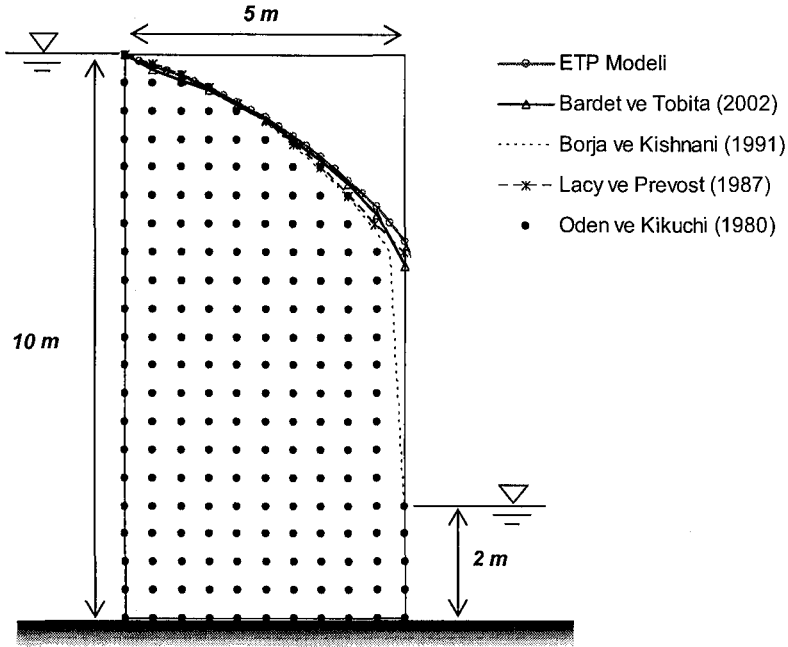
Şekil 5.3. D46 hücresi için basınç yüksekliğinin zamana bağlı değişimi

Şekil EK-2.1'deki basınç yüksekliği değerleri hesaplandıktan sonra Çizelge EK-1.2'deki makro ile serbest su yüzeyi hesaplanmıştır. Şekil EK-2.2'de yazılan makronun ETP de modellenmiş hali görülmektedir. Çözüm bölgesi C ve Y kolonları arasında olduğu için, “ $InterL(e_0; X; Z)$ ” formülü bu aralıkta uygulanmıştır. Ayrıca Şekil EK-2.2'de, “ $InterL(e_0; X; Z)$ ” formülünün D4 hücresi için ETP formunda yazılmış hali görülmektedir. Formül C52:Y52 aralığında uygulandıktan sonra, C53:Y53 aralığında hesaplanan değerlerin başlangıç su yüksekliği olan 10 m'den farkları alınmıştır. Böylelikle serbest su yüzeyinin baraj taban kotundan olan mesafeleri kolaylıkla bulunmuş olur.

Şekil 5.4'de sızma sonucu oluşan serbest su yüzeyinin farklı zamanlar için durumu görülmektedir. Burada da zaman arttıkça sistemin kararlı duruma ulaştığı açıkça görülebilmektedir. Şekil 5.5'te ise, geliştirilen modelin 3600 gün için çözülmesi ile elde edilen su yüzeyi karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Uygulama 1 için farklı zamanlarda serbest su yüzeyinin durumu



Şekil 5.5. Uygulama 1 için serbest su yüzeylerinin karşılaştırılması

Geliştirilen model ile hesaplanan serbest su yüzeyinin; Bardet ve Tobita (2002), Borja ve Kishnani (1991), Lacy ve Prevost (1987), Oden ve Kikuchi (1980) tarafından bulunan su yüzeyleri ile iyi uyum içinde olduğu görülmektedir.

### 5.3. Uygulama 2

Bu uygulamada, mansap tarafında yatay bir topuk dreni bulunan dikdörtgen kesitte bir baraj ele alınmıştır. Kabul edilen geometri ve sınır koşulları Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Ayrıca kabul edilen tüm değişken değerleri aşağıda verilmiştir:

Baraj boyutları:  $6 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  (dikdörtgen kesit)

Grid aralığı:  $\Delta x = \Delta y = 0.25 \text{ m}$

Özgül depolama katsayısı:  $S_s = 0.01 \text{ m}^{-1}$  (tüm hücrelerde sabit)

Permeabilite:  $K = 0.0000002 \text{ m/gün}$  (tüm hücrelerde sabit)

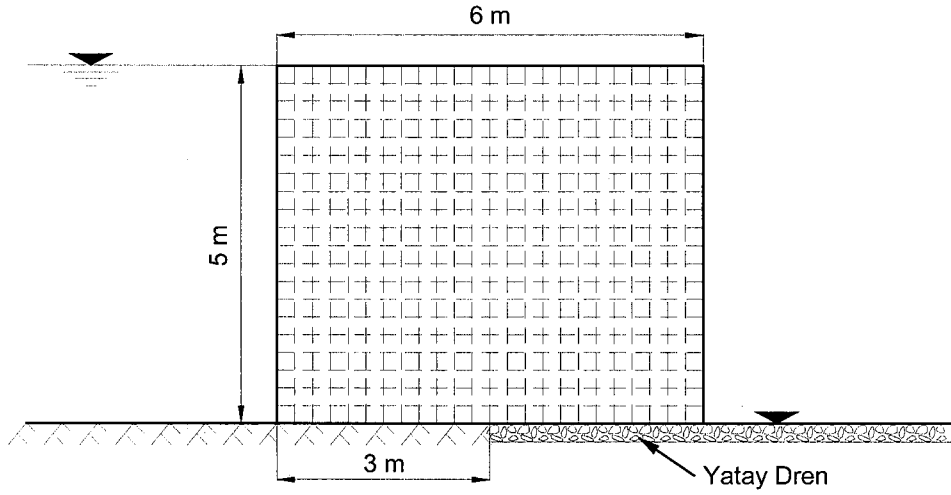
Zaman:  $m \cdot \Delta t = 3600 \text{ gün}$

Yumuşatma katsayısı:  $w = 1.2$

Penaltı katsayısı:  $\varepsilon = 0.25$

Şekil 5.6'da gösterilen kesitin ETP'de modellenmiş hali Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Bu uygulamada da, kabul edilen özgül depolama ve permeabilite değerleri tüm kesitte aynı kabul edildiğinden dolayı “Ozg\_depolama” ve “Permeabilite” sayfalarına yukarıdaki değerleri girilmiştir. Şekil 5.7'de görüldüğü

gibi, yatay topuk dreninde toplam hidrolik yük değeri sıfır olduğu için mansap tarafından barajın ortasına kadar sınır koşulu sıfır değerini almıştır.



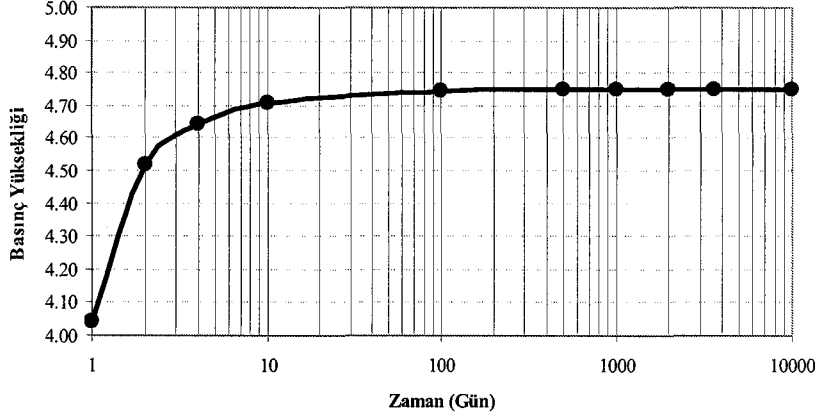
Şekil 5.6. Uygulama 2 için kabul edilen geometri ve sınır koşulları

Uygulama 1 ile benzer şekilde, denklem (3.27) ve (3.28)'in ilgili hücrelere yazılması gerekmektedir. Denklem (3.27) ve (3.28)'in bu uygulama için ETP formatında yazılmış hali EK-3 içerisinde denklem (EK-3.1) ve Denklem (EK-3.2) olarak verilmiştir. Bu denklemlerin ilgili hücrelere yazılmasından sonra, başlangıç basınç yüksekliği değerleri tüm çözüm bölgesine girilir. Bu uygulamada başlangıç basınç yüksekliği değeri, iç hücrelerde  $p = 0.00 \text{ m}$ , geçirimsiz alt tabakada  $p = 0.15 \text{ m}$  seçilmiştir. Bu işlemden sonra, D26 hücresi kopyalanıp, D26:O26 aralığına, D4 hücresi de, D4:AA25 aralığına yapıştırılmasıyla iteratif hesaplama süreci başlar ve gerekli şartlar sağlanıncaya kadar devam eder. İteratif hesaplama sonucu elde edilmiş basınç yüksekliği değerleri EK-3'deki Şekil EK-3.1'de gösterilmiştir.





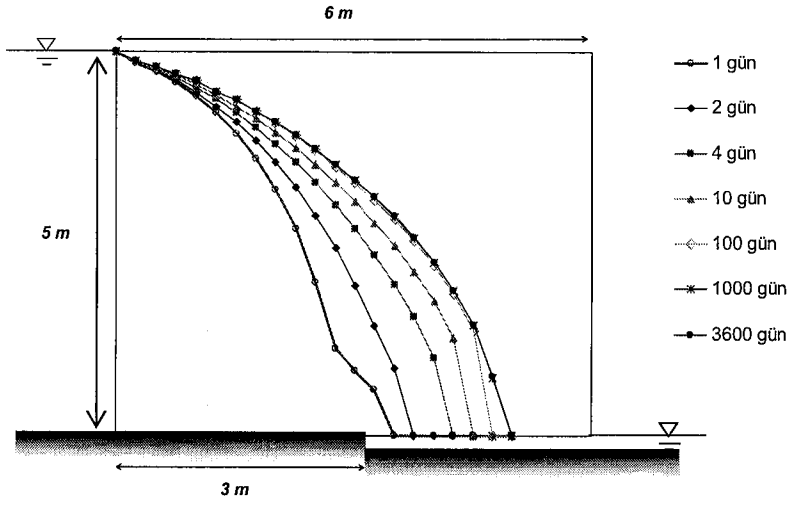
Uygulama 1’de olduğu gibi bu uygulama da farklı zaman adımları için çözülmüştür. Geçirimsiz alt tabaka üzerinde bulunan D26 hücresindeki basınç yüksekliği değerinin farklı zamanlar için gösterimi Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



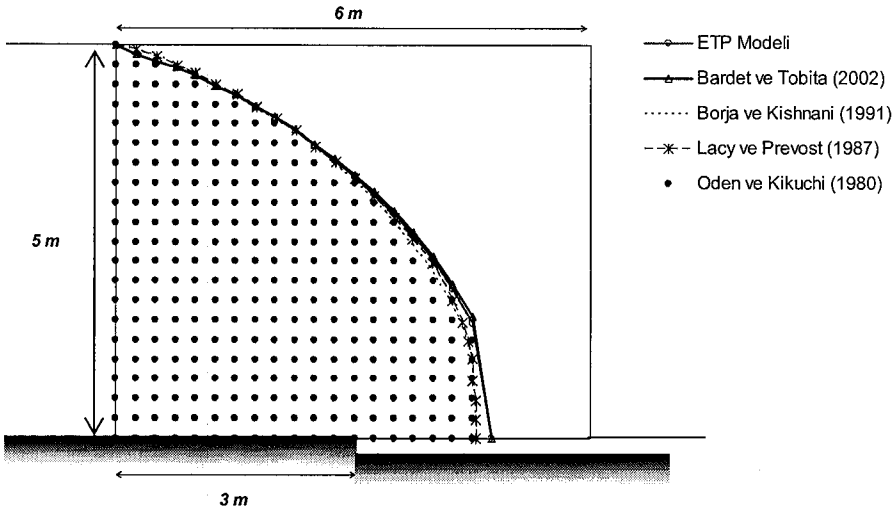
Şekil 5.8. D26 hücresi için basınç yüksekliğinin zamana bağlı değişimi

İteratif hesaplama ile basınç yükseklikleri bulunduğundan sonra, Çizelge EK-1.2’de verilen makro ile serbest su yüzeyi bulunmuştur. Şekil EK-3.2’de bu makronun Uygulama 2 için ETP’de modellenmiş hali görölmektedir.

Şekil EK-3.2’de gösterilen makronun kullanılması ile, farklı zamanlar için elde edilmiş serbest su yüzeyinin durumu Şekil 5.9 da gösterilmiştir. Şekil 5.10’da ise, geliştirilen modelin 3600 gün için çözümlenmesi ile elde edilen su yüzeyi görölmektedir. Burada da, hesaplanan serbest su yüzeyinin; Bardet ve Tobita (2002), Borja ve Kishnani (1991), Lacy ve Prevost (1987), Oden ve Kikuchi (1980) tarafından bulunan su yüzeyleri ile iyi uyum içinde olduğu görölmektedir.



