



---

**HETEROJEN ZEMİNLERDE GEÇİŞ BÖLGESİNDEKİ AKIM  
KARAKTERİSTİKLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**Onur ABAY**

**Temmuz 2006  
DENİZLİ**

**HETEROJEN ZEMİNLERDE GEÇİŞ BÖLGESİNDEKİ AKIM  
KARAKTERİSTİKLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

**Pamukkale Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Onur ABAY**

**Danışman: Prof. Dr. Halil KARAHAN**

**Temmuz, 2006  
DENİZLİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ ONAY FORMU**

Onur ABAY tarafından Prof. Dr. Halil KARAHAN yönetiminde hazırlanan “**Heterojen Zeminlerde Geçiş Bölgesindeki Akım Karakteristiklerinin Sayısal Olarak İncelenmesi**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Halil KARAHAN  
Jüri Başkanı (Danışman)



Yard. Doç. Dr. A. Cem KOÇ  
Jüri Üyesi



Yard. Doç. Dr. Ali GÖKGÖZ  
Jüri Üyesi

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
.../.../..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Mehmet Ali SARIGÖL**  
Müdür

## TEŞEKKÜR

Başta yol gösterici önerileri için saygıdeğer tez danışmanım Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Halil KARAHAN'a;

Lisans ve yüksek lisans derslerinde bilgilerinden yararlanmaktan zevk aldığım değerli hocam Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Anabilim Dalı Öğretim Üyesi Prof. Dr. N. Orhan BAYKAN'a;

Bilgisayar programlama konusundaki önemli yardımları ve dostluğu için Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Anabilim Dalı'ndan Okutman Y. İnş. Müh. Gürhan GÜRARSLAN'a;


Ders ve tez çalışmalarım sırasında gösterdikleri kolaylıklar için işyerlerimdeki yöneticilerime;

Öğrenim yaşamım boyunca yanımda olan Ailem'e

Teşekkür ederim.

Onur ABAY  
İnş. Müh.  
Temmuz, 2006, DENİZLİ

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğini beyan ederim.

İmza :   
Öğrenci Adı Soyadı : Onur ABAY

## ÖZET

### HETEROJEN ZEMİNLERDE GEÇİŞ BÖLGESİNDEKİ AKIM KARAKTERİSTİKLERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Abay, Onur  
Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği ABD  
Tez Yöneticisi: Prof. Dr. Halil KARAHAN

Temmuz 2006, 78 Sayfa

Yeraltısuyu, hidrolojik çevrimin önemli bileşenlerinden biridir. Yeraltısuyu niteliğinin artırılması, toprak ve su kaynaklarının birlikte planlanması ve sızma ile taşınan kimyasalların etkisinin belirlenmesi gibi nedenlerle yeraltısuyunun incelenmesi büyük öneme sahiptir. Bu incelemeler için genellikle modelleme yöntemi kullanılmaktadır.

Bu tezde geçiş bölgesindeki akım karakteristiklerinin incelenmesi için yeraltısuyu akımının iki boyutlu temel denkleminde hidrolik iletkenlik katsayılarının harmonik, aritmetik ve geometrik ortalamaları kullanılmıştır. Bu denklem sayısal yöntemlerden biri olan sonlu farklar yöntemi ile değişken ve sabit grid aralıkları kullanılarak çözülmüştür. Sonlu farklar yöntemi implisit yaklaşımla ele alınmıştır. Modelleme ise MS EXCEL ve VISUAL BASIC ile kod yazılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal örnekler oluşturularak sonuçlar somut olarak değerlendirilmiştir. Bu örneklerde hidrolik iletkenlik katsayılarının yukarıda anılan ortalamaları ile hesaplanmış sonuçlar arasında gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** yeraltısuyu modellemesi, kısmi diferansiyel denklemler, sonlu farklar yöntemi, elektronik tablolama, hidrolik iletkenlik

Prof. Dr. Halil KARAHAN  
Yard. Doç. Dr. A. Cem KOÇ  
Yard. Doç. Dr. Ali GÖKGÖZ

**ABSTRACT****NUMERICAL INVESTIGATION OF FLOW CHARACTERISTICS OF  
BOUNDARY REGIONS IN HETEROGENEOUS SOILS**

Abay, Onur  
M. Sc. Thesis in Civil Engineering  
Supervisor: Prof. Dr. Halil KARAHAN

July 2006, 78 Pages

Groundwater is one of the significant components of hydrologic cycle. Examination of groundwater is so important due to needs like increasing quality of groundwater, combined planning of soil and water resources and determination of harms of chemicals carried by seepage. Modeling is generally utilized as a method for this examination.

In this thesis to examine the flow characteristics of soil boundary regions harmonic, arithmetic and geometric means of hydraulic conductivities were used in two dimensional groundwater flow equation. This equation was solved with both variable and constant grid distances using finite difference method which is one of the numerical methods. Finite difference method was based on implicit algorithm. Modeling was made by writing code in MS EXCEL and VISUAL BASIC. Then numerical examples were constituted to evaluate the results more effectively. In these examples necessary comparisons were made between the results which were calculated with types of hydraulic conductivities mentioned above.

**Keywords:** groundwater modeling, partial differential equations, finite difference method, spreadsheet, hydraulic conductivity

Prof. Dr. Halil KARAHAN  
Asst. Prof. Dr. A. Cem KOÇ  
Asst. Prof. Dr. Ali GÖKGÖZ

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
Tez Onay Sayfası .....	i
Teşekkür .....	ii
Bilimsel Etik Sayfası .....	iii
Özet .....	iv
Abstract .....	v
İçindekiler .....	vi
Şekiller Dizini .....	viii
Tablolar Dizini .....	ix
Simgeler ve Kısaltmalar Dizini .....	x
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Genel Bilgiler .....	1
1.2. Model Kavramı .....	2
1.3. Sayısal Yöntemler .....	2
2. LİTERATÜR TARAMASI .....	4
2.1. Yeraltısuyla İlgili Temel Çalışmalar .....	4
2.2. Düşey Yeraltısuyla Hareketini İnceleyen Çalışmalar .....	4
2.3. Yatay Yeraltısuyla Hareketini İnceleyen Çalışmalar .....	6
3. YERALTISUYU AKIMININ TEMEL DENKLEMLERİ VE SONLU FARKLAR YÖNTEMİ .....	10
3.1. Yeraltısuyla Akımının Temel Denklemleri .....	10
3.2. Sonlu Farklar Yöntemi .....	12
3.2.1. Doğrusal yaklaşım .....	12
3.2.2. Taylor serisi yaklaşımı ve sayısal hatalar .....	15
3.2.2.1. Düzenli grid yapısı .....	15
3.2.2.2. Düzensiz grid yapısı .....	18
4. MATEMATİKSEL MODEL .....	21
4.1. Matematiksel Modelin Kurulması .....	21
4.2. Merkezi Fark Yaklaşımı .....	22
4.2.1. Aritmetik ortalamalar .....	24
4.2.2. Harmonik ortalamalar .....	26
4.2.3. Geometrik ortalamalar .....	29
4.3. İteratif Çözüm .....	32
5. SAYISAL UYGULAMALAR .....	35
5.1. Sayısal Uygulamalarda Kullanılan Yöntem .....	35
5.2. Örnek 1 .....	35
5.3. Örnek 2 .....	44
5.4. Örnek 3 .....	51
5.5. Örnek 4 .....	59
6. SONUÇ .....	67
6.1. Modellemeye İlişkin Sonuçlar .....	67



6.2. Öneriler .....	68
Kaynaklar .....	70
Ekler .....	72
Özgeçmiş .....	78

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1	Sonlu farklar yöntemi.....12
Şekil 3.2	Sonlu farklar yöntemi için düzenli grid yapısı.....15
Şekil 3.3	Sonlu farklar yöntemi için düzensiz grid yapısı.....19
Şekil 4.1	Düzensiz grid yapısının hesap molekülü.....22
Şekil 4.2	Ağırlıklı ortalamaların hesabında noktalar arası uzaklıklar.....23
Şekil 5.1.a	Analitik yöntem çözüm sayfası (Ör.1).....38
Şekil 5.1.b	Sayısal yöntem harmonik ortalama çözüm sayfası (Ör.1).....39
Şekil 5.1.c	Sayısal yöntem aritmetik ortalama çözüm sayfası (Ör.1).....40
Şekil 5.1.d	Sayısal yöntem geometrik ortalama çözüm sayfası (Ör.1).....41
Şekil 5.2.a	A-A kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri grafiği (Ör. 1).....42
Şekil 5.2.b	B-B kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri grafiği (Ör. 1).....43
Şekil 5.3.a	Analitik yöntem çözüm sayfası (Ör. 2).....45
Şekil 5.3.b	Sayısal yöntem harmonik ortalama çözüm sayfası (Ör. 2).....46
Şekil 5.3.c	Sayısal yöntem aritmetik ortalama çözüm sayfası (Ör. 2).....47
Şekil 5.3.d	Sayısal yöntem geometrik ortalama çözüm sayfası (Ör. 2).....48
Şekil 5.4.a	A-A kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri grafiği (Ör. 2).....49
Şekil 5.4.b	B-B kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri grafiği (Ör. 2).....50
Şekil 5.5	Hidrolik iletkenlik katsayısı değerleri (Ör. 3).....52
Şekil 5.6	Kaynak – Yitik sayfası kuyu debileri (Ör. 3).....53
Şekil 5.7.a	Harmonik ortalama için hidrolik yük değerleri (Ör. 3).....54
Şekil 5.7.b	Aritmetik ortalama için hidrolik yük değerleri (Ör. 3).....55
Şekil 5.7.c	Geometrik ortalama için hidrolik yük değerleri (Ör. 3).....56
Şekil 5.8.a	A-A kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri grafiği (Ör. 3).....57
Şekil 5.8.b	B-B kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri grafiği (Ör. 3).....58
Şekil 5.9	Hidrolik iletkenlik katsayısı değerleri (Ör. 4).....60
Şekil 5.10.a	Harmonik ortalama için hidrolik yük değerleri (Ör. 4).....61
Şekil 5.10.b	Aritmetik ortalama için hidrolik yük değerleri (Ör. 4).....62
Şekil 5.10.c	Geometrik ortalama için hidrolik yük değerleri (Ör. 4).....63
Şekil 5.11.a	A-A kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri grafiği (Ör. 4).....64
Şekil 5.11.b	B-B kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri grafiği (Ör. 4).....65
Şekil 5.11.c	A-A kesitinde değişim bölgesi civarındaki konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör. 4).....66
Şekil 5.11.d	B-B kesitinde değişim bölgesi civarındaki konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi(Ör. 4).....66

**TABLULAR DİZİNİ**

	<b>Sayfa</b>
<b>Tablo 5.1</b> Sayısal ve analitik çözümün hata ölçütleriyle karşılaştırılması(Ör.1).....	37
<b>Tablo 5.2</b> A-A kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör.1).....	42
<b>Tablo 5.3</b> B-B kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör.1).....	43
<b>Tablo 5.4</b> Sayısal ve analitik çözümün hata ölçütleriyle karşılaştırılması(Ör.2).....	44
<b>Tablo 5.5</b> A-A kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör. 2).....	49
<b>Tablo 5.6</b> B-B kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör. 2).....	50
<b>Tablo 5.7</b> A-A kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör. 3).....	57
<b>Tablo 5.8</b> B-B kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör. 3).....	58
<b>Tablo 5.9</b> A-A kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör. 4).....	64
<b>Tablo 5.10</b> B-B kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör. 4).....	65
<b>Tablo 6.1</b> Örnek 1 ve Örnek 2 arasında görelî hataların karşılaştırılması.....	68

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

$K_{xx}$	$x$ yönündeki hidrolik iletkenlik katsayısı ( $m/gün$ )
$K_{yy}$	$y$ yönündeki hidrolik iletkenlik katsayısı ( $m/gün$ )
$K_{zz}$	$z$ yönündeki hidrolik iletkenlik katsayısı ( $m/gün$ )
$H$	Hidrolik yük ( $m$ )
$Q$	Debi ( $m^3/gün$ )
$\Delta x$	$x$ yönünde grid aralığı ( $m$ )
$\Delta y$	$y$ yönünde grid aralığı ( $m$ )
$\Delta z$	$z$ yönünde grid aralığı ( $m$ )
$S_s$	Özgül depolama katsayısı ( $m^{-1}$ )
$T$	İletimlilik katsayısı ( $m^2/gün$ )
$K$	Hidrolik iletkenlik katsayısı ( $m/gün$ )
$b$	Akifer kalınlığı ( $m$ )
$S$	Depolama katsayısı
$n$	Zaman adımı
$m$	İterasyon adımı
$H_a$	$m+1$ inci iterasyondaki hidrolik yük ( $m$ )
$H_{obs}$	Analitik çözümdeki hidrolik yük değeri ( $m$ )
$H_{est}$	Sayısal çözümdeki hidrolik yük değeri ( $m$ )
$\bar{H}_{obs}$	Analitik çözümdeki hidrolik yük değerlerinin ortalaması ( $m$ )
$L$	Eleman sayısı

## 1. GİRİŞ

### 1.1. Genel Bilgiler

Sulama ve yağış sonucu görülen sızma, yeraltısuyu düzeyinin yükselmesine neden olmakta ve gübreler, tarım ilaçları ve kimyasallar sızıntı suları ile taşınarak yeraltısuyunun niteliğini bozmaktadır. Hidrolik düzey farkları nedeniyle komşu akiferlerin yeraltısuyu düzeylerinde ve niteliklerinde zaman içinde değişimler görülmektedir. Aynı zamanda yeraltısuyu düzeyinin aşırı arttığı kesimlerde toprak yüzeyinden buharlaşma sonucu zemindeki tuzluluk oranı artmakta ve toprağın verimi azalmaktadır.

Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak ve toprak – su kaynaklarının birlikte ve uzun süreli kullanımını sağlamak amaçları ile çalışmalar yürütülmektedir. Fakat sistemlerin yeraltısuyu düzeyinin zaman içindeki değişiminin meteorolojik koşullarla birlikte düşünülmeden tasarımı, inşa edilmesi ve işletilmesi toprak ve su kaynaklarının belli bir süre sonunda etkin ve sürdürülebilir biçimde kullanımını engellemektedir.

Toprak ve su kaynaklarını meteorolojik koşullar ile birlikte değerlendirerek farklı işletme politikalarına göre zamanla değişken olarak modellemek olanaklıdır. Böylece tümleşik (entegre) kaynak yönetimi yaklaşımı ile farklı olayların akifer üstündeki olası etkileri önceden kestirilerek toprak ve su kaynaklarının bütün olarak kullanımına yönelik işletme politikaları belirlenebilmektedir (Karahan 1997).

Yukarıda anılan etkinlikleri yürütmek için doğal bir sürecin gerçek boyutlarındaki sonuçlarını gözleme yöntemi uygulanması zor bir seçenektir. Aynı zamanda bu sürecin nedenlerini değiştirmek veya etkilemek olanaksız yakındır. Fakat aynı sürecin modelinde oluşum parametrelerini değiştirmek eldedir.

## 1.2. Model Kavramı

Model kavramı ile bilimsel uygulamalarda ve günlük yaşamın birçok alanında karşılaşılmaktadır. Model, gerçeğin basitleştirilmiş durumunu temsil etmek için tasarlanan bir araçtır (Wang ve Anderson 1982). Benzer biçimde yeraltısuyu modelleri de gerçeğin bir temsilidir ve bu modeller doğru kurulduklarında yeraltısuyu kaynaklarının işletilmesi ve yönetimi için oldukça yararlıdır. Örneğin yeraltısuyu modeli kullanılarak çeşitli yönetim şemalarını denemek ve mutlak olayların etkilerini kestirmek olanaklıdır. Bu kestirimin doğruluğu modelin arazi koşullarını ne kadar iyi temsil ettiğine bağlıdır. Bu nedenle iyi arazi verileri, kestirim amaçlı modeller için temel gerekliliktir.

Yeraltısuyu akışı modelleri üç ana bölüme ayrılabilir. Bunlar kum tankı modelleri, analog modeller ve matematiksel modellerdir. Kum tankı modelleri sıkışmayan, gözenekli ve yapısında su akışı bulunan bir zeminle doldurulmuş bir tank ile oluşturulur. Analog modeller petrol gibi daha viskoz akışkanların davranışının, bir katıdaki ısı yayılımının ve elektrik akımının incelenmesine yönelik, temel fizik ilkelerine dayanan modellerdir. En çok kullanılan modeller ise matematiksel modellerdir. Bunlar süreklilik denklemine dayanan ve kısmi diferansiyel denklemlerin belirli başlangıç ve sınır koşulları altında çözülmesini esas alan modellerdir. Başlangıç koşulları genelde  $t = 0$  olarak gösterilir ve deneyin veya gözlemin başladığı anda sistemin koşullarını temsil eder. Sınır koşulları ise deney veya gözlem başladıktan sonra  $t > 0$  anında sistemin sadece sınırlarındaki koşullardır. Matematiksel bir model, analitik ve sayısal yöntemler olarak iki tür yöntemle çözülebilir.

## 1.3. Sayısal Yöntemler

Arazi durumunun benzetim için çok karmaşık olması durumunda, bir matematiksel model oluşturmak ve bu modeli analitik olarak çözebilmek için çoğu zaman basitleştirici varsayımlar yapılır. Bu nedenle modelin gerçeği temsil etme yeteneği ve buna bağlı olarak çözümün doğruluğu azalır. Örneğin birçok analitik çözüm, ortamın homojen ve izotrop olduğu varsayımını gerektirir. Bu varsayım da doğada geçerli değildir.

Sayısal yöntemler, analitik olarak çözülemeyen matematiksel modellerde çözümün doğrulunu artırma amacıyla kullanılır. Yeraltısuyu için matematiksel modeller 1800 lü yıllardan beri kullanılmaktadır. 1960 larda sayısal bilgisayarlar kullanılmaya başlanınca sayısal modeller yeraltısuyu çalışmaları için oldukça uygun modeller durumuna gelmiştir. Başlıca sayısal çözüm yöntemleri sonlu farklar yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi, sınır elemanlar yöntemi ve spektral yöntemler olarak sıralanabilir. Bu tezdeki çözümlerde sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır.

Sayısal yöntemler, implisit ve eksplisit olarak iki yaklaşım ile çözülebilir. İmplicit yaklaşımda sistemin tüm noktaları eşzamanlı çözülür. İmplicit yöntemlerin matematiksel formülasyonu ve bilgisayarda programlanması eksplisit yaklaşıma göre daha zordur, bellek gereksinimi ve işlem süresi fazladır. Buna karşı her durumda stabildirler. Eksplisit yaklaşımda ise modeldeki değerlerin bilindiği noktalardan yararlanılarak değerleri bilinmeyen noktalar çözülür. Eksplisit yöntemlerin formülasyonu ve programlanması daha kolay ve bellek gereksinimi ile işlem süresi daha azdır. Fakat sadece küçük  $\Delta t$  zaman aralıkları için stabildirler.

Bu çalışmada geliştirilen matematiksel modelde, komşu zeminlere ait farklı yatay hidrolik iletkenlik katsayılarının harmonik, aritmetik ve geometrik ortalamaları kullanılarak hidrolik yük değerleri sonlu farklar yöntemi ile hesaplanmıştır. Elde edilen hidrolik yük değerleri sayısal örnekler içerisinde değerlendirilmiştir.

## **2. LİTERATÜR TARAMASI**

### **2.1. Yeraltısuyla İlgili Temel Çalışmalar**

1800 lü yıllarda Fransa'da yeraltısuyla çalışmalarında önemli bir gelişme sağlanmış, deney ve gözlem amaçlı çok sayıda artezyen kuyusu açılmıştır. 1856 yılında mühendis Henri Darcy "Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon" adlı kitabını yayımlamıştır. Bu kitabın ekinde Darcy Yasası olarak bilinen ilke yer almaktadır. Buna göre, Darcy yaptığı bir dizi deney sonucunda, verilen bir kum çeşidi için, debinin noktalar arasındaki basınç farkı ve kesit alan ile doğru orantılı, uzaklığın farkı ile ters orantılı olduğunu göstermiştir.

Arsène Jules Etienne Dupuit 1863 yılında Darcy Yasası'ndan yola çıkarak denge koşulları altındaki bir kuyuya olan su akışını tanımlayan bir denklem türetmiştir. 1870 yılında Alman bilimadamı Adolph Thiem, Dupuit'nin formülünü düzenlemiştir. Böylece bir kuyudan pompaj yapılarak ve denge koşullarındaki yakın kuyularda su düzeyi alçalmasının gözlenmesi ile bir akiferin hidrolik özelliklerinin hesaplanması olanaklı duruma gelmiştir. Yeraltısuyla hidroliği için oldukça önemli ve sonraki bilimsel çalışmalara öncülük etmiş bir diğer çalışma L.A. Richards tarafından 1931 de gerçekleştirilmiştir. Richards denklemi, doymun olmayan zeminlerdeki su akışının benzetimi için kullanılmaktadır.

### **2.2. Düşey Yeraltısuyla Hareketini İnceleyen Çalışmalar**

Çok tabakalı zeminlerde tabakalararası düşey yeraltısuyla hareketine ilişkin zemin sınıfı, inceleme alanının büyüklüğü, zeminin doymunluk durumu, zeminin tabakalanma durumu ve bunların incelenmesinde kullanılan yöntemlere ve modellere yönelik çalışmalar yapılmıştır.



Kumlu zeminlerin görelî hidrolîk iletkenliğinin kestirimine ilişkin bir alışma Ruan ve Illangasekare (1999) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu alışmada Mualem (1976) tarafından geliştirilmiş bir hidrolîk iletkenlik modeli ele alınmıştır. Laboratuvar koşullarında bir kum sütünü deneyinde, Mualem modelinin kumlu zeminlerin hidrolîk iletkenliğini temsil ettiği gösterilmiştir. Özellikle kumlu zeminlere yönelik, doğgun olmayan hidrolîk iletkenlik modeli geliştirilmiştir. Bu modelde kum taneleri üniform küreler olarak kabul edilmiştir.

Doğgun olmayan akımların sayısal benzetimi için bloklararası permeabilitelerin kestirimini Gasto vd (2002) ele almıştır. Bu alışmada Warrick (1991) tarafından tanımlandığı gibi, bloklararası iletkenliği hesaplararken her zemin türü ve grid aralığı için ayrı çizelgeler üretmeyi gerektirmeyen ve ağırlıklı değerleri hesaplamada kullanılan basit bir yöntem verilmiştir. Deneyler Brooks ve Corey (1964) ve van Genuchten (1980) hidrolîk fonksiyonları kullanılarak sunulmuştur. Grid aralıklarının fazla olması durumunda bile bloklararası iletkenliği doğru hesaplamak için kullanımı kolay sayısal algoritmalar üretilmiştir.

Severino vd (2003) zemin hidrolîk iletkenliklerinin ortalamaları konusunda laboratuvar yerine arazi ölçeğinde çalışmıştır. Bu çalışmada arazi ölçeğindeki zemin iletkenliği eğrisini kalibre etmek için gereksinim duyulan hidrolîk parametrelerin değişkenliğini ölçmek için bir yöntem verilmiştir. Hidrolîk parametreleri rastgele uzay fonksiyonları olarak kabul eden bir stokastik model, Dagan ve Bresler'in (1979) akım tüpü yaklaşımı benimsenerek türetilmiştir.

Doğgun olmayan zemin hidrolîk özelliklerinin invers kestirimi üzerine Bitterlich vd. (2003) tarafından bir inceleme yapılmıştır. İnvrs yöntemler genellikle sayısal benzetimli verilerin ölçölmüş verilere uygulandığı "ağırlıklı en küçük kareler yaklaşımı"nı kullanır. Anılan incelemede invers yöntemler, doğgun olmayan zemin hidrolîk özelliklerinin sürekli ve çok adımlı sütün deneyleri ile belirlenmesinde kullanılmıştır.

### 2.3. Yatay Yeraltısuyu Hareketini İnceleyen Çalışmalar

Pratikte yeraltısuyunun yataydaki (alansal) hareketi düşeydeki hareketine oranla daha belirgindir. Bu nedenle yeraltısuyunun yataydaki hareketi de çok sayıda yayında incelenmiştir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda sıralanmaktadır.

Freeze ve Witherspoon (1966) kararlı bölgedeki yeraltısuyu akımı için geliştirilmiş bir matematiksel model kullanarak sayısal ve analitik çözümleri karşılaştırmıştır. Bu çalışmada sayısal çözümün analitik çözüme olan avantajları belirtilmiştir. Yine Freeze ve Witherspoon (1967) yaptıkları sonraki çalışmada permeabilite değişiminin ve su tablası yapılandırmasının (konfigurasyonunun) etkisini incelemiştir.

Basıncılı akiferlerdeki kararsız akıma sonlu farklar yönteminin implisit yaklaşımı uygulanarak Bredehoeft ve Pinder (1968) tarafından bir sayısal model geliştirilmiştir. Anılan modelde düşey sızma, düzensiz sınır koşulları ve homojen olmayan akifer koşulları göz önüne alınmıştır. Modelden elde edilen sonuçlar basit geometri akiferlerin analitik sonuçlarıyla ve arazi çalışmalarının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Bredehoeft (1969) daha önce yaptığı çalışmaları da kapsayan bir modelde sonlu farklar yöntemini yeraltısuyu akımı denklemlerine uygulamıştır. Bu modelde, ölçülmüş potansiyel verilerden iletimlilik katsayısı dağılımını hesaplamak için sonlu farklar yönteminin kullanımı incelenmiş ve analog modellerle karşılaştırma yapılmıştır.

Taylor ve Luthin (1969) tarafından yapılmış çalışmada akiferlerin zamana bağlı çözümlenmesi için hesaplamalı bilgisayar yöntemleri önerilmiştir. Bu çalışmada, sonlu farklar yönteminin serbest yüzeyli akiferdeki alçalma için doğru sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Bredehoeft ve Pinder (1970) tarafından yapılmış bir başka çalışmada ise çok akiferli sistemler ele alınmıştır. Çok akiferli yeraltısuyu sistemlerinde alansal akımın sayısal çözümlenmesinin gerçekleştirildiği bu çalışmada sonlu fark yöntemi ile çözüm yapmak için iteratif ADIM (alternating direction implicit method – alternatif yönlü implisit yöntem) kullanılmıştır. Anılan model basıncılı bir tabaka ve iki akifer için üç boyutlu olarak çözülmüştür.

Sızdırmalı ve sızdırmaz artezyen koşullarındaki heterojen akiferlere ilişkin çalışmalarında Prickett ve Lonquist (1971) bir, iki ve üç boyutlu, üniform olmayan yeraltısu benzetimi için genel bir bilgisayar programı geliştirmiştir. Ayrıca artezyenden su tablasına dönüşüm, buharlaşma, yüzey suları – yeraltısu haznesi arası su değişimi, yapay ve doğal beslenme hızı, kuyulardan değişken zamanlı çekim konularına da bu çalışmada yer verilmiştir. Darcy yasası ve kütle korunumu ilkesinin dikkate alındığı sonlu fark modelleri Gauss eliminasyon (yok etme) yöntemi ve iteratif ADIM ile ayrı ayrı çözülmüştür.

Larson ve Trescott (1977) anizotropik akım problemlerinin çözümüne yönelik etkili bir implisit yöntem geliştirmiştir. Bu çalışmada test problemleri için farklı iteratif yöntemler gerektiren hesaplamalar karşılaştırılmıştır.

Kinzelbach (1986) yeraltısu akımı ve çözülmüş madde taşınımına ilişkin bir model sunmuştur. Sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemlerine ilişkin kodlar ve bu kodların uygulamaları verilmiştir.

Kapsamlı bir çalışma Anderson ve Woessner (1992) tarafından gerçekleştirilmiştir. Anılan çalışma FLOWPATH, MODPATH, PATH-3D, AQUIFEM-N, AQUIFEM-1 ve MODFLOW yazılımlarının kullanımını içermektedir.

İki boyutlu kararsız heterojen anizotrop ortamda yeraltısu kirliliğini önlemek amacıyla İrfanoğlu (1994) bir çalışma yapmıştır. Burada sabit grid aralıkları kullanılmış ve problemi çözmek için C<sup>++</sup> dilinde bir benzetim programı yazılmıştır. İmplicit algoritma kullanılarak yeraltısu akımı ve kirlilik iletim denklemleri ayrı ayrı çözülmüştür. Çözümlerde Gauss yok etme yöntemi ve iteratif ADIM kullanılmıştır.

Yılmaz (1999), baraj altından sızma problemini incelemiştir. Problemin çözümünde sabit grid aralıkları kullanılmış, iki boyutlu homojen izotrop kararlı yeraltısu akım denklemleri ETP (elektronik tablolama programı) ile çözülmüştür. ETP çözümünde MS EXCEL yazılımının döngüsel başvuru özelliğinden yararlanılmıştır.

Toprak dolgu barajlarda görülen serbest yüzeyli sızma Ayvaz (2004) tarafından ele alınmıştır. Değişken grid aralıkları kullanılarak kararsız heterojen anizotrop ortamda

sızma olayına ilişkin kısmi diferansiyel denklem ETP kullanılarak ADIM ile çözülmüştür.

