



**HETEROJEN BİR AKİFERDE POMPAJ KUYU
KARAKTERİSTİKLERİNİN GENETİK ALGORİTMA İLE
BELİRLENMESİ**

Mustafa Tamer AYVAZ

Mayıs, 2008

DENİZLİ

**HETEROJEN BİR AKİFERDE POMPAJ KUYU
KARAKTERİSTİKLERİNİN GENETİK ALGORİTMA İLE
BELİRLENMESİ**

**Pamukkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Tarafından Kabul Edilen
Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Mustafa Tamer AYVAZ

Danışman: Prof. Dr. Halil KARAHAN

Mayıs, 2008

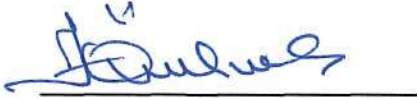
DENİZLİ

DOKTORA TEZİ ONAY FORMU

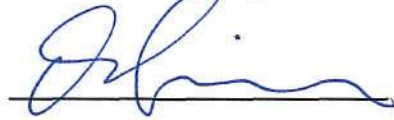
Mustafa Tamer AYVAZ tarafından Prof. Dr. Halil KARAHAN yönetiminde hazırlanan “**Heterojen bir Akiferde Pompaj Kuyu Karakteristiklerinin Genetik Algoritma ile Belirlenmesi**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Halil KARAHAN
(BAŞKAN, DANIŞMAN)



Prof. Dr. Halil ÖNDER
(Jüri Üyesi)



Yrd. Doç. Dr. Orhan GÜNDÜZ
(Jüri Üyesi)



Doç. Dr. Halim CEYLAN
(Jüri Üyesi)



Yrd. Doç. Dr. Ali GÖKGÖZ
(Jüri Üyesi)

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

Prof. Dr. Mehmet Ali SARIGÖL
Müdür

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının yapılması esnasında verdiği desteklerden ve teşvik edici yönlendirmelerinden dolayı başta danışman hocam Prof. Dr. Halil KARAHAN'a, çalışmanın her aşamasında yapıcı görüş önerilerini eksik etmeyen Prof. Dr. Gökmen TAYFUR ve Doç. Dr. Halim CEYLAN'a, tezin daha iyi bir hale gelebilmesi için görüş ve önerilerini sunan jüri üyeleri Prof. Dr. Halil ÖNDER, Yrd. Doç. Dr. Orhan GÜNDÜZ ve Yrd. Doç. Dr. Ali GÖKGÖZ'e, yaşamım süresince beni sürekli destekleyen ve büyüten babam A. Turan AYVAZ, rahmetli annem Türkan AYVAZ, ablam Şule AYVAZ, ağabeylerim Boğaç ve Fatih AYVAZ'a, üniversite hayatımın başlangıcından beri sürekli daha iyi işler yapabilmem için bana destek veren eşim Canan KÖKCÜ AYVAZ'a ve bu tezin tamamlanması esnasında oyun vaktinden çaldığım biricik kızım Ayşe Naz AYVAZ'a teşekkür ederim.

Mustafa Tamer AYVAZ
Denizli - 2008

Ayşe Naz'a...

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırılmalarının 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 : Mustafa Tamer AYVAZ

ÖZET

HETEROJEN BİR AKİFERDE POMPAJ KUYU KARAKTERİSTİKLERİNİN GENETİK ALGORİTMA İLE BELİRLENMESİ

AYVAZ, Mustafa Tamer
Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği ABD
Tez Yöneticisi: Prof. Dr. Halil KARAHAN

Mayıs 2008, 133 Sayfa

Bu çalışmada, heterojen bir akifer sistemi için pompaj kuyularının karakteristiklerinin (kuyu yeri ve sayıları, pompaj debileri) belirlenebildiği bir Simülasyon/Optimizasyon (S/O) modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen S/O modelinde, yeraltı suyu hareketini temsil eden kısmi diferansiyel denklem sistemi blok-merkezli bir sonlu fark hesap şeması ile çözülmüş ve bu çözüm simülasyon modeli olarak kullanılmıştır. Bu model daha sonra, yerleşik yaklaşım kullanılarak Genetik Algoritma (GA) tabanlı bir optimizasyon modeli ile birleştirilmiştir. Geliştirilen S/O modeli ile kuyu karakteristikleri, mevcut gözlem kuyularında ölçülen ve hesaplanan hidrolik yük değerleri arasındaki hatanın minimize edilmesiyle belirlenmektedir. Kuyu yerlerinin belirlenebilmesi için “Hareketli alt bölge yaklaşımı” adı verilen bir çözüm tekniği geliştirilmiştir. Bu çözüm tekniğinde, kuyu yerleri optimizasyon modelinde karar değişkeni olarak kullanılmadan ilgili kuyu karakteristikleri belirlenebilmektedir. Geliştirilen çözüm tekniğinin performansı üç akifer modeli üzerinde test edilmiştir. Ayrıca, kullanılan çözüm parametrelerinin model sonuçları üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen çözüm tekniğinin akifer kuyu karakteristiklerinin belirlenmesinde etkin bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Simülasyon/Optimizasyon (S/O); Yeraltı Suyu; Kuyu Yeri; Pompaj Kuyusu; Hareketli Alt Bölge; Genetik Algoritma

Prof. Dr. Halil KARAHAN
Prof. Dr. Halil ÖNDER
Doç. Dr. Halim CEYLAN
Yrd. Doç. Dr. Orhan GÜNDÜZ
Yrd. Doç. Dr. Ali GÖKGÖZ

ABSTRACT**IDENTIFICATION OF PUMPING WELL CHARACTERISTICS IN
A HETEROGENEOUS AQUIFER SYSTEM USING A GENETIC
ALGORITHM APPROACH**

AYVAZ, Mustafa Tamer
PhD. Thesis in Civil Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Halil KARAHAN

May 2008, 133 Pages

In this study, a Simulation/Optimization (S/O) model is proposed for the identification of unknown pumping well characteristics (i.e. location and numbers, pumping rates) for a heterogeneous aquifer system. In the proposed S/O model, the governing equation of groundwater flow is solved through a block-centered finite difference solution scheme within the simulation model. This model is then combined with a genetic algorithm (GA) based optimization model using embedded approach. The proposed S/O model finds the well characteristics by minimizing the residual error (RE) between simulated and observed head values at available observation sites. To determine the well locations, a solution technique entitled “moving sub-domain approach” is proposed. In this technique, the well characteristics can be determined without using the well locations as decision variables in the optimization model. The performance of the proposed solution technique is tested on three aquifer models. Furthermore, a sensitivity analysis is performed to determine the effect of the solution parameters to the solution accuracy. Results indicate that the proposed solution approach is an effective way of determining the unknown groundwater pumping well characteristics.

Keywords: Simulation/Optimization (S/O); Groundwater; Well Location; Pumping Well; Sub-domain; Genetic Algorithm

Prof. Dr. Halil KARAHAN
Prof. Dr. Halil ÖNDER
Assoc. Prof. Dr. Halim CEYLAN
Assist. Prof. Dr. Orhan GÜNDÜZ
Assist. Prof. Dr. Ali GÖKGÖZ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ ONAY FORMU.....	i
TEŞEKKÜR.....	ii
BİLİMSEL ETİK SAYFASI	iv
ÖZET	v
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ	xiv
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	1
1.2. Tezin Organizasyonu	4
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	6
2.1. Yeraltı Suyu Problemlerinde S/O Modellerinin Kullanımı	6
2.1.1. S/O modellerinde türeve dayalı optimizasyon algoritmalarının kullanılması	7
2.1.2. S/O modellerinde GA optimizasyon tekniğinin kullanılması	9
2.2. Kuyu Karakteristiklerinin Belirlenmesi	10
2.1.2. Kuyu yerlerinin bilinmesi durumunda kuyu karakteristiklerinin belirlenmesi	10
2.1.2. Kuyu yerlerinin bilinmemesi durumunda kuyu karakteristiklerinin belirlenmesi	12
3. SİMÜLASYON/OPTİMİZASYON (S/O) MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ.....	15
3.1. Giriş.....	15
3.2. Simülasyon Modeli	15
3.2.1. Yeraltı suyu akım denklemi	16
3.2.2. Sayısal çözümleme	18
3.2.3. Simülasyon modelinin testi	18
3.2.3.1. Uygulama 1	18
3.2.3.2. Uygulama 2	20
3.3. Optimizasyon Modeli.....	22
3.3.1. Genetik Algoritma (GA) optimizasyon tekniğine genel bakış.....	24
3.3.1.1. Değişkenlerin kodlanması	25
3.3.1.2. Başlangıç toplumunun oluşturulması	26
3.3.1.3. Toplumdaki bireylerin değerlendirilmesi.....	26
3.3.1.4. Bireylerin seçimi	26
3.3.1.4.1. Rulet tekeri seçim yöntemi.....	27
3.3.1.4.2. Turnuva seçim yöntemi.....	27
3.3.1.5. Yeni toplumun oluşturulması	27
3.3.1.5.1. Elitizm	28