Şekil 5.9. Uygulama 2 için farklı zamanlarda serbest su yüzeyinin durumu



Şekil 5.10. Uygulama 2 için serbest su yüzeylerinin karşılaştırılması

### 5.4. Uygulama 3

Bu uygulamada, Şekil 5.11’de gösterildiği gibi, memba tarafına su yüzeyinden itibaren 4 m yüksekliğinde palplanj perde yerleştirilmiş dikdörtgen kesitte bir baraj ele alınmıştır. Ayrıca kabul edilen tüm değişken değerleri aşağıda verilmiştir:

Baraj boyutları: 5 m x 7 m (dikdörtgen kesit)

Grid aralığı:  $\Delta x = \Delta y = 0.25$  m

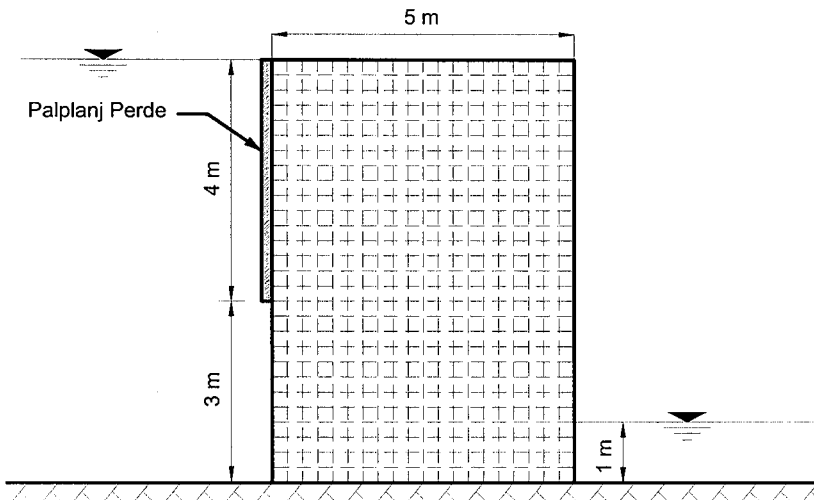
Özgül depolama katsayısı:  $S_s = 0.01$  m<sup>-1</sup> (tüm hücrelerde sabit)

Permeabilite:  $K = 0.0000002$  m/gün (tüm hücrelerde sabit)

Zaman:  $m \cdot \Delta t = 3600$  gün

Yumuşatma katsayısı:  $w = 1.2$

Penaltı katsayısı:  $\varepsilon = 0.25$



Şekil 5.11. Uygulama 3 için kabul edilen geometri ve sınır koşulları

Şekil 5.11’de gösterilen kesitin ETP’de modellenmiş hali Şekil 5.12’de görülmektedir. Baraj gövdesine yerleştirilen palplanj perde Şekil 5.12’de D3:D19 aralığında gösterilmiştir.

Bu uygulamada da denklem (3.27) ve (3.28)’in sırasıyla iç hücreler ile geçirimsiz alt tabakaya ait hücrelere yazılması gerekmektedir. Bunun yanında, baraj gövdesinde geçirimsiz bir yüzey olduğu için Denklem (3.29)’un da ilgili hücrelere yazılması gerekmektedir. Bu uygulama için Denklem (3.27), (3.28) ve (3.29)’un ETP formatında yazılmış hali EK-4 içerisinde sırasıyla; Denklem (EK-4.1), (EK-4.2) ve (EK-4.3) olarak verilmiştir. Bu uygulamada başlangıç basınç yüksekliği değeri, iç hücrelerde ve palplanj perde üzerinde,  $p = 0.00 m$ , geçirimsiz alt tabakada,  $p = 0.15 m$  seçilmiştir. Başlangıç basınç yüksekliği değerleri ilgili hücrelere girildikten sonra, sırasıyla D4 hücresi D4:D19 aralığına, E4 hücresi E4:E31 ve E20:E31 aralığına ve D32 hücresi E32 hücresine yapıştırılır. Bu işlemlerin ardından, E4:E32 aralığı kopyalanarak, E4:W32 aralığına yapıştırılır. Verilen iterasyon sayısı ve/veya en büyük değişim şartları sağlanıncaya kadar iteratif hesaplama süreci devam eder. Burada dikkat edilmesi gereken husus, kopyalama ve yapıştırma işleminin yukarıda belirtilen sırada yapılmasıdır. Çünkü küçük zaman adımları için, model bu şekilde optimal çözümü bulmaktadır. İteratif hesaplama sonucu elde edilen basınç yüksekliği değerleri EK-4 içerisinde Şekil EK-4.1’de verilmiştir.

Geçirimsiz alt tabakadaki D32 hücresine ait basınç yüksekliği değerinin farklı zamanlar için gösterimi Şekil 5.13’de gösterilmiştir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA
1																											
2	$\Delta z \backslash \Delta x$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	
3	0.25			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
4	0.25		0.00	0.00																							0.00
5	0.25																										0.00
6	0.25																										0.00
7	0.25																										0.00
8	0.25																										0.00
9	0.25																										0.00
10	0.25																										0.00
11	0.25																										0.00
12	0.25																										0.00
13	0.25																										0.00
14	0.25																										0.00
15	0.25																										0.00
16	0.25																										0.00
17	0.25																										0.00
18	0.25																										0.00
19	0.25																										0.00
20	0.25	4.00																									0.00
21	0.25	4.25																									0.00
22	0.25	4.50																									0.00
23	0.25	4.75																									0.00
24	0.25	5.00																									0.00
25	0.25	5.25																									0.00
26	0.25	5.50																									0.00
27	0.25	5.75																									0.00
28	0.25	6.00																									0.00
29	0.25	6.25																									0.25
30	0.25	6.50																									0.50
31	0.25	6.75																									0.75
32	0.25	7.00		6.75																							1.00
33																											

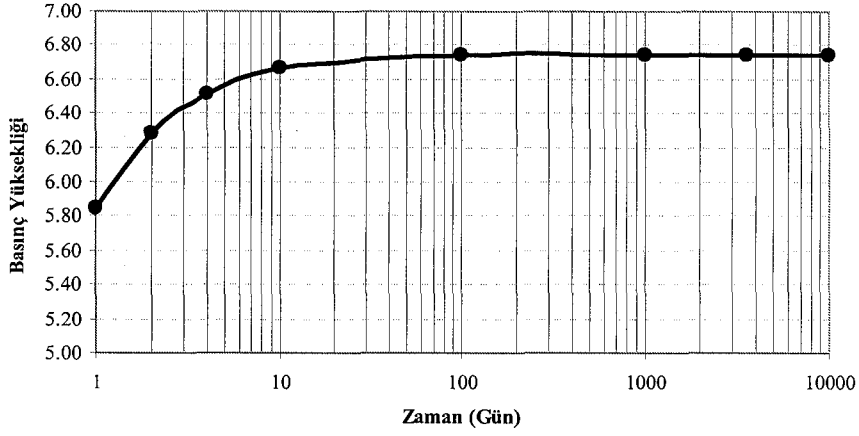
w =	1.2
$\varepsilon =$	0.25
dt =	1
m =	3600

ct =	3600
e0 =	0.09

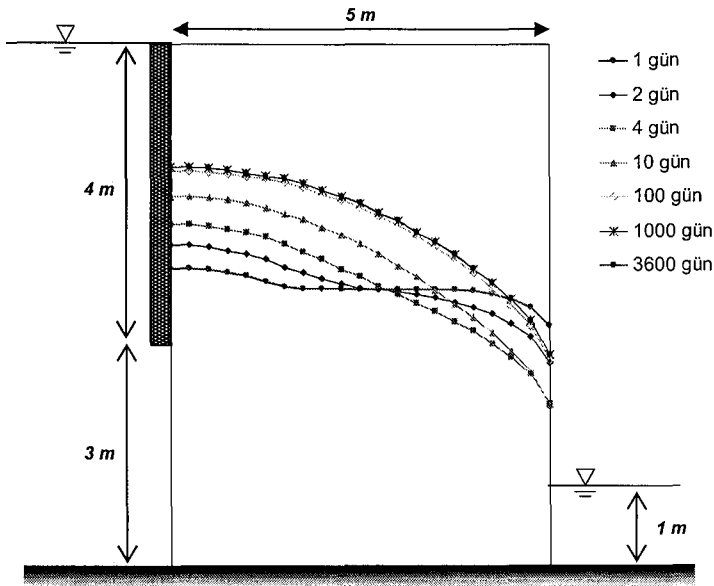
Özg. Depolama	Permeabilite	Çözüm
---------------	--------------	-------

Şekil 5.12. Uygulama 3'ün ETP'de modellenmiş hali



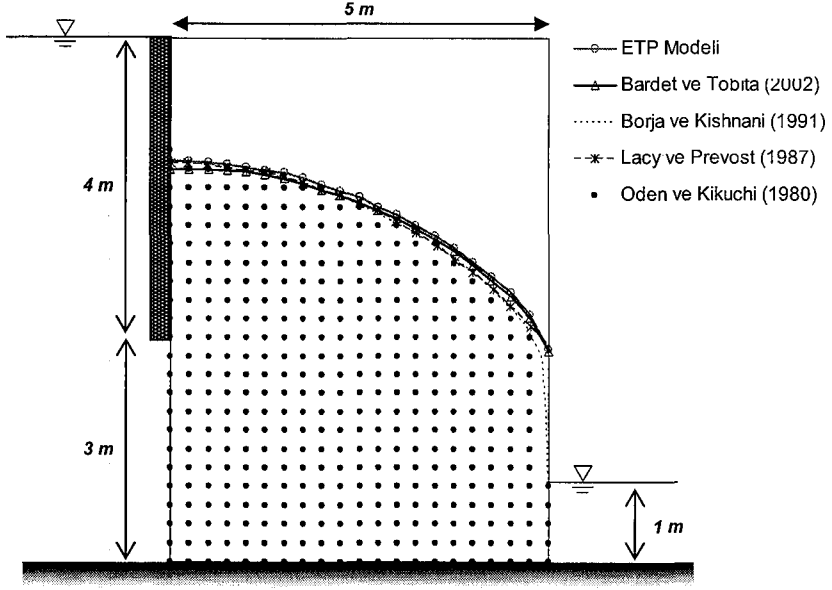
Şekil 5.13. D32 hücresi için basınç yüksekliğinin zamana bağlı değişimi

İteratif hesaplamadan sonra, Çizelge EK-1.2’de verilen makro ile serbest su yüzeyi bulunmuştur. Şekil EK-4.2’de bu makronun Uygulama 3 için ETP’de modellenmiş hali görülmektedir. Bu makronun kullanılması ile, farklı zamanlar için elde edilmiş serbest su yüzeyleri Şekil 5.14’de görülmektedir.



Şekil 5.14. Uygulama 3 için farklı zamanlarda serbest su yüzeyinin durumu

Şekil 5.15’de ise, geliştirilen modelin 3600 gün için çözülmesi ile elde edilen su yüzeyi görülmektedir.



Şekil 5.15. Uygulama 3 için serbest su yüzeylerinin karşılaştırılması

## 5.5. Uygulama 4

Bu uygulamada, Şekil 5.16’da gösterile trapez kesitinde bir baraj ele alınmıştır kabul edilen değişken değerleri aşağıda verilmiştir:

Grid aralığı:  $\Delta x = \Delta y = 0.25 \text{ m}$

Özgül depolama katsayısı:  $S_s = 0.01 \text{ m}^{-1}$  (tüm hücrelerde sabit)

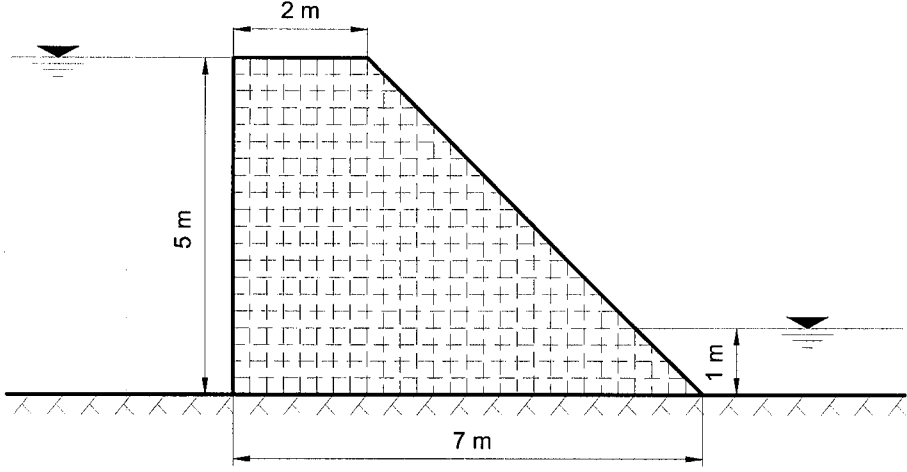
Permeabilite:  $K = 0.0000002 \text{ m/gün}$  (tüm hücrelerde sabit)