Yeraltısuyu akımının iki boyutlu modellenmesine ilişkin çalışmalarında Gürarlan (2005), Gürarlan ve Karahan (2006) bir sayısal model geliştirmiştir. Zamana bağlı kısmi diferansiyel denklem, değişken zemin özellikleri tanımlanarak düzensiz sonlu fark hesap şeması ile implisit çözülmüştür. Bu modelin olumlu yanı Gauss – Seidel iterasyon şeması kullanılması ve böylece yoğun matris işlemlerine girilmemesidir. Ayrıca işlemleri hızlandırmak için SOR (successive over relaxation – ardışık aşırı rahatlama) tekniği seçilmiştir. Bu modelde hidrolik yük değerleri bakımından uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Karahan ve Ayvaz (2005 a), sayısal çözümler için TGMSS (time-dependent groundwater modeling using spreadsheet simulation – elektronik tablolarla benzetimi kullanarak zamana bağlı yeraltısuyu modellemesi) tekniğini geliştirmiştir. Bu, geleneksel çözüm yöntemleri yerine elektronik tablolamayı kullanan pratik bir yöntemdir. Anılan çalışmada düzensiz akifer geometrisi, değişken sınır koşulları, çekim ve/veya besleme değerleri, heterojen akifer parametreleri (hidrolik iletkenlik, özgül depolama katsayısı) gibi etmenlerin TGMSS ile kolayca değerlendirilebileceği gösterilmiştir. Modelde sonlu farklar yöntemi kullanılmış ve TGMSS ile çözülen sayısal örneklerin sonuçları MODFLOW sonuçları ile karşılaştırılarak aralarında tutarlılık olduğu gösterilmiştir. Çözümde hidrolik iletkenlik katsayılarının aritmetik ortalamaları kullanılmıştır.

Karahan ve Ayvaz (2005 b) TGMSS modelini kullandıkları bir başka çalışmada ise izotropik, heterojen akiferde iki boyutlu Darcy akışı, sonlu farklar yöntemi ile çözülmüş ve sayısal uygulamalar verilmiştir. TGMSS nin çözümleri kolaylaştırmadaki etkisi gösterilmiştir. Sonlu farklar yöntemindeki her elemanın orta noktası, elektronik tablodaki bir hücre ile eşleştirilmiştir. Bu çözümde ise hidrolik iletkenlik katsayılarının harmonik ortalamaları kullanılmıştır.

Karahan vd (2006) çeşitli iteratif algoritmalar (Gauss – Seidel, Red – Black, Blok Gauss – Seidel, İteratif ADI) ve doğrudan bir çözüm algoritması (ADI - Thomas algoritması) kullanarak, iki boyutlu yeraltısuyu akımının modellenmesinde iteratif

yöntemlerin üstünlüğünü analitik bir örnek üzerinde doğrulamıştır. Modelde harmonik ortalama kullanılmıştır.

Yukarıda sıralanan çalışmaların içeriklerinden anlaşılacağı üzere, literatürde zeminlerin hidrolik iletkenlikleri ve akış karakteristikleri başlıkları altında toplanabilecek çok sayıda çalışma yer almaktadır. Fakat farklı hidrolik özelliklere sahip komşu zeminlerde bulunan noktalar arasındaki iletkenliklerinin belirlenmesi ile ilgili hesaplamalı yayınlar azdır. Yani komşu zeminlerin hidrolik iletkenlik katsayılarının geçiş arayüzünde hidrolik iletkenlik katsayısının davranışını nasıl etkileyeceği üzerine yeterince çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle bu tezde farklı özellikteki zeminler arasında hidrolik iletkenliklerin kestirimi ve geçiş bölgelerindeki akım davranışı incelenecektir.

### 3. YERALTISUYU AKIMININ TEMEL DENKLEMLERİ VE SONLU FARKLAR YÖNTEMİ

#### 3.1. Yeraltısuyu Akımının Temel Denklemleri

Doğal süreçlerin ve fiziksel olayların çözümlenmesinde matematiksel yaklaşımlara sıkça başvurulmaktadır. Matematiksel olarak ifade edilebilen bu olaylara ilişkin denklemler de analitik veya sayısal yöntemler ile çözümlenerek sonuca ulaşılmaktadır. Benzer biçimde yeraltısuyu akımı da Darcy yasası ve kütle korunumu ilkesinin birlikte kullanımı ile kısmi diferansiyel denklem olarak türetilmiştir.

Heterojen ve anizotrop bir akiferde, sistemde kaynak/yitik olarak sadece kuyu olması durumunda yeraltısuyu akımının üç boyutlu diferansiyel denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( T_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right) \pm \frac{Q}{\Delta x \Delta y} = S \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.1)$$

ile tanımlanabilir. (3.1) denklemi aynı zamanda yeraltısuyu akımının temel denklemdir. Aynı koşullarda, yani heterojen ve anizotrop ortamda, akımın iki boyutlu inceleniyorsa z eksenini göz önüne alınmaz. Bu durumda akım denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) \pm \frac{Q}{\Delta x \Delta y} = S \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.2.a)$$

biçiminde gösterilebilir (Karahan vd 2006). (3.2.a) denkleminde iletkenlik katsayısı yerine hidrolik iletkenlik katsayısı kullanıldığında (3.2.b) denklemi elde edilir. Bu tez kapsamında akım iki boyutlu incelenecektir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) \pm \frac{Q}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot H} = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.2.b)$$

Anizotrop zeminlerde hidrolik iletkenlik katsayısı  $K$  lerin her eksen yönündeki değerleri birbirinden farklıdır. Zemin izotrop kabul edilirse  $K_{xx} = K_{yy} = K$  olacaktır. Buna göre izotrop ve heterojen zeminde akım denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial H}{\partial y} \right) \pm \frac{Q}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot H} = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.3)$$

olur. Heterojenlik ve homojenlik kavramları ise hidrolik iletkenlik katsayısı  $K$  lerin konuma bağlı olarak değişip değişmediği ile ilgilidir. Homojen ortamlarda  $K$  değerleri sabittir, yani konumdan bağımsızdır ve türevin dışında yer alır. Heterojen bir ortamda ise  $K$  değerleri değişkendir, yani konuma bağlıdır ve türevin içinde gösterilir. Buna göre (3.2) denklemi anizotrop ve homojen bir ortamda (3.4) ile gösterilir.

$$K_{xx} \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \pm \frac{Q}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot H} = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.4)$$

Zemin izotrop kabul edilirse (3.4) denkleminde  $K_{xx} = K_{yy} = K$  gibi bir değer alınabilir. Daha sonra her iki yan  $K$  ile bölünerek aynı denklem izotrop ve homojen bir ortamda (3.5) ile gösterilir.

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \pm \frac{Q}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot H \cdot K} = \frac{S_s}{K} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.5)$$

(3.2.a-b) denklemleri iki boyutlu akım için doğal durumu en iyi yansıtan denklemlerdir. Bu nedenle de bilgi-işlem süresi, bellek gereksinimi ve çözüm duyarlılığı (3.3), (3.4) ve (3.5) ten daha fazladır. Yapılan basitleştirmelerin işlem süresini azaltmakta fakat gerçeği temsil gücünü zayıflatmaktadır. Kalınlığı  $b$  olan basınçlı bir akiferin iletkenlik katsayısı  $T$  (3.6) da, depolama katsayısı  $S$  (3.7) de verilmiştir. Serbest yüzeyli akiferlerde  $b=H$  olduğundan  $T=K.H$  dir. Ayrıca (3.6) ve

(3.7) dan  $S_s/K=S/T$  olduğu bilinmektedir. Bu nedenlerle (3.5) denklemi başka bir biçimde (3.8) deki gibi gösterilebilir.

$$T = Kb \quad (3.6)$$

$$S = S_s b \quad (3.7)$$

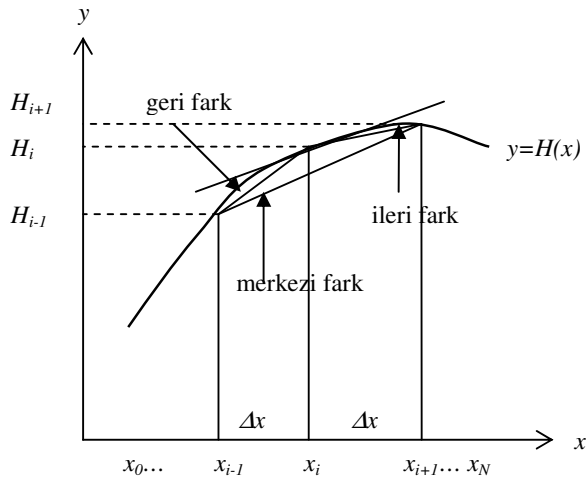
$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \pm \frac{Q}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot T} = \frac{S}{T} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3.8)$$

## 3.2. Sonlu Farklar Yöntemi

### 3.2.1. Doğrusal yaklaşım

$H(x)$ ,  $a \leq x \leq b$  aralığında tanımlı bir fonksiyon olsun.  $[a, b]$  aralığı  $x_0 = a, \dots, x_i, \dots, x_{N+1} = b$  olacak biçimde elemanlara ayrılınsın ve bu  $x$  değerlerine karşılık gelen  $H(x)$  değerleri  $\{H(a), H(x_1), \dots, H(x_i), \dots, H(b)\}$  olsun.  $H(x_i)$  nin değeri genellikle  $H_i$  biçiminde gösterilir.  $H(x)$ , örneğin diferansiyel denklem gibi, bazı matematiksel problemlerin çözümü olarak bilinen durumundayken  $H(x_i)$  değerleri tam olarak hesaplanamaz ve bazı yaklaşımların sonucu olarak verilir. Bu durumda  $\{H_i\}$ ,  $H(x)$  in yaklaşık değeridir ve  $H_i \approx H(x_i)$  olarak gösterilir.

$(x_{i+1} - x_i)$  farkı  $\Delta x$  ile gösterilebilir ve basitleştirme amacıyla  $\Delta x = (b-a)/(N+1)$  olarak sabit alınabilir. Burada  $x_i = a + i \cdot \Delta x$  ve  $i = 0, \dots, N+1$  dir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Sonlu farklar yöntemi



$H(x)$  fonksiyonunun  $x_i$  noktasındaki 1. mertebeden türevi  $\frac{dH}{dx}$ , bu fonksiyona  $x_i$  noktasında teğet olan doğrunun eğimine eşittir (Şekil 3.1) ve bu türev üç farklı yoldan yakınsar.

$x_i$  noktasından  $\Delta x$  kadar ileride olan  $x_{i+1}$  noktası dikkate alınırsa “iki noktalı ileri fark denklemi” (3.9.a) yazılır. İki nokta terimi,  $i$  ve  $i+1$  olmak üzere iki nokta yazıldığından, ileri terimi ise  $x_i$  den sonra bir nokta gereksiniminden kullanılır.

$$\left(\frac{dH}{dx}\right)_i = \frac{H_{i+1} - H_i}{\Delta x} \quad (3.9.a)$$

$x_i$  noktasından  $\Delta x$  kadar gerideki  $x_{i-1}$  noktası için de “iki noktalı geri fark denklemi” (3.9.b) yazılabilir.

$$\left(\frac{dH}{dx}\right)_i = \frac{H_i - H_{i-1}}{\Delta x} \quad (3.9.b)$$

Üçüncü olarak  $x_i$  den bir önceki  $x_{i-1}$  ve  $x_i$  den bir sonraki  $x_{i+1}$  noktaları göz önünde tutulursa “üç noktalı merkezi fark denklemi” (3.9.c) yazılır.

$$\left(\frac{dH}{dx}\right)_i = \frac{H_{i+1} - H_{i-1}}{2\Delta x} \quad (3.9.c)$$

(3.9.a-c) denklemleri, yüksek mertebeden türevlerin sonlu fark gösterimleri için geliştirilebilir. Örneğin  $H(x)$  fonksiyonunun  $i$  noktasındaki ikinci mertebeden türevi

$$\left(\frac{d^2H}{dx^2}\right)_i = \frac{d}{dx}\left(\frac{dH}{dx}\right)_i \quad (3.10)$$

dir. (3.9.a-c) de verilen  $\left(\frac{dH}{dx}\right)_i$  değerleri (3.10) da yerlerine konursa ikinci mertebeden türevler elde edilir. Buna göre (3.9.a) ve (3.10) kullanılarak ileri fark (3.10.a)

$$\begin{aligned} \left(\frac{d^2 H}{dx^2}\right)_i &= \frac{d}{dx} \left(\frac{dH}{dx}\right)_i = \frac{1}{\Delta x} \left[ \left(\frac{dH}{dx}\right)_{i+1} - \left(\frac{dH}{dx}\right)_i \right] = \frac{1}{\Delta x} \left[ \frac{H_{i+2} - H_{i+1}}{\Delta x} - \frac{H_{i+1} - H_i}{\Delta x} \right] \\ \Rightarrow \left(\frac{d^2 H}{dx^2}\right)_i &= \frac{H_{i+2} - 2H_{i+1} + H_i}{\Delta x^2} \end{aligned} \quad (3.10.a)$$

(3.9.b) ve (3.10) kullanılarak geri fark (3.10.b)

$$\begin{aligned} \left(\frac{d^2 H}{dx^2}\right)_i &= \frac{d}{dx} \left(\frac{dH}{dx}\right)_i = \frac{1}{\Delta x} \left[ \left(\frac{dH}{dx}\right)_i - \left(\frac{dH}{dx}\right)_{i-1} \right] = \frac{1}{\Delta x} \left[ \frac{H_i - H_{i-1}}{\Delta x} - \frac{H_{i-1} - H_{i-2}}{\Delta x} \right] \\ \Rightarrow \left(\frac{d^2 H}{dx^2}\right)_i &= \frac{H_i - 2H_{i-1} + H_{i-2}}{\Delta x^2} \end{aligned} \quad (3.10.b)$$

(3.9.c) ve (3.10) kullanılarak merkezi fark (3.10.c)

$$\begin{aligned} \left(\frac{d^2 H}{dx^2}\right)_i &= \frac{d}{dx} \left(\frac{dH}{dx}\right)_i = \frac{1}{2\Delta x} \left[ \left(\frac{\Delta H}{\Delta x}\right)_{i+1} - \left(\frac{\Delta H}{\Delta x}\right)_{i-1} \right] \\ &= \frac{1}{\Delta x} \left\{ \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{\Delta H}{\Delta x}\right)_{i+1} + \left(\frac{\Delta H}{\Delta x}\right)_i \right] - \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{\Delta H}{\Delta x}\right)_i + \left(\frac{\Delta H}{\Delta x}\right)_{i-1} \right] \right\} \end{aligned}$$

(burada da  $\Delta x$  yerine  $\Delta x/2$  alınarak  $x_{i-1/2}$  ve  $x_{i+1/2}$  yarı aralığında)

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{\Delta x} \left[ \left(\frac{\Delta H}{\Delta x}\right)_{i+1/2} - \left(\frac{\Delta H}{\Delta x}\right)_{i-1/2} \right] = \frac{1}{\Delta x} \left[ \frac{H_{i+1} - H_i}{\Delta x} - \frac{H_i - H_{i-1}}{\Delta x} \right] \\ \Rightarrow \left(\frac{d^2 H}{dx^2}\right)_i &= \frac{H_{i+1} - 2H_i + H_{i-1}}{\Delta x^2} \end{aligned} \quad (3.10.c)$$

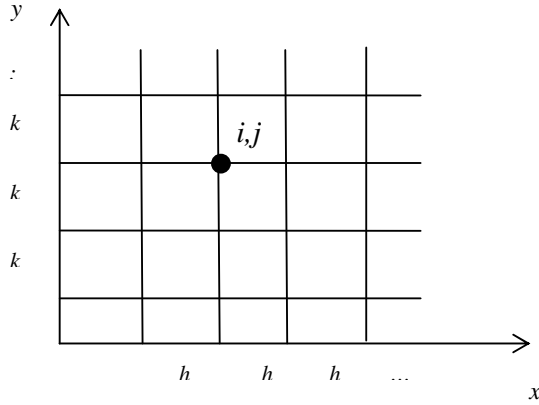
olarak elde edilir.

### 3.2.2. Taylor serisi yaklaşımı ve sayısal hatalar

Doğrusal yaklaşım görece olarak basit bir çözümdür. Bu nedenle sayısal yöntemler için aslında önemli olan yakınsama hatalarını işlemeye katmamaktadır. Sonlu fark çözümleri için en duyarlı yollardan biri Taylor serisi yaklaşımıdır (Lam 1994).

#### 3.2.2.1. Düzenli grid yapısı

Yatay aralıkları  $\Delta x=h$ , düşey aralıkları  $\Delta y=k$  olan ve grid boyutları birbirine eşit bir düzenli grid sistemi Şekil 3.2 de verilmiştir. Adım boyutu, grid genişliği veya grid boyutu olarak adlandırılan  $h$ , serilerin yakınsaması için küçük seçilir.



Şekil 3.2 Sonlu farklar yöntemi için düzenli grid yapısı

Bir  $H(x,y)$  fonksiyonu,  $x_i$  civarında  $(x_i+h)$  ve  $(x_i-h)$  noktalarında Taylor serisine açılırsa sırasıyla

$$H(x+h,y)=H(x,y)+h\frac{\partial H(x,y)}{\partial x}+\frac{h^2}{2!}\frac{\partial^2 H(x,y)}{\partial x^2}+\frac{h^3}{3!}\frac{\partial^3 H(x,y)}{\partial x^3}+\dots \quad (3.11.a)$$

$$H(x-h,y)=H(x,y)-h\frac{\partial H(x,y)}{\partial x}+\frac{h^2}{2!}\frac{\partial^2 H(x,y)}{\partial x^2}-\frac{h^3}{3!}\frac{\partial^3 H(x,y)}{\partial x^3}+\dots \quad (3.11.b)$$

bulunur. Bu denklemler gösterimi basitleştirmek için, iki alt indisli biçimde yazılabilir.  $i$  alt indisi  $x$  yönünü,  $j$  alt indisi  $y$  yönünü göstermek üzere  $x$  e bağlı türevler için

$$H_{i+1,j} = H_{i,j} + h \frac{\partial H_{i,j}}{\partial x} + \frac{h^2}{2!} \frac{\partial^2 H_{i,j}}{\partial x^2} + \frac{h^3}{3!} \frac{\partial^3 H_{i,j}}{\partial x^3} + \dots \quad (3.12.a)$$

$$H_{i-1,j} = H_{i,j} - h \frac{\partial H_{i,j}}{\partial x} + \frac{h^2}{2!} \frac{\partial^2 H_{i,j}}{\partial x^2} - \frac{h^3}{3!} \frac{\partial^3 H_{i,j}}{\partial x^3} + \dots \quad (3.12.b)$$

elde edilir.  $\frac{\partial H_{i,j}}{\partial x}$  terimi (3.12.a) ve (3.12.b) de yalnız bırakıldıktan sonra, ikinci ve daha yüksek mertebeden türevleri içeren terimler kesilirse, birinci mertebeden türev için, ileri fark (3.13.a) ve geri fark (3.13.b) elde edilir. Serilerin yakınsaması için  $h$  yeterince küçük seçildiğinden ikinci ve sonraki kesilen terimler, birinci kesilen terimden daha küçüktür. Bu nedenle de kesilen tüm terimler, birinci kesilen terimdeki  $h$  nin mertebesinde yazılır. Yakınsama hataları da kesme hataları olarak bilindiği için  $h$  nin mertebesinde ve  $O(h)$  olarak gösterilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_{i,j}}{\partial x} &= \frac{H_{i+1,j} - H_{i,j}}{h} - \frac{h}{2!} \frac{\partial^2 H_{i,j}}{\partial x^2} - \frac{h^2}{3!} \frac{\partial^3 H_{i,j}}{\partial x^3} + \dots \\ \Rightarrow \frac{\partial H_{i,j}}{\partial x} &= \frac{H_{i+1,j} - H_{i,j}}{h} + O(h) \end{aligned} \quad (3.13.a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_{i,j}}{\partial x} &= \frac{H_{i,j} - H_{i-1,j}}{h} - \frac{h}{2!} \frac{\partial^2 H_{i,j}}{\partial x^2} - \frac{h^2}{3!} \frac{\partial^3 H_{i,j}}{\partial x^3} + \dots \\ \Rightarrow \frac{\partial H_{i,j}}{\partial x} &= \frac{H_{i,j} - H_{i-1,j}}{h} + O(h) \end{aligned} \quad (3.13.b)$$

Kesme hataları yaklaşık olarak  $h$  ile orantılıdır.  $h$  yarı değerine indirilirse kesme hataları da yaklaşık olarak yarıya iner. Bu tür sonlu fark anlatımlarının birinci mertebeden doğruluğa sahip olduğu söylenebilir. Kesme hatası fiziksel olarak türevin tam değeri ile sonlu fark değeri arasındaki farkı belirtir.

Birinci mertebeden türevin merkezi fark denklemini yazmak için (3.12.a) ve (3.12.b) düzenlenerek (3.13.c) elde edilir. Bu denklemde kesme hatası  $O(h^2)$  dir ve yaklaşık olarak  $h^2$  ile orantılıdır.

$$\frac{\partial H_{i,j}}{\partial x} = \frac{H_{i+1,j} - H_{i-1,j}}{2h} - \frac{h^2}{3!} \frac{\partial^3 H_{i,j}}{\partial x^3} + \dots = \frac{H_{i+1,j} - H_{i-1,j}}{2h} + O(h^2) \quad (3.13.c)$$

(3.13.c) de görüldüğü üzere merkezi fark yaklaşımı ikinci mertebeden doğruluğa sahiptir. Grid boyutu  $h$  yarıya indirildiğinde kesme hatası bir öncekinin 1/4 üne düşer. Bu nedenle merkezi fark, ileri fark veya geri fark yaklaşımlarından daha duyarlı çözüm sağlar. Şekil 3.1 de de türevi temsil eden gerçek eğime en yakın yaklaşımın merkezi fark olduğu görülmektedir.

İkinci mertebeden türevin merkezi farkını elde etmek için (3.13.a) ve (3.13.b) düzenlenerek (3.13.d) yazılabilir. Burada da kesme hatası  $O(h^2)$  dir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_{i,j}}{\partial x^2} &= \frac{H_{i+1,j} - 2H_{i,j} + H_{i-1,j}}{h^2} + \frac{2h^2}{4!} \frac{\partial^4 H_{i,j}}{\partial x^4} - \dots \\ &= \frac{H_{i+1,j} - 2H_{i,j} + H_{i-1,j}}{h^2} + O(h^2) \end{aligned} \quad (3.13.d)$$

Aynı mantıkla elde edilen y yönündeki sonlu fark açılımları da (3.14) te verilmiştir.

İleri fark yaklaşımı,

$$\frac{\partial H_{i,j}}{\partial y} = \frac{H_{i,j+1} - H_{i,j}}{k} + O(k) \quad (3.14.a)$$

Geri fark yaklaşımı,

$$\frac{\partial H_{i,j}}{\partial y} = \frac{H_{i,j} - H_{i,j-1}}{k} + O(k) \quad (3.14.b)$$

Merkezi fark yaklaşımı,

$$\frac{\partial H_{i,j}}{\partial y} = \frac{H_{i,j+1} - H_{i,j-1}}{2k} + O(k^2) \quad (3.14.c)$$

İkinci mertebeden türev merkezi fark yaklaşımı,

$$\frac{\partial^2 H_{i,j}}{\partial y^2} = \frac{H_{i,j+1} - 2H_{i,j} + H_{i,j-1}}{k^2} + O(k^2) \quad (3.14.d)$$

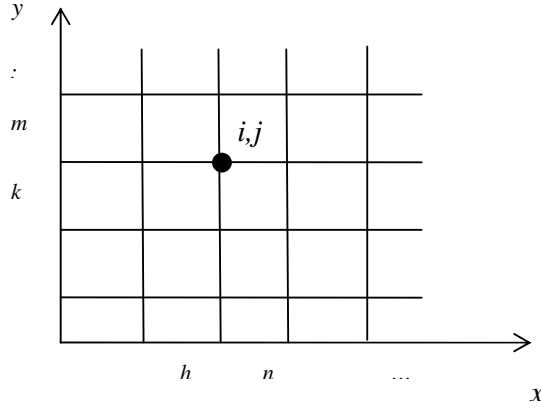
(3.13) ve (3.14) denklemleri çözümlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Fiziksel problemlerin çoğunda kısmi diferansiyel denklemler ikinci mertebeden türevli olduğu için yüksek mertebeden türevlerde sonlu fark yönteminin kullanımı azdır. Doğruluğu daha fazla olan denklemler de fazla terim içerdiğinden ender kullanılırlar. Bunların yerine doğruluğu daha az olan denklemleri kullanıp inceleme alanını daha fazla grid aralığına bölerek aynı duyarlılık sağlanabilir.

### 3.2.2.2. Düzensiz grid yapısı

Ele alınan problemin koşullarının değişken olması durumunda sonucun duyarlılığını artırmak için grid boyutlarının küçük seçilmesi gerekmektedir. Bu durum ise işlem süresini ve bellek gereksinimini artırmaktadır. İki yöntemin eniyilemesi ile değişimin fazla olduğu yerlerde küçük grid boyutu seçilip diğer bölgelerde değişken ve düzenli artan bir grid yapısı uygulanabilir. Bu nedenle de düzensiz grid yapısından söz edilmelidir.

$(i,j)$  noktasından uzaklıkları  $+x$  yönünde  $n$ ,  $-x$  yönünde  $h$ ,  $+y$  yönünde  $m$  ve  $-y$  yönünde  $k$  kadar olacak bir grid yapısı ele alınsın. Burada  $h \neq n$  ve  $m \neq k$  dir (Şekil 3.3).

Birinci mertebeden türevler, (3.13.a) ileri fark ve (3.13.b) geri fark denklemlerine benzer biçimde, yazılarak düzensiz grid yapısı için (3.15.a) ileri fark ve (3.15.b) geri fark denklemleri elde edilir.



Şekil 3.3 Sonlu farklar yöntemi için düzensiz grid yapısı

$$\frac{\partial H_{i,j}}{\partial x} = \frac{H_{i+1,j} - H_{i,j}}{n} + O(n) \quad (3.15.a)$$

$$\frac{\partial H_{i,j}}{\partial x} = \frac{H_{i,j} - H_{i-1,j}}{h} + O(h) \quad (3.15.b)$$

Merkezi farkın elde edilme yöntemi ise farklıdır ve yeniden Taylor açılımı yapılır:

$$H_{i+1,j} = H_{i,j} + n \frac{\partial H_{i,j}}{\partial x} + \frac{n^2}{2!} \frac{\partial^2 H_{i,j}}{\partial x^2} + \frac{n^3}{3!} \frac{\partial^3 H_{i,j}}{\partial x^3} \dots \quad (3.16.a)$$

$$H_{i-1,j} = H_{i,j} - h \frac{\partial H_{i,j}}{\partial x} + \frac{h^2}{2!} \frac{\partial^2 H_{i,j}}{\partial x^2} - \frac{h^3}{3!} \frac{\partial^3 H_{i,j}}{\partial x^3} \dots \quad (3.16.b)$$

(3.16.a) denklemi  $h^2$  ile, (3.16.b) denklemi  $n^2$  ile çarpıldıktan sonra  $h^2 \cdot (3.16.a) - n^2 \cdot (3.16.b)$  farkından düzensiz grid yapısı için birinci mertebeden türevin merkezi fark denklemi (3.16.c) bulunur.

$$\frac{\partial H_{i,j}}{\partial x} = \frac{h^2 H_{i+1,j} - (h^2 - n^2) H_{i,j} - n^2 H_{i-1,j}}{hn(h+n)} + O(hn) \quad (3.16.c)$$

İkinci mertebeden türevin merkezi farkı da  $h \cdot (3.16.a) + n \cdot (3.16.b)$  düzenlemesi ile (3.16.d) biçimde yazılır:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 H_{i,j}}{\partial x^2} &= \frac{2H_{i+1,j}}{n(h+n)} - \frac{2H_{i,j}}{hn} + \frac{2H_{i-1,j}}{h(h+n)} + \frac{2(n-h)}{3!} \frac{\partial^3 H_{i,j}}{\partial x^3} + \frac{2(n^2-nh+h^2)}{4!} \frac{\partial^4 H_{i,j}}{\partial x^4} + \dots \\ \Rightarrow \frac{\partial^2 H_{i,j}}{\partial x^2} &= \frac{2H_{i+1,j}}{n(h+n)} - \frac{2H_{i,j}}{hn} + \frac{2H_{i-1,j}}{h(h+n)} + 0(n-h) \end{aligned} \quad (3.16.d)$$

Düzensiz grid yapısında  $y$  yönüne ait denklemler  $x$  yönüne benzer biçimde oluşturulur. Bu denklemler (3.17) de verilmiştir.