3.3.1.5.2. Çaprazlama.....	28
3.3.1.5.3. Mutasyon.....	29
3.3.1.6. Oluşturulan toplumun başlangıç toplumuna atanması	31
3.3.2. Optimizasyon modelinin testi	31
3.4. Simülasyon ve Optimizasyon Modellerinin Birleştirilmesi.....	32
3.5. S/O Modelinin Testi.....	34
3.5.1. Uygulama 3	34
3.5.1.1. Senaryo 1 (tek pompaj kuyusu – kararlı durum).....	35
3.5.1.2. Senaryo 2 (tek pompaj kuyusu – zamana bağlı durum).....	37
3.5.1.3. Senaryo 3 (3 pompaj kuyusu – kararlı durum).....	38
3.5.1.4. Senaryo 4 (3 pompaj kuyusu – zamana bağlı durum).....	40
3.5.2. Uygulama 4	42
3.5.2.1. Senaryo 1 (2 pompaj kuyusu – kararlı durum).....	43
3.5.2.2. Senaryo 2 (2 pompaj kuyusu – zamana bağlı durum).....	46
3.5.2.3. Senaryo 3 (5 pompaj kuyusu – kararlı durum).....	47
3.5.2.4. Senaryo 4 (5 pompaj kuyusu – zamana bağlı durum).....	48
3.6. Sonuçların İrdelenmesi.....	52
4. SİMÜLASYON / OPTİMİZASYON MODELİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ	54
4.1. Giriş.....	54
4.2. Hareketli Alt Bölge Yaklaşımı	54
4.3. S/O Modelinin Hareketli Alt Bölge Yaklaşımı ile Kullanılması	59
4.4. Hareketli Alt Bölge Yaklaşımı ile İyileştirilen S/O Modelinin Testi	60
4.4.1. Uygulama 5	61
4.4.1.1. Senaryo 1 (tek pompaj kuyusu – kararlı durum).....	61
4.4.1.2. Senaryo 2 (tek pompaj kuyusu – zamana bağlı durum).....	62
4.4.1.3. Senaryo 3 (3 pompaj kuyusu – kararlı durum).....	63
4.4.1.4. Senaryo 4 (3 pompaj kuyusu – zamana bağlı durum).....	64
4.4.2. Uygulama 6	65
4.4.2.1. Senaryo 1 (2 pompaj kuyusu – kararlı durum).....	66
4.4.2.2. Senaryo 2 (2 pompaj kuyusu – zamana bağlı durum).....	67
4.4.2.3. Senaryo 3 (5 pompaj kuyusu – kararlı durum).....	68
4.4.2.4. Senaryo 4 (5 pompaj kuyusu – zamana bağlı durum).....	69
4.4.3. Sonuçlarının değerlendirilmesi	70
4.4.4. Uygulama 7	74
4.4.5. Uygulama 8	78
4.5. Sonuçların İrdelenmesi.....	84
5. DUYARLILIK ANALİZİ.....	86
5.1. Giriş.....	86
5.2. Farklı Başlangıç Noktaları için Model Performansının Test Edilmesi	87
5.3. Alt Bölge Boyutları için Model Performansının Test Edilmesi.....	89
5.4. Gözlem Kuyularının Sayısı için Model Performansının Test Edilmesi.....	92
5.5. Ölçüm Hataları için Model Performansının Test Edilmesi.....	95
5.6. Değişim Simülasyon Sayısı için Model Performansının Test Edilmesi	96
5.7. GA Çözüm Parametreleri için Model Performansının Test Edilmesi.....	98
5.7.1. Toplum büyüklüğünün model performansı üzerine etkisi	100
5.7.2. Çaprazlama oranının model performansı üzerine etkisi.....	102

5.7.3. Mutasyon oranının model performansı üzerine etkisi.....	103
5.8. Sonuçların İrdelenmesi.....	105
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	108
6.1. Sonuçlar.....	108
6.2. Öneriler	111
7. KAYNAKLAR	113
EKLER.....	120
Ek-1 Yeraltı Suyu Hareketini Temsil Eden Kısmi Diferansiyel Denklemin Sonlu Farklar Metodu ile Çözülmesi.....	121
Ek-2 De Jong'un 1. Test Fonksiyonu.....	124
Ek-3 Rastrigin'in 6. Test Fonksiyonu	126
Ek-4 Michalewicz'in 12. Test Fonksiyonu	128
Ek-5 Goldstein-Price'in Test Fonksiyonu.....	130
Ek-6 Schwefel'in 7. Test Fonksiyonu.....	132
ÖZGEÇMİŞ	134

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1 Sınır koşullarının örnek bir çözüm bölgesi üzerinde gösterilmesi	17
Şekil 3.2 Uygulama 1'e ait geometri ve sınır koşulları	19
Şekil 3.3 Simülasyon modeli ve MODFLOW sonuçlarının farklı simülasyon zamanları için karşılaştırılması; (a): $t = 30$ gün , (b): $t = 60$ gün , (c): $t = 120$ gün , (d): $t = 360$ gün	20
Şekil 3.4 Uygulama 2'ye ait geometri ve sınır koşulları	21
Şekil 3.5 Kullanılan iletim kapasitesi dağılımı ($m^2/gün$).....	22
Şekil 3.6 Simülasyon modeli ve MODFLOW sonuçlarının farklı simülasyon zamanları için karşılaştırılması; (a): $t = 2$ gün , (b): $t = 4$ gün , (c): $t = 6$ gün , (d): $t = 10$ gün	23
Şekil 3.7 Değişkenlerin kromozomlarla temsil edilmesi ve başlangıç toplumu.....	26
Şekil 3.8 (a): Başlangıç toplumunun değerlendirilmesi ve rölatif seçim olasılıklarının hesaplanması, (b): Rulet tekeri ve turnuva seçim yöntemleri ile yeni toplum için bireylerin seçilmesi, (c): Seçilen bireylerle yeni toplumun oluşturulması.....	28
Şekil 3.9 Seçilen iki bireyin çaprazlanması	29
Şekil 3.10 Mutasyon işlemi.....	29
Şekil 3.11 Pompaj ve gözlem kuyularının yerleşimi (Uygulama 3).....	35
Şekil 3.12 Zamana bağlı çözüm için kullanılan pompaj debileri (Uygulama 3); (a): PW_1 ; (b): PW_2 ; (c): PW_3	36
Şekil 3.13 Denklem (16)'nın simülasyon sayısı ile değişimi (Uygulama 3 – Senaryo 1)	36
Şekil 3.14 PW_2 kuyusunun akifer üzerindeki hareketi (Uygulama 3 – Senaryo 1).....	37
Şekil 3.15 Denklem (16)'nın simülasyon sayısı ile değişimi (Uygulama 3 – Senaryo 2)	38
Şekil 3.16 PW_2 kuyusunun akifer üzerindeki hareketi (Uygulama 3 – Senaryo 2).....	38
Şekil 3.17 Denklem (16)'nın simülasyon sayısı ile değişimi (Uygulama 3 – Senaryo 3)	39
Şekil 3.18 Pompaj kuyularının akifer üzerindeki hareketi (Uygulama 3 – Senaryo 3); (a): PW_1 ; (b) PW_2 ; (c): PW_3	40