Zaman:  $m.\Delta t = 3600 \text{ gün}$

Yumuşatma katsayısı:  $w = 1.2$



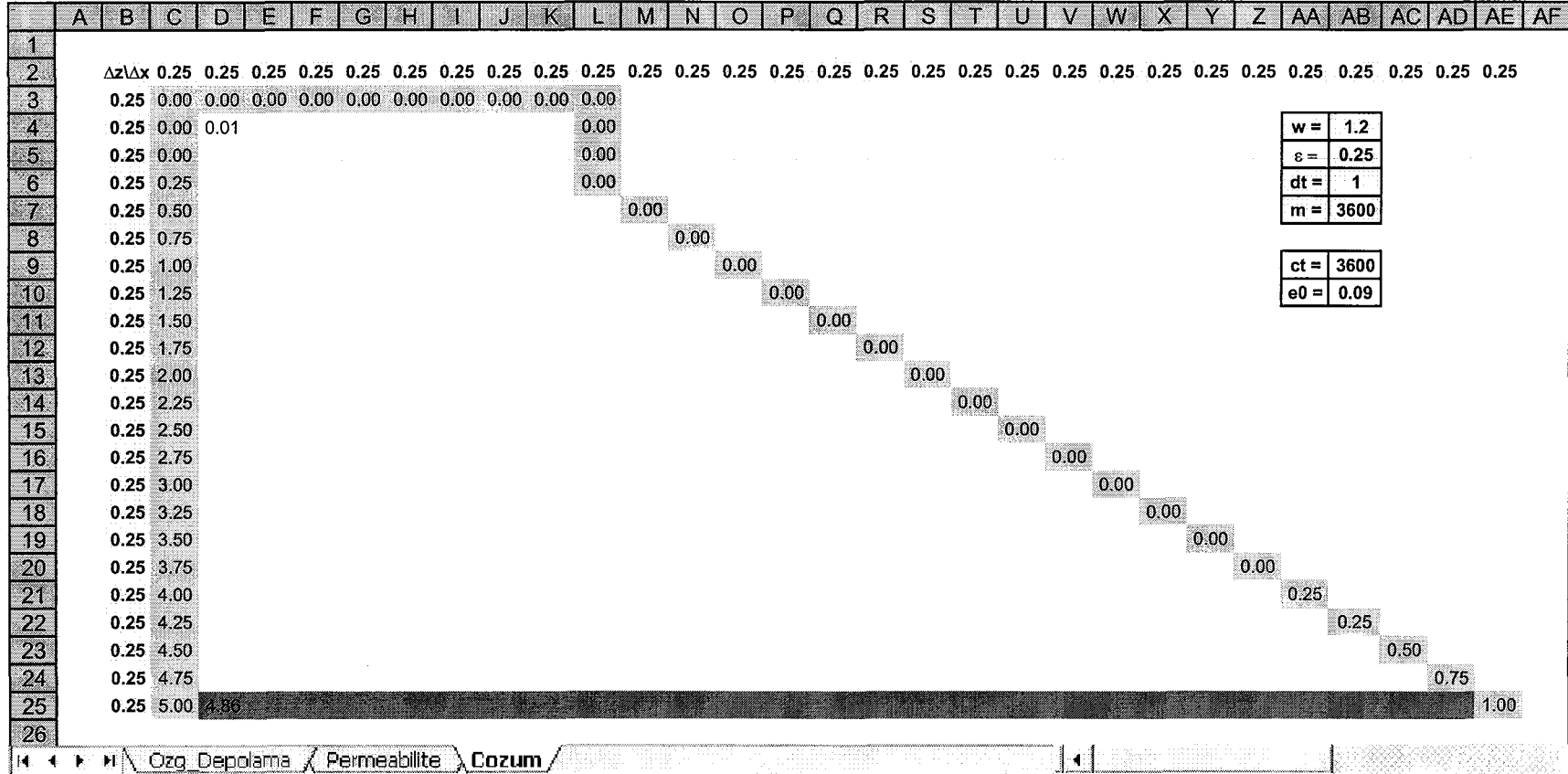
Penaltı katsayısı:  $\varepsilon = 0.25$



Şekil 5.16. Uygulama 4 için kabul edilen geometri ve sınır koşulları

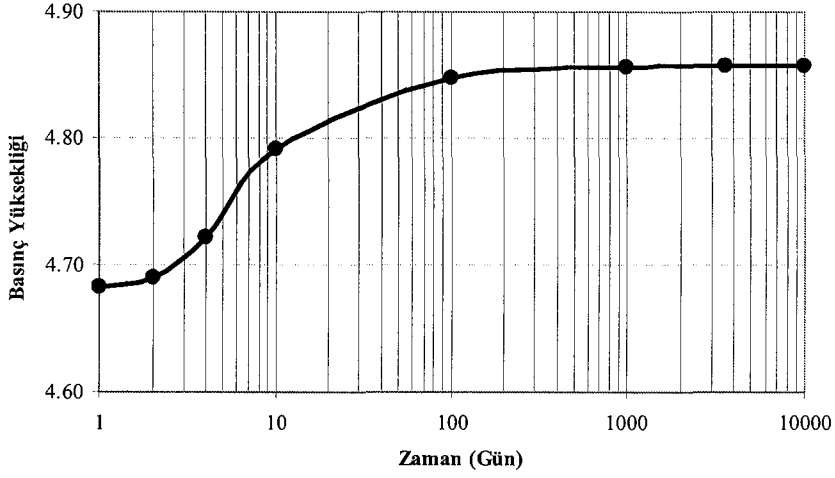
Şekil 5.16'da gösterilen kesitin ETP'de modellenmiş hali Şekil 5.17'de görülmektedir. Burada da görüldüğü gibi, serbest su yüzeyinin bulunmasında meydana gelebilecek hataları önlemek amacıyla gerçek geometrinin üzerine iki adet satır ilave edilmiştir.

Bu uygulamanın çözülebilmesi için de, denklem (3.27) ve (3.28)'in ilgili hücrelere yazılması gerekmektedir. Bu uygulama için denklem (3.27) ve (3.28)'in ETP formatında yazılmış hali EK-5 içerisinde sırasıyla denklem (EK-5.1) ve (EK-5.2) olarak verilmiştir. Daha önceki uygulamalarda olduğu gibi, başlangıç basınç yüksekliği değerleri, iç hücreler için  $p = 0.00 \text{ m}$ , geçirimsiz alt tabaka için  $p = 0.15 \text{ m}$  girildikten sonra ilgili hücrelerin kopyalanıp çözüm bölgesine yapıştırılmasıyla iteratif hesaplama başlar. Hesaplama sonucu elde edilen basınç yükseklikleri EK-5 içerisinde Şekil EK-5.1'de verilmiştir (3600 gün için).



Şekil 5.17. Uygulama 4'ün ETP'de modellenmiş hali

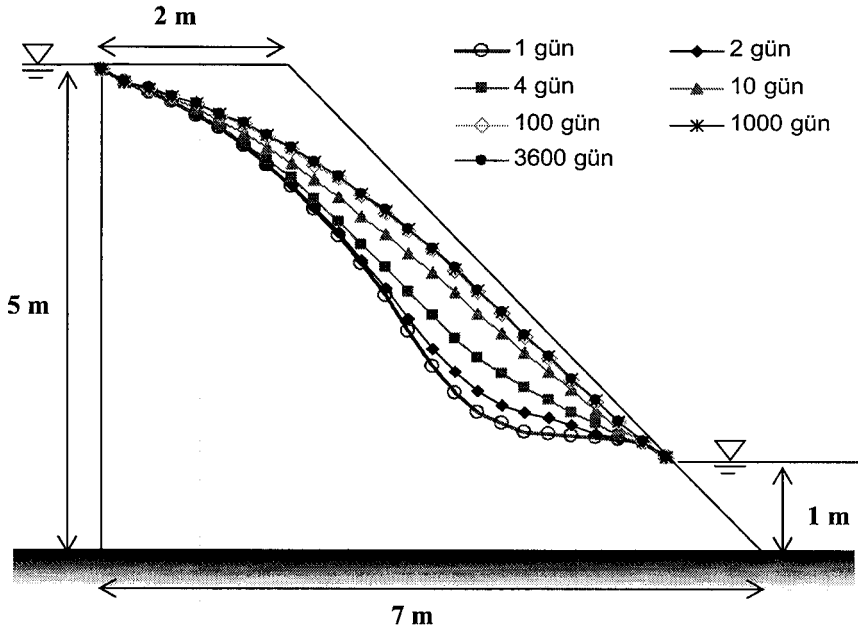
Geçirimsiz alt tabakadaki D25 hücresine ait basınç yüksekliğinin, farklı zamanlar için değerleri Şekil 5.18’de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi 1000 günden sonraki çözümler için, sistem karalı durum özelliği göstermektedir.



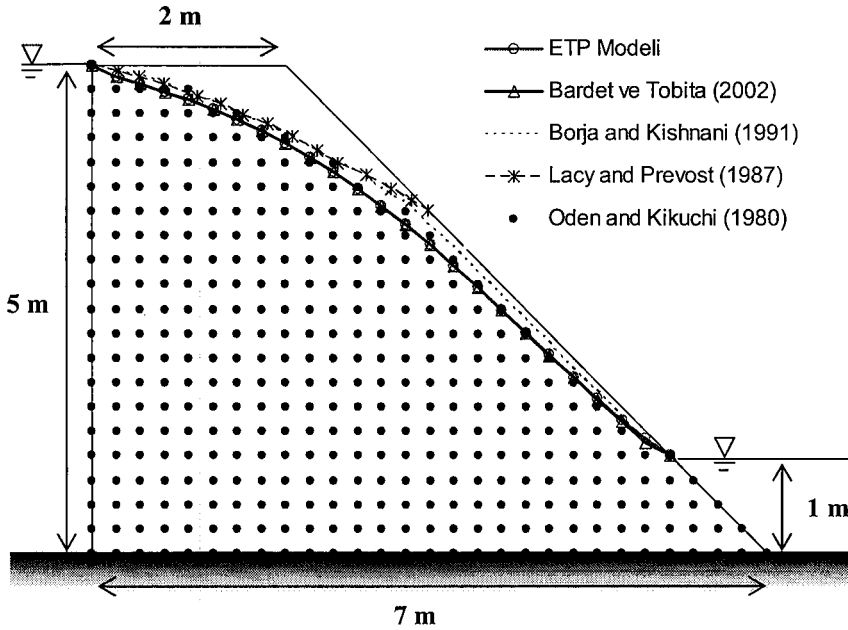
Şekil 5.18. D25 hücresi için basınç yüksekliğinin zamana bağlı değişimi

Şekil EK-5.2’de, serbest su yüzeyinin bulunması için yazılan makronun ETP’de modellenmiş hali görülmektedir. Bu makro yardımıyla farklı zamanlar için elde edilen serbest su yüzeyleri Şekil 5.19’da gösterilmiştir. Görüldüğü gibi burada da zaman ilerledikçe, sistem kararlı bir hale gelmektedir.

Şekil 5.20’de ise, geliştirilen modelin 3600 gün için çözülmesi ile elde edilen su yüzeyi görülmektedir. Buradan da görüleceği gibi, geliştirilen modelin sonuçları ile diğer araştırmacıların sonuçları iyi uyum içerisindedir.



Şekil 5.19. Uygulama 4 için farklı zamanlarda serbest su yüzeyinin durumu



Şekil 5.20. Uygulama 4 için serbest su yüzeylerinin karşılaştırılması

## 5.6. Uygulama 5

Bu uygulamada, yine dikdörtgen kesitte ancak değişken permeabilite dağılımına (yatayda) sahip bir baraj kesiti ele alınmıştır. Kabul edilen geometri ve sınır koşulları Şekil 5.21’de gösterilmiştir. Ayrıca bu uygulamaya ait değişken değerleri aşağıda verilmiştir.

Baraj boyutları:  $5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  (dikdörtgen kesit)

Grid aralığı:  $\Delta x = \Delta y = 0.25 \text{ m}$

Özgül depolama katsayısı:  $S_s = 0.01 \text{ m}^{-1}$  (tüm hücrelerde sabit)

Permeabilite:  $K_1 = 0.0000002 \text{ m/gün}$  (1. bölgedeki tüm hücrelerde sabit)

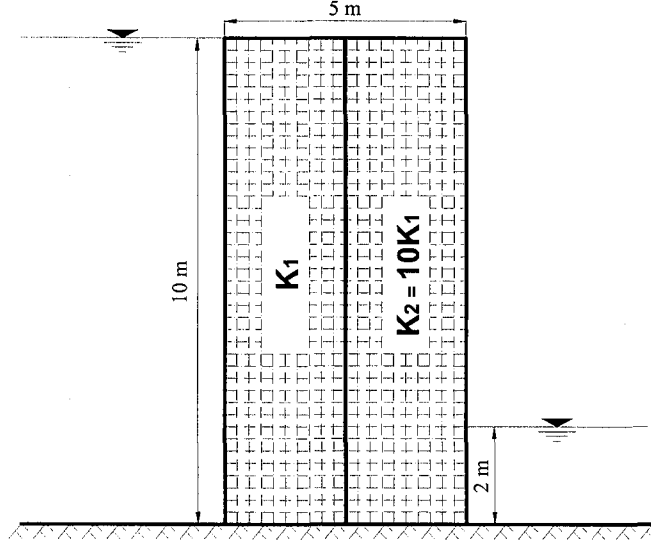
$K_2 = 0.000002 \text{ m/gün}$  (2. bölgedeki tüm hücrelerde sabit)

Zaman:  $m.\Delta t = 3600 \text{ gün}$

Yumuşatma katsayısı:  $w = 1.2$

Penaltı katsayısı:  $\varepsilon = 0.375$

Bardet ve Tobita (2002), Borja ve Kishnani (1991), Lacy ve Prevost (1987), Oden ve Kikuchi (1980) bu uygulamayı çözerken, ilgili denklemleri sadece yatayda permeabilite değişimini göz önünde bulundurarak çıkarmışlardır. Oysa ki geliştirilen ETP modelinde, permeabilite dağılımı yatay ile beraber düşeyde de değişken kabul edilebilmektedir. Belirtilen bu koşul için Şekil 5.21’de verilen kesitin ETP’de modellenmiş hali Şekil 5.22’de verilmiştir. Ayrıca, EK-6 içerisinde Şekil EK-6.1’de kabul edilen permeabilite dağılımının “Permeabilite” sayfasına yazılmış hali görülmektedir.