İleri fark yaklaşımı,

$$\frac{\partial H_{i,j}}{\partial y} = \frac{H_{i,j+1} - H_{i,j}}{m} + 0(m) \quad (3.17.a)$$

Geri fark yaklaşımı,

$$\frac{\partial H_{i,j}}{\partial y} = \frac{H_{i,j} - H_{i,j-1}}{k} + 0(k) \quad (3.17.b)$$

Merkezi fark yaklaşımı,

$$\frac{\partial H_{i,j}}{\partial y} = \frac{k^2 H_{i,j+1} - (k^2 - m^2) H_{i,j} - m^2 H_{i,j-1}}{km(k+m)} + 0(km) \quad (3.17.c)$$

İkinci mertebeden türev merkezi fark yaklaşımı,

$$\frac{\partial^2 H_{i,j}}{\partial y^2} = \frac{2H_{i,j+1}}{m(k+m)} - \frac{2H_{i,j}}{km} + \frac{2H_{i,j-1}}{k(k+m)} + 0(k-m) \quad (3.18.d)$$



## 4. MATEMATİKSEL MODEL

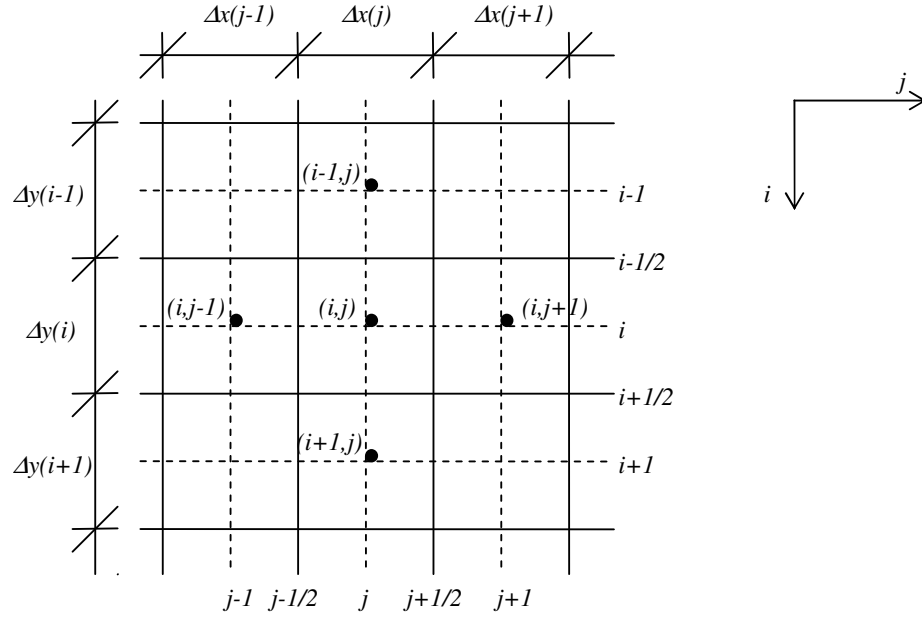
### 4.1. Matematiksel Modelin Kurulması

Heterojen, anizotrop ortamda iki boyutlu yeraltısuyu akımının denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{Q}{\Delta x \Delta y H} = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4.1)$$

olarak verilmişti. Bu bölümde, (4.1) denklemini yeraltısuyu akım problemlerinde sıkça kullanılan sayısal yöntemlerden biri olan sonlu farklar yöntemi ile çözmek için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Sonlu farklar yönteminde değinildiği üzere, Taylor serisi açılımında merkezi fark yaklaşımı ikinci mertebeden doğruluğa sahiptir ve gerçeği temsil gücü ileri fark ve geri fark yaklaşımlarından fazladır. Bu nedenle denklemin açılımında merkezi fark yaklaşımı kullanılmıştır. Ayrıca implisit yaklaşım her durumda stabil olduğu için eksplisit yaklaşım yerine implisit yaklaşım tercih edilmiştir.

Sonlu farklar yönteminde doğal ortam üzerine bir grid yapısı kurulur ve eksen takımı seçilir. Sonuçların duyarlılığını artırmak için küçük grid aralıkları seçmek işlem süresini ve bellek gereksinimini artırmaktadır. Bu nedenle çözümde değişimin fazla olduğu kesimlerde küçük, değişimin daha az olduğu kesimlerde geniş grid aralıkları seçilmiş ve düzensiz grid yapısı kullanılmıştır. Çözümde kullanılan düzensiz grid yapısının molekülü Şekil 4.1 de gösterilmiştir. Grid yapısındaki çözüm noktası yerleşiminde düğüm merkezli ve hücre merkezli yöntemler yaygındır. Hücre merkezli gösterim elektronik tablolama için kolaylık sağladığından çözümde bu yöntem seçilmiştir.



Şekil 4.1 Düzensiz grid yapısının hesap molekülü

#### 4.2. Merkezi Fark Yaklaşımı

(4.1) denkleminin implisit merkezi sonlu fark açılımını yapmak için öncelikle bu denkleme ait terimler açılmalıdır. Buna göre (4.1) in terimleri

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right)_{i,j} &= \frac{\left( K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right)_{i,j+1/2} - \left( K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right)_{i,j-1/2}}{\Delta x(j)} \\ &= \frac{K(i,j+1/2) \frac{H(i,j+1) - H(i,j)}{\frac{1}{2}[\Delta x(j) + \Delta x(j+1)]} - K(i,j-1/2) \frac{H(i,j) - H(i,j-1)}{\frac{1}{2}[\Delta x(j) + \Delta x(j-1)]}}{\Delta x(j)} \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right)_{i,j} &= \frac{\left( K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right)_{i+1/2,j} - \left( K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right)_{i-1/2,j}}{\Delta y(i)} \\ &= \frac{K(i+1/2,j) \frac{H(i+1,j) - H(i,j)}{\frac{1}{2}[\Delta y(i) + \Delta y(i+1)]} - K(i-1/2,j) \frac{H(i,j) - H(i-1,j)}{\frac{1}{2}[\Delta y(i) + \Delta y(i-1)]}}{\Delta y(i)} \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\frac{Q}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot H} = \frac{Q(i, j)}{\Delta x(j) \cdot \Delta y(i) \cdot H(i, j, n)} \quad (4.4)$$

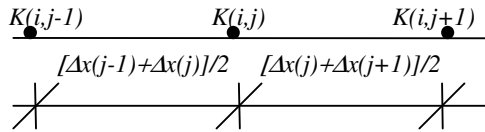
(4.4) te  $n$  zaman adımını göstermektedir. Nonlineerliği ortadan kaldırmak için  $H$  değeri  $n+1$  yerine  $n$  zaman adımında alınmıştır.

$$S_s \frac{\partial H}{\partial t} = S_s(i, j) \frac{H(i, j, n+1) - H(i, j, n)}{\Delta t} \quad (4.5)$$

Birden fazla başlangıç koşulu tanımlamamak için (4.5) in açılımı geri fark yaklaşımı ile yapılmıştır.

Geçiş bölgesindeki hidrolik yük değerlerinin ve akımın davranışını belirleyecek parametreler  $K$  lerin ortalamalarının hangi yöntemle seçileceğidir. Bu nedenle (4.2) ve (4.3) denklemlerindeki  $K(i, j+1/2)$ ,  $K(i, j-1/2)$ ,  $K(i+1/2, j)$  ve  $K(i-1/2, j)$  terimlerinin açılımında  $K$  değerlerinin aritmetik, harmonik ve geometrik ağırlıklı ortalamaları kullanılmıştır. Beşinci Bölüm’de, bu ortalamalar kullanılarak elde edilen sonuçlar üzerine bir değerlendirme yapılacaktır. Ağırlıklı ortalamalar kavramı, değişken grid yapısından dolayı kullanılmıştır. Çünkü değişken grid yapısı nedeniyle komşu noktadaki  $K$  değerlerinin ortalamalara etkisi aynı olmayacaktır. Ağırlıklı ortalamalar hesaplanırken bir eksen üstündeki değerlerle birlikte bu değerler arasındaki uzaklıklar da dikkate alınmaktadır. Ağırlıklı ortalamaların gösterimi Şekil 4.2 de verilmiştir.

Yazımda ve anlatımda bir kolaylık sağlamak amacıyla “hidrolik iletkenlik katsayılarının aritmetik, harmonik ve geometrik ağırlıklı ortalamaları” kavramları buradan sonra kısaca sırasıyla “aritmetik ortalamalar”, “harmonik ortalamalar” ve “geometrik ortalamalar” olarak adlandırılacaktır.



**Şekil 4.2** Ağırlıklı ortalamaların hesabında noktalar arası uzaklıklar

### 4.2.1. Aritmetik ortalamalar

$x$  yönünde  $K(i,j+1/2)$  ve  $K(i,j-1/2)$  terimlerinin aritmetik ortalamaları

$$K(i, j+1/2) = \frac{K(i, j+1) \frac{\Delta x(j+1)}{2} + K(i, j) \frac{\Delta x(j)}{2}}{\frac{\Delta x(j+1)}{2} + \frac{\Delta x(j)}{2}} = \frac{K(i, j+1)\Delta x(j+1) + K(i, j)\Delta x(j)}{\Delta x(j+1) + \Delta x(j)} \quad (4.6.a)$$

$$K(i, j-1/2) = \frac{K(i, j) \frac{\Delta x(j)}{2} + K(i, j-1) \frac{\Delta x(j-1)}{2}}{\frac{\Delta x(j)}{2} + \frac{\Delta x(j-1)}{2}} = \frac{K(i, j)\Delta x(j) + K(i, j-1)\Delta x(j-1)}{\Delta x(j) + \Delta x(j-1)} \quad (4.6.b)$$

olarak hesaplanır. (4.6.a) ve (4.6.b) denklemleri (4.2) de yerlerine yazılırsa

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right)_{i,j} &= 2 \left[ \frac{K(i, j+1)\Delta x(j+1) + K(i, j)\Delta x(j)}{[\Delta x(j+1) + \Delta x(j)]^2 \Delta x(j)} \right] [H(i, j+1) - H(i, j)] \\ &- 2 \left[ \frac{K(i, j)\Delta x(j) + K(i, j-1)\Delta x(j-1)}{[\Delta x(j) + \Delta x(j-1)]^2 \Delta x(j)} \right] [H(i, j) - H(i, j-1)] \end{aligned} \quad (4.6.c)$$

Burada

$$2 \left[ \frac{K(i, j+1)\Delta x(j+1) + K(i, j)\Delta x(j)}{[\Delta x(j+1) + \Delta x(j)]^2 \Delta x(j)} \right] = aa, \quad 2 \left[ \frac{K(i, j)\Delta x(j) + K(i, j-1)\Delta x(j-1)}{[\Delta x(j) + \Delta x(j-1)]^2 \Delta x(j)} \right] = bb$$

olarak kısaltılırsa

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right)_{i,j} = aaH(i, j+1) - (aa + bb)H(i, j) + bbH(i, j-1) \quad (4.6.d)$$

bulunur.

y yönünde  $K(i+1/2, j)$  ve  $K(i-1/2, j)$  terimlerinin aritmetik ortalamaları

$$K(i+1/2, j) = \frac{K(i+1, j) \frac{\Delta y(i+1)}{2} + K(i, j) \frac{\Delta x(i)}{2}}{\frac{\Delta y(i+1)}{2} + \frac{\Delta y(i)}{2}} = \frac{K(i+1, j)\Delta y(i+1) + K(i, j)\Delta y(i)}{\Delta y(i+1) + \Delta y(i)} \quad (4.7.a)$$

$$K(i-1/2, j) = \frac{K(i, j) \frac{\Delta y(i)}{2} + K(i-1, j) \frac{\Delta x(i-1)}{2}}{\frac{\Delta y(i)}{2} + \frac{\Delta y(i-1)}{2}} = \frac{K(i, j)\Delta y(i) + K(i-1, j)\Delta y(i-1)}{\Delta y(i) + \Delta y(i-1)} \quad (4.7.b)$$

olarak hesaplanır. (4.7.a) ve (4.7.b) denklemleri (4.3) de yerlerine yazılırsa

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right)_{i,j} &= 2 \left[ \frac{K(i, j)\Delta y(i) + K(i+1, j)\Delta y(i+1)}{[\Delta y(i) + \Delta y(i+1)]^2 \Delta y(i)} \right] [H(i+1, j) - H(i, j)] \\ &- 2 \left[ \frac{K(i, j)\Delta y(i) + K(i-1, j)\Delta y(i-1)}{[\Delta y(i) + \Delta y(i-1)]^2 \Delta y(i)} \right] [H(i, j) - H(i-1, j)] \end{aligned} \quad (4.7.c)$$

Burada

$$2 \left[ \frac{K(i, j)\Delta y(i) + K(i+1, j)\Delta y(i+1)}{[\Delta y(i) + \Delta y(i+1)]^2 \Delta y(i)} \right] = cc, \quad 2 \left[ \frac{K(i, j)\Delta y(i) + K(i-1, j)\Delta y(i-1)}{[\Delta y(i) + \Delta y(i-1)]^2 \Delta y(i)} \right] = dd$$

olarak kısaltılırsa

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right)_{i,j} = ccH(i+1, j) - (cc + dd)H(i, j) + ddH(i-1, j) \quad (4.7.d)$$

bulunur.

(4.6.d), (4.7.d), (4.4) ve (4.5) denklemlerinde bulunan terimler (4.1) ana denkleminde, zaman adımları da dikkate alınarak, yerlerine yazılırsa

$$\begin{aligned}
& aa.H(i, j+1, n+1) - (aa+bb).H(i, j, n+1) + bb.H(i, j-1, n+1) \\
& + cc.H(i+1, j, n+1) - (cc+dd).H(i, j, n+1) + dd.H(i-1, j, n+1) \\
& + \frac{Q(i, j)}{\Delta x(j).\Delta y(i).H(i, j, n)} = S_s(i, j) \frac{H(i, j, n+1) - H(i, j, n)}{\Delta t}
\end{aligned} \tag{4.8}$$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow & \left[ aa+bb+cc+dd + \frac{S_s(i, j)}{\Delta t} \right].H(i, j, n+1) = \\
& aa.H(i, j+1, n+1) + bb.H(i, j-1, n+1) + cc.H(i+1, j, n+1) + dd.H(i-1, j, n+1) \\
& + \frac{Q(i, j)}{\Delta x(j).\Delta y(i).H(i, j, n)} + S_s(i, j) \frac{H(i, j, n+1) - H(i, j, n)}{\Delta t}
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Burada bir kısaltma yapmak amacıyla

$$\left[ aa+bb+cc+dd + \frac{S_s(i, j)}{\Delta t} \right] = ab \tag{4.10}$$

$$\frac{Q(i, j)}{\Delta x(j).\Delta y(i).H(i, j, n)} + S_s(i, j) \frac{H(i, j, n+1) - H(i, j, n)}{\Delta t} = ac \tag{4.11}$$

olarak gösterilebilir. (4.9) da iterasyon adımı  $m$  gösterilir bilinmeyen değer olan  $H(i, j, n+1)$  yalnız bırakılırsa

$$\begin{aligned}
H^{m+1}(i, j, n+1) = & [aa.H^m(i, j+1, n+1) + bb.H^{m+1}(i, j-1, n+1) + \\
& cc.H^m(i+1, j, n+1) + dd.H^{m+1}(i-1, j, n+1) + ac] / ab
\end{aligned} \tag{4.12}$$

elde edilir.

#### 4.2.2. Harmonik ortalamalar

Bu yaklaşımda da aritmetik ortalamalara benzer bir yol izlenmiştir.  $x$  yönünde  $K(i, j+1/2)$  ve  $K(i, j-1/2)$  terimlerinin harmonik ortalamaları

$$K(i, j+1/2) = \frac{\frac{\Delta x(j) + \Delta x(j+1)}{2}}{\frac{\Delta x(j)}{2} + \frac{\Delta x(j+1)}{2}} = \frac{[\Delta x(j) + \Delta x(j+1)]K(i, j)K(i, j+1)}{\Delta x(j)K(i, j+1) + \Delta x(j+1)K(i, j)} \quad (4.13.a)$$

$$K(i, j-1/2) = \frac{\frac{\Delta x(j) + \Delta x(j-1)}{2}}{\frac{\Delta x(j)}{2} + \frac{\Delta x(j-1)}{2}} = \frac{[\Delta x(j) + \Delta x(j-1)]K(i, j)K(i, j-1)}{\Delta x(j)K(i, j-1) + \Delta x(j-1)K(i, j)} \quad (4.13.b)$$

olarak hesaplanır. (4.13.a) ve (4.13.b) denklemleri (4.2) de yerlerine yazılırsa

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right)_{i,j} &= \left[ \frac{2K(i, j)K(i, j+1)}{[\Delta x(j)K(i, j+1) + \Delta x(j+1)K(i, j)]\Delta x(j)} \right] [H(i, j+1) - H(i, j)] \\ &- \left[ \frac{2K(i, j)K(i, j-1)}{[\Delta x(j)K(i, j-1) + \Delta x(j-1)K(i, j)]\Delta x(j)} \right] [H(i, j) - H(i, j-1)] \end{aligned} \quad (4.13.c)$$

Burada

$$\left[ \frac{2K(i, j)K(i, j+1)}{[\Delta x(j)K(i, j+1) + \Delta x(j+1)K(i, j)]\Delta x(j)} \right] = ee$$

$$\left[ \frac{2K(i, j)K(i, j-1)}{[\Delta x(j)K(i, j-1) + \Delta x(j-1)K(i, j)]\Delta x(j)} \right] = ff$$

olarak kısaltılırsa

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right)_{i,j} = eeH(i, j+1) - (ee + ff)H(i, j) + ffH(i, j-1) \quad (4.13.d)$$

bulunur.

y yönünde  $K(i+1/2,j)$  ve  $K(i-1/2,j)$  terimlerinin harmonik ortalamaları

$$K(i+1/2, j) = \frac{\frac{\Delta y(i) + \Delta y(i+1)}{2}}{\frac{\Delta y(i)}{2} + \frac{\Delta y(i+1)}{2}} = \frac{[\Delta y(i) + \Delta y(i+1)]K(i, j)K(i+1, j)}{\Delta y(i)K(i+1, j) + \Delta y(i+1)K(i, j)} \quad (4.14.a)$$

$$K(i-1/2, j) = \frac{\frac{\Delta y(i) + \Delta y(i-1)}{2}}{\frac{\Delta y(i)}{2} + \frac{\Delta y(i-1)}{2}} = \frac{[\Delta y(i) + \Delta y(i-1)]K(i, j)K(i-1, j)}{\Delta y(i)K(i-1, j) + \Delta y(i-1)K(i, j)} \quad (4.14.b)$$

olarak hesaplanır. (4.14.a) ve (4.14.b) denklemleri (4.3) de yerlerine yazılırsa

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right)_{i,j} &= \left[ \frac{2K(i, j)K(i+1, j)}{[\Delta y(i)K(i+1, j) + \Delta y(i+1)K(i, j)]\Delta y(i)} \right] [H(i+1, j) - H(i, j)] \\ &- \left[ \frac{2K(i, j)K(i-1, j)}{[\Delta y(i)K(i-1, j) + \Delta y(i-1)K(i, j)]\Delta y(i)} \right] [H(i, j) - H(i-1, j)] \end{aligned} \quad (4.14.c)$$

Burada

$$\left[ \frac{2K(i, j)K(i+1, j)}{[\Delta y(i)K(i+1, j) + \Delta y(i+1)K(i, j)]\Delta y(i)} \right] = gg$$

$$\left[ \frac{2K(i, j)K(i-1, j)}{[\Delta y(i)K(i-1, j) + \Delta y(i-1)K(i, j)]\Delta y(i)} \right] = hh$$

olarak kısaltılırsa

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right)_{i,j} = ggH(i+1, j) - (gg + hh)H(i, j) + hhH(i-1, j) \quad (4.14.d)$$

bulunur.



(4.13.d), (4.14.d), (4.4) ve (4.5) denklemlerinde bulunan terimler (4.1) ana denkleminde, zaman adımları da dikkate alınarak, yerlerine yazılırsa

$$\begin{aligned}
& ee.H(i, j+1, n+1) - (ee + ff).H(i, j, n+1) + ff.H(i, j-1, n+1) \\
& + gg.H(i+1, j, n+1) - (gg + hh).H(i, j, n+1) + hh.H(i-1, j, n+1) \\
& + \frac{Q(i, j)}{\Delta x(j).\Delta y(i).H(i, j, n)} = S_s(i, j) \frac{H(i, j, n+1) - H(i, j, n)}{\Delta t}
\end{aligned} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow & \left[ ee + ff + gg + hh + \frac{S_s(i, j)}{\Delta t} \right].H(i, j, n+1) = \\
& ee.H(i, j+1, n+1) + ff.H(i, j-1, n+1) + gg.H(i+1, j, n+1) + hh.H(i-1, j, n+1) \\
& + \frac{Q(i, j)}{\Delta x(j).\Delta y(i).H(i, j, n)} + S_s(i, j) \frac{H(i, j, n+1) - H(i, j, n)}{\Delta t}
\end{aligned} \quad (4.16)$$

(4.16) deki terimler

$$\left[ ee + ff + gg + hh + \frac{S_s(i, j)}{\Delta t} \right] = ad \quad (4.17)$$

$$\frac{Q(i, j)}{\Delta x(j).\Delta y(i).H(i, j, n)} + S_s(i, j) \frac{H(i, j, n+1) - H(i, j, n)}{\Delta t} = ae \quad (4.18)$$

olarak kısaltılırsa yazımda kolaylık sağlanabilir. (4.16) da  $H(i, j, n+1)$  yalnız bırakılırsa

$$\begin{aligned}
H^{m+1}(i, j, n+1) &= [ee.H^m(i, j+1, n+1) + ff.H^{m+1}(i, j-1, n+1) + \\
& gg.H^m(i+1, j, n+1) + hh.H^{m+1}(i-1, j, n+1) + ae] / ad
\end{aligned} \quad (4.19)$$

elde edilir.

### 4.2.3. Geometrik ortalamalar

Geometrik ortalama yaklaşımda da aritmetik ve harmonik ortalamalara benzer bir yol izlenmiştir.  $x$  yönünde  $K(i, j+1/2)$  ve  $K(i, j-1/2)$  terimlerinin geometrik ortalamaları

$$K(i, j+1/2) = \left[ K(i, j)^{\Delta x(j)/(\Delta x(j)+\Delta x(j+1))} \right] * \left[ K(i, j+1)^{\Delta x(j+1)/(\Delta x(j)+\Delta x(j+1))} \right] \quad (4.20.a)$$

$$K(i, j-1/2) = \left[ K(i, j)^{\Delta x(j)/(\Delta x(j)+\Delta x(j-1))} \right] * \left[ K(i, j-1)^{\Delta x(j-1)/(\Delta x(j)+\Delta x(j-1))} \right] \quad (4.20.b)$$

dir. (4.20.a) ve (4.20.b) denklemleri (4.2) de yerlerine yazılarak

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right)_{i,j} &= \frac{\left[ K(i, j)^{\Delta x(j)/(\Delta x(j)+\Delta x(j+1))} \right] * \left[ K(i, j+1)^{\Delta x(j+1)/(\Delta x(j)+\Delta x(j+1))} \right]}{\frac{\Delta x(j)}{2} [\Delta x(j) + \Delta x(j+1)]} * [H(i, j+1) - H(i, j)] \\ &- \frac{\left[ K(i, j)^{\Delta x(j)/(\Delta x(j)+\Delta x(j-1))} \right] * \left[ K(i, j-1)^{\Delta x(j-1)/(\Delta x(j)+\Delta x(j-1))} \right]}{\frac{\Delta x(j)}{2} [\Delta x(j) + \Delta x(j-1)]} * [H(i, j) - H(i, j-1)] \end{aligned} \quad (4.20.c)$$

elde edilir. (4.20.c) de

$$\begin{aligned} \frac{\left[ K(i, j)^{\Delta x(j)/(\Delta x(j)+\Delta x(j+1))} \right] * \left[ K(i, j+1)^{\Delta x(j+1)/(\Delta x(j)+\Delta x(j+1))} \right]}{\frac{\Delta x(j)}{2} [\Delta x(j) + \Delta x(j+1)]} &= AA \\ \frac{\left[ K(i, j)^{\Delta x(j)/(\Delta x(j)+\Delta x(j-1))} \right] * \left[ K(i, j-1)^{\Delta x(j-1)/(\Delta x(j)+\Delta x(j-1))} \right]}{\frac{\Delta x(j)}{2} [\Delta x(j) + \Delta x(j-1)]} &= BB \end{aligned}$$

biçiminde kısaltmalar yapılırsa

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right)_{i,j} = AA.H(i, j+1) - (AA + BB).H(i, j) + BB.H(i, j-1) \quad (4.20.d)$$

bulunur.

y yönünde  $K(i+1/2, j)$  ve  $K(i-1/2, j)$  terimlerinin geometrik ortalamaları

$$K(i+1/2, j) = \left[ K(i, j)^{\Delta y(i)/(\Delta y(i)+\Delta y(i+1))} \right] * \left[ K(i+1, j)^{\Delta y(i+1)/(\Delta y(i)+\Delta y(i+1))} \right] \quad (4.21.a)$$

$$K(i-1/2, j) = \left[ K(i, j)^{\Delta y(i)/(\Delta y(i)+\Delta y(i-1))} \right] * \left[ K(i-1, j)^{\Delta y(i-1)/(\Delta y(i)+\Delta y(i-1))} \right] \quad (4.21.b)$$

bulunur. (4.21.a) ve (4.21.b) denklemleri (4.3) de yerine yazılırsa

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right)_{i,j} = \left[ \frac{[K(i, j)^{\Delta y(i)/(\Delta y(i)+\Delta y(i+1))}] * [K(i+1, j)^{\Delta y(i+1)/(\Delta y(i)+\Delta y(i+1))}]}{\frac{\Delta y(i)}{2} [\Delta y(i) + \Delta y(i+1)]} \right] [H(i+1, j) - H(i, j)]$$

$$- \left[ \frac{[K(i, j)^{\Delta y(i)/(\Delta y(i)+\Delta y(i-1))}] * [K(i-1, j)^{\Delta y(i-1)/(\Delta y(i)+\Delta y(i-1))}]}{\frac{\Delta y(i)}{2} [\Delta y(i) + \Delta y(i-1)]} \right] [H(i, j) - H(i-1, j)] \quad (4.21.c)$$

bulunur. Burada

$$\left[ \frac{[K(i, j)^{\Delta y(i)/(\Delta y(i)+\Delta y(i+1))}] * [K(i+1, j)^{\Delta y(i+1)/(\Delta y(i)+\Delta y(i+1))}]}{\frac{\Delta y(i)}{2} [\Delta y(i) + \Delta y(i+1)]} \right] = CC$$

$$\left[ \frac{[K(i, j)^{\Delta y(i)/(\Delta y(i)+\Delta y(i-1))}] * [K(i-1, j)^{\Delta y(i-1)/(\Delta y(i)+\Delta y(i-1))}]}{\frac{\Delta y(i)}{2} [\Delta y(i) + \Delta y(i-1)]} \right] = DD$$

olarak kısaltılırsa

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right)_{i,j} = CC.H(i+1, j) - (CC + DD).H(i, j) + DD.H(i-1, j) \quad (4.21.d)$$

denklemine ulaşılır.

(4.20.d), (4.21.d), (4.4) ve (4.5) denklemlerindeki terimler (4.1) ana denkleminde, zaman adımları da dikkate alınarak, yerlerine yazılırsa

$$AA.H(i, j+1, n+1) - (AA + BB).H(i, j, n+1) + BB.H(i, j-1, n+1)$$

$$+ CC.H(i+1, j, n+1) - (CC + DD).H(i, j, n+1) + DD.H(i-1, j, n+1)$$

$$+ \frac{Q(i, j)}{\Delta x(j) \cdot \Delta y(i) \cdot H(i, j, n)} = S_s(i, j) \frac{H(i, j, n+1) - H(i, j, n)}{\Delta t} \quad (4.22)$$

$$\Rightarrow \left[ AA + BB + CC + DD + \frac{S_s(i, j)}{\Delta t} \right] \cdot H(i, j, n+1) =$$

$$AA \cdot H(i, j+1, n+1) + BB \cdot H(i, j-1, n+1) + CC \cdot H(i+1, j, n+1) + DD \cdot H(i-1, j, n+1)$$

$$+ \frac{Q(i, j)}{\Delta x(j) \cdot \Delta y(i) \cdot H(i, j, n)} + S_s(i, j) \frac{H(i, j, n+1) - H(i, j, n)}{\Delta t} \quad (4.23)$$

(4.23) teki terimler

$$\left[ AA + BB + CC + DD + \frac{S_s(i, j)}{\Delta t} \right] = AB \quad (4.24)$$

$$\frac{Q(i, j)}{\Delta x(j) \cdot \Delta y(i) \cdot H(i, j, n)} + S_s(i, j) \frac{H(i, j, n+1) - H(i, j, n)}{\Delta t} = AC \quad (4.25)$$

olarak kısaltılabilir. (4.23) de  $H(i, j, n+1)$  yalnız bırakılırsa

$$H^{m+1}(i, j, n+1) = [AA \cdot H^m(i, j+1, n+1) + BB \cdot H^{m+1}(i, j-1, n+1) +$$

$$CC \cdot H^m(i+1, j, n+1) + DD \cdot H^{m+1}(i-1, j, n+1) + AC] / AB \quad (4.26)$$

elde edilir.