Şekil 3.19 Denklem (16)'nın simülasyon sayısı ile değişimi (Uygulama 3 – Senaryo 4)	41
Şekil 3.20 Pompaj kuyularının akifer üzerindeki hareketi (Uygulama 3 – Senaryo 4); (a): PW_1 ; (b) PW_2 ; (c): PW_3	42
Şekil 3.21 Pompaj ve gözlem kuyularının yerleşimi (Uygulama 4)	43
Şekil 3.22 Zamana bağlı çözüm için kullanılan pompaj debileri (Uygulama 4)	44
Şekil 3.23 Denklem (16)'nın simülasyon sayısı ile değişimi (Uygulama 4 – Senaryo 1)	44
Şekil 3.24 Pompaj kuyularının akifer üzerindeki hareketi (Uygulama 4 – Senaryo 1); (a): PW_1 ; (b) PW_2	45
Şekil 3.25 Denklem (16)'nın simülasyon sayısı ile değişimi (Uygulama 4 – Senaryo 2)	46
Şekil 3.26 Pompaj kuyularının akifer üzerindeki hareketi (Uygulama 4 – Senaryo 2); (a): PW_1 ; (b) PW_2	47
Şekil 3.27 Denklem (16)'nın simülasyon sayısı ile değişimi (Uygulama 4 – Senaryo 3)	47
Şekil 3.28 Pompaj kuyularının akifer üzerindeki hareketi (Uygulama 4 – Senaryo 3); (a): PW_1 ; (b) PW_2 ; (c) PW_3 ; (d) PW_4 ; (e) PW_5	49
Şekil 3.29 Denklem (16)'nın simülasyon sayısı ile değişimi (Uygulama 4 – Senaryo 4)	50
Şekil 3.30 Pompaj kuyularının akifer üzerindeki hareketi (Uygulama 4 – Senaryo 4); (a): PW_1 ; (b) PW_2 ; (c) PW_3 ; (d) PW_4 ; (e) PW_5	51
Şekil 4.1 (a): Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile iki adet pompaj kuyusunun yerlerinin belirlenmesi; (b): Hareketli alt bölgenin detaylı gösterimi	55
Şekil 4.2 Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile iyileştirilen S/O modeline ait akış diyagramı	58
Şekil 4.3 Hareketli alt bölge yaklaşımı ile PW_2 kuyusunun yerinin belirlenmesi (Uygulama 5 – Senaryo 1)	61
Şekil 4.4 Hareketli alt bölge yaklaşımı ile PW_2 kuyusunun yerinin belirlenmesi (Uygulama 5 – Senaryo 2)	62
Şekil 4.5 Hareketli alt bölge yaklaşımı ile üç pompaj kuyusunun yerinin belirlenmesi (Uygulama 5 – Senaryo 3)	64

Şekil 4.6 Hareketli alt bölge yaklaşımı ile üç pompaj kuyusunun yerinin belirlenmesi (Uygulama 5 – Senaryo 4)	65
Şekil 4.7 Hareketli alt bölge yaklaşımı ile PW_1 ve PW_2 kuyularının yerlerinin belirlenmesi (Uygulama 6 – Senaryo 1)	66
Şekil 4.8 Hareketli alt bölge yaklaşımı ile PW_1 ve PW_2 kuyularının yerlerinin belirlenmesi (Uygulama 6 – Senaryo 2)	67
Şekil 4.9 Hareketli alt bölge yaklaşımı ile pompaj kuyularının yerlerinin belirlenmesi (Uygulama 6 – Senaryo 3)	68
Şekil 4.10 Hareketli alt bölge yaklaşımı ile pompaj kuyularının yerlerinin belirlenmesi (Uygulama 6 – Senaryo 4)	69
Şekil 4.11 Gerçek ve belirlenen kuyu yerleri; (a): $c = 1$, (b): $c = 2$, (c): $c = 3$, (d): $c = 4$, (e): $c = 5$, (f): $c = 6$, (g): $c = 7$	77
Şekil 4.12 Farklı kuyu sayıları için RE değerlerinin değişimi.....	78
Şekil 4.13 Kullanılan 2-boyutlu kavramsal basınçlı akifer modeli.....	79
Şekil 4.14 Kullanılan iletim kapasitesi dağılımı ($m^2/gün$).....	80
Şekil 4.15 (a): İzinli pompaj kuyularından çekilen debiler; (b): Kaçak pompaj kuyularından çekilen debiler	80
Şekil 4.16 Çözüm bölgesinin grid bloklarına ayrılmış hali	81
Şekil 4.17 (a): $c = 1$ için gerçek ve belirlenen kuyu yerleri; (b): $c = 1$ için gerçek ve hesaplanan pompaj debilerinin karşılaştırılması	83
Şekil 4.18 (a): $c = 2$ için gerçek ve belirlenen kuyu yerleri; (b): $c = 2$ için gerçek ve hesaplanan pompaj debilerinin karşılaştırılması	83
Şekil 4.19 (a): $c = 3$ için gerçek ve belirlenen kuyu yerleri; (b): $c = 3$ için gerçek ve hesaplanan pompaj debilerinin karşılaştırılması	84
Şekil 5.1 Farklı başlangıç noktaları için kuyu yerlerinin belirlenmesi; (a): Senaryo 1; (b): Senaryo 2;(c): Senaryo 3; (d): Senaryo 4; (e): Senaryo 5; (f): Senaryo 6.....	88
Şekil 5.2 Farklı alt bölge boyutları için kuyu yerlerinin belirlenmesi; (a): $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 3$; (b): $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 5$; (c): $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 7$; (d): $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 9$; (e): $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 11$; (f): $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 13$	91
Şekil 5.3 Gözlem kuyularının akifer üzerindeki yerleşimi; (a): $N_d = 15$; (b): $N_d = 20$; (c): $N_d = 25$; (d): $N_d = 30$; (e): $N_d = 35$; (f): $N_d = 40$	92

Şekil 5.4 Farklı gözlem kuyu sayıları için kuyu yerlerinin belirlenmesi; (a): $N_d = 15$; (b): $N_d = 20$; (c): $N_d = 25$; (d): $N_d = 30$; (e): $N_d = 35$; (f): $N_d = 40$	94
Şekil 5.5 Farklı hata verileri için kuyu yerlerinin belirlenmesi; (a): Hatasız; (b): $\sigma = 0.10$; (c): $\sigma = 0.20$; (d): $\sigma = 0.30$; (e): $\sigma = 0.50$; (f): $\sigma = 1.00$	97
Şekil 5.6 Farklı değişim simülasyon sayıları için kuyu yerlerinin belirlenmesi; (a): $st' = 5$; (b): $st' = 10$; (c): $st' = 15$; (d): $st' = 20$; (e): $st' = 25$; (f): $st' = 30$	99
Şekil 5.7 Farklı toplum büyüklükleri için kuyu yerlerinin belirlenmesi; (a): $m = 5$; (b): $m = 10$; (c): $m = 15$; (d): $m = 20$; (e): $m = 30$; (f): $m = 50$	101
Şekil 5.8 Farklı çaprazlama oranları için kuyu yerlerinin belirlenmesi; (a): $p_c = 0.30$; (b): $p_c = 0.40$; (c): $p_c = 0.50$; (d): $p_c = 0.60$; (e): $p_c = 0.70$; (f): $p_c = 0.80$	104
Şekil 5.9 Farklı Mutasyon oranları için kuyu yerlerinin belirlenmesi; (a): $p_m = 0.01$; (b): $p_m = 0.05$; (c): $p_m = 0.10$; (d): $p_m = 0.15$; (e): $p_m = 0.20$; (f): $p_m = 0.25$	106
Şekil Ek-1.1 Denklem (1)'in çözümünde kullanılan blok merkezli grid yapısı.....	121
Şekil Ek-2.1 De Jong'un 1. test fonksiyonu.....	124
Şekil Ek-2.2 Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi	125
Şekil Ek-3.1 Rastrigin'in 6. test fonksiyonu	126
Şekil Ek-3.2 Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi	127
Şekil Ek-4.1 Michalewicz'in 12. test fonksiyonu	128
Şekil Ek-4.2 Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi	129
Şekil Ek-5.1 Goldstein-Price'in test fonksiyonu.....	130
Şekil Ek-5.2 Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi	131
Şekil Ek-6.1 Schwefel'in 7. test fonksiyonu	132
Şekil Ek-6.2 Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi	133

TABLOLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1 Optimizasyon modelinin sonuçlarının değerlendirilmesi	32
Tablo 3.2 Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar (Uygulama 3 – Senaryo 1)	36
Tablo 3.3 Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar (Uygulama 3 – Senaryo 2)	37
Tablo 3.4 Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar (Uygulama 3 – Senaryo 3)	39
Tablo 3.5 Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar (Uygulama 3 – Senaryo 4)	41
Tablo 3.6 Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar (Uygulama 4 – Senaryo 1)	45
Tablo 3.7 Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar (Uygulama 4 – Senaryo 2)	46
Tablo 3.8 Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar (Uygulama 4 – Senaryo 3)	48
Tablo 3.9 Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar (Uygulama 4 – Senaryo 4)	50
Tablo 4.1 Hareketli alt bölge ile elde edilen sonuçlar (Uygulama 5 – Senaryo 1).....	62
Tablo 4.2 Hareketli alt bölge ile elde edilen sonuçlar (Uygulama 5 – Senaryo 2).....	63
Tablo 4.3 Hareketli alt bölge ile elde edilen sonuçlar (Uygulama 5 – Senaryo 3).....	63
Tablo 4.4 Hareketli alt bölge ile elde edilen sonuçlar (Uygulama 5 – Senaryo 4).....	65
Tablo 4.5 Hareketli alt bölge ile elde edilen sonuçlar (Uygulama 6 – Senaryo 1).....	66
Tablo 4.6 Hareketli alt bölge ile elde edilen sonuçlar (Uygulama 6 – Senaryo 2).....	67
Tablo 4.7 Hareketli alt bölge ile elde edilen sonuçlar (Uygulama 6 – Senaryo 3).....	69
Tablo 4.8 Hareketli alt bölge ile elde edilen sonuçlar (Uygulama 6 – Senaryo 4).....	70
Tablo 4.9 Uygulama 3 ve 4’de belirlenen kuyu yerlerinin karşılaştırılması	71
Tablo 4.10 Uygulama 4 ve 6’da belirlenen kuyu yerlerinin karşılaştırılması	71