Şekil 5.21. Uygulama 5 için kabul edilen geometri ve sınır koşulları

Diğer uygulamalar ile benzer şekilde Denklem (3.27) ve (3.28)'in ilgili hücrelere yazılıp çözüm bölgesine kopyalanmasıyla iteratif hesaplama süreci başlamaktadır. Denklem (3.27) ve (3.28)'in bu uygulama için ETP formatında yazılmış hali EK-6 içerisinde Denklem (EK-6.1) ve (EK-6.2) olarak verilmiştir. Bu uygulamada da başlangıç basınç yüksekliği değeri iç hücreler için  $p=0.00 m$ , geçirimsiz alt tabaka için  $p=0.15 m$  alınmıştır.

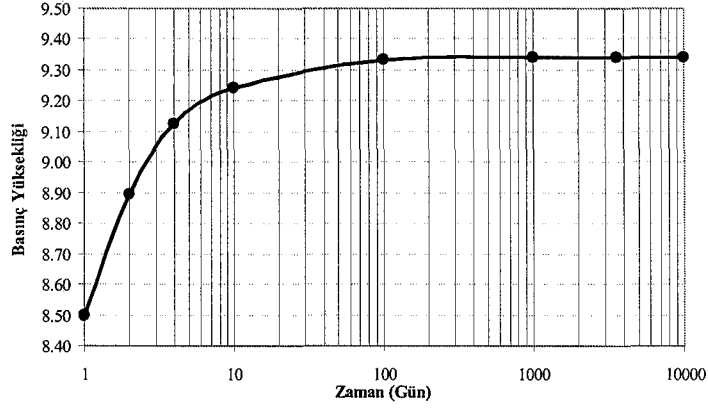
Bu uygulamada, çözüm uzayının kısıtlama miktarını belirleyen penalti katsayısına ( $\varepsilon$ ) ilk olarak 0.25 değeri verilerek çözüm yapılmıştır. Ancak, çözüm bölgesinde permeabilite açısından bir süreksizlik olduğundan dolayı,  $\varepsilon=0.375$  verilerek elde edilen çözüm,  $\varepsilon=0.25$  verilerek elde edilen çözümden daha iyi sonuç vermiştir.  $\varepsilon=0.375$  verilerek elde edilen basınç yükseklikleri EK-6 içerisinde Şekil EK-6.2'de verilmiştir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
1																												
2		$\Delta z \backslash \Delta x$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25			
3		0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
4		0.25	0.00	0.01																								
5		0.25	0.00																									
6		0.25	0.25																									
7		0.25	0.50																									
8		0.25	0.75																									
9		0.25	1.00																									
10		0.25	1.25																									
11		0.25	1.50																									
12		0.25	1.75																									
13		0.25	2.00																									
14		0.25	2.25																									
15		0.25	2.50																									
16		0.25	2.75																									
17		0.25	3.00																									
18		0.25	3.25																									
19		0.25	3.50																									
20		0.25	3.75																									
21		0.25	4.00																									
22		0.25	4.25																									
23		0.25	4.50																									
24		0.25	4.75																									
25		0.25	5.00																									
26		0.25	5.25																									
27		0.25	5.50																									
28		0.25	5.75																									
29		0.25	6.00																									
30		0.25	6.25																									
31		0.25	6.50																									
32		0.25	6.75																									
33		0.25	7.00																									
34		0.25	7.25																									
35		0.25	7.50																									
36		0.25	7.75																									
37		0.25	8.00																									
38		0.25	8.25																									
39		0.25	8.50																									
40		0.25	8.75																									
41		0.25	9.00																									
42		0.25	9.25																									
43		0.25	9.50																									
44		0.25	9.75																									
45		0.25	10.00	0.34																								

w =	1.2
e =	0.375
dt =	1
m =	3600
ct =	3600
e0 =	0.14

Şekil 5.22. Uygulama 5'in ETP'de modellenmiş hali

Geliştirilen model ile bu uygulama da farklı zamanlar için çözülmüştür. Geçirimsiz alt tabaka üzerindeki D45 hücresinin farklı zamanlar için basınç yüksekliğinin değişimi Şekil 5.23'te görülmektedir.

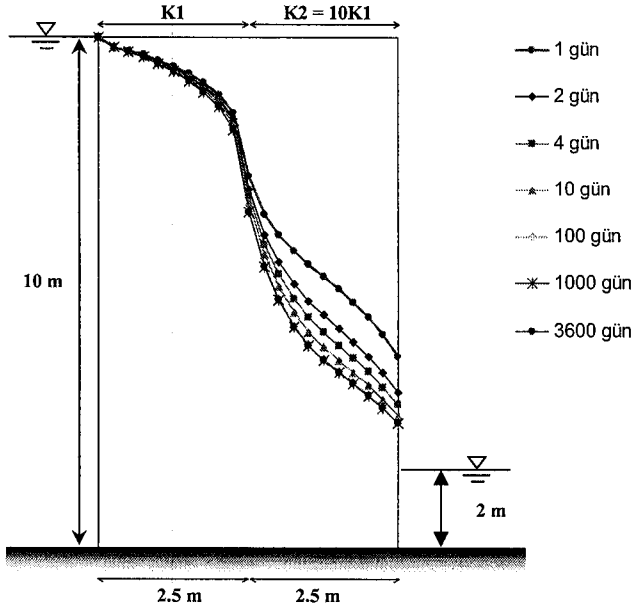


Şekil 5.23. D45 hücresi için basınç yüksekliğinin zamana bağlı değişimi

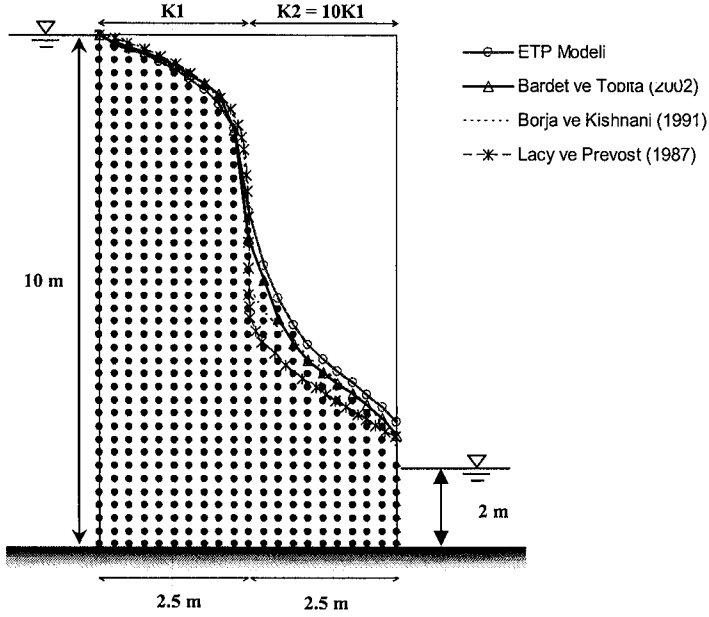
Şekil 5.23'te görüldüğü gibi basınç yüksekliği değeri 1000 günden sonra kararlı hale gelmektedir.

Bu aşamadan sonra, Çizelge EK-1.2'de verilen makro ile serbest su yüzeyleri hesaplanmıştır. EK-6 içerisindeki Şekil EK-6.3'de belirtilen makronun 3600 gün için ETP'de modellenmiş hali görülmektedir. Bu makro kullanılarak farklı zamanlar için serbest su yüzeyinin değişimi Şekil 5.24'te verilmiştir. Zaman ilerledikçe sistemin kararlı duruma ulaştığı bu şekilde de görülmektedir. Şekil 5.25'te ise 3600 gün için elde edilen çözümün diğer araştırmacıların çözümleri ile karşılaştırılması görülmektedir. Elde edilen çözümün, diğer çözümlerle iyi uyum içinde olduğu burada da görülmektedir.





Şekil 5.24. Uygulama 5 için farklı zamanlarda serbest su yüzeyinin durumu



Şekil 5.25. Uygulama 5 için serbest su yüzeylerinin karşılaştırılması

## 6. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

### 6.1. Tartışma

Geliştirilen ETP modelinin ana avantajı, serbest yüzeyli sızma analizi problemlerine kolaylıkla uygulanabilmesidir. Pratik açıdan bakıldığında, çıkarılan tüm denklemler ve çözüm algoritması, serbest su yüzeyinin bulunmasında kullanılan ve ağır matematiksel ifadeler içeren diğer sayısal tekniklere göre oldukça kolay bir şekilde elde edilebilmektedir. Geliştirilen ETP modeli ile, kararlı durum için serbest yüzeyli sızma analizi problemleri kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Ancak, zamana bağlı çözümler için, kısa zaman adımlarında yakınsak değerlerin elde edilmesi için gereken iterasyon sayısının fazla olmasından dolayı işlem süresi uzun olmaktadır.

Geliştirilen ETP modeli, ETP'nin maksimum hesaplama kapasitesinin aşılabileceğinden dolayı çok büyük sistemlere uyarlanamamaktadır. Ayrıca sonlu fark grid yapısı sadece dikdörtgen yada üçgen olabileceği için düzensiz geometrideki bir çözüm bölgesinin ETP'de modellenmesi esnasında sınır bölgelerinde gerçek geometriye uyulamadığından problem yaşanmaktadır. Bu problemin önüne geçmek için sınır bölgeleri civarında sayısal hataları azaltmak için grid aralıkları küçültülmelidir. Grid aralıklarının gelişigüzel küçültülmesi de sayısal çözüm yöntemlerinde stabilite bozukluklarına neden olabilmekte ve ETP'nin maksimum hesaplama kapasitesi aşılabilmektedir. Bu nedenle bu tip durumlarda diğer çözüm yöntemlerinin kullanılması daha uygun olmaktadır.

## 6.2. Sonuçlar

Bu çalışmada, serbest yüzeyli zamana bağlı sızma analizi problemi sonlu farklar metodu kullanılarak elektronik tablolama programı yardımıyla incelenmiştir. Geliştirilen özm yönteminde sonlu fark denklemleri, serbest yüzeyli sızma problemlerinde ıslak ve kuru bölgeler arasındaki varyasyonel eşişsizlikleri ortadan kaldıran genişletilmiş basınç (*extended pressure*) yöntemi ile düzenlenmiştir. Geliştirilen özm yöntemini doğrulamak amacıyla, Bardet ve Tobita (2002), Borja ve Kishnani (1991), Lacy ve Prevost (1987), Oden ve Kikuchi (1980) tarafından ele alınan beş adet örnek zlmştir. Bu araştırmacılar tarafından çıkarılan denklemlerde, kararlı durum (*steady-state*), homojen zemin özellikleri ve grid aralıklarının sabit olması gibi kabuller yapılırken geliştirilen bu yöntemde ise zamana bağlı (*time-dependent*), homojen olmayan zemin özelliklerine uygun ve değişken grid aralıklarını dikkate alacak Şekilde denklemler çıkarılmıştır. Bu sayede baraj bünyesinden sızan suyun zaman içerisindeki davranışı kolaylıkla belirlenebilmektedir.

Geliştirilen yöntemin en önemli avantajlarından biri de, lineer olmayan terimler içeren denklem sistemlerini zmek için yoğun matris işlemleri ile uğraşmaya gerek kalmamasıdır. Böylece, sadece teorik açıdan ele alınan sızma problemleri zlmekle kalmayıp pratikte karşılaşılabilecek birçok sızma problemi de zlebilmektedir.

## KAYNAKLAR

BAKKER, M., *Simulating groundwater flow in multi-aquifer systems with analytical and numerical Dupuit-Models*, Journal of Hydro., **222(1-4)**, 55-64 (1999).

BARDET, J. P., *Experimental soil mechanics*, Upper Saddle River (NJ), Prentice-Hall, USA (1997).

BARDET, J.P. ve TOBITA, T., *A practical method for solving free-surface seepage problems*, Computers and Geotechnics, **29**, 45-475 (2002).

BORJA, R. I. ve KISHNANI, S. S., *On the Solution of elliptic free-boundary problems via Newton's method*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, **88**, 341-361 (1991).

BREZIS, H., KINDERLEHRER, D. ve STAMPACCHIA, G., *Sur une nouvelle formulation du probleme de l'ecoulement a travers une digue*, Serie A., Paris C, R. Academie des Sciences (1978).