### 4.3. İteratif Çözüm

(4.12), (4.19) ve (4.26) denklemlerini çözmek için iteratif yöntemler, matris yöntemleri veya bu yöntemlerin birleşimi ile elde edilen yöntemler kullanılabilir. Anılan yöntemler kullanılırken olumlu ve olumsuz yanları göz önünde tutulmalıdır. Matris yöntemlerinin olumlu yanları başlangıç değeri, iterasyon parametresi ve hata toleransı gerektirmemeleri ve işlemleri bir kez yapmalarıdır. Olumsuz yanları ise hesaplama süresinin ve bellek gereksinimlerinin fazla olmasıdır. İteratif yöntemlerin olumlu yanları depolama gereksiniminin ve hesaplama sürelerinin az olmasıdır. Olumsuz

yanları da başlangıç değeri, iterasyon parametresi, hata toleransı ve iyi koşullanmış bir matris yapısı gerektirmeleridir (Gürarlan 2005).

Matris yöntemlerinin veri depolama gereksinimlerinin fazla olması nedeniyle yeraltısuyu çözümlemelerinde iteratif yöntemlerle daha sık karşılaşılmaktadır. İteratif yöntemler nokta ve blok olarak ikiye ayrılır. Nokta iteratif yöntemler eksplisit, blok iteratif yöntemler implisit karakterlidir (Ames 1992). Yani sistemin genel çözümü implisit olmasına karşın iteratif çözüm implisit veya eksplisit karakterli olabilir.

İteratif işlemleri çabuklaştırmak için literatürde Lyusternik, Aitken, Chebyshev, Eşlenik Eğim, SOR gibi teknikler bulunmaktadır. Bunların arasında SOR tekniği daha etkin çözüm sağladığı için kullanımı daha yaygındır (Gürarlan 2005).

Bunlara göre,  $(i,j)$  noktasında herhangi bir zaman adımında,  $m$  inci iterasyondaki hidrolik yük değeri  $H$ ,  $m+1$  inci iterasyondaki hidrolik yük değeri  $Ha$  ile gösterilirse (4.12), (4.19) ve (4.26) denklemlerine ilişkin Gauss-Seidel iterasyon şemaları sırasıyla

$$Ha(i, j) = [aa.H(i, j + 1) + bb.Ha(i, j - 1) + cc.H(i + 1, j) + dd.Ha(i - 1, j) + ac] / ab \quad (4.12.a)$$

$$Ha(i, j) = [ee.H(i, j + 1) + ff.Ha(i, j - 1) + gg.H(i + 1, j) + hh.Ha(i - 1, j) + ae] / ad \quad (4.19.a)$$

$$Ha(i, j) = [AA.H(i, j + 1) + BB.Ha(i, j - 1) + CC.H(i + 1, j) + DD.Ha(i - 1, j) + AC] / AB \quad (4.26.a)$$

olarak yazılır. Bu denklemlerde  $m$  inci iterasyonda bilinen noktaların,  $m+1$  inci iterasyonda bilinmeyen noktaların değerleri kullanılmaktadır.

Çözüm algoritmasında (4.12.a), (4.19.a) ve (4.26.a) denklemlerinde  $|Ha(i, j) - H(i, j)| \leq eps$  koşulu sağlandığında iterasyon döngüsünden çıkılır ve bir sonraki zaman adımına geçilir. Burada  $eps$  belli bir tolerans değeridir. Yeni zaman

adımına geçildiği anda yine iterasyon döngüsü başlar ve her zaman adımında bu işlem yinelenir. SOR tekniği ile hızlandırma adımının denklemleri de

$$H_a(i, j) = H(i, j) * (1 - r) + H_a(i, j) * r \quad (4.27)$$

olarak verilir (Gürarlan 2005, Gürarlan ve Karahan 2006, Karahan vd 2006). Literatürde  $r$  katsayısı sınır koşulları ve sistem geometrisi gibi parametrelere bağlı olarak seçilmektedir. Bu tezdeki sayısal uygulamalarda Örnek 1 ve Örnek 2 de  $r=1,8$ ; Örnek 3 ve Örnek 4 te  $r=1,5$  değerleri kullanılmıştır.

## 5. SAYISAL UYGULAMALAR

### 5.1. Sayısal Uygulamalarda Kullanılan Yöntem

Bu bölümde yeraltısuyu akımının temel denklemleri düzenli geometride değişken ve sabit grid yapısı kullanılarak analitik ve sayısal yöntemlerle çözülmüş ve bu çözümlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Denklemim implisit açılımı nedeniyle karşılaşılan matris işlemlerinden kaçınmak için iteratif yöntemlerin kullanımı daha uygundur (Karahan vd 2006). TGMSS modelinde Karahan ve Ayvaz (2005) implisit bir yaklaşım olan iteratif ADIM kullanılmış ve böylece herhangi bir kod gerektirmeyen stabil bir çözüm tekniği (elektronik tablolama programı) oluşturulmuştur.

Bu çalışmada ise implisit sonlu farklar yöntemi ile elde edilen denklem sistemi iteratif bir teknik ile VISUAL BASIC dilinde bir kod yazılarak çözülmüştür. Zamana bağlı iki boyutlu yeraltısuyu akım denklemleri değişken zemin koşullarına göre çözülmüştür. Böylece veri sayfalarında yapılan herhangi bir değişiklik aynı anda çözüm sayfasına ve çözüm grafiklerine yansıtılmaktadır.

### 5.2. Örnek 1

Geliştirilen sayısal modelin doğruluğunu sınamak için Örnek 1 de, yeraltısuyu akımı temel denkleminin sayısal çözümü analitik çözümle karşılaştırılmıştır. Analitik yöntem ele alınan problemin gerçek çözümünü vermektedir. Hesaplarda inceleme alanı  $1*1 \text{ br}^2$  dir. Bu alan  $\Delta x=\Delta y=0,05 \text{ br}$  olarak her iki yönde 20 eşit parçaya bölünerek çözümde sabit grid yapısı kullanılmıştır. Maksimum iterasyon sayısı  $maxiter=10000$ , maksimum hata toleransı  $eps=0,000001$ , özgül depolama katsayısı  $S_s=1,00$ , maksimum hesap süresi  $tmax=3600$  gün, hesap adımı  $dt=3600$  gün olarak alınmıştır.

Kararlı yeraltısuyu akımına ilişkin en basit denklem  $\nabla(T.\nabla H) = 0$  dir. İletimlilik katsayısı  $T(x, y) = (1 + 0,2x + 0,4y + 0,15xy)^2$  olarak alındığı zaman bu denklemin analitik çözümü  $H(x, y) = \frac{xy}{1 + 0,2x + 0,4y + 0,15xy}$  olarak verilmiştir (Lesnic ve diğ., 1998). Buna göre Örnek 1 için yazılan kodda ilk olarak denklemdeki  $x$  ve  $y$  değişkenlerinin katsayılarına bağlı olarak değişen  $H$  leri içeren analitik çözüm sayfası düzenlenmiştir. Bu katsayılar  $a=1$ ;  $b=0,2$ ;  $c=0,4$ ;  $d=0,15$  olarak alınmıştır.

Sayısal çözümler ise Dördüncü Bölüm'de tanımlanan ve hidrolik iletkenlik katsayılarının aritmetik, harmonik ve geometrik ortalamalarına bağlı olarak hücre merkezli olarak yapılmıştır. Çözüm sayfasında bu üç ortalama için birer hesap butonu yer almaktadır. Her bir ortalamaya ait buton ile çözüm sayfasında  $H$  değerleri ve grafikler elde edilmektedir. Kodda ayrıca depolama katsayısı, % görelî hata (% RE) ve hidrolik iletkenlik katsayısı sayfaları bulunmaktadır. Sayısal çözüm algoritmasının kullandığı hidrolik iletkenlik katsayısı değerleri de yukarıda verilen  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  katsayılarına bağlı olarak fonksiyonel bir değişim göstermektedir (Ek 1).

Analitik ve sayısal sonuçlar arasında karşılaştırma yapmak için yararlanılan bazı hata ölçütlerinin tanımları aşağıda verilmiştir.

1) Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error):  $MAE = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L |H_{obs} - H_{est}|$  (5.1)

2) Hata Karelerinin Ortalaması (Mean Square Error):  $MSE = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (H_{obs} - H_{est})^2$  (5.2)

3) Hata Karelerinin Ortalamasının Karekökü (Root Mean Square Error):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (H_{obs} - H_{est})^2}$$
 (5.3)



4) Düzeltilmiş Verimlilik Katsayısı (Modified Coefficient of Efficiency):

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^L |H_{obs} - H_{est}|}{\sum_{i=1}^L |H_{obs} - \overline{H}_{obs}|} \quad (5.4)$$

(5.1) – (5.4) te verilen terimlerin açılımları:

$H_{obs}$ : Analitik çözümdeki hidrolik yük değeri

$H_{est}$ : Sayısal çözümdeki hidrolik yük değeri

$\overline{H}_{obs}$ : Analitik çözümdeki hidrolik yük değerlerinin ortalaması

$L$ : Eleman sayısı

Çözümde yukarıdaki hata ölçütleri ile yapılan karşılaştırmada sayısal yöntem ile analitik yöntem arasında en küçük hata miktarı geometrik ortalamada görülmüştür (Tablo 5.1). Ayrıca sayısal yöntemdeki harmonik, aritmetik ve geometrik ortalamaların sonuçları analitik yöntemin sonuçları ile yaklaşık aynı değerleri vermiştir. Bu durum sayısal modellemenin doğruluğunu göstermektedir (Şekil 5.1.a-d). Analitik ve sayısal çözüm sayfalarında  $y=0,50$  için  $x$  yönünde A-A ve  $x=0,50$  için  $y$  yönünde B-B kesitleri alınmıştır. Bu kesitlerde çözüme ilişkin hidrolik yük değerleri konuma bağlı olarak çizelge (Tablo 5.2, Tablo 5.3) ve grafik (Şekil 5.2.a, Şekil 5.2.b) biçiminde verilmiştir. Virgülden sonraki basamak sayısı artırıldığında da analitik çözüme en yakın değerleri geometrik çözümün verdiği görülmektedir. Bu durum en az hata miktarı ile geometrik çözümde karşılaşılmamasını doğrulamaktadır.

**Tablo 5.1** Sayısal çözüm ve analitik çözümün hata ölçütleriyle karşılaştırılması (Ör.1)

	RMSE	MAE	MSE	E	r	%RE MAX	%RE ORT
H.O	3,87E-05	6,41E-04	1,49E-09	1,00E+00	1,00	8,53E-03	1,80E-03
A.O	3,85E-05	6,46E-04	1,48E-09	1,00E+00	1,00	7,06E-03	1,84E-03
G.O	2,46E-06	3,05E-05	6,04E-12	1,00E+00	1,00	4,39E-03	1,37E-04

Tablo 5.1 de r korelasyon katsayısını göstermektedir.

y/x	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
1,00	0,0000	0,0353	0,0697	0,1033	0,1361	0,1681	0,1993	0,2299	0,2597	0,2889	0,3175	0,3454	0,3727	0,3994	0,4255	0,4511	0,4762	0,5007	0,5248	0,5483	0,5714
0,95	0,0000	0,0340	0,0672	0,0996	0,1312	0,1620	0,1922	0,2217	0,2505	0,2787	0,3062	0,3331	0,3595	0,3853	0,4106	0,4353	0,4595	0,4832	0,5064	0,5292	0,5515
0,90	0,0000	0,0327	0,0646	0,0957	0,1261	0,1558	0,1849	0,2132	0,2410	0,2681	0,2946	0,3205	0,3459	0,3708	0,3951	0,4189	0,4423	0,4651	0,4875	0,5095	0,5310
0,85	0,0000	0,0313	0,0619	0,0918	0,1210	0,1495	0,1773	0,2045	0,2311	0,2572	0,2826	0,3075	0,3319	0,3558	0,3792	0,4020	0,4245	0,4464	0,4680	0,4891	0,5097
0,80	0,0000	0,0299	0,0592	0,0877	0,1156	0,1429	0,1695	0,1955	0,2210	0,2459	0,2703	0,2941	0,3175	0,3403	0,3627	0,3846	0,4061	0,4271	0,4478	0,4680	0,4878
0,75	0,0000	0,0285	0,0563	0,0835	0,1101	0,1361	0,1614	0,1863	0,2105	0,2343	0,2575	0,2803	0,3025	0,3243	0,3457	0,3666	0,3871	0,4072	0,4269	0,4462	0,4651
0,70	0,0000	0,0270	0,0534	0,0792	0,1044	0,1290	0,1531	0,1767	0,1997	0,2223	0,2443	0,2659	0,2871	0,3078	0,3281	0,3480	0,3675	0,3866	0,4053	0,4236	0,4416
0,65	0,0000	0,0255	0,0504	0,0747	0,0985	0,1218	0,1445	0,1668	0,1885	0,2098	0,2307	0,2511	0,2711	0,2907	0,3099	0,3287	0,3471	0,3652	0,3829	0,4003	0,4173
0,60	0,0000	0,0239	0,0473	0,0701	0,0924	0,1143	0,1356	0,1565	0,1770	0,1970	0,2166	0,2358	0,2546	0,2730	0,2911	0,3087	0,3261	0,3431	0,3598	0,3761	0,3922
0,55	0,0000	0,0223	0,0441	0,0654	0,0862	0,1065	0,1265	0,1460	0,1650	0,1837	0,2020	0,2199	0,2375	0,2547	0,2716	0,2881	0,3043	0,3202	0,3358	0,3511	0,3661
0,50	0,0000	0,0206	0,0407	0,0604	0,0797	0,0985	0,1170	0,1350	0,1527	0,1700	0,1869	0,2035	0,2198	0,2357	0,2513	0,2667	0,2817	0,2964	0,3109	0,3251	0,3390
0,45	0,0000	0,0189	0,0373	0,0553	0,0730	0,0902	0,1071	0,1237	0,1399	0,1557	0,1713	0,1865	0,2014	0,2160	0,2304	0,2445	0,2582	0,2718	0,2851	0,2981	0,3109
0,40	0,0000	0,0171	0,0337	0,0500	0,0660	0,0816	0,0969	0,1119	0,1266	0,1410	0,1550	0,1688	0,1824	0,1956	0,2086	0,2214	0,2339	0,2462	0,2582	0,2701	0,2817
0,35	0,0000	0,0152	0,0300	0,0446	0,0588	0,0727	0,0864	0,0997	0,1128	0,1256	0,1382	0,1505	0,1626	0,1744	0,1861	0,1975	0,2086	0,2196	0,2304	0,2410	0,2513
0,30	0,0000	0,0132	0,0262	0,0389	0,0513	0,0635	0,0754	0,0871	0,0985	0,1097	0,1207	0,1315	0,1421	0,1524	0,1626	0,1726	0,1824	0,1920	0,2014	0,2107	0,2198
0,25	0,0000	0,0112	0,0222	0,0330	0,0436	0,0539	0,0640	0,0740	0,0837	0,0932	0,1026	0,1117	0,1207	0,1295	0,1382	0,1467	0,1550	0,1632	0,1713	0,1792	0,1869
0,20	0,0000	0,0092	0,0181	0,0269	0,0355	0,0440	0,0522	0,0603	0,0683	0,0760	0,0837	0,0912	0,0985	0,1057	0,1128	0,1198	0,1266	0,1333	0,1399	0,1463	0,1527
0,15	0,0000	0,0070	0,0139	0,0206	0,0272	0,0336	0,0399	0,0461	0,0522	0,0582	0,0640	0,0698	0,0754	0,0809	0,0864	0,0917	0,0969	0,1021	0,1071	0,1121	0,1170
0,10	0,0000	0,0048	0,0094	0,0140	0,0185	0,0229	0,0272	0,0314	0,0355	0,0396	0,0436	0,0475	0,0513	0,0551	0,0588	0,0624	0,0660	0,0695	0,0730	0,0764	0,0797
0,05	0,0000	0,0024	0,0048	0,0071	0,0094	0,0117	0,0139	0,0160	0,0181	0,0202	0,0222	0,0242	0,0262	0,0281	0,0300	0,0319	0,0337	0,0355	0,0373	0,0390	0,0407
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Şekil 5.1.a Analitik yöntem çözüm sayfası (Ör.1)

dy/dx	0,00	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,00
1,00	0,0000	0,0353	0,0697	0,1033	0,1361	0,1681	0,1993	0,2299	0,2597	0,2889	0,3175	0,3454	0,3727	0,3994	0,4255	0,4511	0,4762	0,5007	0,5248	0,5483	0,5714
0,95	0,0000	0,0340	0,0672	0,0996	0,1312	0,1620	0,1922	0,2217	0,2505	0,2787	0,3062	0,3331	0,3595	0,3853	0,4106	0,4353	0,4595	0,4832	0,5064	0,5292	0,5515
0,90	0,0000	0,0327	0,0646	0,0957	0,1261	0,1558	0,1849	0,2132	0,2410	0,2681	0,2946	0,3205	0,3459	0,3708	0,3951	0,4189	0,4423	0,4651	0,4875	0,5095	0,5310
0,85	0,0000	0,0313	0,0619	0,0918	0,1210	0,1495	0,1773	0,2045	0,2311	0,2572	0,2826	0,3075	0,3319	0,3558	0,3792	0,4021	0,4245	0,4464	0,4680	0,4891	0,5097
0,80	0,0000	0,0299	0,0592	0,0877	0,1156	0,1429	0,1695	0,1955	0,2210	0,2459	0,2703	0,2941	0,3175	0,3403	0,3627	0,3846	0,4061	0,4271	0,4478	0,4680	0,4878
0,75	0,0000	0,0285	0,0563	0,0835	0,1101	0,1361	0,1614	0,1863	0,2105	0,2343	0,2575	0,2803	0,3025	0,3243	0,3457	0,3666	0,3871	0,4072	0,4269	0,4462	0,4651
0,70	0,0000	0,0270	0,0534	0,0792	0,1044	0,1290	0,1531	0,1767	0,1997	0,2223	0,2443	0,2659	0,2871	0,3078	0,3281	0,3480	0,3675	0,3866	0,4053	0,4236	0,4416
0,65	0,0000	0,0255	0,0504	0,0747	0,0985	0,1218	0,1445	0,1668	0,1885	0,2098	0,2307	0,2511	0,2711	0,2907	0,3099	0,3287	0,3471	0,3652	0,3829	0,4003	0,4173
0,60	0,0000	0,0239	0,0473	0,0701	0,0925	0,1143	0,1356	0,1565	0,1770	0,1970	0,2166	0,2358	0,2546	0,2730	0,2911	0,3088	0,3261	0,3431	0,3598	0,3761	0,3922
0,55	0,0000	0,0223	0,0441	0,0654	0,0862	0,1065	0,1265	0,1460	0,1650	0,1837	0,2020	0,2199	0,2375	0,2547	0,2716	0,2881	0,3043	0,3202	0,3358	0,3511	0,3661
0,50	0,0000	0,0206	0,0407	0,0604	0,0797	0,0985	0,1170	0,1350	0,1527	0,1700	0,1869	0,2035	0,2198	0,2357	0,2513	0,2667	0,2817	0,2964	0,3109	0,3251	0,3390
0,45	0,0000	0,0189	0,0373	0,0553	0,0730	0,0902	0,1071	0,1237	0,1399	0,1557	0,1713	0,1865	0,2014	0,2161	0,2304	0,2445	0,2583	0,2718	0,2851	0,2981	0,3109
0,40	0,0000	0,0171	0,0337	0,0500	0,0660	0,0816	0,0969	0,1119	0,1266	0,1410	0,1550	0,1688	0,1824	0,1956	0,2086	0,2214	0,2339	0,2462	0,2583	0,2701	0,2817
0,35	0,0000	0,0152	0,0300	0,0446	0,0588	0,0727	0,0864	0,0997	0,1128	0,1256	0,1382	0,1505	0,1626	0,1745	0,1861	0,1975	0,2086	0,2196	0,2304	0,2410	0,2513
0,30	0,0000	0,0132	0,0262	0,0389	0,0513	0,0635	0,0754	0,0871	0,0985	0,1097	0,1207	0,1315	0,1421	0,1524	0,1626	0,1726	0,1824	0,1920	0,2014	0,2107	0,2198
0,25	0,0000	0,0112	0,0222	0,0330	0,0436	0,0539	0,0640	0,0740	0,0837	0,0932	0,1026	0,1117	0,1207	0,1295	0,1382	0,1467	0,1550	0,1632	0,1713	0,1792	0,1869
0,20	0,0000	0,0092	0,0181	0,0269	0,0355	0,0440	0,0522	0,0603	0,0683	0,0760	0,0837	0,0912	0,0985	0,1057	0,1128	0,1198	0,1266	0,1333	0,1399	0,1463	0,1527
0,15	0,0000	0,0070	0,0139	0,0206	0,0272	0,0336	0,0399	0,0461	0,0522	0,0582	0,0640	0,0698	0,0754	0,0809	0,0864	0,0917	0,0969	0,1021	0,1071	0,1121	0,1170
0,10	0,0000	0,0048	0,0094	0,0140	0,0185	0,0229	0,0272	0,0314	0,0355	0,0396	0,0436	0,0475	0,0513	0,0551	0,0588	0,0624	0,0660	0,0695	0,0730	0,0764	0,0797
0,05	0,0000	0,0024	0,0048	0,0071	0,0094	0,0117	0,0139	0,0160	0,0181	0,0202	0,0222	0,0242	0,0262	0,0281	0,0300	0,0319	0,0337	0,0355	0,0373	0,0390	0,0407
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Şekil 5.1.b Sayısal yöntem harmonik ortalama çözüm sayfası (Ör.1)

dy/dx	0,00	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,00
1,00	0,0000	0,0353	0,0697	0,1033	0,1361	0,1681	0,1993	0,2299	0,2597	0,2889	0,3175	0,3454	0,3727	0,3994	0,4255	0,4511	0,4762	0,5007	0,5248	0,5483	0,5714
0,95	0,0000	0,0340	0,0672	0,0996	0,1312	0,1620	0,1922	0,2217	0,2505	0,2787	0,3062	0,3331	0,3595	0,3853	0,4106	0,4353	0,4595	0,4832	0,5064	0,5292	0,5515
0,90	0,0000	0,0327	0,0646	0,0957	0,1261	0,1558	0,1849	0,2132	0,2410	0,2681	0,2946	0,3205	0,3459	0,3708	0,3951	0,4189	0,4423	0,4651	0,4875	0,5095	0,5310
0,85	0,0000	0,0313	0,0619	0,0918	0,1210	0,1494	0,1773	0,2045	0,2311	0,2572	0,2826	0,3075	0,3319	0,3558	0,3792	0,4020	0,4245	0,4464	0,4680	0,4891	0,5097
0,80	0,0000	0,0299	0,0592	0,0877	0,1156	0,1429	0,1695	0,1955	0,2210	0,2459	0,2703	0,2941	0,3175	0,3403	0,3627	0,3846	0,4061	0,4271	0,4478	0,4680	0,4878
0,75	0,0000	0,0285	0,0563	0,0835	0,1101	0,1361	0,1614	0,1863	0,2105	0,2343	0,2575	0,2803	0,3025	0,3243	0,3457	0,3666	0,3871	0,4072	0,4269	0,4462	0,4651
0,70	0,0000	0,0270	0,0534	0,0792	0,1044	0,1290	0,1531	0,1767	0,1997	0,2223	0,2443	0,2659	0,2871	0,3078	0,3281	0,3480	0,3675	0,3866	0,4053	0,4236	0,4416
0,65	0,0000	0,0255	0,0504	0,0747	0,0985	0,1218	0,1445	0,1668	0,1885	0,2098	0,2307	0,2511	0,2711	0,2907	0,3099	0,3287	0,3471	0,3652	0,3829	0,4003	0,4173
0,60	0,0000	0,0239	0,0473	0,0701	0,0924	0,1143	0,1356	0,1565	0,1770	0,1970	0,2166	0,2358	0,2546	0,2730	0,2911	0,3087	0,3261	0,3431	0,3598	0,3761	0,3922
0,55	0,0000	0,0223	0,0441	0,0654	0,0862	0,1065	0,1265	0,1460	0,1650	0,1837	0,2020	0,2199	0,2375	0,2547	0,2716	0,2881	0,3043	0,3202	0,3358	0,3511	0,3661
0,50	0,0000	0,0206	0,0407	0,0604	0,0797	0,0985	0,1170	0,1350	0,1527	0,1700	0,1869	0,2035	0,2198	0,2357	0,2513	0,2667	0,2817	0,2964	0,3109	0,3251	0,3390
0,45	0,0000	0,0189	0,0373	0,0553	0,0730	0,0902	0,1071	0,1237	0,1399	0,1557	0,1713	0,1865	0,2014	0,2160	0,2304	0,2445	0,2582	0,2718	0,2851	0,2981	0,3109
0,40	0,0000	0,0170	0,0337	0,0500	0,0660	0,0816	0,0969	0,1119	0,1266	0,1410	0,1550	0,1688	0,1824	0,1956	0,2086	0,2214	0,2339	0,2462	0,2582	0,2701	0,2817
0,35	0,0000	0,0152	0,0300	0,0446	0,0588	0,0727	0,0864	0,0997	0,1128	0,1256	0,1382	0,1505	0,1626	0,1744	0,1861	0,1975	0,2086	0,2196	0,2304	0,2410	0,2513
0,30	0,0000	0,0132	0,0262	0,0389	0,0513	0,0635	0,0754	0,0871	0,0985	0,1097	0,1207	0,1315	0,1421	0,1524	0,1626	0,1726	0,1824	0,1920	0,2014	0,2107	0,2198
0,25	0,0000	0,0112	0,0222	0,0330	0,0436	0,0539	0,0640	0,0740	0,0837	0,0932	0,1026	0,1117	0,1207	0,1295	0,1382	0,1467	0,1550	0,1632	0,1713	0,1792	0,1869
0,20	0,0000	0,0092	0,0181	0,0269	0,0355	0,0440	0,0522	0,0603	0,0683	0,0760	0,0837	0,0912	0,0985	0,1057	0,1128	0,1198	0,1266	0,1333	0,1399	0,1463	0,1527
0,15	0,0000	0,0070	0,0139	0,0206	0,0272	0,0336	0,0399	0,0461	0,0522	0,0582	0,0640	0,0698	0,0754	0,0809	0,0864	0,0917	0,0969	0,1021	0,1071	0,1121	0,1170
0,10	0,0000	0,0048	0,0094	0,0140	0,0185	0,0229	0,0272	0,0314	0,0355	0,0396	0,0436	0,0475	0,0513	0,0551	0,0588	0,0624	0,0660	0,0695	0,0730	0,0764	0,0797
0,05	0,0000	0,0024	0,0048	0,0071	0,0094	0,0117	0,0139	0,0160	0,0181	0,0202	0,0222	0,0242	0,0262	0,0281	0,0300	0,0319	0,0337	0,0355	0,0373	0,0390	0,0407
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