Tablo 4.11 Uygulama 3 ve 5 için hesaplanan pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata değerleri (%).....	72
Tablo 4.12 Uygulama 4 ve 6 için hesaplanan pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata değerleri (%).....	72
Tablo 4.13 Uygulama 3 ve 5 için optimizasyon işlemi sonunda elde edilen RE değerleri	73
Tablo 4.14 Uygulama 4 ve 6 için optimizasyon işlemi sonunda elde edilen RE değerleri	73
Tablo 4.15 Uygulama 3 ve 5 için gerekli simülasyon sayıları	73
Tablo 4.16 Uygulama 4 ve 6 için gerekli simülasyon sayıları	73
Tablo 4.17 Farklı kuyu sayıları için hareketli alt bölge yaklaşımının verdiği sonuçlar ..	75
Tablo 4.18 $c = 1, 2, 3$ için hareketli alt bölge yaklaşımının verdiği sonuçlar	82
Tablo 5.1 Farklı başlangıç noktaları için belirlenen kuyu karakteristikleri.....	89
Tablo 5.2 Farklı alt bölge boyutları için belirlenen kuyu karakteristikleri.....	90
Tablo 5.3 Farklı gözlem kuyu sayıları için belirlenen kuyu karakteristikleri	93
Tablo 5.4 Farklı hata verileri için belirlenen kuyu karakteristikleri.....	95
Tablo 5.5 Farklı değişim simülasyon sayıları için belirlenen kuyu karakteristikleri	98
Tablo 5.6 Farklı toplum büyüklükleri için belirlenen kuyu karakteristikleri	100
Tablo 5.7 Farklı çaprazlama oranları için belirlenen kuyu karakteristikleri	102
Tablo 5.8 Farklı mutasyon oranları için belirlenen kuyu karakteristikleri.....	103

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

a	: Cauchy sınır koşulunun tanımlanmasında kullanılan sabit sayı
α	: $[1, 2]$ aralığında tanımlı olan bir katsayı
c	: Pompaj kuyularının sayısı
$\delta(\bullet, \bullet)$	: Dirac-delta fonksiyonu
Δx	: Sayısal çözümlemede yatayda kullanılan grid aralığı
Δy	: Sayısal çözümlemede düşeyde kullanılan grid aralığı
$\Delta \hat{x}$	: Hareketli alt bölgenin yataydaki boyutu
Δt	: Sayısal çözümlemede kullanılan zaman adımı
$\Delta \hat{y}$	: Hareketli alt bölgenin düşeydeki boyutu
δx	: Hareketli alt bölgenin yataydaki adım boyu
δy	: Hareketli alt bölgenin düşeydeki adım boyu
ε	: Tolerans değeri
$f(x)$	: Optimizasyon işleminde kullanılan amaç fonksiyonu
GA	: Genetik algoritma
h	: Hidrolik yük
\tilde{h}	: Gözlem kuyusunda ölçülen hidrolik yük
I	: Hesap yapılan grid noktasının sütun numarası
J	: Hesap yapılan grid noktasının satır numarası
k	: Bit sayısı
λ	: Bir alt bölge için hesaplanan RE değerlerinin minimumu
m	: Toplum büyüklüğü
MJS	: Maksimum jenerasyon sayısı
n	: Karar değişkenlerinin sayısı
N_d	: Gözlem kuyularının sayısı
Φ	: Karar değişkeninin değerinin onluk sayı sistemine dönüştürülmüş hali
p_c	: Çaprazlama olasılığı
p_m	: Mutasyon olasılığı
\hat{p}_m	: Her birey için değişken olan mutasyon oranı
p_{si}	: Rölatif seçim olasılığı
PGA	: Aşamalı genetik algoritma
PW	: Pompaj kuyusu
IPW	: Kaçak Pompaj kuyusu
Q	: Pompaj kuyusundan çekilen ya da ortama verilen debi

Q_{\min}	: Pompaj debisinin alabileceği minimum değer
Q_{\max}	: Pompaj debisinin alabileceği maksimum değer
R	: Etkili yağış yüksekliği
RE	: Artık hata değeri
S	: Özgül depolama katsayısı
S/O	: Simülasyon/Optimizasyon
st	: Değişim jenerasyon sayısı
st'	: Değişim simülasyon sayısı
Γ_1^h	: Dirichlet sınır koşulunun geçerli olduğu sınır bölgesi
Γ_2^h	: Neuman sınır koşulunun geçerli olduğu sınır bölgesi
Γ_3^h	: Cauchy sınır koşulunun geçerli olduğu sınır bölgesi
s_x	: Adım boylarının yatayda alacağı değerleri içeren çözüm uzayı
s_y	: Adım boylarının düşeyde alacağı değerleri içeren çözüm uzayı
σ	: Gözlem verilerine eklenen hata verilerinin standart sapması
SOR	: Ardışık aşırı rahatlatma
T	: Akifer iletim kapasitesi
t	: Simülasyon süresi
W	: Kaynak/yitik terimi
w	: Rahatlatma parametresi
x	: Yatay yöndeki bağımsız kartezyen koordinat
x_{\min}	: Pompaj kuyusunun koordinatının x yönünde alabileceği alt sınır değer
x_{\max}	: Pompaj kuyusunun koordinatının x yönünde alabileceği üst sınır değer
\tilde{X}	: Alt bölgelerin yatay yöndeki konumlarını içeren yer vektörü
y	: Düşey yöndeki bağımsız kartezyen koordinat
y_{\min}	: Pompaj kuyusunun koordinatının y yönünde alabileceği alt sınır değer
y_{\max}	: Pompaj kuyusunun koordinatının y yönünde alabileceği üst sınır değer
\tilde{Y}	: Alt bölgelerin düşey yöndeki konumlarını içeren yer vektörü
YSA	: Yapay sinir ağları
z	: Amaç fonksiyonunun minimum ya da maksimum değeri

1. GİRİŞ

1.1. Amaç ve Kapsam

Son yıllarda gelişmekte olan ülkelerde, hızlı nüfus artışı, düzensiz kentleşme ve sanayileşme ile yüzeysel sular gibi yeraltı suları da hızlı bir şekilde azalırken aynı zamanda ciddi bir kirlenme süreci de yaşanmaktadır. Gelecekte daha da artacak evsel, endüstriyel ve sulama suyu ihtiyaçlarının karşılanabilmesi için öncelikli olarak yeraltı suyu kaynaklarının mevcut durumlarının belirlenmesi ve gelecekteki ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak etkin bir şekilde kullanımı için sürdürülebilir planlama ve yönetim stratejilerinin geliştirilmesi gereklidir.

Yeraltı suyu sistemlerinin, farklı planlama ve yönetim stratejileri için davranışlarını önceden belirlemede matematik modeller etkin bir araç olarak kullanılmaktadır. Matematik modellerin akifer davranışını temsil edebilmesi için akifere ait hidrolojik ve hidrojeolojik parametreler ile sistem girdi ve çıktılarının bilinmesi gerekmektedir. Akiferlerdeki önemli sistem girdilerinden biri de, içme, sanayi ve sulama suyu temini için açılan pompaj kuyularının karakteristikleridir (sayıları, yerleri ve pompaj debileri). Pompaj kuyularının karakteristiklerinin tam olarak bilinmemesi, mevcut kuyulardan aşırı pompaj yapılması ya da izinsiz pompaj kuyusu açılması gibi nedenlerden dolayı sistem davranışı doğru bir şekilde belirlenememektedir. Ayrıca, mevcut pompaj kuyularından aşırı çekim yapılması ve izinsiz pompaj kuyusu açılması sonucunda; pompaj için gerekli enerjinin artması, kıyı bölgelerinde tuzlu su girişi, zemin oturması ve akiferdeki diğer pompaj kuyularının veriminin azalması gibi olumsuz sonuçlar oluşabildiği için pompaj kuyularının karakteristiklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir (USGS 1995, Covalla vd 2001).