CHAKIB, A., GHEMIRE, T. ve NACHAOUI, A., *A numerical study of filtration problem in inhomogeneous dam with discontinuous permeability*, Appl. Num. Math., **45**, 123-138 (2003).

ELDHO, T.I. ve RAO, B.V., *Simulation of two-dimensional contaminant transport with dual reciprocity boundary elements*. Eng. Anal. with Bound. Elem., **20**, 213-228 (1997).

FRANCE, P.W., *Finite element analysis of three-dimensional groundwater flow problems*, Journal of Hydro., **21**, 381-398 (1974).

GRUPTA, S.K., COLE, C.R. ve PINDER, G.F., *A finite element three-dimensional groundwater (FE3DGW) model for a multiaquifer system*, Water Resour. Res., **20(5)**, 553-563 (1984).

GVIRTZMAN, Z. ve GARFUNKEL, Z., *Numerical solutions for one-dimensional heat-conduction equation using a spreadsheet*,. Computers and Geosciences, **22(10)**, 1147-1158 (1996).

HAGLER, M., *Spreadsheet solution of partial differential equations*, I.E.E.E. Trans. Educ., **E-30**, 130-134 (1987).

HARROUNI, K.E., OUAZAR, D., WROBEL, L.C. ve CHENG, A.H-D., *Aquifer parameter estimation by extended Kalman filtering and boundary elements*, Eng. Anal. with Bound. Elem., **19**, 231-237 (1997).

HARROUNI, K.E., OUAZAR, D., WROBEL, L.C. ve CHENG, A.H-D., *Groundwater parameter estimation by optimization and DRBEM*, Eng. Anal. with Bound. Elem., **19**, 97-103 (1997).

HARROUNI, K.E., OUAZAR, D., WROBEL, L.C. ve CHENG, A.H-D., *Uncertainty analysis of groundwater flow with DRBEM*, Eng. Anal. with Bound. Elem., **19**, 217-221 (1997).

HE, J.H., *Approximate analytical solution for seepage flow with fractional derivatives in porous media*, Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., **167**, 57-68 (1998).

http-1: Seep3D user's guide, <http://www.geo-slope.com/pub/manuals/Seep3D.pdf>

LACY, S. J. ve PREVOST J. H., *Flow through porous media: a procedure for locating the free surface*, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, **11**, 585-601 (1980).

LEONTIEV, A. ve HUACASI, W., *Mathematical programming approach for unconfined seepage flow problem*, Eng. Anal. with Bound. Elem., **25**, 49-56 (2001).

LI, G., GE, J. ve JIE, Y., *Free surface seepage analysis based on the element-free method*, Mech. Res. Communications, **30**, 9-19 (2003).

LI, H. ve YANG, Q.A., *Least-squares penalty method algorithm for inverse problems of steady-state aquifer models*, Adv. in Water Resour., **23(8)**, 867-880 (2000).

MAZZIA, A. ve PUTTI, M., *Mixed-finite element and finite volume discretization for heavy brine simulations in groundwater*. Journal of Comp. and Appl. Math., **147(1)**, 191-213 (2002).

McDONALD, M.G. ve HARBOUGH, A.W., *A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model*, U. S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, Book 6 (Chapter A1), 586 (1988).

NABA, B., BOUFADEL, M.C. ve WEAVER, J., *The role of capillary forces in steady-state and transient seepage flows*, Groundwater, **40(4)**, 407-415 (2002).

ODEN, J. T. ve KIKUCHI, N., *Recent advances: theory of variational inequalities with applications to problems of flow through porous media*. International Journal of Engineering Science, **18**, 1173–1284 (1980).

PARK, Y.-C., *Modeling of groundwater flow and transport by the element-free Galerkin (EFG) method*, Ph.D. Thesis, Purdue University, Graduate School, IN, USA (2000).

PENTLAND, J.S., GITIRANA, G.F.N. ve FREDLUND, D.G., *Use of a general partial differential equation solver for solutions of mass and heat transfer problems in geotechnical engineering*, 4th Brazilian Symposium on Unsaturated Soils (Ed: PALLOTI-GRAFICA), SANTA MARIA, BRASIL, **1**, 29-45 (2001).

SAULYEV, F.K., *Integration of equations of parabolic type by the method of nets*, Macmillan Company, 1964.

SHARIF, N.H. ve WILBERG, N.-E., *Adaptive ICT procedure for non-linear seepage flows with free surface in porous media*, Communications in Numerical Meth. in Eng., **18**, 161-176 (2002).

TRESCOTT, P.C. ve LARSON, S.P., *Solution of three-dimensional groundwater flow equations using the strongly implicit procedure*, Journal of Hydrol., **35**, 49-60 (1977).

WANG, P.P. ve CHUNMAIO, Z., *An efficient approach for successively perturbed groundwater models*, Advances in Water Resorces, **21(6)**, 499-508 (1998).

XU, Y.-Q., UNAMI, K. ve KAWACHI, T., *Optimal hydraulic design of earth dam cross-section using saturated-unsaturated seepage flow model*, Adv. in Water Resour., **26**, 1-7 (2003).

YILMAZ, H., *Elektrik tablolama yöntemi ile yeraltı su akımının incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye (1999).

ZHANG, J., XU, Q. ve CHEN, Z., *Seepage analysis based on the unified unsaturated soil theory*, Mech. Research Communications, **28(1)**, 107-112 (2001).

## EKLER

### EK-1 Visual Basic Editörde yazılan makrolara ait kodlamalar

Çizelge EK-1.1. Genişletilmiş basınç yöntemi terimlerini hesaplamak için yazılan Makro

---

Function H(u As Single, eps As Single) As Single

    If u > eps Then

        H=1#

    Else

        H=u / eps

    End If

End Function

---

“eps =  $\epsilon$ ”



Function InterL(e0 As Single, X As Variant, Z As Variant) As Single

Dim i As Integer, X1, X2

i = 0

X2 = X(1)

For Each X1 In X

i = i + 1

If Y = X1 And e0 = X2 Then

InterL = Z(i)

Exit Function

ElseIf (e0 - X1) \* (e0 - X2) <= 0 And X1 <> X2 Then

InterL = Z(i - 1) + (Z(i) - Z(i - 1)) / (X1 - X2) \* (e0 - X2)

Exit Function

End If

X2 = X1

Next

End Function

---

“ $e_0 = p_w = \varepsilon / e$ ”

## EK-2 Uygulama 1'e ait ETP denklemleri ve çıktıları

Denklem (EK-2.1): Denklem (3.27)'nin ETP formatında yazılmış hali.

$$\begin{aligned}
 D4 = & (1-w)*D4+w*(((Ozg\_Depolama!D4*D4/(4*AB\$9)))+((Permeabilite!C4*C\$2 \\
 & +Permeabilite!D4*D\$2)/(Cozum!C\$2+D\$2)^3)*C4)+(((Permeabilite!D4*D\$2 \\
 & +Permeabilite!E4*E\$2)/(D\$2+E\$2)^3)*E4)+(((Permeabilite!D3*\$B3+Permeabilite!D4 \\
 & *\$B4)/(\$B3+\$B4)^3)*D3)+((Permeabilite!D4*\$B4+Permeabilite!D5*\$B5)/(\$B4+\$B5)^3) \\
 & *D5+((((Permeabilite!D3*\$B3+Permeabilite!D4*\$B4)/(\$B3+\$B4)) \\
 & *H((Cozum!D3+Cozum!D4)/2;eps)-((Permeabilite!D4*\$B4+Permeabilite!D5 \\
 & *\$B5)/(\$B4+\$B5))*H((Cozum!D4+Cozum!D5)/2;eps)))/(((Permeabilite!C4 \\
 & *Cozum!C\$2+Permeabilite!D4*Cozum!D\$2)/(Cozum!C\$2+Cozum!D\$2)^3) \\
 & +((Permeabilite!D4*Cozum!D\$2+Permeabilite!E4*Cozum!E\$2)/(Cozum!D\$2 \\
 & +Cozum!E\$2)^3)+((Permeabilite!D3*Cozum!\$B3+Permeabilite!D4 \\
 & *Cozum!\$B4)/(Cozum!\$B3+Cozum!\$B4)^3)+((Permeabilite!D4 \\
 & *Cozum!\$B4+Permeabilite!D5*Cozum!\$B5)/(Cozum!\$B4+Cozum!\$B5)^3) \\
 & +(Ozg\_Depolama!D4/(4*AB\$9))))
 \end{aligned} \tag{EK-2.1}$$

Denklem (EK-2.2): Denklem (3.28)'in ETP formatında yazılmış hali.

$$\begin{aligned}
 D46 = & (1-w)*D46+w*(((Ozg\_Depolama!D46/(4*Cozum!AB\$9))*D46+((Permeabilite!C46 \\
 & *Cozum!C\$2+Permeabilite!D46*Cozum!D\$2)/(Cozum!C\$2+Cozum!D\$2)^3)*Cozum!C46 \\
 & +((Permeabilite!D46*Cozum!D\$2+Permeabilite!E46*Cozum!E\$2)/(Cozum!D\$2 \\
 & +Cozum!E\$2)^3)*Cozum!E46+((Permeabilite!D45*Cozum!\$B45+Permeabilite!D46 \\
 & *\$B46)/(Cozum!\$B45+Cozum!\$B46)^3)*Cozum!D45+((Permeabilite!D45*\$B45 \\
 & +Permeabilite!D46*\$B46)/(\$B45+\$B46))*H((Cozum!D45+Cozum!D46)/2;eps)) \\
 & /((Ozg\_Depolama!D46/(4*Cozum!AB\$9))+((Permeabilite!C46*Cozum!C\$2 \\
 & +Permeabilite!D46*Cozum!D\$2)/(Cozum!C\$2+Cozum!D\$2)^3)+((Permeabilite!D46 \\
 & *Cozum!D\$2+Permeabilite!E46*Cozum!E\$2)/(Cozum!D\$2+Cozum!E\$2)^3) \\
 & +((Permeabilite!D45*Cozum!\$B45+Permeabilite!D46*Cozum!\$B46)/(Cozum!\$B45 \\
 & +Cozum!\$B46)^3)))
 \end{aligned} \tag{EK-2.2}$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
1																												
2	$\Delta z/\Delta x$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
3	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.25	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.25	0.00	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.25	0.25	0.16	0.11	0.08	0.05	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.25	0.50	0.40	0.31	0.22	0.14	0.10	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.25	0.75	0.65	0.55	0.45	0.35	0.25	0.16	0.10	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.25	1.00	0.89	0.79	0.68	0.57	0.46	0.36	0.25	0.15	0.10	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.25	1.25	1.14	1.02	0.91	0.79	0.68	0.56	0.45	0.34	0.22	0.13	0.08	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.25	1.50	1.38	1.26	1.14	1.01	0.89	0.77	0.65	0.53	0.41	0.29	0.17	0.11	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.25	1.75	1.62	1.49	1.36	1.23	1.11	0.98	0.85	0.72	0.59	0.47	0.34	0.22	0.13	0.08	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.25	2.00	1.86	1.73	1.59	1.46	1.32	1.18	1.05	0.91	0.78	0.65	0.52	0.39	0.26	0.15	0.09	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.25	2.25	2.11	1.96	1.82	1.68	1.53	1.39	1.25	1.11	0.97	0.83	0.69	0.55	0.42	0.28	0.17	0.10	0.06	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.25	2.50	2.35	2.20	2.05	1.90	1.75	1.60	1.45	1.30	1.15	1.00	0.86	0.72	0.57	0.44	0.30	0.18	0.10	0.06	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.25	2.75	2.59	2.43	2.27	2.12	1.96	1.80	1.65	1.49	1.33	1.18	1.03	0.88	0.73	0.58	0.44	0.30	0.18	0.10	0.06	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.25	3.00	2.83	2.67	2.50	2.34	2.17	2.01	1.84	1.68	1.52	1.36	1.20	1.04	0.88	0.73	0.58	0.43	0.29	0.17	0.10	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.25	3.25	3.08	2.90	2.73	2.56	2.38	2.21	2.04	1.87	1.70	1.53	1.36	1.20	1.03	0.87	0.71	0.56	0.41	0.27	0.15	0.08	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.25	3.50	3.32	3.14	2.96	2.77	2.59	2.41	2.23	2.06	1.88	1.70	1.52	1.35	1.18	1.01	0.84	0.68	0.52	0.37	0.22	0.12	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.25	3.75	3.56	3.37	3.18	2.99	2.81	2.62	2.43	2.24	2.06	1.87	1.69	1.50	1.32	1.14	0.97	0.80	0.63	0.47	0.31	0.17	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.25	4.00	3.80	3.61	3.41	3.21	3.02	2.82	2.62	2.43	2.23	2.04	1.85	1.65	1.46	1.28	1.09	0.91	0.73	0.56	0.39	0.22	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.25	4.25	4.05	3.84	3.64	3.43	3.23	3.02	2.82	2.61	2.41	2.21	2.01	1.80	1.60	1.41	1.21	1.02	0.83	0.64	0.46	0.29	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0.25	4.50	4.29	4.07	3.86	3.65	3.44	3.22	3.01	2.80	2.59	2.37	2.16	1.95	1.74	1.53	1.33	1.12	0.92	0.72	0.53	0.34	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0.25	4.75	4.53	4.31	4.09	3.87	3.65	3.43	3.20	2.98	2.76	2.54	2.32	2.10	1.88	1.66	1.44	1.23	1.01	0.80	0.59	0.38	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	0.25	5.00	4.77	4.54	4.31	4.09	3.86	3.63	3.40	3.17	2.94	2.71	2.48	2.25	2.02	1.79	1.56	1.33	1.10	0.87	0.65	0.42	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27	0.25	5.25	5.01	4.78	4.54	4.30	4.07	3.83	3.59	3.35	3.11	2.87	2.63	2.39	2.15	1.91	1.67	1.43	1.18	0.94	0.70	0.46	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28	0.25	5.50	5.26	5.01	4.77	4.52	4.28	4.03	3.79	3.54	3.29	3.04	2.79	2.54	2.29	2.03	1.78	1.53	1.27	1.01	0.76	0.50	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29	0.25	5.75	5.50	5.25	5.00	4.74	4.49	4.24	3.98	3.73	3.47	3.21	2.95	2.69	2.43	2.16	1.89	1.63	1.36	1.09	0.81	0.54	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.25	6.00	5.74	5.48	5.22	4.96	4.70	4.44	4.18	3.91	3.65	3.38	3.11	2.84	2.57	2.29	2.01	1.73	1.44	1.16	0.87	0.58	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
31	0.25	6.25	5.98	5.72	5.45	5.18	4.92	4.65	4.38	4.10	3.83	3.55	3.27	2.99	2.71	2.42	2.13	1.83	1.53	1.23	0.93	0.62	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
32	0.25	6.50	6.23	5.95	5.68	5.41	5.13	4.85	4.58	4.30	4.01	3.73	3.44	3.15	2.85	2.55	2.25	1.94	1.63	1.31	0.99	0.66	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
33	0.25	6.75	6.47	6.19	5.91	5.63	5.35	5.06	4.78	4.49	4.20	3.91	3.61	3.31	3.00	2.69	2.38	2.05	1.73	1.39	1.05	0.71	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
34	0.25	7.00	6.71	6.43	6.14	5.85	5.57	5.27	4.98	4.69	4.39	4.09	3.78	3.47	3.16	2.84	2.51	2.17	1.83	1.48	1.12	0.75	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35	0.25	7.25	6.96	6.67	6.37	6.08	5.79	5.49	5.19	4.89	4.58	4.27	3.96	3.64	3.32	2.99	2.65	2.30	1.95	1.58	1.20	0.81	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36	0.25	7.50	7.20	6.91	6.61	6.31	6.01	5.70	5.40	5.09	4.78	4.46	4.14	3.82	3.48	3.14	2.80	2.44	2.07	1.69	1.29	0.88	0.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37	0.25	7.75	7.45	7.15	6.84	6.54	6.23	5.92	5.61	5.30	4.98	4.66	4.33	4.00	3.66	3.31	2.95	2.59	2.21	1.81	1.40	0.97	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
38	0.25	8.00	7.69	7.39	7.08	6.77	6.46	6.14	5.83	5.51	5.19	4.86	4.52	4.19	3.84	3.49	3.12	2.75	2.36	1.96	1.53	1.08	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
39	0.25	8.25	7.94	7.63	7.32	7.00	6.69	6.37	6.05	5.72	5.40	5.06	4.73	4.38	4.03	3.67	3.30	2.92	2.53	2.12	1.70	1.25	0.76	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
40	0.25	8.50	8.19	7.87	7.55	7.24	6.92	6.60	6.27	5.94	5.61	5.27	4.93	4.58	4.23	3.86	3.49	3.11	2.71	2.30	1.88	1.44	0.98	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
41	0.25	8.75	8.43	8.11	7.80	7.47	7.15	6.83	6.50	6.17	5.83	5.49	5.15	4.79	4.43	4.07	3.69	3.31	2.91	2.50	2.08	1.65	1.20	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00
42	0.25	9.00	8.68	8.36	8.04	7.71	7.39	7.06	6.73	6.40	6.06	5.71	5.37	5.01	4.65	4.28</												