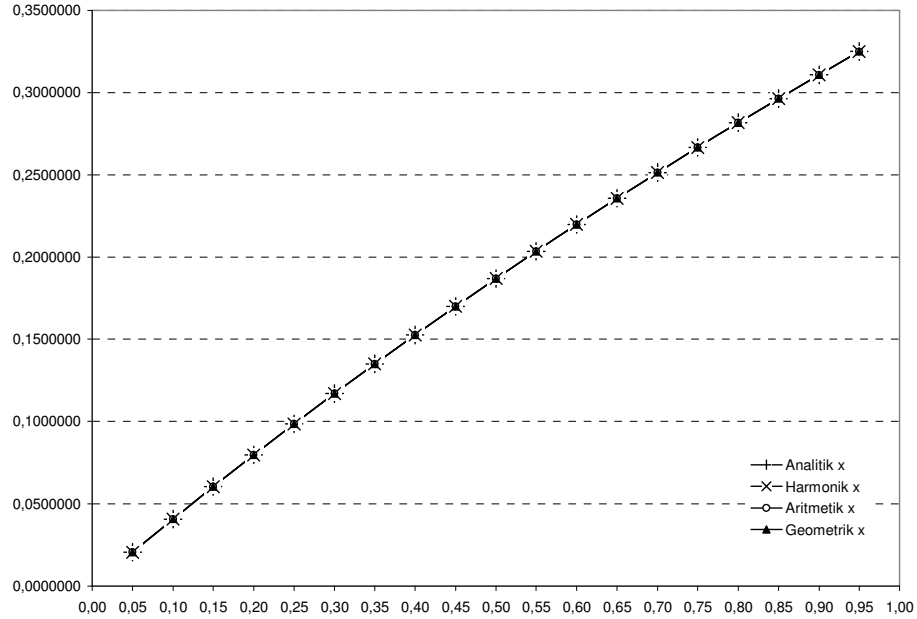
Şekil 5.1.c Sayısal yöntem aritmetik ortalama çözüm sayfası (Ör.1)

dy/dx	0,00	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,00
1,00	0,0000	0,0353	0,0697	0,1033	0,1361	0,1681	0,1993	0,2299	0,2597	0,2889	0,3175	0,3454	0,3727	0,3994	0,4255	0,4511	0,4762	0,5007	0,5248	0,5483	0,5714
0,95	0,0000	0,0340	0,0672	0,0996	0,1312	0,1620	0,1922	0,2217	0,2505	0,2787	0,3062	0,3331	0,3595	0,3853	0,4106	0,4353	0,4595	0,4832	0,5064	0,5292	0,5515
0,90	0,0000	0,0327	0,0646	0,0957	0,1261	0,1558	0,1849	0,2132	0,2410	0,2681	0,2946	0,3205	0,3459	0,3708	0,3951	0,4189	0,4423	0,4651	0,4875	0,5095	0,5310
0,85	0,0000	0,0313	0,0619	0,0918	0,1210	0,1495	0,1773	0,2045	0,2311	0,2572	0,2826	0,3075	0,3319	0,3558	0,3792	0,4020	0,4245	0,4464	0,4680	0,4891	0,5097
0,80	0,0000	0,0299	0,0592	0,0877	0,1156	0,1429	0,1695	0,1955	0,2210	0,2459	0,2703	0,2941	0,3175	0,3403	0,3627	0,3846	0,4061	0,4271	0,4478	0,4680	0,4878
0,75	0,0000	0,0285	0,0563	0,0835	0,1101	0,1361	0,1614	0,1863	0,2105	0,2343	0,2575	0,2803	0,3025	0,3243	0,3457	0,3666	0,3871	0,4072	0,4269	0,4462	0,4651
0,70	0,0000	0,0270	0,0534	0,0792	0,1044	0,1290	0,1531	0,1767	0,1997	0,2223	0,2443	0,2659	0,2871	0,3078	0,3281	0,3480	0,3675	0,3866	0,4053	0,4236	0,4416
0,65	0,0000	0,0255	0,0504	0,0747	0,0985	0,1218	0,1445	0,1668	0,1885	0,2098	0,2307	0,2511	0,2711	0,2907	0,3099	0,3287	0,3471	0,3652	0,3829	0,4003	0,4173
0,60	0,0000	0,0239	0,0473	0,0701	0,0924	0,1143	0,1356	0,1565	0,1770	0,1970	0,2166	0,2358	0,2546	0,2730	0,2911	0,3087	0,3261	0,3431	0,3598	0,3761	0,3922
0,55	0,0000	0,0223	0,0441	0,0654	0,0862	0,1065	0,1265	0,1460	0,1650	0,1837	0,2020	0,2199	0,2375	0,2547	0,2716	0,2881	0,3043	0,3202	0,3358	0,3511	0,3661
0,50	0,0000	0,0206	0,0407	0,0604	0,0797	0,0985	0,1170	0,1350	0,1527	0,1700	0,1869	0,2035	0,2198	0,2357	0,2513	0,2667	0,2817	0,2964	0,3109	0,3251	0,3390
0,45	0,0000	0,0189	0,0373	0,0553	0,0730	0,0902	0,1071	0,1237	0,1399	0,1557	0,1713	0,1865	0,2014	0,2160	0,2304	0,2445	0,2582	0,2718	0,2851	0,2981	0,3109
0,40	0,0000	0,0171	0,0337	0,0500	0,0660	0,0816	0,0969	0,1119	0,1266	0,1410	0,1550	0,1688	0,1824	0,1956	0,2086	0,2214	0,2339	0,2462	0,2582	0,2701	0,2817
0,35	0,0000	0,0152	0,0300	0,0446	0,0588	0,0727	0,0864	0,0997	0,1128	0,1256	0,1382	0,1505	0,1626	0,1744	0,1861	0,1975	0,2086	0,2196	0,2304	0,2410	0,2513
0,30	0,0000	0,0132	0,0262	0,0389	0,0513	0,0635	0,0754	0,0871	0,0985	0,1097	0,1207	0,1315	0,1421	0,1524	0,1626	0,1726	0,1824	0,1920	0,2014	0,2107	0,2198
0,25	0,0000	0,0112	0,0222	0,0330	0,0436	0,0539	0,0640	0,0740	0,0837	0,0932	0,1026	0,1117	0,1207	0,1295	0,1382	0,1467	0,1550	0,1632	0,1713	0,1792	0,1869
0,20	0,0000	0,0092	0,0181	0,0269	0,0355	0,0440	0,0522	0,0603	0,0683	0,0760	0,0837	0,0912	0,0985	0,1057	0,1128	0,1198	0,1266	0,1333	0,1399	0,1463	0,1527
0,15	0,0000	0,0070	0,0139	0,0206	0,0272	0,0336	0,0399	0,0461	0,0522	0,0582	0,0640	0,0698	0,0754	0,0809	0,0864	0,0917	0,0969	0,1021	0,1071	0,1121	0,1170
0,10	0,0000	0,0048	0,0094	0,0140	0,0185	0,0229	0,0272	0,0314	0,0355	0,0396	0,0436	0,0475	0,0513	0,0551	0,0588	0,0624	0,0660	0,0695	0,0730	0,0764	0,0797
0,05	0,0000	0,0024	0,0048	0,0071	0,0094	0,0117	0,0139	0,0160	0,0181	0,0202	0,0222	0,0242	0,0262	0,0281	0,0300	0,0319	0,0337	0,0355	0,0373	0,0390	0,0407
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Şekil 5.1.d Sayısal yöntem geometrik ortalama çözüm sayfası (Ör.1)

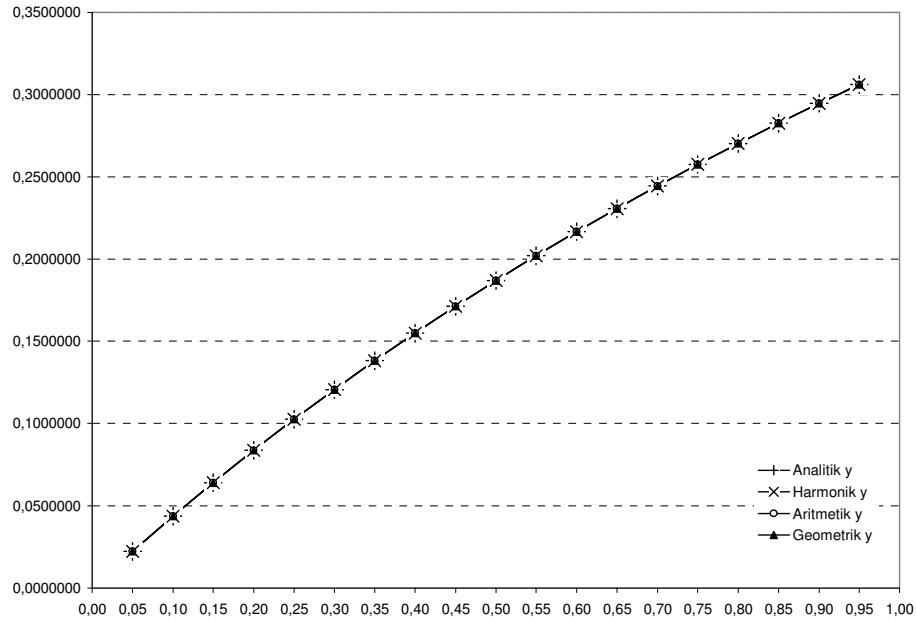
**Tablo 5.2** A-A kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör.1)

x	H			
	ANALİTİK	HARMONİK	ARİTMETİK	GEOMETRİK
0,05	0,0205973	0,0205979	0,0205969	0,0205974
0,10	0,0407332	0,0407343	0,0407324	0,0407334
0,15	0,0604230	0,0604245	0,0604217	0,0604231
0,20	0,0796813	0,0796831	0,0796795	0,0796813
0,25	0,0985222	0,0985241	0,0985198	0,0985220
0,30	0,1169591	0,1169615	0,1169566	0,1169591
0,35	0,1350048	0,1350075	0,1350020	0,1350048
0,40	0,1526718	0,1526748	0,1526688	0,1526718
0,45	0,1699717	0,1699748	0,1699685	0,1699717
0,50	0,1869159	0,1869192	0,1869126	0,1869159
0,55	0,2035153	0,2035186	0,2035119	0,2035153
0,60	0,2197802	0,2197836	0,2197769	0,2197803
0,65	0,2357208	0,2357241	0,2357175	0,2357208
0,70	0,2513465	0,2513498	0,2513434	0,2513466
0,75	0,2666667	0,2666698	0,2666639	0,2666668
0,80	0,2816901	0,2816929	0,2816876	0,2816903
0,85	0,2964255	0,2964277	0,2964234	0,2964255
0,90	0,3108808	0,3108824	0,3108792	0,3108808
0,95	0,3250642	0,3250650	0,3250633	0,3250641

**Şekil 5.2.a** A-A kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri grafiği (Ör. 1)

**Tablo 5.3** B-B kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör. 1)

y	H			
	ANALİTİK	HARMONİK	ARİTMETİK	GEOMETRİK
0,05	0,0222469	0,0222480	0,0222459	0,0222469
0,10	0,0435730	0,0435748	0,0435712	0,0435730
0,15	0,0640342	0,0640366	0,0640318	0,0640342
0,20	0,0836820	0,0836849	0,0836792	0,0836820
0,25	0,1025641	0,1025672	0,1025609	0,1025641
0,30	0,1207243	0,1207276	0,1207210	0,1207243
0,35	0,1382034	0,1382068	0,1382000	0,1382034
0,40	0,1550388	0,1550422	0,1550354	0,1550388
0,45	0,1712655	0,1712689	0,1712621	0,1712655
0,50	0,1869159	0,1869192	0,1869126	0,1869159
0,55	0,2020202	0,2020233	0,2020170	0,2020202
0,60	0,2166065	0,2166095	0,2166036	0,2166065
0,65	0,2307010	0,2307036	0,2306981	0,2307008
0,70	0,2443281	0,2443307	0,2443258	0,2443283
0,75	0,2575107	0,2575126	0,2575083	0,2575105
0,80	0,2702703	0,2702721	0,2702685	0,2702703
0,85	0,2826268	0,2826284	0,2826255	0,2826269
0,90	0,2945990	0,2946002	0,2945982	0,2945992
0,95	0,3062047	0,3062054	0,3062043	0,3062048

**Şekil 5.2.b** B-B kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri grafiği (Ör. 1)

### 5.3. Örnek 2

Örnek 1 de elde edilen  $H$  değerleri pratik değerlerden küçüktür. Örnek 2 de  $H$  leri gerçeğe yaklaştırmak için, literatürde verilmiş olan ve Örnek 1 de kullanılan  $a, b, c, d$  katsayıları  $1/50$  oranında küçültülmüştür. Yeni katsayılar  $a=0,02; b=0,004; c=0,008; d=0,003$  olarak seçildiği için  $H(x, y) = \frac{xy}{1 + 0,2x + 0,4y + 0,15xy}$  denklemi gereği  $H$  değerleri artırılarak gerçeğe yaklaştırılmıştır. Ayrıca  $T(x, y) = (1 + 0,2x + 0,4y + 0,15xy)^2$  denklemi gereği iletkenlik azalmıştır. Bu durumda elde edilen yeni hidrolik iletkenlik katsayısı değerleri Ek 2 de verilmiştir.

Bunun dışında Örnek 2 de izlenen yöntem Örnek 1 deki ile aynıdır. Hesaplarda inceleme alanı  $1*1 \text{ br}^2$  dir.  $dx=dy=0,05$  br olarak her iki yönde 20 şer eşit parçaya bölünmüştür ve sabit grid yapısı ile çözüm yapılmıştır. Maksimum iterasyon sayısı  $maxiter=10000$ , maksimum hata toleransı  $eps=0,000001$ , özgül depolama katsayısı  $S_s=1,00$ , maksimum hesap süresi  $tmax=3600$  gün, hesap adımı  $dt=3600$  gün olarak alınmıştır.

Hesaplama sonucu sayısal çözümün en küçük hata miktarı yine geometrik ortalama da görülmüştür (Tablo 5.4). Gerçeğe yakın değerler ile işlem yapıldığında görece maksimum hata miktarları Örnek 1 e göre azalmaktadır. Sayısal yöntemdeki harmonik, aritmetik ve geometrik ortalamaların sonuçları analitik yöntemin sonuçları ile yaklaşık aynı değerleri vermiştir. Bu durum sayısal modellemenin doğruluğunu göstermektedir (Şekil 5.3.a-d). Analitik ve sayısal çözüm sayfalarında  $y=0,50$  için  $x$  yönünde A-A ve  $x=0,50$  için  $y$  yönünde B-B kesitleri alınmıştır. Bu kesitlerde çözüme ilişkin hidrolik yük değerleri konuma bağlı olarak çizelge (Tablo 5.5, Tablo 5.6) ve grafik (Şekil 5.4.a, Şekil 5.4.b) biçiminde verilmiştir. Bu örnekte de analitik çözüme en yakın değerleri geometrik çözüm vermektedir. Bu durum en az hata miktarı ile geometrik çözümde karşılaştırılmasını doğrulamaktadır.

**Tablo 5.4** Sayısal çözüm ve analitik çözümün hata ölçütleriyle karşılaştırılması (Ör. 2)

	RMSE	MAE	MSE	E	r	%RE MAX	%RE ORT
H.O	1,93E-03	3,22E-02	3,71E-06	1,00E+00	1,00	5,19E-03	1,82E-03
A.O	1,92E-03	3,21E-02	3,70E-06	1,00E+00	1,00	5,25E-03	1,82E-03
G.O	3,43E-06	4,20E-05	1,18E-11	1,00E+00	1,00	2,87E-05	2,77E-06



y/x	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
1,00	0,0000	1,7637	3,4843	5,1635	6,8027	8,4034	9,9668	11,4943	12,9870	14,4462	15,8730	17,2684	18,6335	19,9693	21,2766	22,5564	23,8095	25,0368	26,2391	27,4170	28,5714
0,95	0,0000	1,6999	3,3587	4,9777	6,5585	8,1023	9,6105	11,0843	12,5247	13,9330	15,3102	16,6574	17,9754	19,2653	20,5279	21,7640	22,9746	24,1604	25,3221	26,4605	27,5762
0,90	0,0000	1,6343	3,2293	4,7864	6,3069	7,7922	9,2434	10,6617	12,0482	13,4039	14,7300	16,0272	17,2966	18,5391	19,7554	20,9465	22,1130	23,2558	24,3756	25,4730	26,5487
0,85	0,0000	1,5667	3,0960	4,5892	6,0477	7,4725	8,8649	10,2260	11,5568	12,8582	14,1313	15,3770	16,5962	17,7896	18,9581	20,1025	21,2235	22,3218	23,3981	24,4530	25,4873
0,80	0,0000	1,4970	2,9586	4,3860	5,7803	7,1429	8,4746	9,7765	11,0497	12,2951	13,5135	14,7059	15,8730	17,0157	18,1347	19,2308	20,3046	21,3568	22,3881	23,3990	24,3902
0,75	0,0000	1,4252	2,8169	4,1763	5,5046	6,8027	8,0717	9,3126	10,5263	11,7137	12,8755	14,0127	15,1261	16,2162	17,2840	18,3299	19,3548	20,3593	21,3439	22,3092	23,2558
0,70	0,0000	1,3511	2,6707	3,9600	5,2200	6,4516	7,6559	8,8336	9,9857	11,1131	12,2164	13,2965	14,3541	15,3898	16,4044	17,3985	18,3727	19,3276	20,2638	21,1817	22,0820
0,65	0,0000	1,2746	2,5199	3,7367	4,9261	6,0890	7,2262	8,3387	9,4271	10,4923	11,5350	12,5560	13,5558	14,5351	15,4946	16,4349	17,3565	18,2599	19,1458	20,0146	20,8668
0,60	0,0000	1,1957	2,3641	3,5060	4,6225	5,7143	6,7822	7,8271	8,8496	9,8504	10,8303	11,7899	12,7298	13,6507	14,5530	15,4374	16,3043	17,1544	17,9880	18,8057	19,6078
0,55	0,0000	1,1141	2,2031	3,2677	4,3087	5,3269	6,3231	7,2979	8,2521	9,1862	10,1010	10,9970	11,8748	12,7349	13,5779	14,4042	15,2144	16,0089	16,7882	17,5527	18,3028
0,50	0,0000	1,0299	2,0367	3,0211	3,9841	4,9261	5,8480	6,7502	7,6336	8,4986	9,3458	10,1758	10,9890	11,7860	12,5673	13,3333	14,0845	14,8213	15,5440	16,2532	16,9492
0,45	0,0000	0,9427	1,8645	2,7661	3,6482	4,5113	5,3561	6,1831	6,9930	7,7862	8,5633	9,3247	10,0709	10,8023	11,5195	12,2227	12,9125	13,5891	14,2530	14,9046	15,5440
0,40	0,0000	0,8525	1,6863	2,5021	3,3003	4,0816	4,8465	5,5955	6,3291	7,0478	7,7519	8,4421	9,1185	9,7818	10,4322	11,0701	11,6959	12,3099	12,9125	13,5039	14,0845
0,35	0,0000	0,7591	1,5018	2,2286	2,9399	3,6364	4,3183	4,9863	5,6406	6,2818	6,9102	7,5261	8,1301	8,7223	9,3032	9,8731	10,4322	10,9809	11,5195	12,0482	12,5673
0,30	0,0000	0,6624	1,3106	1,9451	2,5663	3,1746	3,7704	4,3541	4,9261	5,4867	6,0362	6,5750	7,1034	7,6217	8,1301	8,6290	9,1185	9,5991	10,0709	10,5341	10,9890
0,25	0,0000	0,5621	1,1123	1,6511	2,1786	2,6954	3,2017	3,6978	4,1841	4,6608	5,1282	5,5866	6,0362	6,4773	6,9102	7,3350	7,7519	8,1613	8,5633	8,9580	9,3458
0,20	0,0000	0,4581	0,9066	1,3459	1,7762	2,1978	2,6110	3,0159	3,4130	3,8023	4,1841	4,5586	4,9261	5,2867	5,6406	5,9880	6,3291	6,6641	6,9930	7,3161	7,6336
0,15	0,0000	0,3501	0,6930	1,0289	1,3581	1,6807	1,9969	2,3069	2,6110	2,9092	3,2017	3,4887	3,7704	4,0469	4,3183	4,5848	4,8465	5,1036	5,3561	5,6042	5,8480
0,10	0,0000	0,2379	0,4710	0,6995	0,9234	1,1429	1,3581	1,5692	1,7762	1,9793	2,1786	2,3743	2,5663	2,7548	2,9399	3,1217	3,3003	3,4758	3,6482	3,8176	3,9841
0,05	0,0000	0,1213	0,2402	0,3568	0,4710	0,5831	0,6930	0,8008	0,9066	1,0104	1,1123	1,2124	1,3106	1,4071	1,5018	1,5949	1,6863	1,7762	1,8645	1,9513	2,0367
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Şekil 5.3.a Analitik yöntem çözüm sayfası (Ör. 2)

dy/dx	0,00	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,00
1,00	0,0000	1,7637	3,4843	5,1635	6,8027	8,4034	9,9668	11,4943	12,9870	14,4462	15,8730	17,2684	18,6335	19,9693	21,2766	22,5564	23,8095	25,0368	26,2391	27,4170	28,5714
0,95	0,0000	1,6999	3,3587	4,9777	6,5585	8,1024	9,6105	11,0843	12,5247	13,9330	15,3103	16,6574	17,9754	19,2653	20,5279	21,7641	22,9746	24,1604	25,3221	26,4605	27,5762
0,90	0,0000	1,6343	3,2293	4,7864	6,3070	7,7922	9,2435	10,6617	12,0482	13,4040	14,7300	16,0272	17,2967	18,5391	19,7555	20,9465	22,1131	23,2558	24,3756	25,4730	26,5487
0,85	0,0000	1,5667	3,0960	4,5893	6,0477	7,4726	8,8650	10,2261	11,5568	12,8583	14,1314	15,3771	16,5962	17,7897	18,9582	20,1025	21,2235	22,3218	23,3981	24,4530	25,4873
0,80	0,0000	1,4970	2,9586	4,3860	5,7804	7,1429	8,4746	9,7766	11,0498	12,2952	13,5136	14,7060	15,8731	17,0158	18,1348	19,2308	20,3046	21,3568	22,3881	23,3990	24,3902
0,75	0,0000	1,4252	2,8169	4,1764	5,5047	6,8028	8,0718	9,3127	10,5264	11,7138	12,8756	14,0128	15,1262	16,2163	17,2841	18,3300	19,3549	20,3594	21,3439	22,3092	23,2558
0,70	0,0000	1,3511	2,6708	3,9601	5,2201	6,4517	7,6559	8,8337	9,9858	11,1132	12,2165	13,2966	14,3542	15,3899	16,4045	17,3986	18,3728	19,3277	20,2638	21,1817	22,0820
0,65	0,0000	1,2747	2,5199	3,7368	4,9262	6,0891	7,2263	8,3388	9,4272	10,4925	11,5352	12,5561	13,5559	14,5353	15,4948	16,4350	17,3566	18,2600	19,1459	20,0146	20,8668
0,60	0,0000	1,1957	2,3641	3,5061	4,6226	5,7144	6,7823	7,8272	8,8497	9,8506	10,8305	11,7901	12,7300	13,6508	14,5532	15,4375	16,3045	17,1545	17,9881	18,8057	19,6078
0,55	0,0000	1,1142	2,2031	3,2677	4,3087	5,3270	6,3232	7,2980	8,2522	9,1864	10,1012	10,9972	11,8749	12,7350	13,5780	14,4043	15,2145	16,0090	16,7883	17,5527	18,3028
0,50	0,0000	1,0299	2,0367	3,0212	3,9842	4,9262	5,8481	6,7504	7,6337	8,4987	9,3460	10,1759	10,9892	11,7862	12,5675	13,3335	14,0846	14,8214	15,5441	16,2533	16,9492
0,45	0,0000	0,9427	1,8646	2,7662	3,6482	4,5114	5,3562	6,1833	6,9932	7,7864	8,5634	9,3248	10,0710	10,8025	11,5196	12,2229	12,9126	13,5892	14,2531	14,9046	15,5440
0,40	0,0000	0,8525	1,6864	2,5022	3,3004	4,0817	4,8467	5,5957	6,3293	7,0479	7,7521	8,4422	9,1187	9,7820	10,4324	11,0703	11,6960	12,3100	12,9126	13,5040	14,0845
0,35	0,0000	0,7592	1,5019	2,2287	2,9400	3,6365	4,3184	4,9864	5,6408	6,2819	6,9103	7,5263	8,1303	8,7225	9,3034	9,8732	10,4323	10,9810	11,5196	12,0482	12,5673
0,30	0,0000	0,6624	1,3107	1,9452	2,5664	3,1747	3,7705	4,3543	4,9263	5,4868	6,0364	6,5752	7,1036	7,6218	8,1303	8,6291	9,1187	9,5992	10,0710	10,5341	10,9890
0,25	0,0000	0,5621	1,1124	1,6511	2,1787	2,6955	3,2018	3,6980	4,1842	4,6609	5,1284	5,5868	6,0364	6,4775	6,9103	7,3351	7,7521	8,1614	8,5634	8,9581	9,3458
0,20	0,0000	0,4581	0,9067	1,3459	1,7763	2,1979	2,6111	3,0161	3,4131	3,8024	4,1842	4,5588	4,9263	5,2869	5,6408	5,9882	6,3292	6,6642	6,9931	7,3162	7,6336
0,15	0,0000	0,3501	0,6930	1,0290	1,3581	1,6807	1,9970	2,3070	2,6111	2,9093	3,2018	3,4889	3,7706	4,0470	4,3185	4,5849	4,8466	5,1037	5,3562	5,6042	5,8480
0,10	0,0000	0,2379	0,4711	0,6995	0,9234	1,1429	1,3581	1,5692	1,7763	1,9794	2,1787	2,3744	2,5664	2,7549	2,9400	3,1218	3,3004	3,4759	3,6482	3,8176	3,9841
0,05	0,0000	0,1213	0,2402	0,3568	0,4711	0,5831	0,6930	0,8009	0,9067	1,0105	1,1124	1,2124	1,3107	1,4071	1,5019	1,5950	1,6864	1,7762	1,8646	1,9513	2,0367
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Şekil 5.3.b Sayısal yöntem harmonik ortalama çözüm sayfası (Ör. 2)

dy/dx	0,00	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,00
1,00	0,0000	1,7637	3,4843	5,1635	6,8027	8,4034	9,9668	11,4943	12,9870	14,4462	15,8730	17,2684	18,6335	19,9693	21,2766	22,5564	23,8095	25,0368	26,2391	27,4170	28,5714
0,95	0,0000	1,6999	3,3587	4,9777	6,5585	8,1023	9,6105	11,0842	12,5247	13,9330	15,3102	16,6573	17,9754	19,2652	20,5278	21,7640	22,9746	24,1604	25,3221	26,4604	27,5762
0,90	0,0000	1,6343	3,2293	4,7864	6,3069	7,7922	9,2434	10,6617	12,0481	13,4039	14,7299	16,0271	17,2966	18,5390	19,7554	20,9464	22,1130	23,2558	24,3755	25,4729	26,5487
0,85	0,0000	1,5667	3,0959	4,5892	6,0476	7,4725	8,8649	10,2259	11,5567	12,8582	14,1313	15,3770	16,5961	17,7895	18,9580	20,1024	21,2234	22,3217	23,3980	24,4530	25,4873
0,80	0,0000	1,4970	2,9585	4,3859	5,7803	7,1428	8,4745	9,7765	11,0496	12,2950	13,5134	14,7058	15,8729	17,0156	18,1346	19,2307	20,3045	21,3567	22,3880	23,3990	24,3902
0,75	0,0000	1,4252	2,8169	4,1763	5,5045	6,8026	8,0717	9,3125	10,5262	11,7136	12,8754	14,0126	15,1259	16,2161	17,2838	18,3298	19,3548	20,3592	21,3438	22,3092	23,2558
0,70	0,0000	1,3511	2,6707	3,9600	5,2199	6,4515	7,6558	8,8335	9,9856	11,1130	12,2163	13,2964	14,3539	15,3897	16,4043	17,3984	18,3726	19,3275	20,2637	21,1817	22,0820
0,65	0,0000	1,2746	2,5198	3,7366	4,9260	6,0889	7,2261	8,3386	9,4270	10,4922	11,5349	12,5558	13,5556	14,5350	15,4945	16,4348	17,3564	18,2598	19,1457	20,0146	20,8668
0,60	0,0000	1,1957	2,3640	3,5060	4,6224	5,7142	6,7821	7,8269	8,8494	9,8503	10,8302	11,7898	12,7297	13,6505	14,5529	15,4373	16,3042	17,1543	17,9879	18,8056	19,6078
0,55	0,0000	1,1141	2,2030	3,2676	4,3086	5,3268	6,3229	7,2978	8,2519	9,1861	10,1009	10,9968	11,8746	12,7347	13,5777	14,4041	15,2143	16,0088	16,7881	17,5527	18,3028
0,50	0,0000	1,0298	2,0366	3,0211	3,9840	4,9260	5,8478	6,7501	7,6334	8,4984	9,3456	10,1756	10,9888	11,7859	12,5672	13,3332	14,0844	14,8212	15,5440	16,2532	16,9492
0,45	0,0000	0,9427	1,8645	2,7660	3,6481	4,5112	5,3560	6,1830	6,9929	7,7861	8,5631	9,3245	10,0707	10,8022	11,5193	12,2226	12,9123	13,5890	14,2530	14,9045	15,5440
0,40	0,0000	0,8525	1,6863	2,5020	3,3002	4,0815	4,8464	5,5954	6,3290	7,0476	7,7518	8,4419	9,1184	9,7816	10,4320	11,0700	11,6958	12,3098	12,9124	13,5039	14,0845
0,35	0,0000	0,7591	1,5018	2,2285	2,9399	3,6363	4,3182	4,9861	5,6405	6,2816	6,9100	7,5260	8,1299	8,7221	9,3030	9,8729	10,4320	10,9808	11,5194	12,0481	12,5673
0,30	0,0000	0,6624	1,3106	1,9450	2,5662	3,1745	3,7703	4,3540	4,9260	5,4865	6,0361	6,5748	7,1032	7,6215	8,1299	8,6288	9,1184	9,5990	10,0708	10,5340	10,9890
0,25	0,0000	0,5621	1,1123	1,6510	2,1786	2,6953	3,2016	3,6977	4,1840	4,6606	5,1280	5,5864	6,0361	6,4772	6,9100	7,3348	7,7518	8,1612	8,5632	8,9580	9,3458
0,20	0,0000	0,4581	0,9066	1,3458	1,7761	2,1977	2,6109	3,0158	3,4128	3,8021	4,1840	4,5585	4,9260	5,2865	5,6405	5,9879	6,3290	6,6639	6,9929	7,3161	7,6336
0,15	0,0000	0,3501	0,6930	1,0289	1,3580	1,6806	1,9968	2,3068	2,6109	2,9091	3,2016	3,4886	3,7703	4,0468	4,3182	4,5847	4,8464	5,1035	5,3560	5,6041	5,8480
0,10	0,0000	0,2379	0,4710	0,6994	0,9233	1,1428	1,3580	1,5691	1,7761	1,9792	2,1786	2,3742	2,5662	2,7547	2,9398	3,1217	3,3002	3,4757	3,6481	3,8175	3,9841
0,05	0,0000	0,1213	0,2402	0,3567	0,4710	0,5831	0,6930	0,8008	0,9066	1,0104	1,1123	1,2123	1,3106	1,4070	1,5018	1,5948	1,6863	1,7762	1,8645	1,9513	2,0367
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