Yeraltı suyu sistemleri için sürdürülebilir planlama ve yönetim stratejileri, Simülasyon/Optimizasyon (S/O) modelleri kullanılarak belirlenebilmektedir (Bear

1979). S/O modelleri, yeraltı suyu akımının matematiksel olarak modellenebildiği simülasyon modelleri ile verilen kısıtlara bağlı olarak en iyi planlama ve yönetim stratejisinin belirlenebildiği optimizasyon modellerinden oluşmaktadır (Das ve Datta 2001, Peralta 2004). Simülasyon modelleri ile verilen başlangıç ve sınır koşulları için yeraltı suyu akımına ait kısmi diferansiyel denklem sistemi analitik veya sayısal olarak çözülmekte ve farklı hidrolojik/hidrojeolojik durumlar için akiferin göstereceği davranış belirlenebilmektedir. Buna karşın, optimizasyon modelleri ile mevcut stratejiler arasından toplam faydayı maksimum ya da toplam hatayı minimum yapan en iyi yönetim stratejisi belirlenebilmektedir. Optimizasyon işleminin her bir hesap adımında, belirlenen parametre değerleri için, simülasyon modeli ile çözüm yapılmakta ve amaç fonksiyonu hesaplanarak optimizasyon işlemine devam edilmektedir.

Yeraltı suyu problemlerinin S/O modelleri ile çözümünde, optimizasyon probleminin çözüm uzayı doğrusal olmayan ve süreksiz bir yapıda olduğundan dolayı pek çok lokal optimum çözüm içermektedir (Willis ve Yeh 1987). Bu gibi durumlarda, optimizasyon tekniği olarak türevelere dayalı algoritmaların kullanılması bir takım güçlüklerle yol açmaktadır. Türevelere dayalı optimizasyon algoritmaları hızlı yakınsama özelliklerine sahip olmalarına karşın, verilen başlangıç değerlerine son derece bağlıdır. Ayrıca, optimizasyon işleminde kullanılan amaç fonksiyonunun karar değişkenlerine göre türevlerinin alınması gerektiğinden lokal optimum çözümlerin elde edilmesine neden olabilmektedir (Sun 1994, Guan ve Aral 1999, Sun vd 2006). Bu nedenle, yeraltı suyu problemlerinin çözümünde son yıllarda sezgisel (heuristic) optimizasyon algoritmalarının kullanımı yaygınlaşmıştır. Sezgisel optimizasyon algoritmalarının en önemli avantajlarından biri, özel bir başlangıç çözümüne ve amaç fonksiyonunun karar değişkenlerine göre türevinin alınmasına gerek kalmadan global ya da global optimuma yakın sonuçları elde edebilmesidir. Genetik Algoritmalar (GA), literatürde yaygın olarak kullanılan sezgisel optimizasyon algoritmalarından biridir (Holland 1975, Goldberg 1989). GA ile global ya da global optimuma yakın sonuçlar, optimizasyon işlemindeki her bir karar değişkenini temsil eden ikilik sayı dizilerinin, amaç fonksiyonlarının değerlerine göre sanal olarak evrimden geçirilmesiyle elde edilmektedir. GA'nın en önemli avantajlarından biri, süreksiz ve türevi alınamayan tipteki amaç fonksiyonlarının, sürekli (continuous) ve ayrık (discrete) karar değişkenleri için optimizasyonunu yapabilmesidir. Literatürde GA ile yeraltı suyu optimizasyon problemlerinin çözümü için pek çok çalışma yapılmıştır (McKinney ve Lin 1994, Ritzel

vd 1994, Cieniawski vd 1995, Rogers vd 1995, Huang ve Mayer 1995, 1997, Sun vd 2006, Guan ve Aral 1999, Park ve Aral 2004, Mahinthakumar ve Sayeed 2005).

Akifer sistemlerinde pompaj kuyularının karakteristiklerinin belirlenmesiyle ilgili olarak yapılan çalışmalar kısıtlıdır (Tung ve Chou 2004, Saffi ve Cheddadi 2007). Literatürde kuyu karakteristiklerinin belirlenmesine ilişkin çalışmalar genellikle; yeraltı suyu kirlenici kaynak yerlerinin ve kirlenici madde konsantrasyonlarının belirlenmesi (Mahar ve Datta 2000, Mahar ve Datta 2001, Aral vd 2001, Ruperti 2002, Singh vd 2004; Sun vd 2006), yeraltı suyu kalitesinin iyileştirilmesi için optimum pompaj karakteristiklerinin belirlenmesi (Wang ve Ahlfeld 1994, Guan ve Aral 1999, Huang ve Mayer 1995, Huang ve Mayer 1997, Zheng ve Wang 1999, Mantoglou ve Kourakos 2007, Chang vd 2007), kıyı alanlarında tuzlu su girişimini önleyecek şekilde pompaj için optimum kuyu karakteristiklerinin belirlenmesi (Cheng vd 2000, Park ve Aral 2004, Júlio F. Ferreira da Silva ve Haie 2007) gibi çalışmalar üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Literatürde, yeraltı suyu kirliliği ile ilgili çalışmalarda genellikle pompaj debileri/konsantrasyon değerleri ile birlikte kuyu yerleri de optimizasyon modelinde karar değişkeni olarak seçilmekte ve kuyu yerlerine ait çözüm uzayının alt ve üst sınırları tüm çözüm bölgesini kapsayacak şekilde tanımlanmaktadır (Huang ve Mayer 1997, Mahinthakumar ve Sayeed 2005). Ancak, bu işlem çözümün elde edilebilmesi için gerekli bilgi işlem süresi ve simülasyon sayısının artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, Guan ve Aral (1999) doğrusal olmayan optimizasyon problemlerinin çözümü için Aşamalı GA (progressive genetic algorithm - PGA) tekniğini geliştirmiştir. PGA ile kuyu yerleri ve pompaj debileri sürekli karar değişkenleri olarak tanımlanmaktadır. PGA'nın en önemli avantajlarından biri, S/O modelinin tanımlanan bir alt bölge içerisinde çalışması ve bu sayede optimum çözümün elde edilmesinde gereksiz simülasyonları önlemesidir. PGA ile literatürde günümüze kadar çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Guan ve Aral 1999, Aral vd 2001, Park ve Aral 2004).

İlgili çalışmaların hepsinde (Huang ve Mayer 1997, Guan ve Aral 1999, Aral vd 2001, Park ve Aral 2004, Mahinthakumar ve Sayeed 2005), her bir kuyunun karakteristiğinin belirlenebilmesi için optimizasyon işleminde üç adet karar değişkeninin kullanılması gerekmektedir (kuyu koordinatları ve pompaj debisi/konsantrasyon değeri). Bu durum kuyu sayısının fazla olduğu durumlarda,

matematiksel olarak optimizasyon probleminin boyutunun artmasına neden olmaktadır. Optimizasyon probleminin boyutunun artması da ilgili problemin matematiksel olarak çözümünü zorlaştıracığından, karar değişkenlerinin sayısının azaltılması gerekli olmaktadır (Huang ve Mayer 1997).

Bu çalışmada, bir akifer sistemindeki pompaj kuyularının karakteristiklerinin belirlenebildiği GA tabanlı bir S/O modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen S/O modeli ile, akiferde yer alan gözlem kuyularında ölçülen ve hesaplanan piyezometrik seviyeler arasındaki hata minimize edilerek pompaj kuyularının karakteristikleri belirlenmiştir. S/O modelinin uygulaması iki farklı senaryo altında yapılmıştır. Birinci senaryoda, literatürde verildiği gibi pompaj debileri ve kuyu yerleri optimizasyon işleminde karar değişkeni olarak seçilmiştir. Kuyu yerlerinin belirlenmesinde çözüm uzayının alt ve üst sınırı olarak çözüm bölgesinin tümünün seçilmesi durumunda, optimum çözümün bulunması için gerekli simülasyon sayısının arttığı görülmüştür. Bu nedenle, ikinci senaryoda “Hareketli Alt Bölge” yaklaşımı adı verilen bir çözüm tekniği geliştirilmiş ve S/O modeli ile birleştirilmiştir. Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımında, literatürde verilen PGA yaklaşımına (Guan ve Aral 1999, Aral vd 2001, Park ve Aral 2004) benzer şekilde her bir pompaj kuyusu bir alt bölgenin içinde olacak şekilde temsil edilmekte ve ilgili alt bölgeler başlangıçta verilen konumlarından başlayarak çözümün bulunduğu noktaya doğru hareket ettirilerek sonuca ulaşmaktadır. Geliştirilen yaklaşımın en önemli avantajı, optimizasyon işlemine karar değişkeni olarak sadece pompaj debilerinin kullanılması ve kuyu yerlerinin karar değişkeni olarak kullanılmasına gerek kalmamasıdır. Ayrıca ilgili S/O modeli alt bölgelerin içinde çalıştığından, kuyu yerlerine ait çözüm uzayının alt ve üst sınırları daraltılmakta ve böylece bilgi-işlem süresi azaltılmaktadır.