D52		=InterL(e0;D5:D46;\$C\$5:\$C\$46)																					
	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
51																							
52	0.00	0.12	0.20	0.28	0.36	0.48	0.58	0.71	0.83	0.98	1.11	1.28	1.44	1.61	1.90	2.01	2.22	2.44	2.69	2.98	3.32	3.92	8.09
53	10.00	9.88	9.80	9.72	9.64	9.52	9.42	9.29	9.17	9.02	8.89	8.72	8.56	8.39	8.20	7.99	7.78	7.56	7.31	7.02	6.68	6.08	1.91
54	Ozo Depolama / Permeabilite / Cozum																						

Şekil EK-2.2. ETP üzerinde serbest su yüzeyinin bulunması

### EK-3 Uygulama 2'ye ait ETP denklemleri ve çıktıları

Denklem (EK-3.1): Denklem (3.27)'nin ETP formatında yazılmış hali.

$$\begin{aligned}
 D4 = & (1-w)*D4+w*(((Ozg\_Depolama!D4*D4/(4*AB\$9)))+(((Permeabilite!C4*C\$2 \\
 & +Permeabilite!D4*D\$2)/(Cozum!C\$2+D\$2)^3)*C4)+(((Permeabilite!D4*D\$2 \\
 & +Permeabilite!E4*E\$2)/(D\$2+E\$2)^3)*E4)+(((Permeabilite!D3*\$B3+Permeabilite!D4 \\
 & *\$B4)/(\$B3+\$B4)^3)*D3)+((Permeabilite!D4*\$B4+Permeabilite!D5*\$B5)/(\$B4+\$B5)^3) \\
 & *D5+((((Permeabilite!D3*\$B3+Permeabilite!D4*\$B4)/(\$B3+\$B4)) \\
 & *H((Cozum!D3+Cozum!D4)/2;eps)-((Permeabilite!D4*\$B4+Permeabilite!D5 \\
 & *\$B5)/(\$B4+\$B5))*H((Cozum!D4+Cozum!D5)/2;eps)))/(((Permeabilite!C4 \\
 & *Cozum!C\$2+Permeabilite!D4*Cozum!D\$2)/(Cozum!C\$2+Cozum!D\$2)^3) \\
 & +((Permeabilite!D4*Cozum!D\$2+Permeabilite!E4*Cozum!E\$2)/(Cozum!D\$2 \\
 & +Cozum!E\$2)^3)+((Permeabilite!D3*Cozum!\$B3+Permeabilite!D4 \\
 & *Cozum!\$B4)/(Cozum!\$B3+Cozum!\$B4)^3)+((Permeabilite!D4 \\
 & *Cozum!\$B4+Permeabilite!D5*Cozum!\$B5)/(Cozum!\$B4+Cozum!\$B5)^3) \\
 & +(Ozg\_Depolama!D4/(4*AB\$9))))
 \end{aligned} \tag{EK-3.1}$$

Denklem (EK-3.2): Denklem (3.28)'in ETP formatında yazılmış hali.

$$\begin{aligned}
 D26 = & (1-w)*D26+w*(((Ozg\_Depolama!D26/(4*ct))*D26+((Permeabilite!C26*Cozum!C\$2 \\
 & +Permeabilite!D26*Cozum!D\$2)/(Cozum!C\$2+Cozum!D\$2)^3)*Cozum!C26 \\
 & +((Permeabilite!D26*Cozum!D\$2+Permeabilite!E26*Cozum!E\$2)/(Cozum!D\$2 \\
 & +Cozum!E\$2)^3)*Cozum!E26+((Permeabilite!D25*Cozum!\$B25+Permeabilite!D26 \\
 & *Cozum!\$B26)/(Cozum!\$B25+Cozum!\$B26)^3)*Cozum!D25+((Permeabilite!D25*\$B25 \\
 & +Permeabilite!D26*\$B26)/(\$B25+\$B26))*H((Cozum!D25+Cozum!D26)/2;eps)) \\
 & /((Ozg\_Depolama!D26/(4*ct))+((Permeabilite!C26*Cozum!C\$2+Permeabilite!D26 \\
 & *Cozum!D\$2)/(Cozum!C\$2+Cozum!D\$2)^3)+((Permeabilite!D26*Cozum!D\$2 \\
 & +Permeabilite!E26*Cozum!E\$2)/(Cozum!D\$2+Cozum!E\$2)^3)+((Permeabilite!D25 \\
 & *Cozum!\$B25+Permeabilite!D26*Cozum!\$B26)/(Cozum!\$B25+Cozum!\$B26)^3)))
 \end{aligned} \tag{EK-3.2}$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	
1																																
2	$\Delta z/\Delta x$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	
3	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
4	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
5	0.25	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
6	0.25	0.00	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
7	0.25	0.25	0.16	0.10	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
8	0.25	0.50	0.40	0.30	0.20	0.13	0.08	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
9	0.25	0.75	0.64	0.53	0.42	0.31	0.21	0.13	0.08	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
10	0.25	1.00	0.88	0.76	0.65	0.53	0.41	0.29	0.18	0.11	0.07	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
11	0.25	1.25	1.12	0.99	0.87	0.74	0.61	0.49	0.36	0.24	0.14	0.08	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
12	0.25	1.50	1.36	1.23	1.09	0.95	0.82	0.68	0.55	0.41	0.28	0.17	0.10	0.06	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
13	0.25	1.75	1.60	1.46	1.31	1.16	1.02	0.87	0.73	0.59	0.45	0.32	0.19	0.11	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
14	0.25	2.00	1.84	1.69	1.53	1.37	1.22	1.06	0.91	0.76	0.61	0.47	0.33	0.20	0.11	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
15	0.25	2.25	2.08	1.92	1.75	1.58	1.42	1.25	1.09	0.93	0.77	0.62	0.47	0.33	0.19	0.11	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
16	0.25	2.50	2.32	2.15	1.97	1.79	1.62	1.44	1.27	1.10	0.93	0.77	0.61	0.46	0.31	0.18	0.10	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
17	0.25	2.75	2.56	2.38	2.19	2.00	1.82	1.63	1.44	1.26	1.08	0.91	0.74	0.57	0.42	0.28	0.16	0.09	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
18	0.25	3.00	2.80	2.61	2.41	2.21	2.01	1.81	1.62	1.42	1.23	1.04	0.86	0.68	0.52	0.37	0.23	0.13	0.08	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
19	0.25	3.25	3.04	2.84	2.63	2.42	2.21	2.00	1.79	1.58	1.37	1.17	0.97	0.78	0.61	0.45	0.31	0.18	0.11	0.07	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
20	0.25	3.50	3.28	3.07	2.85	2.63	2.41	2.19	1.96	1.73	1.51	1.29	1.07	0.87	0.68	0.51	0.36	0.23	0.14	0.09	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
21	0.25	3.75	3.52	3.30	3.07	2.84	2.61	2.37	2.13	1.89	1.65	1.40	1.16	0.94	0.73	0.56	0.40	0.28	0.17	0.11	0.07	0.04	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
22	0.25	4.00	3.77	3.53	3.30	3.06	2.81	2.56	2.31	2.05	1.78	1.51	1.24	0.99	0.76	0.57	0.42	0.30	0.20	0.13	0.08	0.05	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
23	0.25	4.25	4.01	3.77	3.52	3.28	3.02	2.76	2.49	2.21	1.92	1.62	1.31	1.02	0.75	0.55	0.40	0.29	0.21	0.14	0.09	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
24	0.25	4.50	4.25	4.01	3.76	3.50	3.24	2.97	2.68	2.38	2.06	1.73	1.37	1.01	0.68	0.48	0.35	0.26	0.20	0.14	0.09	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
25	0.25	4.75	4.50	4.25	3.99	3.73	3.46	3.18	2.89	2.57	2.23	1.85	1.43	0.96	0.49	0.33	0.25	0.20	0.15	0.11	0.08	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
26	0.25	5.00	4.75	4.50	4.24	3.97	3.70	3.42	3.11	2.79	2.43	2.03	1.54	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
27																																

w =	1.2
$\varepsilon =$	0.25
dt =	1
m =	3600

ct =	3600
e0 =	0.092

Şekil EK-3.1. İteratif hesaplama sonucu elde edilen basınç yüksekliği değerleri

E31 =InterL(e0;D6:D26;\$C\$6:\$C\$26)

	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
30																											
31		0.00	0.12	0.21	0.29	0.39	0.52	0.63	0.78	0.92	1.08	1.28	1.47	1.67	1.89	2.14	2.42	2.74	3.10	3.55	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
32		5.00	4.88	4.79	4.71	4.61	4.48	4.37	4.22	4.08	3.92	3.72	3.53	3.33	3.11	2.86	2.58	2.26	1.90	1.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
33																											

H \ Ozg. Depolama / Permeabilite / Cozum / 4

Şekil EK-3.2. ETP üzerinde serbest su yüzeyinin bulunması

#### EK-4 Uygulama 3'e ait ETP denklemleri ve çıktıları

Denklem (EK-4.1): Denklem (3.27)'nin ETP formatında yazılmış hali.