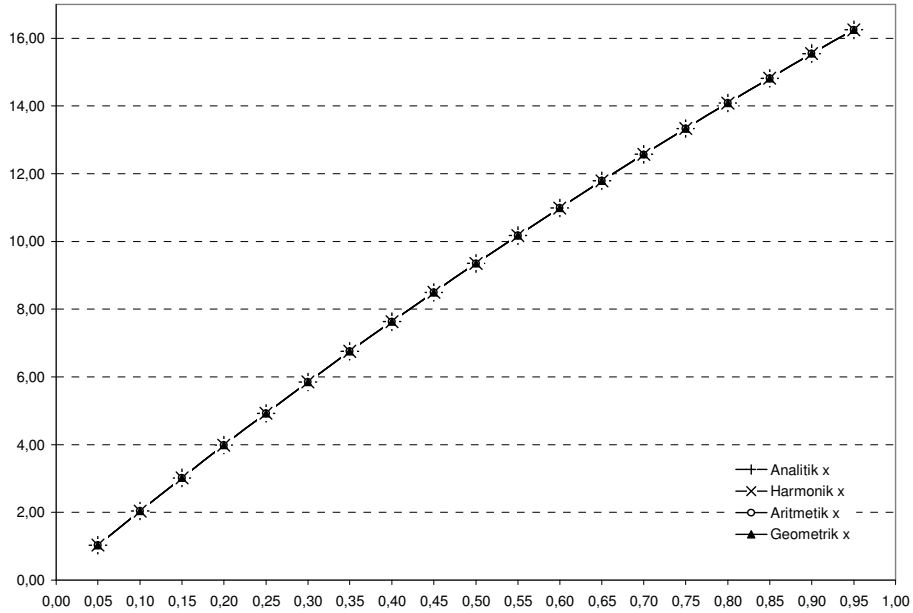
Şekil 5.3.c Sayısal yöntem aritmetik ortalama çözüm sayfası (Ör. 2)

dy/dx	0,00	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,00
1,00	0,0000	1,7637	3,4843	5,1635	6,8027	8,4034	9,9668	11,4943	12,9870	14,4462	15,8730	17,2684	18,6335	19,9693	21,2766	22,5564	23,8095	25,0368	26,2391	27,4170	28,5714
0,95	0,0000	1,6999	3,3587	4,9777	6,5585	8,1023	9,6105	11,0843	12,5247	13,9330	15,3102	16,6574	17,9754	19,2653	20,5279	21,7640	22,9746	24,1604	25,3221	26,4605	27,5762
0,90	0,0000	1,6343	3,2293	4,7864	6,3069	7,7922	9,2434	10,6617	12,0482	13,4039	14,7300	16,0272	17,2966	18,5391	19,7554	20,9465	22,1130	23,2558	24,3756	25,4730	26,5487
0,85	0,0000	1,5667	3,0960	4,5892	6,0477	7,4725	8,8649	10,2260	11,5568	12,8582	14,1313	15,3770	16,5962	17,7896	18,9581	20,1025	21,2235	22,3218	23,3981	24,4530	25,4873
0,80	0,0000	1,4970	2,9586	4,3860	5,7803	7,1429	8,4746	9,7765	11,0497	12,2951	13,5135	14,7059	15,8730	17,0157	18,1347	19,2308	20,3046	21,3568	22,3881	23,3990	24,3902
0,75	0,0000	1,4252	2,8169	4,1763	5,5046	6,8027	8,0717	9,3126	10,5263	11,7137	12,8755	14,0127	15,1261	16,2162	17,2840	18,3299	19,3548	20,3593	21,3439	22,3092	23,2558
0,70	0,0000	1,3511	2,6707	3,9600	5,2200	6,4516	7,6559	8,8336	9,9857	11,1131	12,2164	13,2965	14,3541	15,3898	16,4044	17,3985	18,3727	19,3276	20,2638	21,1817	22,0820
0,65	0,0000	1,2746	2,5199	3,7367	4,9261	6,0890	7,2262	8,3387	9,4271	10,4923	11,5350	12,5560	13,5558	14,5351	15,4946	16,4349	17,3565	18,2599	19,1458	20,0146	20,8668
0,60	0,0000	1,1957	2,3641	3,5060	4,6225	5,7143	6,7822	7,8271	8,8496	9,8504	10,8303	11,7899	12,7298	13,6507	14,5530	15,4374	16,3043	17,1544	17,9880	18,8057	19,6078
0,55	0,0000	1,1141	2,2031	3,2677	4,3087	5,3269	6,3231	7,2979	8,2521	9,1862	10,1010	10,9970	11,8748	12,7349	13,5779	14,4042	15,2144	16,0089	16,7882	17,5527	18,3028
0,50	0,0000	1,0299	2,0367	3,0211	3,9841	4,9261	5,8480	6,7502	7,6336	8,4986	9,3458	10,1758	10,9890	11,7860	12,5673	13,3333	14,0845	14,8213	15,5440	16,2532	16,9492
0,45	0,0000	0,9427	1,8645	2,7661	3,6482	4,5113	5,3561	6,1831	6,9930	7,7862	8,5633	9,3247	10,0709	10,8023	11,5195	12,2227	12,9125	13,5891	14,2530	14,9046	15,5440
0,40	0,0000	0,8525	1,6863	2,5021	3,3003	4,0816	4,8465	5,5955	6,3291	7,0478	7,7519	8,4421	9,1185	9,7818	10,4322	11,0701	11,6959	12,3099	12,9125	13,5039	14,0845
0,35	0,0000	0,7591	1,5018	2,2286	2,9399	3,6364	4,3183	4,9863	5,6406	6,2818	6,9102	7,5261	8,1301	8,7223	9,3032	9,8731	10,4322	10,9809	11,5195	12,0482	12,5673
0,30	0,0000	0,6624	1,3106	1,9451	2,5663	3,1746	3,7704	4,3541	4,9261	5,4867	6,0362	6,5750	7,1034	7,6217	8,1301	8,6290	9,1185	9,5991	10,0709	10,5341	10,9890
0,25	0,0000	0,5621	1,1123	1,6511	2,1786	2,6954	3,2017	3,6978	4,1841	4,6608	5,1282	5,5866	6,0362	6,4773	6,9102	7,3350	7,7519	8,1613	8,5633	8,9580	9,3458
0,20	0,0000	0,4581	0,9066	1,3459	1,7762	2,1978	2,6110	3,0159	3,4130	3,8023	4,1841	4,5586	4,9261	5,2867	5,6406	5,9880	6,3291	6,6641	6,9930	7,3161	7,6336
0,15	0,0000	0,3501	0,6930	1,0289	1,3581	1,6807	1,9969	2,3069	2,6110	2,9092	3,2017	3,4887	3,7704	4,0469	4,3183	4,5848	4,8465	5,1036	5,3561	5,6042	5,8480
0,10	0,0000	0,2379	0,4710	0,6995	0,9234	1,1429	1,3581	1,5692	1,7762	1,9793	2,1786	2,3743	2,5663	2,7548	2,9399	3,1217	3,3003	3,4758	3,6482	3,8176	3,9841
0,05	0,0000	0,1213	0,2402	0,3568	0,4710	0,5831	0,6930	0,8008	0,9066	1,0104	1,1123	1,2124	1,3106	1,4071	1,5018	1,5949	1,6863	1,7762	1,8645	1,9513	2,0367
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Şekil 5.3.d Sayısal yöntem geometrik ortalama çözüm sayfası (Ör. 2)

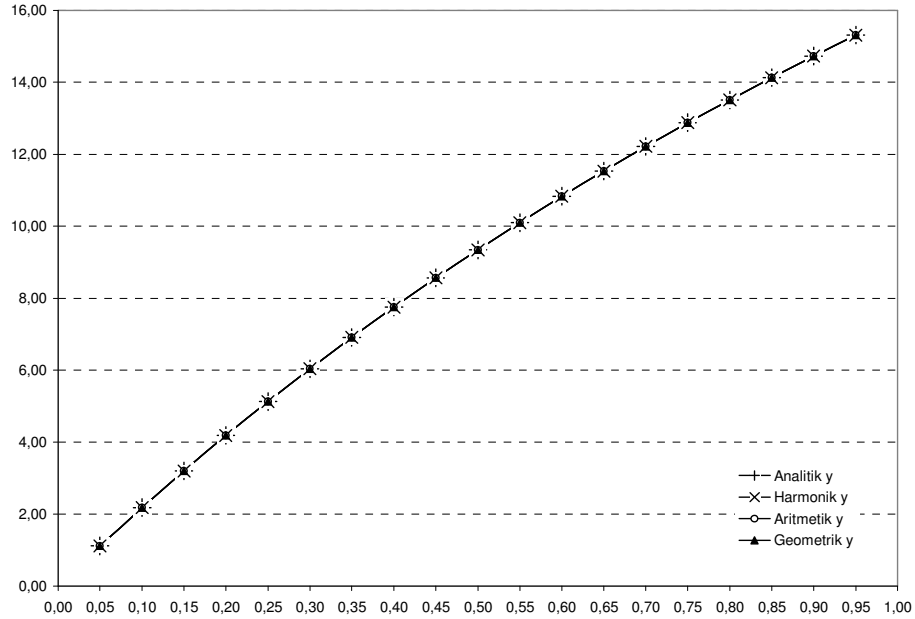
**Tablo 5.5** A-A kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör. 2)

x	H			
	ANALİTİK	HARMONİK	ARİTMETİK	GEOMETRİK
0,05	1,0299	1,0299	1,0298	1,0299
0,10	2,0367	2,0367	2,0366	2,0367
0,15	3,0211	3,0212	3,0211	3,0211
0,20	3,9841	3,9842	3,9840	3,9841
0,25	4,9261	4,9262	4,9260	4,9261
0,30	5,8480	5,8481	5,8478	5,8480
0,35	6,7502	6,7504	6,7501	6,7502
0,40	7,6336	7,6337	7,6334	7,6336
0,45	8,4986	8,4987	8,4984	8,4986
0,50	9,3458	9,3460	9,3456	9,3458
0,55	10,1758	10,1759	10,1756	10,1758
0,60	10,9890	10,9892	10,9888	10,9890
0,65	11,7860	11,7862	11,7859	11,7860
0,70	12,5673	12,5675	12,5672	12,5673
0,75	13,3333	13,3335	13,3332	13,3333
0,80	14,0845	14,0846	14,0844	14,0845
0,85	14,8213	14,8214	14,8212	14,8213
0,90	15,5440	15,5441	15,5440	15,5440
0,95	16,2532	16,2533	16,2532	16,2532

**Şekil 5.4.a** A-A kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri grafiği (Ör. 2)

**Tablo 5.6** B-B kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör. 2)

y	H			
	ANALİTİK	HARMONİK	ARİTMETİK	GEOMETRİK
0,05	1,1123	1,1124	1,1123	1,1123
0,10	2,1786	2,1787	2,1786	2,1786
0,15	3,2017	3,2018	3,2016	3,2017
0,20	4,1841	4,1842	4,1840	4,1841
0,25	5,1282	5,1284	5,1280	5,1282
0,30	6,0362	6,0364	6,0361	6,0362
0,35	6,9102	6,9103	6,9100	6,9102
0,40	7,7519	7,7521	7,7518	7,7519
0,45	8,5633	8,5634	8,5631	8,5633
0,50	9,3458	9,3460	9,3456	9,3458
0,55	10,1010	10,1012	10,1009	10,1010
0,60	10,8303	10,8305	10,8302	10,8303
0,65	11,5350	11,5352	11,5349	11,5350
0,70	12,2164	12,2165	12,2163	12,2164
0,75	12,8755	12,8756	12,8754	12,8755
0,80	13,5135	13,5136	13,5134	13,5135
0,85	14,1313	14,1314	14,1313	14,1313
0,90	14,7300	14,7300	14,7299	14,7300
0,95	15,3102	15,3103	15,3102	15,3102

**Şekil 5.4.b** B-B kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri grafiği (Ör. 2)

### 5.4. Örnek 3

Örnek 1 ve Örnek 2 de hidrolik iletkenlik katsayısı  $K$  değerleri belli bir fonksiyona göre değişim göstermektedir. Doğada ise bu durumla karşılaşmak olanaksızdır. Zeminlerin hidrolik iletkenlik katsayıları ani değişimler gösterebilmektedir. Bu nedenle bu örnekte farklı bir yol izlenmiştir.

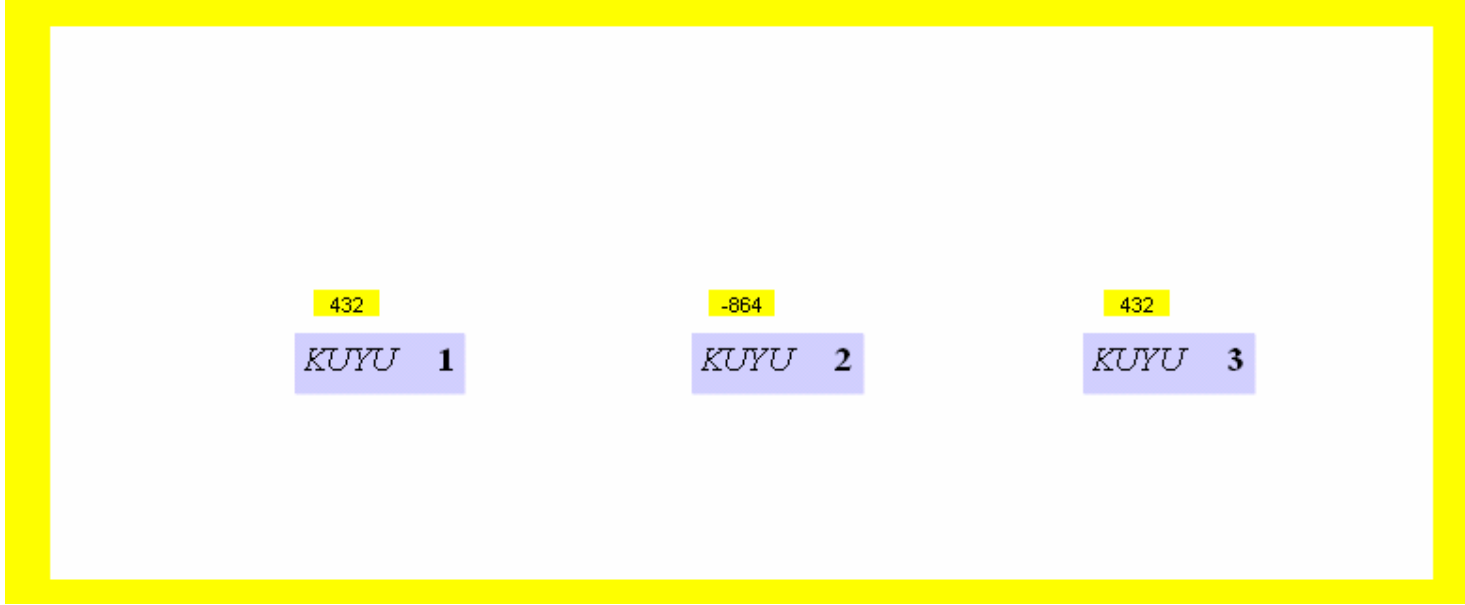
Örnek 3 te, inceleme alanı için hidrolik iletkenlik sayfasında  $K_1=15$  m/gün,  $K_2=25$  m/gün,  $K_3=35$  m/gün,  $K_4=30$  m/gün,  $K_5=40$  m/gün ve  $K_6=50$  m/gün olmak üzere altı farklı hidrolik iletkenlik katsayısı tanımlanmıştır (Şekil 5.5). Maksimum iterasyon sayısı  $maxiter=1000$ , hata toleransı  $eps=0,0001$ , özgül depolama katsayısı  $S_s=1,00$ , maksimum hesap süresi  $tmax=3600$  gün, hesap adımı  $dt=3600$  gün olarak alınmıştır. İnceleme alanı değişken grid yapısında çözülmüş ve uzunluklar  $x$  yönünde 3800 m,  $y$  yönünde 1650 m seçilmiştir. Kaynak – Yitik sayfasında üç adet besleme ve pompaj kuyusunun debileri  $Q_1= Q_3=432$  m<sup>3</sup>/gün yitik ve  $Q_2=864$  m<sup>3</sup>/gün kaynak seçilmiştir. Bu kuyuların yerleşimi (Şekil 5.6) da gösterilmiştir. Çözüm sayfasında sayısal yönteme ait harmonik, aritmetik ve geometrik ortalamalar için üç farklı buton atanmıştır. Bu butonlar kendi ortalama yaklaşımları ile ilgili sonuçları yazdırmaktadır.

Harmonik, aritmetik ve geometrik ortalamalara ilişkin çözüm sayfaları sırasıyla Şekil 5.7.a-c de verilmiştir. Kuyuların bulunduğu noktadan geçecek biçimde alınan sırasıyla  $x$  yönünde A-A ve  $y$  yönünde B-B kesitlerindeki hidrolik yük değerlerinin değişimi çizelge (Tablo 5.7, Tablo 5.8) ve grafik (Şekil 5.8.a, Şekil 5.8.b) olarak verilmiştir. Burada görüldüğü üzere harmonik, aritmetik ve geometrik ortalamalarla elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakındır.

15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	
15	15	15	15	15	15	15	15	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	35	35	35	35	15
15	15	15	15	15	15	15	15	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	35	35	35	35	15
15	15	15	15	15	15	15	15	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	35	35	35	35	15
15	15	15	15	15	15	15	15	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	35	35	35	35	15
15	15	15	15	15	15	15	15	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	35	35	35	35	15
15	15	15	15	15	15	15	15	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	35	35	35	35	15
15	15	15	15	15	15	15	15	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	35	35	35	35	15
15	30	30	30	30	30	30	30	40	40	40	40	40	40	40	50	50	50	50	50	50	50	15
15	30	30	30	30	30	30	30	40	40	40	40	40	40	40	50	50	50	50	50	50	50	15
15	30	30	30	30	30	30	30	40	40	40	40	40	40	40	50	50	50	50	50	50	50	15
15	30	30	30	30	30	30	30	40	40	40	40	40	40	40	50	50	50	50	50	50	50	15
15	30	30	30	30	30	30	30	40	40	40	40	40	40	40	50	50	50	50	50	50	50	15
15	15	15	15	15	15	15	15	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	35	35	35	35	15
15	15	15	15	15	15	15	15	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	35	35	35	35	15
15	15	15	15	15	15	15	15	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	35	35	35	35	15
15	15	15	15	15	15	15	15	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	35	35	35	35	15
15	15	15	15	15	15	15	15	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	35	35	35	35	15
15	15	15	15	15	15	15	15	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	35	35	35	35	15
15	15	15	15	15	15	15	15	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	35	35	35	35	15
15	15	15	15	15	15	15	15	25	25	25	25	25	25	25	35	35	35	35	35	35	35	15
15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

Şekil 5.5 Hidrolik iletkenlik katsayısı değerleri (Ör. 3)





Şekil 5.6 Kaynak – Yitik sayfası kuyu debileri (Ör. 3)

dy/dx	100	200	300	300	200	100	100	50	50	100	200	300	300	200	100	50	50	100	200	300	300	200	100		
100	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
50	20	20,00	20,00	20,01	20,01	20,00	20,00	19,99	19,99	19,98	19,98	19,97	19,98	19,99	20,00	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00	20	20
100	20	20,00	20,01	20,01	20,01	20,00	19,99	19,98	19,98	19,97	19,96	19,94	19,96	19,99	20,00	20,01	20,01	20,01	20,02	20,01	20,01	20,01	20,00	20	20
50	20	20,01	20,01	20,02	20,02	20,01	19,99	19,98	19,97	19,96	19,94	19,92	19,94	19,98	20,00	20,01	20,01	20,02	20,02	20,02	20,02	20,01	20,01	20	20
100	20	20,01	20,02	20,03	20,03	20,01	19,99	19,97	19,96	19,95	19,92	19,89	19,93	19,98	20,00	20,01	20,02	20,02	20,03	20,03	20,03	20,02	20,01	20	20
50	20	20,01	20,02	20,04	20,04	20,02	20,00	19,97	19,96	19,94	19,90	19,85	19,91	19,97	20,01	20,02	20,03	20,03	20,04	20,03	20,03	20,02	20,01	20	20
100	20	20,01	20,03	20,05	20,06	20,04	20,01	19,97	19,96	19,93	19,88	19,81	19,89	19,97	20,01	20,03	20,04	20,04	20,05	20,04	20,04	20,02	20,01	20	20
50	20	20,01	20,03	20,06	20,08	20,06	20,02	19,98	19,96	19,93	19,86	19,76	19,87	19,96	20,02	20,04	20,05	20,06	20,06	20,06	20,04	20,02	20,01	20	20
100	20	20,01	20,04	20,07	20,11	20,10	20,05	19,99	19,96	19,92	19,83	19,70	19,84	19,96	20,03	20,06	20,07	20,08	20,08	20,05	20,03	20,01	20	20	20
50	20	20,02	20,04	20,08	20,13	20,15	20,08	20,01	19,97	19,92	19,81	19,62	19,82	19,96	20,04	20,08	20,09	20,12	20,10	20,06	20,03	20,01	20	20	20
100	20	20,02	20,04	20,08	20,15	20,22	20,11	20,02	19,98	19,92	19,80	19,54	19,81	19,96	20,05	20,09	20,12	20,16	20,11	20,06	20,03	20,01	20	20	20
50	20	20,02	20,04	20,09	20,16	20,40	20,13	20,03	19,98	19,92	19,79	19,42	19,81	19,96	20,05	20,10	20,15	20,27	20,12	20,06	20,03	20,01	20	20	20
100	20	20,02	20,04	20,08	20,15	20,22	20,11	20,02	19,98	19,92	19,80	19,54	19,81	19,96	20,05	20,09	20,12	20,16	20,11	20,06	20,03	20,01	20	20	20
50	20	20,02	20,04	20,08	20,13	20,15	20,08	20,01	19,97	19,92	19,81	19,62	19,82	19,96	20,04	20,08	20,09	20,12	20,10	20,06	20,03	20,01	20	20	20
100	20	20,01	20,04	20,07	20,11	20,10	20,05	19,99	19,96	19,92	19,83	19,70	19,84	19,96	20,03	20,06	20,07	20,08	20,08	20,05	20,03	20,01	20	20	20
50	20	20,01	20,03	20,06	20,08	20,06	20,02	19,98	19,96	19,93	19,86	19,76	19,87	19,96	20,02	20,04	20,05	20,06	20,06	20,04	20,02	20,01	20	20	20
100	20	20,01	20,03	20,05	20,06	20,04	20,01	19,97	19,96	19,93	19,88	19,81	19,89	19,97	20,01	20,03	20,04	20,04	20,05	20,04	20,02	20,01	20	20	20
50	20	20,01	20,02	20,04	20,04	20,02	20,00	19,97	19,96	19,94	19,90	19,85	19,91	19,97	20,01	20,02	20,03	20,03	20,04	20,03	20,02	20,01	20	20	20
100	20	20,01	20,02	20,03	20,03	20,01	19,99	19,97	19,96	19,95	19,92	19,89	19,93	19,98	20,00	20,01	20,02	20,02	20,03	20,03	20,02	20,01	20	20	20
50	20	20,01	20,01	20,02	20,02	20,01	19,99	19,98	19,97	19,96	19,94	19,92	19,94	19,98	20,00	20,01	20,01	20,02	20,02	20,02	20,02	20,01	20,01	20	20
100	20	20,00	20,01	20,01	20,01	20,00	19,99	19,98	19,98	19,97	19,96	19,94	19,96	19,99	20,00	20,01	20,01	20,01	20,02	20,01	20,01	20,01	20,00	20	20
50	20	20,00	20,00	20,01	20,01	20,00	20,00	19,99	19,99	19,98	19,98	19,97	19,98	19,99	20,00	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00	20	20
100	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

Şekil 5.7.a Harmonik ortalama için hidrolik yük değerleri (Ör. 3)

dy/dx	100	200	300	300	200	100	100	50	50	100	200	300	300	200	100	50	50	100	200	300	300	200	100
100	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
50	20	20,00	20,00	20,01	20,01	20,00	20,00	19,99	19,99	19,98	19,98	19,97	19,98	19,99	20,00	20,00	20,00	20,01	20,01	20,01	20,00	20,00	20
100	20	20,00	20,01	20,01	20,01	20,00	19,99	19,98	19,98	19,97	19,96	19,95	19,96	19,99	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00	20
50	20	20,01	20,01	20,02	20,02	20,01	19,99	19,98	19,97	19,96	19,94	19,92	19,95	19,98	20,00	20,01	20,01	20,02	20,02	20,02	20,01	20,00	20
100	20	20,01	20,02	20,03	20,03	20,01	19,99	19,97	19,97	19,95	19,92	19,89	19,93	19,98	20,00	20,01	20,02	20,02	20,03	20,02	20,01	20,01	20
50	20	20,01	20,02	20,04	20,04	20,02	20,00	19,97	19,96	19,94	19,90	19,85	19,91	19,97	20,01	20,02	20,03	20,03	20,04	20,03	20,02	20,01	20
100	20	20,01	20,03	20,05	20,06	20,04	20,01	19,97	19,96	19,93	19,88	19,81	19,89	19,97	20,01	20,03	20,04	20,04	20,05	20,04	20,02	20,01	20
50	20	20,01	20,03	20,06	20,08	20,06	20,02	19,98	19,96	19,93	19,86	19,76	19,87	19,96	20,02	20,04	20,05	20,06	20,06	20,04	20,02	20,01	20
100	20	20,01	20,04	20,07	20,11	20,10	20,05	19,99	19,96	19,92	19,84	19,70	19,84	19,96	20,03	20,06	20,07	20,08	20,08	20,05	20,03	20,01	20
50	20	20,02	20,04	20,08	20,13	20,15	20,08	20,01	19,97	19,92	19,81	19,62	19,83	19,96	20,04	20,07	20,09	20,12	20,09	20,05	20,03	20,01	20
100	20	20,02	20,04	20,08	20,15	20,22	20,10	20,02	19,98	19,92	19,80	19,55	19,81	19,96	20,05	20,09	20,12	20,16	20,11	20,06	20,03	20,01	20
50	20	20,02	20,04	20,08	20,16	20,40	20,13	20,03	19,98	19,92	19,79	19,43	19,81	19,96	20,05	20,10	20,15	20,27	20,11	20,06	20,03	20,01	20
100	20	20,02	20,04	20,08	20,15	20,22	20,10	20,02	19,98	19,92	19,80	19,55	19,81	19,96	20,05	20,09	20,12	20,16	20,11	20,06	20,03	20,01	20
50	20	20,02	20,04	20,08	20,13	20,15	20,08	20,01	19,97	19,92	19,81	19,62	19,83	19,96	20,04	20,07	20,09	20,12	20,09	20,05	20,03	20,01	20
100	20	20,01	20,04	20,07	20,11	20,10	20,05	19,99	19,96	19,92	19,83	19,70	19,84	19,96	20,03	20,06	20,07	20,08	20,08	20,05	20,03	20,01	20
50	20	20,01	20,03	20,06	20,08	20,06	20,02	19,98	19,96	19,93	19,86	19,76	19,87	19,96	20,02	20,04	20,05	20,06	20,06	20,04	20,02	20,01	20
100	20	20,01	20,03	20,05	20,06	20,04	20,01	19,97	19,96	19,93	19,88	19,81	19,89	19,97	20,01	20,03	20,03	20,04	20,05	20,04	20,02	20,01	20
50	20	20,01	20,02	20,04	20,04	20,02	20,00	19,97	19,96	19,94	19,90	19,85	19,91	19,97	20,01	20,02	20,03	20,03	20,04	20,03	20,02	20,01	20
100	20	20,01	20,02	20,03	20,03	20,01	19,99	19,97	19,96	19,95	19,92	19,89	19,93	19,98	20,00	20,01	20,02	20,02	20,03	20,02	20,01	20,01	20
50	20	20,01	20,01	20,02	20,02	20,01	19,99	19,98	19,97	19,96	19,94	19,92	19,95	19,98	20,00	20,01	20,01	20,02	20,02	20,02	20,01	20,00	20
100	20	20,00	20,01	20,01	20,01	20,00	19,99	19,98	19,98	19,97	19,96	19,95	19,96	19,99	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00	20
50	20	20,00	20,00	20,01	20,01	20,00	20,00	19,99	19,99	19,98	19,98	19,97	19,98	19,99	20,00	20,00	20,00	20,01	20,01	20,01	20,00	20,00	20
100	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