1.2. Tezin Organizasyonu

Yukarıda anlatılanlar doğrultusunda, bu tez çalışması altı ana bölümden oluşacak şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde, konuyla ilgili detaylı bir literatür taraması yapılmış ve S/O modellerinin yeraltı suyu modellemesi ile ilgili çalışmalarda nasıl kullanıldığı detaylı olarak anlatılmıştır. Üçüncü bölümde, simülasyon ve optimizasyon modelleri geliştirilmiş ve ayrı ayrı test edilmiştir. Ardından, her iki model yerleşik

yaklaşım kullanılarak birleştirilmiş ve farklı akifer modelleri üzerinde geliştirilen S/O modelinin performansı test edilmiştir. Dördüncü bölümde, geliştirilen S/O modelinin performansını arttırmak amacıyla kuyu yerlerinin optimizasyon işleminde karar değişkeni olarak kullanılmadan kuyu karakteristiklerinin belirlenebildiği “hareketli alt bölge yaklaşımı” adı verilen bir çözüm tekniği geliştirilmiş ve S/O modeli ile birleştirilerek model performansı test edilmiştir. Beşinci bölümde ise, farklı çözüm parametreleri için model performansının test edildiği bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Son olarak altıncı bölümde yapılan çalışmaya ait sonuçlar ve öneriler detaylı olarak verilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Yeraltı Suyu Problemlerinde S/O Modellerinin Kullanımı

Önceki bölümde belirtildiği gibi, yeraltı suyu sistemleri için sürdürülebilir planlama ve yönetim stratejileri S/O modelleri kullanılarak belirlenebilmektedir. Gorelick'e (1983) göre, simülasyon modeli optimizasyon modeli içerisinde iki farklı şekilde kullanılmaktadır: Yerleşik yaklaşım (Aguado ve Remson 1974) ve tepki matrisi yaklaşımı (Deninger 1970).

Yerleşik yaklaşımda, yeraltı suyu akımına ait kısmi diferansiyel denklem sisteminin sayısal çözümü, incelenen probleme ait diğer kısıtlarla beraber optimizasyon modelinde kullanılmakta ve belirlenen her bir karar değişkeni için ilgili kısıtlar sağlanacak şekilde simülasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Yerleşik yaklaşımın pratikteki ilk uygulamalarından biri Aguado vd (1974) tarafından yapılmıştır. Belirtilen çalışmada, kararlı durum için yeraltı suyu akımına ait kısmi diferansiyel denklem sistemi bir sonlu fark hesap şeması ile çözülmüş ve bu çözüm optimizasyon modelinde kısıt olarak kullanılarak bir kazı alanında yeraltı suyu seviyesinin belirlenen bir seviyenin altına düşürmek için pompaj kuyularının optimizasyonu yapılmıştır. Literatürde, yeraltı suyu optimizasyon problemlerinin çözümünde yerleşik yaklaşım ile pek çok çalışma yapılmıştır (Yazdanian ve Peralta 1986, Yazıcıgil ve Rasheeduddin 1987, Peralta ve Datta 1990, Wagner vd 1992, Das ve Datta 1999a, Das ve Datta 1999b).

Tepki matrisi yaklaşımında ise, optimizasyon işleminde belirlenen karar değişkenlerinin (pompaj debileri) gözlem kuyularında oluşturduğu tepki, cebirsel bir ilişki ile temsil edilerek optimizasyon işleminde kullanılmaktadır. Cebirsel bir ilişkinin kurulabilmesi için, simülasyon modeli farklı pompaj debileri için çalıştırılmakta ve çözümün gözlem kuyularında oluşturduğu etki, bir matris içerisinde saklanarak farklı çözümler için süperpozisyon prensibine göre değerlendirme yapılmaktadır (Das ve

Datta 2001). Tepki matrisi yaklaşımı kullanılarak literatürde yeraltı suyu ile ilgili pek çok çalışma yapılmıştır (Larson vd 1977, Gorelick ve Remson 1982, Willis 1983, Colarullo vd 1984, Daskin ve Gorelick 1985, Yazıcıgil vd 1987, Aral 1989, Hallaji ve Yazıcıgil 1996, Mylopoulos vd 1999, Zhou vd 2003, Shen vd 2004).

Optimizasyon modelinde belirlenecek karar değişkenlerinin sayısının fazla olması durumunda, kararlı durumda sonuca ulaşmak için, yerleşik yaklaşım tepki matrisi yaklaşımına göre daha az bilgi-işlem süresi gerektirmektedir. Buna karşın, zamana bağlı problemlerde kesin olarak böyle bir yargıya varılamamaktadır (Peralta ve Datta 1990). Doğrusal olmayan, karmaşık yapıya sahip ve/veya çok sayıda bilinmeyen içeren akifer sistemlerinin çözümünde yerleşik yaklaşım tepki matrisi yaklaşımından daha etkili olduğu bulunmuştur (Das ve Datta 2001). Optimizasyon modelinin her bir hesap adımında amaç fonksiyonunun hesaplanabilmesi için yerleşik yaklaşımda ilgili simülasyon modeli çalıştırılmakta, buna karşın tepki matrisi yaklaşımında kuyu karakteristikleri ile gözlem kuyularındaki seviye değerleri arasında kurulan cebirsel ilişki kullanılmaktadır. Ancak, tepki matrisinin oluşturulabilmesi için simülasyon modelinin defalarca çalışması gerekmektedir. Ayrıca, akiferin sınır koşullarının ve/veya pompaj kuyularının yerlerinin değişmesi tepki matrisinin yeniden oluşturulmasını gerektirmektedir (Das ve Datta 2001).

Görüleceği gibi, yeraltı suyu problemlerinin S/O modelleri ile çözümünde her iki yaklaşım da yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak ilgili çalışmalarda, kullanılan optimizasyon algoritmaları bakımından farklılıklar bulunmaktadır. Aşağıda sırasıyla türeve dayalı ve sezgisel optimizasyon algoritmalarından GA'nın S/O modellerinde kullanılması ile ilgili çalışmalar vurgulanacaktır.

2.1.1. S/O modellerinde türeve dayalı optimizasyon algoritmalarının kullanılması

Yeraltı suyu yönetim problemlerinin çözümünde, türeve dayalı optimizasyon algoritmalarına dayanan S/O modelleri literatürde yaygın olarak kullanılmıştır. Bu uygulamalar ağırlıklı olarak doğrusal ve doğrusal olmayan programlama teknikleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Doğrusal programlama teknikleri, optimizasyon problemine ait kısıtların ve amaç fonksiyonunun doğrusal yapıda olması durumunda kullanılmaktadır. Buna karşın, pratikteki yeraltı suyu yönetim modellerinin çoğu

doğrusal olmayan kısıtlardan ve amaç fonksiyonlarından oluşmaktadır. Bu gibi durumlarda optimizasyon problemlerinin çözümünde doğrusal olmayan optimizasyon tekniklerinin kullanılması gerekmektedir. Aguado ve Remson (1974), doğrusal programlama tekniği ile kararlı ve zamana bağlı durumları ayrı ayrı dikkate alarak basınçlı ve yüzeysel akifer modelleri için bir yönetim modeli geliştirmiştir. Geliştirilen modelde, yeraltı suyu akımına ait kısmi diferansiyel denklem sistemi sonlu farklar metodu ile çözülmüş ve elde edilen bu çözüm yerleşik yaklaşım kullanılarak optimizasyon modelinde kısıt olarak tanımlanmıştır. Willis (1983) ise, gerekli sulama suyu ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla doğrusal programlama tekniğini kullanarak bir optimum pompaj planı belirlemiştir. İlgili çalışmada, serbest yüzeysel bir akifer modeli kullanılmış ve doğrusal olmayan yeraltı suyu akım denklemleri Taylor serisi yaklaşımı ile yarı-doğrusal hale dönüştürülerek tepki matrisi yaklaşımı ile optimizasyon modeli ile birleştirilmiştir. Gorelick vd (1984), bir akifer için optimum su kalitesi iyileştirme planını belirleyen bir S/O modeli geliştirmiştir. İlgili S/O modelinde, simülasyon modeli olarak yeraltı suyu hareketi ve kirlilik taşınımı problemlerinin çözümü kullanılmış ve yerleşik yaklaşımla doğrusal olmayan bir optimizasyon modeli ile birleştirilmiştir. Finney vd (1992) geliştirdikleri S/O modeli ile, Endonezya'nın Jakarta bölgesi için tuzlu su girişimini önleyecek bir pompaj planı belirlemiştir. İlgili S/O modelinde, simülasyon modeli olarak 3-boyutlu keskin ara-yüzeysel model; optimizasyon modeli olarak ta doğrusal olmayan programlama tekniği kullanılmıştır. Çalışma sonuçları, su talebindeki artışın mevcut yeraltı suyu kalitesinin bozulmasında büyük etkisi olduğunu göstermiştir. Başağaoğlu ve Yazıcıgil (1994), tepki matrisi yaklaşımı ve karmaşık tam sayılı doğrusal programlama tekniğini kullanarak bir akifer sistemi için pompaj kuyularının yatırım ve işletme maliyetlerini minimize eden bir yönetim modeli geliştirmiştir. İlgili çalışmada ayrıca, sistem parametrelerinin çözüm üzerindeki etkisini görmek amacıyla bir duyarlılık analizi de yapılmıştır. Tokgöz vd (2002) ise, yüzeysel bir akiferde yeraltı suyu seviyesinin altında kalan bir kazı alanı içindeki suyu boşaltacak bir pompaj sisteminin optimum tasarımını yapmıştır. Kullanılan simülasyon modeli, kararlı ve zamana bağlı durumlar için tepki matrisi yaklaşımı ile doğrusal ve tam sayılı programlama modellerine göre ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca, akiferin doğrusal olmayan yapısı iteratif bir düzeltme işlemi ile doğrusal bir hale dönüştürülmüştür. Analiz sonuçları, zamana bağlı durum için tam sayılı programlama modelinin gerekli kuyu sayısı, inşaatın tamamlanma süresi ve pompajla çekilen toplam su miktarı bakımından en iyi sonucu verdiğini göstermiştir.