$$\begin{aligned}
 E4 = & (1-w)*E4+w*(((Ozg\_Depolama!E4*E4/(4*AA\$9)))+(((Permeabilite!D4*D\$2 \\
 & +Permeabilite!E4*E\$2)/(Cozum!D\$2+E\$2)^3)*D4)+(((Permeabilite!E4*E\$2 \\
 & +Permeabilite!F4*F\$2)/(E\$2+F\$2)^3)*F4)+(((Permeabilite!E3*\$B3+Permeabilite!E4 \\
 & *\$B4)/(\$B3+\$B4)^3)*E3)+((Permeabilite!E4*\$B4+Permeabilite!E5*\$B5)/(\$B4 \\
 & +\$B5)^3)*E5+(((Permeabilite!E3*\$B3+Permeabilite!E4*\$B4)/(\$B3+\$B4))* \\
 & H((Cozum!E3+Cozum!E4)/2;eps)-((Permeabilite!E4*\$B4+Permeabilite!E5*\$B5) \\
 & /(\$B4+\$B5))* H((Cozum!E4+Cozum!E5)/2;eps)))/(((Permeabilite!D4 \\
 & *Cozum!D\$2+Permeabilite!E4*Cozum!E\$2)/(Cozum!D\$2+Cozum!E\$2)^3) \\
 & +((Permeabilite!E4*Cozum!E\$2+Permeabilite!F4*Cozum!F\$2)/(Cozum!E\$2 \\
 & +Cozum!F\$2)^3)+((Permeabilite!E3*Cozum!\$B3+Permeabilite!E4*Cozum!\$B4) \\
 & /(Cozum!\$B3+Cozum!\$B4)^3)+((Permeabilite!E4*Cozum!\$B4+Permeabilite!E5 \\
 & *Cozum!\$B5)/(Cozum!\$B4+Cozum!\$B5)^3)+(Ozg\_Depolama!E4/(4*AA\$9))))
 \end{aligned} \tag{EK-4.1}$$

Denklem (EK-4.2): Denklem (3.28)'in ETP formatında yazılmış hali.

$$\begin{aligned}
 D32 = & (1-w)*D32+w*(((Ozg\_Depolama!D32/(4*ct))*D32+((Permeabilite!C32 \\
 & *Cozum!C\$2+Permeabilite!D32*Cozum!D\$2)/(Cozum!C\$2+Cozum!D\$2)^3) \\
 & *Cozum!C32+((Permeabilite!D32*Cozum!D\$2+Permeabilite!E32*Cozum!E\$2) \\
 & /(Cozum!D\$2+Cozum!E\$2)^3)*Cozum!E32+((Permeabilite!D31*Cozum!\$B31 \\
 & +Permeabilite!D32*Cozum!\$B32)/(Cozum!\$B31+Cozum!\$B32)^3)*Cozum!D31 \\
 & +((Permeabilite!D31*\$B31+Permeabilite!D32*\$B32)/(\$B31+\$B32))* H((Cozum!D31 \\
 & +Cozum!D32)/2;eps))/((Ozg\_Depolama!D32/(4*ct))+((Permeabilite!C32*Cozum!C\$2 \\
 & +Permeabilite!D32*Cozum!D\$2)/(Cozum!C\$2+Cozum!D\$2)^3)+((Permeabilite!D32 \\
 & *Cozum!D\$2+Permeabilite!E32*Cozum!E\$2)/(Cozum!D\$2+Cozum!E\$2)^3) \\
 & +((Permeabilite!D31*Cozum!\$B31+Permeabilite!D32*Cozum!\$B32) \\
 & /(\$B31+\$B32)^3)))
 \end{aligned} \tag{EK-4.2}$$



Denklem (EK-4.3): Denklem (3.29)'un ETP formatında yazılmış hali.

$$\begin{aligned}
 D4 = & (1-w)*D4+w*(((Ozg\_Depolama!D4*D4/(4*AA\$9))+((Permeabilite!D4*D\$2 \\
 & +Permeabilite!E4*E\$2)/(D\$2+E\$2)^3)*E4)+(((Permeabilite!D3*\$B3+Permeabilite!D4 \\
 & *\$B4)/(\$B3+\$B4)^3)*D3)+((Permeabilite!D4*\$B4+Permeabilite!D5*\$B5)/(\$B4 \\
 & +\$B5)^3)*D5+(((Permeabilite!D3*\$B3+Permeabilite!D4*\$B4)/(\$B3+\$B4)) \quad (EK-4.3) \\
 & * H((Cozum!D3+Cozum!D4)/2;eps)-((Permeabilite!D4*\$B4+Permeabilite!D5*\$B5) \\
 & /(\$B4+\$B5))* H((Cozum!D4+Cozum!D5)/2;eps)))/(((Permeabilite!D4 \\
 & *Cozum!D\$2+Permeabilite!E4*Cozum!E\$2)/(Cozum!D\$2+Cozum!E\$2)^3) \\
 & +((Permeabilite!D3*Cozum!\$B3+Permeabilite!D4*Cozum!\$B4)/(Cozum!\$B3 \\
 & +Cozum!\$B4)^3)+((Permeabilite!D4*Cozum!\$B4+Permeabilite!D5*Cozum!\$B5) \\
 & /((Cozum!\$B4+Cozum!\$B5)^3)+(Ozg\_Depolama!D4/(4*AA\$9))))
 \end{aligned}$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA
1																											
2	$\Delta z/\Delta x$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
3	0.25		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.25		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.25		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.25		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.25		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.25		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.25		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.25		0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.25		0.13	0.13	0.11	0.10	0.08	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	0.25		0.39	0.38	0.35	0.31	0.26	0.20	0.15	0.11	0.08	0.05	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	0.25		0.67	0.65	0.62	0.57	0.51	0.45	0.38	0.29	0.21	0.13	0.09	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.25		0.96	0.94	0.90	0.85	0.78	0.70	0.62	0.53	0.43	0.33	0.23	0.14	0.09	0.06	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.25		1.27	1.24	1.20	1.13	1.06	0.97	0.87	0.77	0.66	0.55	0.44	0.32	0.21	0.13	0.08	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.25		1.60	1.57	1.51	1.43	1.34	1.24	1.13	1.01	0.89	0.77	0.65	0.52	0.40	0.27	0.16	0.09	0.05	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.25		1.97	1.92	1.85	1.75	1.64	1.52	1.39	1.26	1.13	1.00	0.86	0.72	0.59	0.45	0.32	0.19	0.11	0.06	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.25		2.38	2.31	2.20	2.07	1.94	1.80	1.66	1.52	1.37	1.22	1.07	0.93	0.78	0.63	0.48	0.34	0.20	0.11	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.25		2.86	2.73	2.57	2.41	2.25	2.09	1.93	1.77	1.61	1.45	1.29	1.13	0.97	0.81	0.65	0.49	0.34	0.19	0.10	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.25	4.00	3.48	3.18	2.95	2.75	2.56	2.38	2.20	2.02	1.85	1.67	1.50	1.33	1.15	0.98	0.81	0.64	0.47	0.31	0.16	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.25	4.25	3.86	3.55	3.30	3.07	2.86	2.66	2.47	2.28	2.09	1.90	1.71	1.53	1.34	1.16	0.97	0.79	0.60	0.42	0.24	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.25	4.50	4.17	3.88	3.62	3.38	3.15	2.94	2.73	2.53	2.33	2.13	1.93	1.73	1.53	1.33	1.13	0.93	0.73	0.53	0.33	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.25	4.75	4.46	4.17	3.91	3.67	3.43	3.21	2.99	2.77	2.56	2.35	2.14	1.93	1.72	1.50	1.29	1.07	0.85	0.63	0.41	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0.25	5.00	4.72	4.45	4.19	3.94	3.70	3.47	3.24	3.02	2.80	2.58	2.36	2.13	1.91	1.68	1.45	1.22	0.98	0.73	0.48	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0.25	5.25	4.98	4.72	4.46	4.21	3.97	3.73	3.49	3.26	3.03	2.80	2.57	2.34	2.10	1.86	1.62	1.36	1.11	0.84	0.56	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	0.25	5.50	5.24	4.98	4.72	4.47	4.22	3.98	3.74	3.50	3.27	3.03	2.79	2.55	2.30	2.05	1.79	1.52	1.24	0.95	0.65	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27	0.25	5.75	5.49	5.23	4.98	4.73	4.48	4.23	3.99	3.75	3.50	3.26	3.01	2.76	2.50	2.24	1.97	1.69	1.39	1.08	0.75	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28	0.25	6.00	5.74	5.49	5.23	4.98	4.73	4.48	4.23	3.99	3.74	3.49	3.23	2.98	2.71	2.44	2.16	1.87	1.56	1.24	0.88	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29	0.25	6.25	5.99	5.74	5.49	5.23	4.98	4.73	4.48	4.23	3.98	3.72	3.46	3.20	2.93	2.65	2.36	2.06	1.75	1.42	1.06	0.67	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.25	6.50	6.25	5.99	5.74	5.48	5.23	4.98	4.73	4.47	4.22	3.96	3.70	3.43	3.15	2.87	2.58	2.27	1.95	1.62	1.26	0.89	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00
31	0.25	6.75	6.50	6.24	5.99	5.73	5.48	5.23	4.97	4.72	4.46	4.20	3.93	3.66	3.39	3.10	2.80	2.50	2.18	1.84	1.49	1.12	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00
32	0.25	7.00	6.75	6.49	6.24	5.98	5.73	5.48	5.22	4.97	4.71	4.45	4.18	3.91	3.63	3.34	3.04	2.73	2.41	2.08	1.73	1.37	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
33																											

w =	1.2
$\epsilon =$	0.25
dt =	1
m =	3600

ct =	3600
e0 =	0.092

Şekil EK-4.1. İteratif hesaplama sonucu elde edilen basınç yüksekliği değerleri

D40 =InterL(e0;D4:D32; \$A\$4: \$A\$32)

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
39																								
40		1.64	1.64	1.65	1.68	1.72	1.76	1.80	1.86	1.95	2.03	2.12	2.25	2.35	2.51	2.63	2.80	2.99	3.17	3.40	3.69	4.15	6.09	
41		5.36	5.36	5.35	5.32	5.28	5.24	5.20	5.14	5.05	4.97	4.88	4.75	4.65	4.49	4.37	4.20	4.01	3.83	3.60	3.31	2.85	0.91	
42																								

H \ Ozg. Depolama / Permeabilite / Cozum /

Şekil EK-4.2. ETP üzerinde serbest su yüzeyinin bulunması

## EK-5 Uygulama 4'e ait ETP denklemleri ve çıktıları

Denklem (EK-5.1): Denklem (3.27)'nin ETP formatında yazılmış hali.

$$\begin{aligned}
 D4 = & (1-w)*D4+w*(((Ozg\_Depolama!D4*D4/(4*AB\$9)))+(((Permeabilite!C4*C\$2 \\
 & +Permeabilite!D4*D\$2)/(Cozum!C\$2+D\$2)^3)*C4)+(((Permeabilite!D4*D\$2 \\
 & +Permeabilite!E4*E\$2)/(D\$2+E\$2)^3)*E4)+(((Permeabilite!D3*\$B3+Permeabilite!D4 \\
 & *\$B4)/(\$B3+\$B4)^3)*D3)+((Permeabilite!D4*\$B4+Permeabilite!D5*\$B5)/(\$B4+\$B5)^3) \\
 & *D5+(((Permeabilite!D3*\$B3+Permeabilite!D4*\$B4)/(\$B3+\$B4)) \\
 & *H((Cozum!D3+Cozum!D4)/2;eps)-((Permeabilite!D4*\$B4+Permeabilite!D5 \\
 & *\$B5)/(\$B4+\$B5))*H((Cozum!D4+Cozum!D5)/2;eps)))/(((Permeabilite!C4 \\
 & *Cozum!C\$2+Permeabilite!D4*Cozum!D\$2)/(Cozum!C\$2+Cozum!D\$2)^3) \\
 & +((Permeabilite!D4*Cozum!D\$2+Permeabilite!E4*Cozum!E\$2)/(Cozum!D\$2 \\
 & +Cozum!E\$2)^3)+((Permeabilite!D3*Cozum!\$B3+Permeabilite!D4 \\
 & *Cozum!\$B4)/(Cozum!\$B3+Cozum!\$B4)^3)+((Permeabilite!D4 \\
 & *Cozum!\$B4+Permeabilite!D5*Cozum!\$B5)/(Cozum!\$B4+Cozum!\$B5)^3) \\
 & +(Ozg\_Depolama!D4/(4*AB\$9)))/(4*AA\$9))
 \end{aligned} \tag{EK-5.1}$$

Denklem (EK-5.2): Denklem (3.28)'in ETP formatında yazılmış hali.