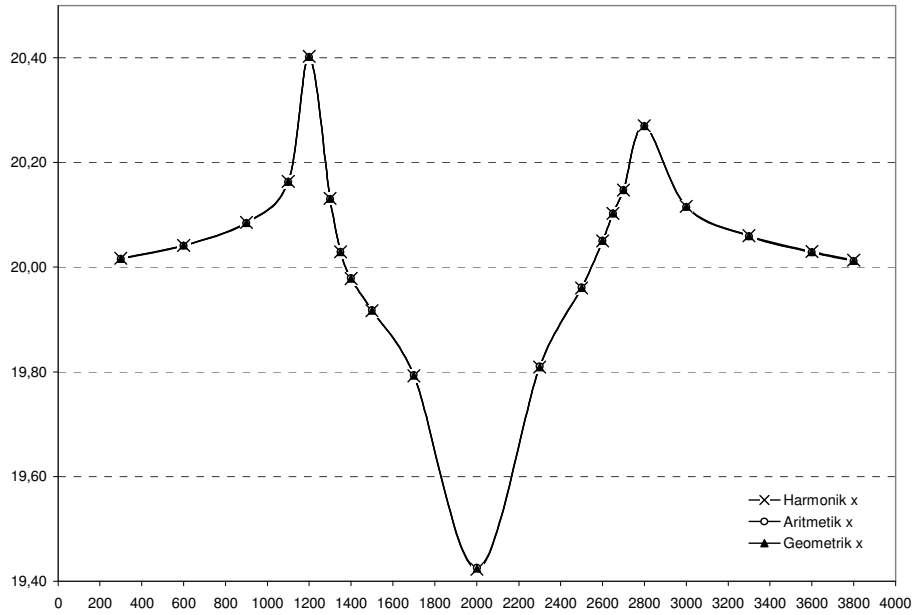
Şekil 5.7.b Aritmetik ortalama için hidrolik yük değerleri (Ör. 3)

dy/dx	100	200	300	300	200	100	100	50	50	100	200	300	300	200	100	50	50	100	200	300	300	200	100	
100	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
50	20	20,00	20,00	20,01	20,01	20,00	20,00	19,99	19,99	19,98	19,98	19,97	19,98	19,99	20,00	20,00	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00	20
100	20	20,00	20,01	20,01	20,01	20,00	19,99	19,98	19,98	19,97	19,96	19,94	19,96	19,99	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00	20
50	20	20,01	20,01	20,02	20,02	20,01	19,99	19,98	19,97	19,96	19,94	19,92	19,95	19,98	20,00	20,01	20,01	20,02	20,02	20,02	20,02	20,01	20,01	20
100	20	20,01	20,02	20,03	20,03	20,01	19,99	19,97	19,96	19,95	19,92	19,89	19,93	19,98	20,00	20,01	20,02	20,02	20,03	20,03	20,03	20,01	20,01	20
50	20	20,01	20,02	20,04	20,04	20,02	20,00	19,97	19,96	19,94	19,90	19,85	19,91	19,97	20,01	20,02	20,03	20,03	20,04	20,03	20,04	20,02	20,01	20
100	20	20,01	20,03	20,05	20,06	20,04	20,01	19,97	19,96	19,93	19,88	19,81	19,89	19,97	20,01	20,03	20,04	20,04	20,05	20,04	20,05	20,02	20,01	20
50	20	20,01	20,03	20,06	20,08	20,06	20,02	19,98	19,96	19,93	19,86	19,76	19,87	19,96	20,02	20,04	20,05	20,06	20,06	20,04	20,06	20,02	20,01	20
100	20	20,01	20,04	20,07	20,11	20,10	20,05	19,99	19,96	19,92	19,83	19,70	19,84	19,96	20,03	20,06	20,07	20,08	20,08	20,05	20,08	20,03	20,01	20
50	20	20,02	20,04	20,08	20,13	20,15	20,08	20,01	19,97	19,92	19,81	19,62	19,83	19,96	20,04	20,07	20,09	20,12	20,09	20,06	20,12	20,03	20,01	20
100	20	20,02	20,04	20,08	20,15	20,22	20,11	20,02	19,98	19,92	19,80	19,55	19,81	19,96	20,05	20,09	20,12	20,16	20,11	20,06	20,16	20,03	20,01	20
50	20	20,02	20,04	20,09	20,16	20,40	20,13	20,03	19,98	19,92	19,79	19,42	19,81	19,96	20,05	20,10	20,15	20,27	20,12	20,06	20,15	20,03	20,01	20
100	20	20,02	20,04	20,08	20,15	20,22	20,11	20,02	19,98	19,92	19,80	19,55	19,81	19,96	20,05	20,09	20,12	20,16	20,11	20,06	20,16	20,03	20,01	20
50	20	20,02	20,04	20,08	20,13	20,15	20,08	20,01	19,97	19,92	19,81	19,62	19,83	19,96	20,04	20,07	20,09	20,12	20,09	20,06	20,12	20,03	20,01	20
100	20	20,01	20,04	20,07	20,11	20,10	20,05	19,99	19,96	19,92	19,83	19,70	19,84	19,96	20,03	20,06	20,07	20,08	20,08	20,05	20,08	20,03	20,01	20
50	20	20,01	20,03	20,06	20,08	20,06	20,02	19,98	19,96	19,93	19,86	19,76	19,87	19,96	20,02	20,04	20,05	20,06	20,06	20,04	20,06	20,02	20,01	20
100	20	20,01	20,03	20,05	20,06	20,04	20,01	19,97	19,96	19,93	19,88	19,81	19,89	19,97	20,01	20,03	20,04	20,04	20,05	20,04	20,05	20,02	20,01	20
50	20	20,01	20,02	20,04	20,04	20,02	20,00	19,97	19,96	19,94	19,90	19,85	19,91	19,97	20,01	20,02	20,03	20,03	20,04	20,03	20,04	20,02	20,01	20
100	20	20,01	20,02	20,03	20,03	20,01	19,99	19,97	19,96	19,95	19,92	19,89	19,93	19,98	20,00	20,01	20,02	20,02	20,03	20,02	20,03	20,01	20,01	20
50	20	20,01	20,01	20,02	20,02	20,01	19,99	19,98	19,97	19,96	19,94	19,92	19,95	19,98	20,00	20,01	20,01	20,02	20,02	20,02	20,02	20,01	20,01	20
100	20	20,00	20,01	20,01	20,01	20,00	19,99	19,98	19,98	19,97	19,96	19,94	19,96	19,99	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00	20
50	20	20,00	20,00	20,01	20,01	20,00	20,00	19,99	19,99	19,98	19,98	19,97	19,98	19,99	20,00	20,00	20,00	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00	20
100	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

Şekil 5.7.c Geometrik ortalama için hidrolik yük değerleri (Ör. 3)

**Tablo 5.7** A-A kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör. 3)

x	H		
	HARMONİK	ARİTMETİK	GEOMETRİK
300	20,0169	20,0158	20,0163
600	20,0418	20,0409	20,0413
900	20,0857	20,0846	20,0851
1100	20,1644	20,1627	20,1636
1200	20,4029	20,4012	20,4021
1300	20,1315	20,1302	20,1309
1350	20,0297	20,0289	20,0293
1400	19,9782	19,9787	19,9784
1500	19,9168	19,9177	19,9173
1700	19,7921	19,7937	19,7929
2000	19,4229	19,4254	19,4241
2300	19,8088	19,8101	19,8094
2500	19,9603	19,9608	19,9605
2600	20,0501	20,0500	20,0500
2650	20,1030	20,1022	20,1026
2700	20,1477	20,1468	20,1473
2800	20,2704	20,2694	20,2699
3000	20,1161	20,1149	20,1155
3300	20,0603	20,0589	20,0596
3600	20,0301	20,0284	20,0292
3800	20,0140	20,0115	20,0126

**Şekil 5.8.a** A-A kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri grafiği (Ör. 3)

**Tablo 5.8** B-B kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör. 3)

y	H		
	HARMONİK	ARİTMETİK	GEOMETRİK
150	19,9675	19,9689	19,9682
250	19,9441	19,9453	19,9447
300	19,9177	19,9186	19,9181
400	19,8889	19,8896	19,8892
450	19,8534	19,8539	19,8536
550	19,8131	19,8133	19,8132
600	19,7595	19,7594	19,7595
700	19,6966	19,6961	19,6963
750	19,6186	19,6214	19,6199
850	19,5446	19,5472	19,5458
900	19,4229	19,4254	19,4241
1000	19,5445	19,5471	19,5458
1050	19,6185	19,6213	19,6198
1150	19,6964	19,6959	19,6962
1200	19,7593	19,7592	19,7593
1300	19,8128	19,8130	19,8129
1350	19,8531	19,8536	19,8533
1450	19,8886	19,8893	19,8890
1500	19,9175	19,9184	19,9179
1600	19,9439	19,9451	19,9445
1650	19,9674	19,9688	19,9680

**Şekil 5.8.b** B-B kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri grafiği (Ör. 3)

### 5.5. Örnek 4

Geçiş bölgesindeki hidrolik yük değerlerinin değişimini daha iyi incelemek için Örnek 4 te hidrolik iletkenlik katsayısı  $K_5=200$  m/gün olarak değiştirilmiştir. Böylece hesapta yumuşak geçiş ve ani geçiş yerine aşırı ani geçiş kullanılmıştır.

Buna göre hidrolik iletkenlik sayfasında  $K_1=15$  m/gün,  $K_2=25$  m/gün,  $K_3=35$  m/gün,  $K_4=30$  m/gün,  $K_5=200$  m/gün ve  $K_6=50$  m/gün olarak hidrolik iletkenlik katsayıları tanımlanmıştır (Şekil 5.9). Bunların dışında iterasyon sayısı, hata toleransı, özgül depolama katsayısı, maksimum hesap süresi, hesap adımı, değişken grid yapısı değerleri, kaynak-yitik kuyu debileri ve yerleşimleri ile çözüm yöntemi Örnek 3 ile aynıdır.

Harmonik, aritmetik ve geometrik ortalamalara ilişkin çözüm sayfaları sırasıyla Şekil 5.10.a-c de verilmiştir. Yine kuyuların bulunduğu noktadan geçecek biçimde sırasıyla  $x$  yönünde A-A ve  $y$  yönünde B-B kesitleri alınmıştır. Hidrolik yük değerlerinin değişimi çizelge (Tablo 5.9, Tablo 5.10) ve grafik (Şekil 5.11.a, Şekil 5.11.b) olarak verilmiştir. Ayrıca geçiş bölgesindeki değişimi daha iyi yansıtmak için  $K_5=200$  m/gün olan bölge civarındaki ( $x$  yönünde 1300-2700 m ve  $y$  yönünde 550-1300 m arası) hidrolik yük değerleri grafiği Şekil 5.11.c ve Şekil 5.11.d de verilmiştir.

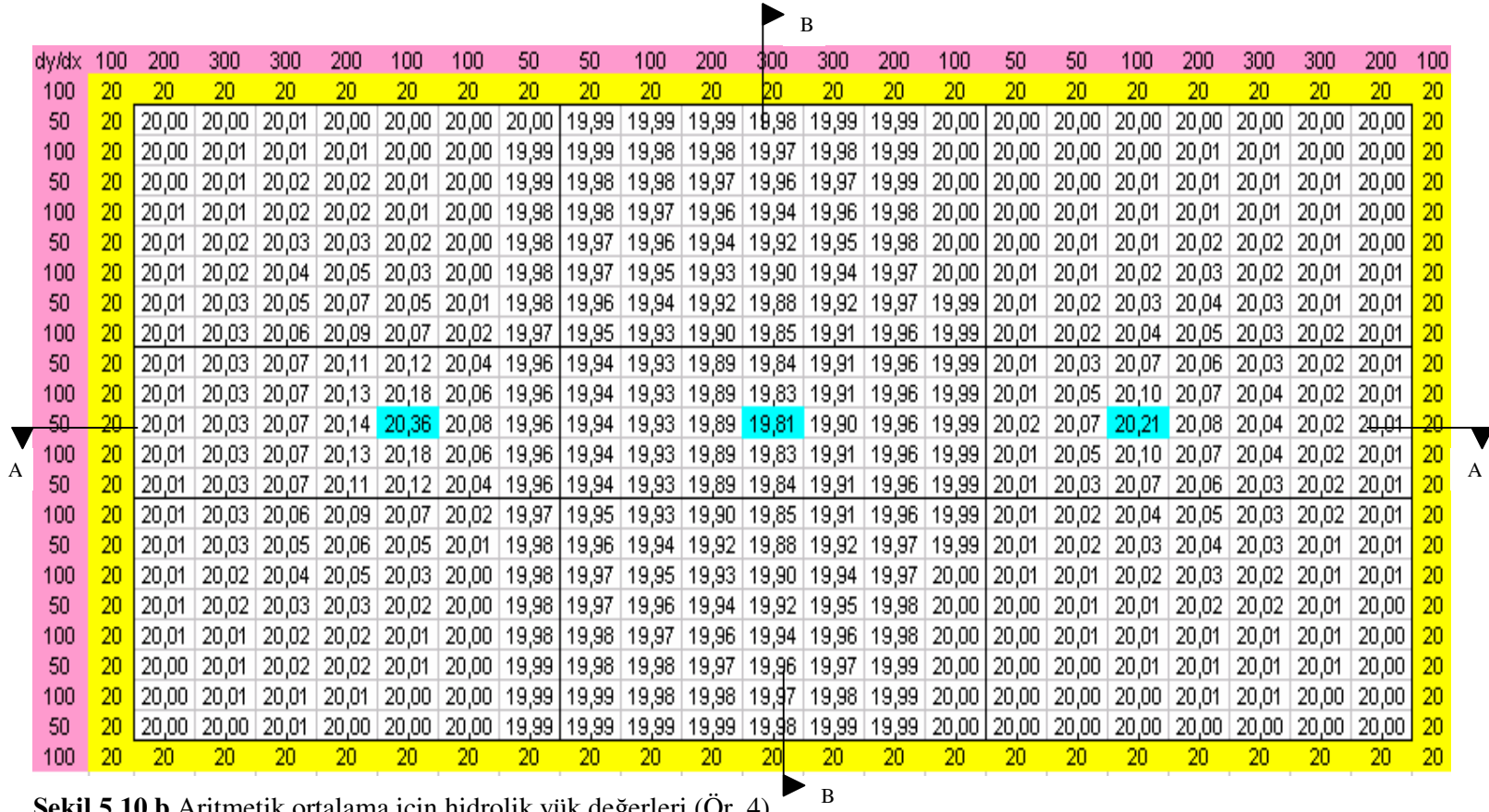
Örnek 4 ün çözümü sonucunda zemindeki hidrolik iletkenlik katsayıları arasında yumuşak yerine aşırı ani geçiş olması durumunda geçiş bölgesindeki hidrolik yük davranışı daha belirgin gözlemlenmiştir. Aşırı artırılmış  $K$  değerinden küçük  $K$  değerlerine geçişte grafikteki eğriler birbirlerine yeniden yakınlaşmaktadır (Şekil 5.11.c ve Şekil 5.11.d). Aynı geçiş bölgesinde, geometrik ortalama ile hesaplanan hidrolik yük değerleri aritmetik ortalama ile hesaplanandan küçük, harmonik ortalama ile hesaplanandan büyüktür. Dolayısıyla geometrik ortalamanın eğrisi diğer ikisinin ortasındadır.





dy/dx	100	200	300	300	200	100	100	50	50	100	200	300	300	200	100	50	50	100	200	300	300	200	100	
100	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
50	20	20,00	20,00	20,01	20,00	20,00	20,00	19,99	19,99	19,99	19,99	19,98	19,99	19,99	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,01	20,00	20,00	20	
100	20	20,00	20,01	20,01	20,01	20,00	20,00	19,99	19,99	19,98	19,98	19,97	19,98	19,99	20,00	20,00	20,00	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00	20
50	20	20,00	20,01	20,02	20,02	20,01	20,00	19,99	19,98	19,98	19,97	19,96	19,97	19,98	20,00	20,00	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00	20
100	20	20,01	20,02	20,03	20,02	20,01	20,00	19,98	19,98	19,97	19,96	19,94	19,96	19,98	20,00	20,00	20,01	20,01	20,02	20,01	20,01	20,01	20,00	20
50	20	20,01	20,02	20,03	20,03	20,02	20,00	19,98	19,97	19,96	19,94	19,92	19,95	19,98	19,99	20,00	20,01	20,01	20,02	20,02	20,02	20,01	20,01	20
100	20	20,01	20,02	20,04	20,05	20,03	20,00	19,98	19,97	19,95	19,93	19,91	19,93	19,97	19,99	20,01	20,01	20,02	20,03	20,02	20,01	20,01	20,01	20
50	20	20,01	20,03	20,05	20,07	20,05	20,01	19,98	19,96	19,94	19,91	19,88	19,92	19,96	19,99	20,01	20,02	20,03	20,04	20,03	20,01	20,01	20,01	20
100	20	20,01	20,03	20,06	20,09	20,07	20,02	19,97	19,95	19,93	19,90	19,85	19,91	19,96	19,99	20,01	20,02	20,04	20,05	20,03	20,02	20,01	20,01	20
50	20	20,01	20,03	20,07	20,11	20,12	20,04	19,96	19,93	19,92	19,88	19,83	19,90	19,95	19,98	20,01	20,03	20,07	20,06	20,03	20,02	20,01	20,01	20
100	20	20,01	20,04	20,07	20,13	20,19	20,06	19,97	19,93	19,91	19,88	19,82	19,90	19,95	19,98	20,01	20,05	20,10	20,07	20,04	20,02	20,01	20,01	20
50	20	20,01	20,04	20,07	20,14	20,37	20,09	19,97	19,93	19,91	19,88	19,79	19,90	19,95	19,98	20,02	20,08	20,21	20,08	20,04	20,02	20,01	20,01	20
100	20	20,01	20,04	20,07	20,13	20,19	20,06	19,97	19,93	19,91	19,88	19,82	19,90	19,95	19,98	20,01	20,05	20,10	20,07	20,04	20,02	20,01	20,01	20
50	20	20,01	20,03	20,07	20,11	20,12	20,04	19,96	19,93	19,92	19,88	19,83	19,90	19,95	19,98	20,01	20,03	20,07	20,06	20,03	20,02	20,01	20,01	20
100	20	20,01	20,03	20,06	20,09	20,07	20,02	19,97	19,95	19,93	19,90	19,85	19,91	19,96	19,99	20,01	20,02	20,04	20,05	20,03	20,02	20,01	20,01	20
50	20	20,01	20,03	20,05	20,07	20,05	20,01	19,98	19,96	19,94	19,91	19,88	19,92	19,96	19,99	20,01	20,02	20,03	20,04	20,03	20,01	20,01	20,01	20
100	20	20,01	20,02	20,04	20,05	20,03	20,00	19,98	19,97	19,95	19,93	19,90	19,93	19,97	19,99	20,01	20,01	20,02	20,03	20,02	20,01	20,01	20,01	20
50	20	20,01	20,02	20,03	20,03	20,02	20,00	19,98	19,97	19,96	19,94	19,92	19,95	19,97	19,99	20,00	20,01	20,01	20,02	20,02	20,01	20,01	20,01	20
100	20	20,01	20,02	20,03	20,02	20,01	20,00	19,98	19,98	19,97	19,95	19,94	19,96	19,98	20,00	20,00	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00	20
50	20	20,00	20,01	20,02	20,02	20,01	20,00	19,99	19,98	19,98	19,97	19,96	19,97	19,98	20,00	20,00	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00	20
100	20	20,00	20,01	20,01	20,01	20,00	20,00	19,99	19,99	19,98	19,98	19,97	19,98	19,99	20,00	20,00	20,00	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00	20
50	20	20,00	20,00	20,01	20,00	20,00	20,00	19,99	19,99	19,99	19,99	19,98	19,99	19,99	20,00	20,00	20,00	20,00	20,01	20,00	20,00	20,00	20,00	20
100	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

Şekil 5.10.a Harmonik ortalama için hidrolik yük değerleri (Ör. 4)



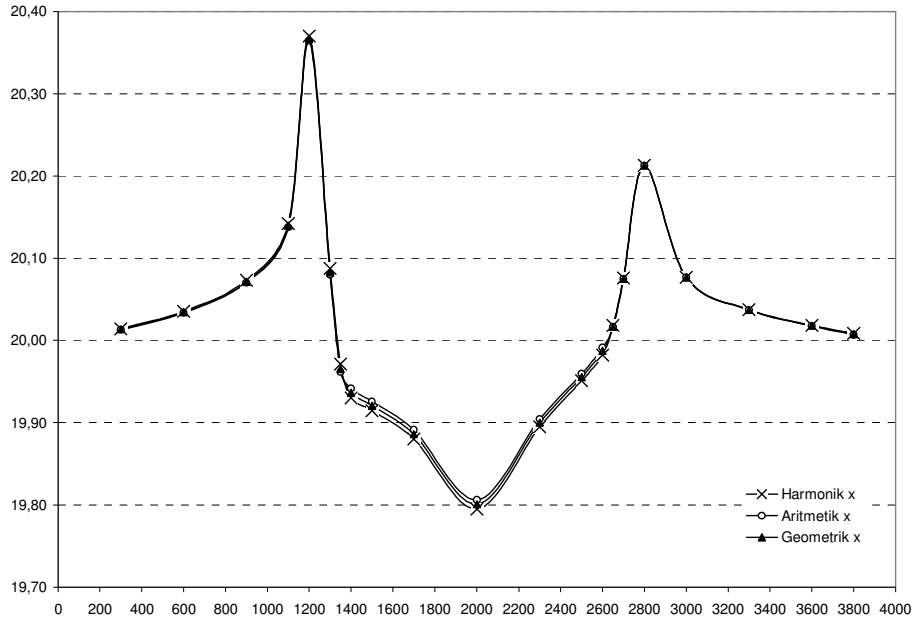
Şekil 5.10.b Aritmetik ortalama için hidrolik yük değerleri (Ör. 4)

dy/dx	100	200	300	300	200	100	100	50	50	100	200	300	300	200	100	50	50	100	200	300	300	200	100
100	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
50	20	20,00	20,00	20,01	20,00	20,00	20,00	19,99	19,99	19,99	19,99	19,98	19,99	19,99	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
100	20	20,00	20,01	20,01	20,01	20,00	20,00	19,99	19,99	19,98	19,98	19,97	19,98	19,99	20,00	20,00	20,00	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00
50	20	20,00	20,01	20,02	20,02	20,01	20,00	19,99	19,98	19,98	19,97	19,96	19,97	19,99	20,00	20,00	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00
100	20	20,01	20,02	20,02	20,02	20,01	20,00	19,98	19,98	19,97	19,96	19,94	19,96	19,98	20,00	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00
50	20	20,01	20,02	20,03	20,03	20,02	20,00	19,98	19,97	19,96	19,94	19,92	19,95	19,98	20,00	20,00	20,01	20,01	20,02	20,02	20,02	20,01	20,00
100	20	20,01	20,02	20,04	20,05	20,03	20,00	19,98	19,97	19,95	19,93	19,91	19,94	19,97	19,99	20,01	20,01	20,02	20,03	20,02	20,01	20,01	20,00
50	20	20,01	20,03	20,05	20,07	20,05	20,01	19,98	19,96	19,94	19,91	19,88	19,92	19,97	19,99	20,01	20,02	20,03	20,04	20,03	20,01	20,01	20,00
100	20	20,01	20,03	20,06	20,09	20,07	20,02	19,97	19,95	19,93	19,90	19,85	19,91	19,96	19,99	20,01	20,02	20,04	20,05	20,03	20,02	20,01	20,00
50	20	20,01	20,03	20,07	20,11	20,12	20,04	19,96	19,94	19,92	19,89	19,83	19,90	19,96	19,99	20,01	20,03	20,07	20,06	20,03	20,02	20,01	20,00
100	20	20,01	20,03	20,07	20,13	20,18	20,06	19,96	19,94	19,92	19,89	19,82	19,90	19,96	19,99	20,01	20,05	20,10	20,07	20,04	20,02	20,01	20,00
50	20	20,01	20,03	20,07	20,14	20,37	20,08	19,97	19,94	19,92	19,89	19,80	19,90	19,96	19,99	20,02	20,07	20,21	20,08	20,04	20,02	20,01	20,00
100	20	20,01	20,03	20,07	20,13	20,18	20,06	19,96	19,94	19,92	19,89	19,82	19,90	19,96	19,99	20,01	20,05	20,10	20,07	20,04	20,02	20,01	20,00
50	20	20,01	20,03	20,07	20,11	20,12	20,04	19,96	19,94	19,92	19,89	19,83	19,90	19,96	19,99	20,01	20,03	20,07	20,06	20,03	20,02	20,01	20,00
100	20	20,01	20,03	20,06	20,09	20,07	20,02	19,97	19,95	19,93	19,90	19,85	19,91	19,96	19,99	20,01	20,02	20,04	20,05	20,03	20,02	20,01	20,00
50	20	20,01	20,03	20,05	20,07	20,05	20,01	19,98	19,96	19,94	19,91	19,88	19,92	19,97	19,99	20,01	20,02	20,03	20,04	20,03	20,01	20,01	20,00
100	20	20,01	20,02	20,04	20,05	20,03	20,00	19,98	19,97	19,95	19,93	19,90	19,94	19,97	19,99	20,01	20,01	20,02	20,03	20,02	20,01	20,01	20,00
50	20	20,01	20,02	20,03	20,03	20,02	20,00	19,98	19,97	19,96	19,94	19,92	19,95	19,98	20,00	20,00	20,01	20,01	20,02	20,02	20,01	20,00	20,00
100	20	20,01	20,01	20,02	20,02	20,01	20,00	19,98	19,98	19,97	19,96	19,94	19,96	19,98	20,00	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00
50	20	20,00	20,01	20,02	20,02	20,01	20,00	19,99	19,98	19,98	19,97	19,96	19,97	19,99	20,00	20,00	20,00	20,01	20,01	20,01	20,01	20,01	20,00
100	20	20,00	20,01	20,01	20,01	20,00	20,00	19,99	19,99	19,98	19,98	19,97	19,98	19,99	20,00	20,00	20,00	20,00	20,01	20,01	20,00	20,00	20,00
50	20	20,00	20,00	20,01	20,00	20,00	20,00	19,99	19,99	19,99	19,99	19,98	19,99	19,99	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
100	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

Şekil 5.10.c Geometrik ortalama için hidrolik yük değerleri (Ör. 4)

**Tablo 5.9** A-A kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör. 4)

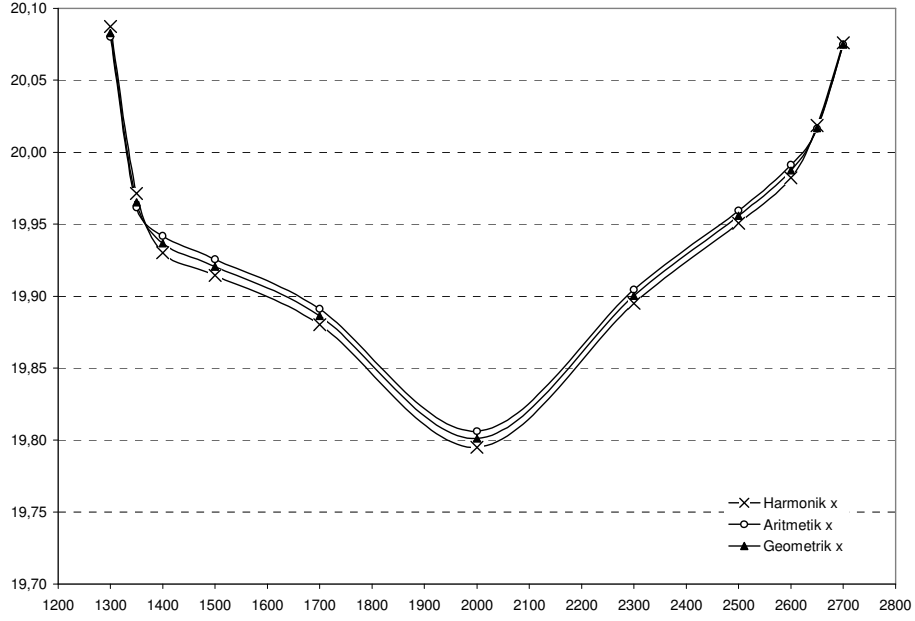
x	H		
	HARMONİK	ARİTMETİK	GEOMETRİK
300	20,0143	20,0130	20,0136
600	20,0355	20,0339	20,0345
900	20,0731	20,0703	20,0714
1100	20,1423	20,1377	20,1395
1200	20,3705	20,3645	20,3668
1300	20,0875	20,0801	20,0829
1350	19,9715	19,9616	19,9653
1400	19,9302	19,9419	19,9367
1500	19,9143	19,9256	19,9206
1700	19,8803	19,8913	19,8863
2000	19,7949	19,8061	19,8010
2300	19,8951	19,9045	19,9003
2500	19,9508	19,9595	19,9557
2600	19,9824	19,9912	19,9874
2650	20,0185	20,0164	20,0169
2700	20,0760	20,0747	20,0749
2800	20,2132	20,2125	20,2125
3000	20,0769	20,0763	20,0764
3300	20,0376	20,0370	20,0372
3600	20,0185	20,0176	20,0180
3800	20,0086	20,0071	20,0077

**Şekil 5.11.a** A-A kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri grafiği (Ör. 4)

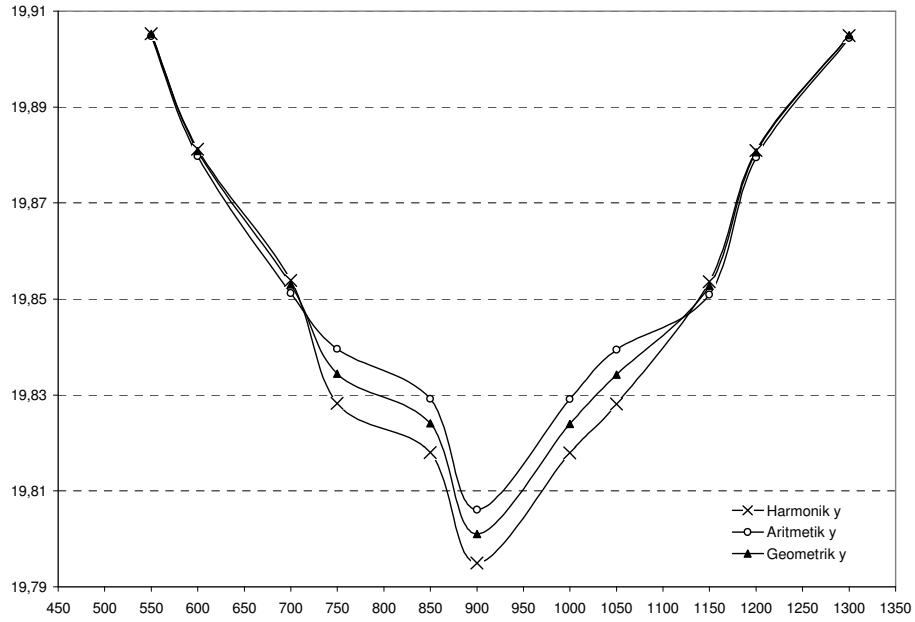
**Tablo 5.10** B-B kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör. 4)

y	H		
	HARMONİK	ARİTMETİK	GEOMETRİK
150	19,9826	19,9834	19,9831
250	19,9702	19,9709	19,9706
300	19,9565	19,9570	19,9569
400	19,9418	19,9421	19,9422
450	19,9245	19,9244	19,9247
550	19,9053	19,9047	19,9053
600	19,8812	19,8798	19,8809
700	19,8539	19,8512	19,8530
750	19,8283	19,8396	19,8344
850	19,8180	19,8292	19,8241
900	19,7949	19,8061	19,8010
1000	19,8179	19,8291	19,8240
1050	19,8281	19,8394	19,8342
1150	19,8536	19,8509	19,8527
1200	19,8809	19,8795	19,8806
1300	19,9049	19,9044	19,9050
1350	19,9241	19,9241	19,9243
1450	19,9415	19,9418	19,9418
1500	19,9562	19,9567	19,9566
1600	19,9700	19,9707	19,9704
1650	19,9825	19,9833	19,9829

**Şekil 5.11.b** B-B kesitinde konuma göre hidrolik yük değerleri grafiği (Ör. 4)



Şekil 5.11.c A-A kesitinde değişim bölgesi civarındaki konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör. 4)



Şekil 5.11.d B-B kesitinde değişim bölgesi civarındaki konuma göre hidrolik yük değerleri çizelgesi (Ör. 4)

## 6. SONUÇ

### 6.1. Modellemeye İlişkin Sonuçlar

Bu bölümde, tez kapsamında gerçekleştirilmiş çalışmaların sonuçları özetlenmiştir. Daha sonra sonuçların bilimsel çalışmalarda ve uygulamada kullanılmasına yönelik öneriler sunulmuştur.