2.1.2. S/O modellerinde GA optimizasyon tekniğinin kullanılması

Bir önceki bölümden görüleceği gibi, yeraltı suyu problemlerinin çözümünde kullanılan S/O modellerinde türeve dayalı optimizasyon algoritmaları yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak, yeraltı suyu optimizasyon problemlerinin çözüm uzayı doğrusal/doğrusal olmayan, konveks/konveks olmayan ve sürekli/sürekli yapıda olabilmektedir (Willis ve Yeh 1987). Bu durumda, türeve dayalı optimizasyon algoritmalarının performansı büyük oranda çözüm uzayının karakteristiğine bağlı olmaktadır. Çözüm uzayının karakteristiği önceden tam olarak bilinmiyorsa türeve dayalı optimizasyon algoritmalarının kullanılması yerel optimum sonuçların elde edilmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle, yeraltı suyu optimizasyon problemlerinin çözümünde son yıllarda sezgisel optimizasyon algoritmalarının kullanımı yaygınlaşmıştır. Literatürde yaygın olarak kullanılan sezgisel optimizasyon algoritmalarından biri de GA'dır (Holland 1975, Goldberg 1989). GA ile, ilgili probleme ait çözüm uzayının, kompleks, sürekli ve lokal optimum çözümler içermesi durumunda bile global optimuma yakın sonuçlar elde edilebilmektedir. (Goldberg 1989, Michalewicz 1992). GA kullanarak yeraltı suyu yönetim problemleri ile ilgili ilk çalışmalardan biri McKinney ve Lin (1994) tarafından yapılmıştır. İlgili çalışmada, GA tabanlı bir S/O modeli ile kararlı durum için yüzeysel bir akiferden çekilebilecek maksimum pompaj debisi, mevcut su talebinin karşılanması için gerekli minimum pompaj maliyeti ve akiferdeki su kalitesinin iyileştirilmesi için gerekli yönetim senaryosu belirlenmeye çalışılmıştır. Simülasyon modeli, optimizasyon modeli içine tepki matrisi yaklaşımı ile dahil edilmiştir. Çalışma sonuçları, GA optimizasyon tekniğinin klasik doğrusal ve doğrusal olmayan programlama tekniklerine göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Huang ve Mayer (1995) ise, GA ile yeraltı suyu kalitesini iyileştirmek için bir çözüm algoritması geliştirmiştir. İlgili çalışmada, su temini amacıyla kullanılan pompaj kuyularından çekilen yeraltı suyuna kirletici madde karışmasını engelleyecek şekilde minimum maliyetle su kalitesinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Benzer şekilde Liu vd (2000), kirletilmiş bir akiferdeki su kalitesinin iyileştirilebilmesi için kesikli bir pompaj planını dikkate alan GA tabanlı bir çözüm algoritması geliştirmiştir. Geliştirilen çözüm algoritmasında, gözlem kuyularındaki kirletici madde konsantrasyonları stokastik yapıdaki bir simülasyon modeli ile belirlenmektedir. GA tabanlı optimizasyon modeli ise, pompaj için gerekli maliyeti ve

hastalık riskini minimize ederken, akiferden çekilen kirletici madde miktarını maksimize etmektedir.

2.2. Kuyu Karakteristiklerinin Belirlenmesi

Akifer sistemlerinde kuyu karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik olarak yapılan çalışma sayısı son derece kısıtlıdır. Tung ve Chou (2004), tabu arama ve zonlama tekniğini eşzamanlı kullanarak bir akiferden çekilen yeraltı suyunun alansal dağılımını belirlemiştir. İlgili çalışmada, zonlama işlemi iki boyutlu normal dağılım fonksiyonunun verdiği olasılık değerlerine göre gerçekleştirilmiş ve amaç fonksiyonunda akiferin belli yerlerine açılmış gözlem kuyularında ölçülen ve hesaplanan hidrolik yük değerleri arasındaki farkın karelerinin toplamı minimize edilmiştir. Saffi ve Cheddadi (2007) ise, yarı basınçlı bir akifer modeli için zamana bağlı etki katsayılarını veren bir bağıntı geliştirmiş ve bu bağıntıya dayanarak bir boyutlu yeraltı suyu akımına ait kısmi diferansiyel denklemi kompartıman modeli ile çözmüştür. Geliştirdikleri model ile akiferin belli yerlerine açılmış gözlem kuyularında hesaplanan ve gözlenen hidrolik yükler arasındaki hatayı minimize edecek şekilde şüphelenilen bölgeler için izinsiz pompaj yapılıp yapılmadığını araştırmıştır.

Literatürde, kuyu karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik olarak yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak; yeraltı suyu kirletici kaynak karakteristiklerinin belirlenmesi, yeraltı suyu kalitesinin iyileştirilmesi için optimum pompaj karakteristiklerinin belirlenmesi ve kıyı alanlarında tuzlu su girişimini önleyecek şekilde pompaj için optimum kuyu karakteristiklerinin belirlenmesi gibi konularda yoğunlaşmaktadır. Aşağıdaki iki bölümde sırasıyla kuyu yerlerinin sabit ve değişken olması dikkate alınarak bu alanlarda yapılan çalışmalar detaylı olarak verilmektedir.

2.1.2. Kuyu yerlerinin bilinmesi durumunda kuyu karakteristiklerinin belirlenmesi

Kuyu karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik olarak yapılan ilk çalışmalardan biri Gorelick (1983) tarafından gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışmada, sınırlı sayıda gözlem değeri kullanılarak iki farklı akifer modeli için bilinmeyen yeraltı suyu kirletici kaynak konsantrasyonları belirlenmiştir. İlgili S/O modelinde, yeraltı suyu simülasyon

modeli tepki matrisi yaklaşımı ile en küçük kareler yöntemi ve doğrusal programla teknikleri birleştirilmiştir. Datta vd (1989), istatistiksel eğilim araştırma tekniklerini kullanarak bilinmeyen yeraltı suyu kirlenici kaynak konsantrasyonlarının belirlenmesi için dinamik programlamaya dayanan bir çözüm algoritması geliştirmiştir. Yeraltı suyu hareketi ve kirlenici madde taşınımı süreci tepki matrisi yaklaşımı ile optimizasyon modeline eklenmiştir. Geliştirilen çözüm algoritması, modelleme sırasında akifer parametrelerindeki belirsizliği ve gözlem değerlerdeki ölçüm hatalarını da dikkate alabilmektedir. Skaggs ve Kabala (1994), kirlenici kaynak konsantrasyonlarını Tikhonov düzenlemesi (Tikhonov regularization) ile belirlemişlerdir. İlgili çalışmada, bir-boyutlu kirlenici madde taşınımı modellemek için bir integral denklemi kullanılmıştır. Ayrıca, ölçüm ve parametre kestirim hataları ile karşılaşılan sayısal zorlukların çözüm üzerine olan etkisi detaylı olarak incelenmiştir.