$$\begin{aligned}
 D25 = & (1-w)*D25+w*(((Ozg\_Depolama!D25*D25/(4*AB\$9)))+(((Permeabilite!C25 \\
 & *C\$2+Permeabilite!D25*D\$2)/(Cozum!C\$2+D\$2)^3)*C25)+(((Permeabilite!D25 \\
 & *D\$2+Permeabilite!E25*E\$2)/(D\$2+E\$2)^3)*E25)+(((Permeabilite!D24*\$B24 \\
 & +Permeabilite!D25*\$B25)/(\$B24+\$B25)^3)*D24)+(((Permeabilite!D24*\$B24 \\
 & +Permeabilite!D25*\$B25)/(\$B24+\$B25))*H((Cozum!D24+Cozum!D25)/2;eps)))/ \\
 & (((Permeabilite!C25*Cozum!C\$2+Permeabilite!D25*Cozum!D\$2)/(Cozum!C\$2 \\
 & +Cozum!D\$2)^3)+((Permeabilite!D25*Cozum!D\$2+Permeabilite!E25*Cozum!E\$2) \\
 & /(Cozum!D\$2+Cozum!E\$2)^3)+((Permeabilite!D24*Cozum!\$B24+Permeabilite!D25 \\
 & *Cozum!\$B25)/(Cozum!\$B24+Cozum!\$B25)^3)+(Ozg\_Depolama!D25/(4*AB\$9))
 \end{aligned} \tag{EK-5.2}$$





## EK-6 Uygulama 5'e ait ETP denklemleri ve çıktıları

Denklem (EK-6.1): Denklem (3.27)'nin ETP formatında yazılmış hali.

$$\begin{aligned}
 D4 = & (1-w)*D4+w*(((Ozg\_Depolama!D4*D4/(4*AB\$9)))+(((Permeabilite!C4*C\$2 \\
 & +Permeabilite!D4*D\$2)/(Cozum!C\$2+D\$2)^3)*C4)+(((Permeabilite!D4*D\$2 \\
 & +Permeabilite!E4*E\$2)/(D\$2+E\$2)^3)*E4)+(((Permeabilite!D3*\$B3+Permeabilite!D4 \\
 & *\$B4)/(\$B3+\$B4)^3)*D3)+((Permeabilite!D4*\$B4+Permeabilite!D5*\$B5)/(\$B4+\$B5)^3) \\
 & *D5+(((Permeabilite!D3*\$B3+Permeabilite!D4*\$B4)/(\$B3+\$B4)) \\
 & *H((Cozum!D3+Cozum!D4)/2;eps)-((Permeabilite!D4*\$B4+Permeabilite!D5 \\
 & *\$B5)/(\$B4+\$B5))*H((Cozum!D4+Cozum!D5)/2;eps)))/(((Permeabilite!C4 \\
 & *Cozum!C\$2+Permeabilite!D4*Cozum!D\$2)/(Cozum!C\$2+Cozum!D\$2)^3) \\
 & +((Permeabilite!D4*Cozum!D\$2+Permeabilite!E4*Cozum!E\$2)/(Cozum!D\$2 \\
 & +Cozum!E\$2)^3)+((Permeabilite!D3*Cozum!\$B3+Permeabilite!D4 \\
 & *Cozum!\$B4)/(Cozum!\$B3+Cozum!\$B4)^3)+((Permeabilite!D4 \\
 & *Cozum!\$B4+Permeabilite!D5*Cozum!\$B5)/(Cozum!\$B4+Cozum!\$B5)^3) \\
 & +(Ozg\_Depolama!D4/(4*AB\$9)))/(4*AA\$9)))
 \end{aligned} \tag{EK-6.1}$$

Denklem (EK-6.2): Denklem (3.28)'in ETP formatında yazılmış hali.

$$\begin{aligned}
 D45 = & (1-w)*D45+w*(((Ozg\_Depolama!D45/(4*Cozum!AB\$9))*D45+((Permeabilite!C45 \\
 & *Cozum!C\$2+Permeabilite!D45*Cozum!D\$2)/(Cozum!C\$2+Cozum!D\$2)^3)*Cozum!C45 \\
 & +((Permeabilite!D45*Cozum!D\$2+Permeabilite!E45*Cozum!E\$2)/(Cozum!D\$2 \\
 & +Cozum!E\$2)^3)*Cozum!E45+((Permeabilite!D44*Cozum!\$B44+Permeabilite!D45 \\
 & *\$B45)/(\$B44+Cozum!\$B45)^3)*Cozum!D44+((Permeabilite!D44*\$B44 \\
 & +Permeabilite!D45*\$B45)/(\$B44+\$B45))*H((Cozum!D44+Cozum!D45)/2;eps)) \\
 & /((Ozg\_Depolama!D45/(4*Cozum!AB\$9))+((Permeabilite!C45*Cozum!C\$2+Permeabilite! \\
 & D45*Cozum!D\$2)/(Cozum!C\$2+Cozum!D\$2)^3)+((Permeabilite!D45*Cozum!D\$2 \\
 & +Permeabilite!E45*Cozum!E\$2)/(Cozum!D\$2+Cozum!E\$2)^3)+((Permeabilite!D44 \\
 & *Cozum!\$B44+Permeabilite!D45*Cozum!\$B45)/(\$B44+Cozum!\$B45)^3)))
 \end{aligned} \tag{EK-6.2}$$





	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
1																												
2		$\Delta z \backslash \Delta x$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25			
3		0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
4		0.25	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			w = 1.2
5		0.25	0.00	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			e = 0.375
6		0.25	0.25	0.17	0.12	0.09	0.07	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			dt = 1
7		0.25	0.50	0.37	0.26	0.18	0.13	0.09	0.06	0.04	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			m = 3600
8		0.25	0.75	0.61	0.48	0.34	0.24	0.16	0.11	0.07	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
9		0.25	1.00	0.85	0.70	0.55	0.41	0.28	0.19	0.12	0.08	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			ct = 3600
10		0.25	1.25	1.08	0.92	0.76	0.60	0.44	0.29	0.19	0.12	0.06	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			e0 = 0.14
11		0.25	1.50	1.32	1.14	0.96	0.78	0.61	0.44	0.29	0.18	0.09	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
12		0.25	1.75	1.55	1.35	1.16	0.96	0.77	0.59	0.41	0.25	0.13	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
13		0.25	2.00	1.78	1.57	1.35	1.14	0.93	0.73	0.53	0.33	0.18	0.05	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
14		0.25	2.25	2.01	1.78	1.55	1.31	1.08	0.86	0.64	0.43	0.23	0.06	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
15		0.25	2.50	2.24	1.99	1.74	1.48	1.24	0.99	0.75	0.51	0.28	0.08	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
16		0.25	2.75	2.47	2.20	1.93	1.65	1.38	1.11	0.85	0.59	0.33	0.09	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			
17		0.25	3.00	2.70	2.41	2.11	1.82	1.53	1.24	0.95	0.66	0.38	0.11	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00			
18		0.25	3.25	2.93	2.62	2.30	1.99	1.67	1.36	1.05	0.74	0.43	0.13	0.08	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00			
19		0.25	3.50	3.16	2.82	2.49	2.15	1.81	1.48	1.14	0.81	0.48	0.15	0.09	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00			
20		0.25	3.75	3.39	3.03	2.67	2.31	1.95	1.59	1.24	0.88	0.52	0.16	0.10	0.08	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00			
21		0.25	4.00	3.62	3.24	2.86	2.48	2.09	1.71	1.33	0.95	0.57	0.18	0.11	0.09	0.06	0.05	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00			
22		0.25	4.25	3.85	3.45	3.04	2.64	2.24	1.83	1.42	1.02	0.61	0.20	0.13	0.10	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00			
23		0.25	4.50	4.08	3.65	3.23	2.80	2.38	1.95	1.52	1.09	0.65	0.22	0.14	0.11	0.08	0.06	0.05	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00			
24		0.25	4.75	4.31	3.86	3.42	2.97	2.52	2.07	1.62	1.16	0.70	0.24	0.16	0.12	0.09	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00			
25		0.25	5.00	4.54	4.07	3.61	3.14	2.67	2.19	1.72	1.23	0.75	0.26	0.17	0.13	0.10	0.08	0.06	0.05	0.03	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00			
26		0.25	5.25	4.77	4.28	3.80	3.31	2.82	2.32	1.82	1.31	0.80	0.28	0.19	0.15	0.12	0.09	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00			
27		0.25	5.50	5.00	4.49	3.99	3.48	2.97	2.45	1.93	1.40	0.86	0.31	0.21	0.17	0.13	0.10	0.08	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00			
28		0.25	5.75	5.23	4.71	4.19	3.66	3.13	2.59	2.05	1.49	0.93	0.35	0.24	0.19	0.15	0.12	0.09	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	0.00			
29		0.25	6.00	5.46	4.92	4.38	3.84	3.29	2.74	2.17	1.60	1.01	0.40	0.29	0.23	0.18	0.14	0.11	0.09	0.06	0.05	0.03	0.02	0.01	0.00			
30		0.25	6.25	5.70	5.14	4.59	4.03	3.46	2.89	2.31	1.72	1.11	0.49	0.37	0.30	0.23	0.18	0.14	0.11	0.08	0.06	0.04	0.03	0.01	0.00			
31		0.25	6.50	5.93	5.36	4.79	4.22	3.64	3.05	2.46	1.85	1.24	0.60	0.48	0.41	0.32	0.25	0.19	0.15	0.11	0.08	0.05	0.03	0.02	0.00			
32		0.25	6.75	6.17	5.59	5.00	4.42	3.82	3.23	2.62	2.00	1.37	0.74	0.62	0.54	0.45	0.36	0.27	0.20	0.15	0.11	0.08	0.05	0.02	0.00			
33		0.25	7.00	6.41	5.81	5.22	4.62	4.01	3.40	2.79	2.16	1.53	0.88	0.76	0.68	0.60	0.50	0.40	0.30	0.22	0.16	0.11	0.07	0.03	0.00			
34		0.25	7.25	6.65	6.04	5.44	4.83	4.21	3.59	2.96	2.33	1.69	1.03	0.91	0.84	0.75	0.66	0.56	0.45	0.33	0.24	0.16	0.10	0.05	0.00			
35		0.25	7.50	6.89	6.27	5.66	5.04	4.41	3.79	3.15	2.51	1.86	1.20	1.08	1.00	0.92	0.82	0.72	0.61	0.49	0.37	0.25	0.16	0.08	0.00			
36		0.25	7.75	7.13	6.51	5.88	5.25	4.62	3.99	3.34	2.69	2.04	1.37	1.25	1.17	1.09	1.00	0.89	0.78	0.66	0.53	0.39	0.24	0.12	0.00			
37		0.25	8.00	7.37	6.74	6.11	5.47	4.83	4.19	3.54	2.89	2.22	1.55	1.43	1.35	1.27	1.18	1.07	0.96	0.84	0.71	0.56	0.39	0.21	0.00			
38		0.25	8.25	7.61	6.98	6.34	5.70	5.05	4.40	3.75	3.09	2.42	1.74	1.62	1.54	1.46	1.37	1.26	1.15	1.03	0.90	0.75	0.60	0.42	0.25			
39		0.25	8.50	7.86	7.22	6.57	5.92	5.27	4.62	3.96	3.29	2.62	1.94	1.82	1.74	1.66	1.56	1.46	1.35	1.23	1.10	0.96	0.82	0.66	0.50			
40		0.25	8.75	8.10	7.46	6.81	6.16	5.50	4.84	4.18	3.51	2.83	2.15	2.02	1.95	1.86	1.77	1.67	1.56	1.44	1.32	1.19	1.04	0.90	0.75			
41		0.25	9.00	8.35	7.70	7.05	6.39	5.73	5.07	4.40	3.73	3.05	2.36	2.24	2.16	2.08	1.99	1.89	1.78	1.66	1.54	1.41	1.28	1.14	1.00			
42		0.25	9.25	8.60	7.94	7.29	6.63	5.97	5.30	4.63	3.96	3.27	2.59	2.46	2.38	2.30	2.21	2.11	2.00	1.89	1.77	1.65	1.52	1.38	1.25			
43		0.25	9.50	8.84	8.19	7.53	6.87	6.20	5.54	4.86	4.19	3.50	2.82	2.69	2.61	2.53	2.44	2.34	2.23	2.12	2.01	1.89	1.76	1.63	1.50			
44		0.25	9.75	9.09	8.43	7.77	7.11	6.45	5.78	5.10	4.43	3.74	3.05	2.92	2.85	2.76	2.67	2.58	2.47	2.36	2.25	2.13	2.00	1.88	1.75			
45		0.25	10.00	9.34	8.68	8.02	7.36	6.69	6.02	5.35	4.67	3.99	3.29	3.17	3.09	3.01	2.92	2.82	2.72	2.61	2.49	2.37	2.25	2.13	2.00			
46																												

Şekil EK-6.2. İteratif hesaplama sonucu elde edilen basınç yüksekliği değerleri

D49 =InterL(e0;D5;D45;\$C\$5;\$C\$45)

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
48																									
49		0.00	0.19	0.28	0.38	0.52	0.66	0.84	1.06	1.34	1.79	3.37	4.42	5.05	5.56	5.92	6.20	6.44	6.66	6.88	7.13	7.41	7.80	8.14	
50		10.00	9.81	9.72	9.62	9.48	9.34	9.16	8.94	8.66	8.21	6.63	5.58	4.95	4.44	4.08	3.80	3.56	3.34	3.12	2.87	2.59	2.20	1.86	
51																									

K:\... \Ozg Depolama \ Permeabilite \ Cozum /

Şekil EK-6.3. ETP üzerinde serbest su yüzeyinin bulunması