Tezde geçiş bölgesindeki akım karakteristiklerinin incelenmesi için iki boyutlu yeraltısuyu akımı temel denkleminin sayısal çözümünde hidrolik iletkenlik katsayılarının harmonik, aritmetik ve geometrik ortalamaları kullanılmıştır. Sayısal çözümün analitik çözüm ile karşılaştırılması için sayısal örnekler türetilerek sonuçların daha iyi değerlendirilmesi sağlanmıştır.

Örnek 1’de yeraltısuyu akımının Lesnic vd (1998) tarafından verilmiş olan analitik çözümü sayısal çözümle karşılaştırılmıştır. Analitik çözümde zemin hidrolik iletkenlikleri belli sabit sayılara bağlı olarak fonksiyonel biçimde değişmektedir. Sayısal çözümde aynı hidrolik iletkenliklerin harmonik, aritmetik ve geometrik ortalamaları kullanılmıştır. Analitik ve sayısal çözümlerde yaklaşık aynı sonuçlar bulunmuştur. Böylece kurulan matematiksel modelin sayısal yöntemle çözümünün doğruluğu gösterilmiştir. Bu karşılaştırmada kullanılan hata ölçütlerinin tümü için en küçük hata miktarı ile geometrik ortalama karşılaştırılmıştır. Dolayısıyla analitik çözüme en yakın sonucu geometrik ortalama vermektedir.

Örnek 2’de ise, analitik yöntem için Örnek 1’de verilen sabit sayılar küçültülerek H değerleri artırılmıştır. Burada amaç gerçeğe daha yakın H değerleri ile işlem yapmaktır. Bunun dışında Örnek 1’deki ile aynı yol izlenmiştir. Sonuçlarda analitik ve sayısal çözümler yaklaşık aynı değerleri vermiştir. En küçük hata ile yine geometrik ortalama

karşılaşılmıştır. Ayrıca gerçeğe yaklaştırılmış H değerleri söz konusu olduğunda görelî maksimum hata miktarları Örnek 1'e göre azalmıştır (Tablo 6.1).

**Tablo 6.1** Örnek 1 ve Örnek 2 arasında görelî hataların karşılaştırılması

	%RE MAX		
	ÖR 1	ÖR 2	Azalma Oranı (%)
H.O	8,53E-03	5,19E-03	39
A.O	7,06E-03	5,25E-03	26
G.O	4,39E-03	2,87E-05	99

Örnek 3'te analitik yöntemden bağımsız bir yol izlenerek sadece sayısal yöntemde kullanılan ortalamaların etkisi izlenmiştir. İnceleme alanında 6 adet farklı hidrolik iletkenlik katsayısı tanımlanmıştır. Böylece doğal durumda daha sık karşılaşılan ani hidrolik iletkenlik katsayısı değişimleri modellenmiştir. İnceleme alanında x ve y yönlerinde kesitler alınmıştır. Harmonik, aritmetik ve geometrik ortalamalar birbirine çok yakın değerler vermiştir.

Geçiş bölgesindeki hidrolik yük değerlerinin değişimini daha iyi incelemek için Örnek 4'te hidrolik iletkenlik katsayıları arasında aşırı ani geçiş kullanılmıştır. Yine sadece sayısal yöntemler ile yapılan çözümde harmonik, aritmetik ve geometrik ortalamalar birbirine yakın değerler vermiştir. Ayrıca aşırı artırılmış K değerinden daha küçük K değerlerine geçişte geometrik ortalama ile hesaplanan değerler aritmetik ortalamadan küçük ve harmonik ortalamadan büyük kalmıştır.

## 6.2. Öneriler

Yeraltısuyu akımı incelenirken matematiksel modeller geliştirmek daha kısa sürede çözüme ulaşmak için tercih edilebilir. Matematiksel modeller oluşturulurken doğal zemin koşullarının modele doğru biçimde aktarılmasının çözümün duyarlılığını artıracığı ve sonucu gerçeğe yaklaştıracağı unutulmamalıdır. Problem koşullarının basitleştirilmesi için yapılan kabuller işlem süresini azaltmasına karşın çözümü gerçekten uzaklaştırmaktadır.

Matematiksel modellerin sayısal yöntemler ile çözümünde klasik yaklaşımlar yerine elektronik tablolama yöntemi kullanılabilir. Elektronik tablolardaki bir hücre sayısal



yöntemdeki bir nokta ile eşleştirilerek çözümde kolaylık sağlanmaktadır. Ayrıca elektronik tablolamada düzensiz akifer geometrisi, değişken sınır koşulları, çekim ve besleme değerleri ve hidrolik iletkenlik, özgül depolama katsayısı gibi akifer parametreleri kolayca tanımlanabilmekte ve bunlardan herhangi birinde yapılacak değişikliğin çözümdeki etkisi anında izlenebilmektedir. Sonuçlar çizelge, grafik veya kontur olarak verilebilmekte böylece sunumlarda anlatım kolaylığı sağlanmaktadır.

Hidrolik iletkenlik özellikleri farklı olan komşu zeminler arasında yeraltısuyu akımı incelenirken sayısal yöntemlerden yararlanılabilir. Sayısal yöntemde hidrolik iletkenlik katsayılarının geometrik ortalaması analitik yöntemle çok yakın değerler vermektedir. Analitik yöntem ile sayısal yöntem arasındaki en küçük göreceli hata ile sayısal yöntemde hidrolik iletkenliklerin geometrik ortalaması kullanıldığında karşılaşılmaktadır. Bu tez kapsamında incelenen örneklerde geçiş arayüzlerindeki davranışı en iyi biçimde geometrik ortalamanın yansıttığı görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- Ames, W. F. (1992) Numerical Methods for Partial Differential Equations, *Academic Press*, New York, 451 s.
- Anderson, M. P. and Woessner, W. W. (1992) Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, *Academic Press*, San Diego, 381 s.
- Ayvaz, M. T. (2004) Serbest Yüzeyle Sızma Problemlerinin Çözümü İçin Pratik Bir Yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 92 s.
- Bitterlich, S., Durner, W., Iden, S. C., Knabner, P. (2003) Inverse Estimation of the Unsaturated Soil Hydraulic Properties from Column Outflow Experiments Using Free-Form Parameterizations. *Vadose Zone Journal*, OL.000, 1-22.
- Bredehoeft, J. D. (1969) Finite Difference Approximation to the Equations of Groundwater Flow. *Water Resources Research*, Vol. 5(2).
- Bredehoeft, J. D. and Pinder, G. F. (1968) Application of the Digital Computer for Aquifer Evaluation. *Water Resources Research*, Vol. 4(5).
- Bredehoeft, J. D. and Pinder, G. F. (1970) Digital Analysis of Arial Flow in Multiaquifer Groundwater Systems: A Quasi Three Dimensional Model. *Water Resources Research*, Vol. 6(3), 883-888.
- Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1964) Hydraulic Properties of Porous Media. *Hydrol. Pap. 3*, Colorado State University, Fort Collins.
- Dagan, G. and Bresler, E. (1979) Solute Dispersion in Unsaturated Heterogeneous Soils at Field Scale Theory. *Soil Science Society of America Journal*, 43, 461-467.
- Freeze, R. A. and Witherspoon, P. A. (1966) Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow, 1: Analytical and Numerical Solutions to the Mathematical Model. *Water Resources Research*, Vol. 2(4), 641-656.
- Freeze, R. A. and Witherspoon, P. A. (1967) Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow, 2: Effect of Water-Table Configuration and Subsurface Permeability Variation. *Water Resources Research*, Vol. 3(2), 623-634.
- Gasto, J. M., Grifoll, J., Cohen, Y. (2002) Estimation of Internodal Permeabilities for Numerical Simulation of Unsaturated Flows. *Water Resources Research*, 38(12)
- Gürarlan, G. (2005) Düzensiz Sonlu Fark Hesap Şeması Kullanarak İki Boyutlu Yeraltısuyu Akımının Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 65 s.
- Gürarlan, G., Karahan, H. (2006) Düzensiz Sonlu Fark Hesap Şeması Kullanılarak Zamana Bağlı İki Boyutlu Yeraltısuyu Modellemesi, *Yedinci Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi*, İstanbul, *baskıda*.
- İrfanoğlu, B. (1994) Yeraltısuyunda Kirliliğin Nümerik Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 106 s.
- Karahan, H. (1997) Yüzeysel Su Yeraltısuyu İlişkisinin Üç Boyutlu Matematik Modellemesi, *İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, III. Tenik Kongre*, Ankara, s. 379-386.

- Karahan, H. and Ayvaz, M. T. (2005 a) Transient Groundwater Modeling Using Spreadsheets. *Advances in Engineering Software*, 36, 374-384.
- Karahan, H. and Ayvaz, M. T. (2005 b) Time-Dependent Groundwater Modeling Using Spreadsheet. *Wiley Periodicals Inc. Comput. Appl. Eng. Educ.*, 13, 192-199.
- Karahan, H., Gürarlan, G., Ayvaz, M.T. (2006) Yeraltısuyu Modellemesinde İteratif ve Doğrudan Çözüm Algoritmalarının Karşılaştırılması, *Yedinci Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi*, İstanbul, *baskıda*.
- Kinzelbach, K. (1986) Groundwater Modeling: An Introduction with Sample Programs in BASIC, *Elsevier*, New York, 333 s.
- Lam, C. Y. (1994) Applied Numerical Methods for Partial Differential Equations, *Prentice Hall*, Singapore, 262 s.
- Larson, S. P. and Trescott, P. C. (1977) Solution of Water-Table and Anisotropic Flow Problems by Using the Strongly Implicit Procedure. *Journal Research of U. S. Geological Survey*, 5(6), 815-821.
- Lesnic, D., Elliot, L., Ingham D. B. (1998) A Boundary Element Method for the Determination of the Transmissivity of A Heterogeneous Aquifer in Groundwater Flow Systems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 21. 223-234.
- Mualem, Y. (1976) A new Model for Predicting the Hydraulic Conductivity Unsaturated Porous Media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522.
- Pricket, T. A. and Lonquist, G. (1971) Selected Digital Computer Techniques for Groundwater Resource Evaluation, *Illinois State Water Survey Bulletin*, 55, 62 s.
- Ruan, H. and Illangasekare, T. H., (1999) Estimation of Relative Hydraulic Conductivity of Sandy Soils Based on A Sheet Flow Model. *Journal of Hydrology*, 219, 83-93.
- Severino, G., Santini, A., Sommella, A. (2003) Determining the Soil Hydraulic Conductivity by Means of A Field Scale Internal Drainage. *Journal of Hydrology*, 1-15.
- Taylor, G. S. and Luthin, J. N. (1969) Computer Methods for Transient Analysis of Water-Table Aquifers. *Water Resources Research*, Vol. 5(1).
- van Genuchten, M. T. (1980) A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- Wang, H. F. and Anderson M. P. (1982) Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods, *Academic Press*, San Diego, 237 s.
- Warrick, A. W. (1991) Numerical Approximation of Darcian Flow Through Unsaturated Soil. *Water Resources Research*, 27, 1215-1222.
- Yılmaz, H. (1999) Elektronik Tablolama Yöntemi ile Yeraltı Su Akımının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 166 s.

**EKLER**

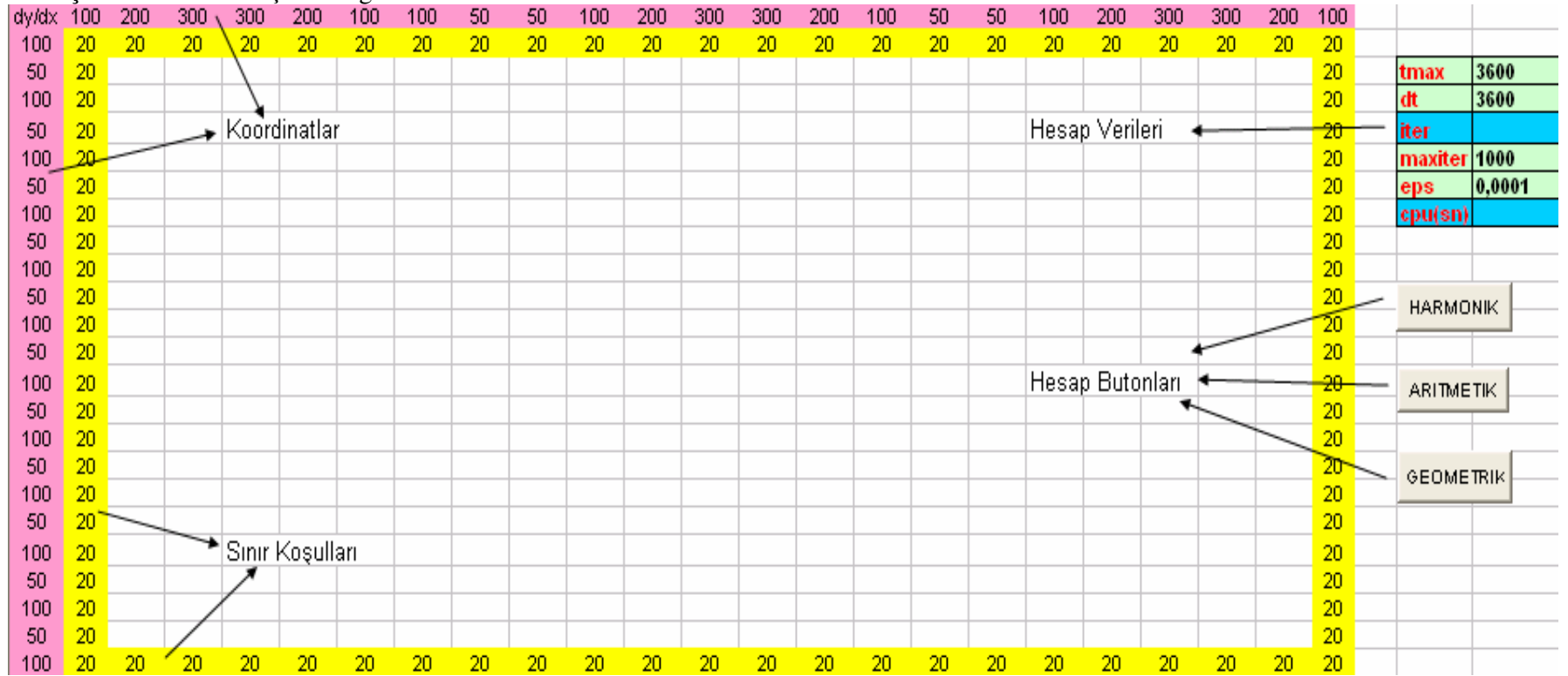
**Ek 1** Analitik ve sayısal yöntemlerde kullanılan hidrolik iletkenlik katsayısı değerleri (Ör.1)

y/x	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,0
1,00	1,9600	2,0093	2,0592	2,1098	2,1609	2,2127	2,2650	2,3180	2,3716	2,4258	2,4806	2,5361	2,5921	2,6488	2,7060	2,7639	2,8224	2,8815	2,9412	3,0016	3,06
0,95	1,9044	1,9520	2,0001	2,0488	2,0982	2,1481	2,1985	2,2496	2,3013	2,3535	2,4064	2,4598	2,5138	2,5684	2,6236	2,6794	2,7357	2,7927	2,8502	2,9083	2,96
0,90	1,8496	1,8954	1,9418	1,9888	2,0363	2,0844	2,1331	2,1823	2,2320	2,2824	2,3333	2,3847	2,4367	2,4893	2,5424	2,5961	2,6504	2,7052	2,7606	2,8165	2,87
0,85	1,7956	1,8398	1,8844	1,9297	1,9754	2,0217	2,0686	2,1159	2,1638	2,2123	2,2613	2,3108	2,3608	2,4114	2,4625	2,5142	2,5664	2,6191	2,6724	2,7262	2,78
0,80	1,7424	1,7849	1,8279	1,8714	1,9155	1,9600	2,0051	2,0506	2,0967	2,1433	2,1904	2,2380	2,2861	2,3348	2,3839	2,4336	2,4838	2,5345	2,5857	2,6374	2,68
0,75	1,6900	1,7309	1,7722	1,8141	1,8564	1,8992	1,9425	1,9863	2,0306	2,0754	2,1207	2,1664	2,2127	2,2594	2,3066	2,3543	2,4025	2,4512	2,5004	2,5500	2,60
0,70	1,6384	1,6777	1,7174	1,7576	1,7983	1,8394	1,8810	1,9231	1,9656	2,0086	2,0521	2,0960	2,1404	2,1852	2,2305	2,2763	2,3226	2,3693	2,4165	2,4641	2,51
0,65	1,5876	1,6253	1,6635	1,7020	1,7411	1,7806	1,8205	1,8608	1,9016	1,9429	1,9846	2,0267	2,0693	2,1123	2,1558	2,1997	2,2440	2,2888	2,3340	2,3797	2,42
0,60	1,5376	1,5738	1,6104	1,6474	1,6848	1,7227	1,7609	1,7996	1,8387	1,8783	1,9182	1,9586	1,9994	2,0406	2,0822	2,1243	2,1668	2,2097	2,2530	2,2967	2,34
0,55	1,4884	1,5231	1,5581	1,5936	1,6295	1,6657	1,7024	1,7394	1,7769	1,8147	1,8530	1,8917	1,9307	1,9702	2,0100	2,0503	2,0909	2,1320	2,1734	2,2153	2,25
0,50	1,4400	1,4732	1,5068	1,5407	1,5750	1,6097	1,6448	1,6803	1,7161	1,7523	1,7889	1,8259	1,8632	1,9010	1,9391	1,9775	2,0164	2,0556	2,0953	2,1353	2,17
0,45	1,3924	1,4241	1,4562	1,4887	1,5215	1,5547	1,5882	1,6221	1,6564	1,6910	1,7259	1,7613	1,7969	1,8330	1,8694	1,9061	1,9432	1,9807	2,0185	2,0567	2,09
0,40	1,3456	1,3759	1,4066	1,4376	1,4689	1,5006	1,5326	1,5650	1,5977	1,6307	1,6641	1,6978	1,7319	1,7662	1,8010	1,8360	1,8714	1,9072	1,9432	1,9796	2,01
0,35	1,2996	1,3285	1,3578	1,3874	1,4173	1,4475	1,4780	1,5089	1,5401	1,5716	1,6034	1,6355	1,6680	1,7007	1,7338	1,7672	1,8010	1,8350	1,8694	1,9041	1,93
0,30	1,2544	1,2820	1,3099	1,3381	1,3666	1,3954	1,4244	1,4538	1,4835	1,5135	1,5438	1,5744	1,6053	1,6365	1,6680	1,6998	1,7319	1,7642	1,7969	1,8299	1,86
0,25	1,2100	1,2363	1,2628	1,2896	1,3168	1,3442	1,3718	1,3998	1,4280	1,4565	1,4854	1,5144	1,5438	1,5735	1,6034	1,6336	1,6641	1,6949	1,7259	1,7573	1,78
0,20	1,1664	1,1914	1,2166	1,2421	1,2679	1,2939	1,3202	1,3468	1,3736	1,4007	1,4280	1,4556	1,4835	1,5117	1,5401	1,5688	1,5977	1,6269	1,6564	1,6861	1,71
0,15	1,1236	1,1473	1,1713	1,1955	1,2199	1,2446	1,2696	1,2948	1,3202	1,3459	1,3718	1,3980	1,4244	1,4511	1,4780	1,5052	1,5326	1,5603	1,5882	1,6164	1,64
0,10	1,0816	1,1041	1,1268	1,1497	1,1729	1,1963	1,2199	1,2438	1,2679	1,2922	1,3168	1,3415	1,3666	1,3918	1,4173	1,4430	1,4689	1,4951	1,5215	1,5482	1,57
0,05	1,0404	1,0617	1,0832	1,1049	1,1268	1,1489	1,1713	1,1938	1,2166	1,2396	1,2628	1,2862	1,3099	1,3337	1,3578	1,3821	1,4066	1,4313	1,4562	1,4814	1,50
0,00	1,0000	1,0201	1,0404	1,0609	1,0816	1,1025	1,1236	1,1449	1,1664	1,1881	1,2100	1,2321	1,2544	1,2769	1,2996	1,3225	1,3456	1,3689	1,3924	1,4161	1,44



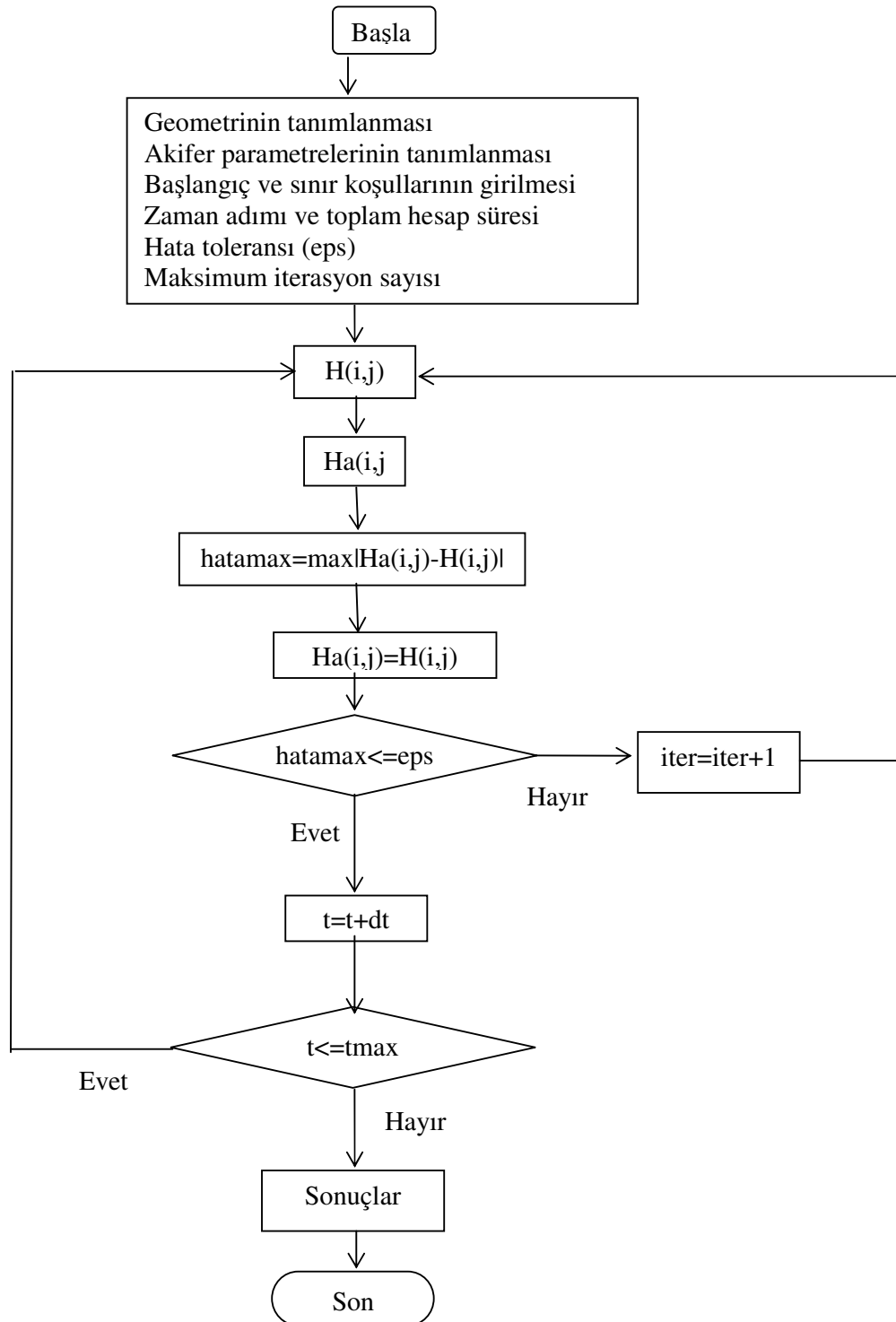


**Ek 4** Çözüm tablosunun şematik gösterimi





**Ek 5** Örneklerin çözümünde kullanılan algoritmaya ilişkin akış şeması



## ÖZGEÇMİŞ

27.04.1980 tarihinde Bornova’da doğdu. Manisa Ali Rıza Çevik İlkokulu’nu, Manisa Atatürk Ortaokulu’nu ve Yabancı Dil Ağırlıklı Manisa Lisesi’ni bitirdi. 1999 yılı Eylül ayında Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne girdi ve Haziran 2003 döneminde bölüm üçüncülüğü derecesi ile mezun oldu. Eylül 2003 döneminde Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Hidrolik ve Su kaynakları Bilim Dalı’na yüksek lisans öğrencisi olarak girdi. Buradan kendi isteği ile ayrılarak Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Hidrolik Bilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2003 yılı Kasım ayında İnşaat Mühendisleri Odası’na üye oldu. 2003 yılı Aralık ayında bir yapı denetim şirketinde yardımcı kontrol mühendisi, 2004 yılı Eylül ayında bir hidroelektrik enerji şirketinde proje mühendisi olarak çalışmaya başladı. 2005-2006 öğretim yılı bahar döneminde Erasmus Öğrenci Değişim Programı kapsamında Università degli Studi di Genova (İtalya) ya öğrenci olarak gitti. 2006 yılı Nisan ayında Bilecik Bayındırlık ve İskân Müdürlüğü’ne mühendis olarak atanınca buradaki öğrenimini yarıda bırakarak görevine başladı. Halen bu kurumda çalışmaktadır. İyi derecede yazılı ve sözlü İngilizce bilgisine sahiptir (Aralık 2005 ÜDS – Fen Bilimleri: 81,250). AUTOCAD, SAP 2000, ETABS, İDE STATİK, STA4 CAD, MS PROJECT, STABLE, VISUAL BASIC ve MS OFFICE bilgisayar programlarını kullanmaktadır.