Mahar ve Datta (2000), kirlenici kaynak konsantrasyonlarının zamana bağlı yeraltı suyu akımı ve kirlenici madde taşınımı için belirlenebildiği bir S/O modeli geliştirmiştir. Belirtilen S/O modelinde, yeraltı suyu akımı ve kirlilik taşınımına ait kısmi diferansiyel denklem sistemlerinin sonlu fark çözümleri yerleşik yaklaşım kullanılarak doğrusal olmayan bir optimizasyon modeli ile birleştirilmiştir. Geliştirilen modelin performansı, iki-boyutlu sentetik bir akifer modeli için; tekil ve çoğul kirlenici kaynak durumu ile gözlem verilerinde ölçüm hatalarının oluşu durumlarına göre ayrı ayrı incelenmiş ve geliştirilen S/O modelinin kirlenici madde konsantrasyonlarının bulunmasında iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bu çalışmanın devamı olarak Mahar ve Datta (2001), kirlenici kaynak konsantrasyonu ile beraber akifer parametrelerinin de eş zamanlı belirlenebildiği bir S/O modeli geliştirmiş ve geliştirilen S/O modelinin kirlenici madde konsantrasyonu ve akifer parametrelerinin bulunmasında iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Mevcut S/O modellerinden farklı olarak, yeraltı suyu yönetim problemlerinin çözümünde Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanımı da yaygınlaşmaktadır. YSA, biyolojik sinir sisteminin çalışma şeklini esas alarak tasarlanan bir programlama yaklaşımıdır (Rogers ve Dowla 1994). YSA ile bir problemin çözümünde, ilgili problemin çözümü için gerekli girdilerle o girdilere karşılık gelen çözümler ilgili modelin eğitiminde kullanılır. Model eğitimi sonucunda ilgili YSA modeli, eğitim aşamasında kullanılmayan farklı girdi değerleri için problemin çözümünü verebilmektedir. Rogers

ve Dowla (1994) YSA ve GA ile yeraltı suyu kalitesinin iyileştirilmesini amaçlayan bir çalışma yapmıştır. İlgili çalışmada, farklı pompaj durumları için YSA modeli eğitilmiş ve eğitilen model GA tabanlı bir optimizasyon modeli içinde simülatör olarak kullanılmıştır. GA optimizasyon işleminin her bir hesap adımında, o anda belirlenen karar değişkenleri için simülasyon modelinin sonucu doğrudan YSA modeli ile belirlenmiştir. Çalışma sonuçları, YSA modelinin kullanılmasının çözüme ulaşmak için gerekli bilgi-işlem süresini büyük oranda azalttığını göstermiştir. Singh ve diğ. (2004), YSA modeli ile bir akiferdeki kirletici kaynak konsantrasyonlarını belirlemiştir. İlgili çalışmada, akifer üzerinde bulunan gözlem kuyularında ölçülen konsantrasyon değerleri YSA modelinde girdi, mevcut kaynak konsantrasyonları ise çıktı olarak kullanılarak modelin eğitimi yapılmıştır. Singh ve Datta (2004) aynı problemi kirletici kaynak konsantrasyonu ile akifer parametrelerini eşzamanlı belirleyecek şekilde çözmüştür. Ancak, ilgili çalışmalarda kirletici kaynak konsantrasyonları homojen ve anizotrop ortamlar için belirlenmiştir. Ayvaz vd'de (2007) ise heterojen ve anizotrop akifer özellikleri için bir akiferdeki kirletici kaynak konsantrasyonları belirlenmiştir. Çalışma sonuçları, YSA modeli ile kaynak yerlerinin bilinmesi durumunda konsantrasyon değerlerinin etkin bir biçimde belirlenebildiğini göstermiştir.

2.1.2. Kuyu yerlerinin bilinmemesi durumunda kuyu karakteristiklerinin belirlenmesi

Bir önceki bölümde kuyu karakteristiklerinin belirlenmesinde kuyu yerlerinin sabit olduğu kabul edilmiştir. Ancak, pratikte mevcut kuyulardan aşırı pompaj yapıp yapılmadığının ya da izinsiz pompaj kuyusu açılıp açılmadığının kontrolünün yapılabilmesi için kuyu yerlerinin de bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle, kuyu yerlerinin de optimizasyon işleminde karar değişkeni olarak tanımlanması gerekmektedir.

Literatürde, kuyu yerlerinin karar değişkeni olarak kabul edilmesiyle ilgili olarak yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak yeraltı suyu kirliliği ve kıyı akiferlerindeki tatlı su-tuzlu su girişimi ile ilgilidir. Kuyu yerlerinin belirlenmesine yönelik olarak Wang ve Ahlfeld (1994), yeraltı suyu kalite iyileştirme probleminin çözümünde pompaj debileri ile birlikte kuyu yerlerini de optimizasyon işleminde karar değişkeni olarak kullanmışlardır. İlgili çalışmada, türeve dayalı bir optimizasyon modeli ile yeraltı suyu

akımı ve kirlilik taşınımına ait kısmi diferansiyel denklem sisteminin sonlu elemanlar metodu ile sayısal çözümünden oluşan simülasyon modeli birleştirilerek pompaj kuyularının yerleri ve optimum debileri belirlenmiştir. Optimizasyon modelinde türeve dayalı optimizasyon algoritmasının kullanılmasından dolayı, kuyu yerleri bir interpolasyon fonksiyonu kullanılarak sürekli karar değişkenlerine dönüştürülmüş ve optimizasyon modeline dahil edilmiştir. Huang ve Mayer (1997) aynı problemin çözümünde GA optimizasyon tekniğini kullanmıştır. GA ile problemin çözümünde kuyu yerleri ayrık, pompaj debileri ise sürekli karar değişkenleri olarak kullanılmıştır. Çalışma sonuçları, ilgili problemin kuyu yerlerini değişken kabul edilerek çözülmesinin sabit kabul edilerek çözülmesinden daha etkili olduğunu göstermiştir. Zheng ve Wang (1999) ise aynı problemin çözümünde kuyu yerlerini temsil eden ayrık karar değişkenlerinin sezgisel; pompaj debilerini temsil eden sürekli karar değişkenlerinin ise türeve dayalı optimizasyon teknikleri ile belirlenmesinin daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Mahinthakumar ve Sayeed (2005), GA ile türeve dayalı bir optimizasyon algoritmasını eşzamanlı kullanarak yeraltı suyu kirlenici kaynak karakteristiklerini belirlemiştir. İlgili çalışmada, bir kirlenici kaynağın yeri ve kaynak konsantrasyonu GA ile eşzamanlı olarak belirlenmiş ve bulunan sonuçlar GA'nın ardından türeve dayalı optimizasyon algoritması ile iyileştirilmiştir. Rao (2006), 3-boyutlu bir akifer modelinde kirlenici kaynak konsantrasyonlarının ve yerlerinin belirlenebildiği bir S/O yaklaşımı geliştirmiştir. Belirtilen S/O yaklaşımında, simülasyon modeli olarak rastgele üretilen kaynak yerleri ve konsantrasyonları ile eğitilen bir YSA modeli kullanılmış ve bu model tavlama benzetimi (simulated annealing) tekniğine göre çözüm yapan bir optimizasyon modeli ile birleştirilmiştir. Çalışma sonuçları, simülasyon modeli olarak YSA modelinin kullanılmasıyla, gerekli bilgi-işlem süresinin büyük oranda azaldığını göstermiştir.

Yukarıda verilen çalışmaların hepsinde pompaj debisi/konsantrasyon değerleriyle birlikte kuyu yerleri de eş zamanlı olarak belirlenmiştir. Ancak, kuyu yerleri tüm çözüm bölgesi içerisinde arandığından dolayı çözümün elde edilebilmesi için gerekli simülasyon sayısı artmaktadır. Bu nedenle Guan ve Aral (1999), kuyu yerlerine ait çözüm uzayının alt ve üst sınırlarını daraltabilmek için aşamalı GA (progressive genetic algorithm - PGA) tekniğini geliştirmiştir. PGA çözüm tekniğinde, kuyu yerleri ve pompaj debileri sürekli karar değişkeni olarak tanımlanmakta ve ilgili S/O modeli her bir kuyu için ayrı ayrı tanımlanan alt bölgeler içerisinde çalıştırılmaktadır. Çözümün hata eğilimine göre alt bölgeler kuyu yerlerine doğru hareket etmekte ve bu sayede olası

özüm bölgesi dışındaki gereksiz simülasyonlar önlenmektedir. PGA özüm tekniği kullanılarak Guan ve Aral (1999), yeraltı suyu kalitesini iyileştirme problemini, Aral vd (2001) kirletici kaynak karakteristiklerini ve Park ve Aral (2004) ise kıyı akiferleri için verilen kısıtlara bağlı olarak pompaj kuyularının karakteristiklerini belirlemişlerdir. Bu alışma kapsamında da PGA yaklaşımına benzer şekilde bir hareketli alt bölge yaklaşımı geliştirilmiş ve pompaj kuyularının karakteristikleri belirlenmiştir.

3. SİMÜLASYON/OPTİMİZASYON (S/O) MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ

3.1. Giriş

Bu bölümde, öncelikle yeraltı suyu akımına ait kısmi diferansiyel denklem sistemi verilmiş ve bu denklemin verilen başlangıç ve sınır koşulları altında sayısal çözümü yapılmıştır. Elde edilen sayısal çözüm simülasyon modeli içinde kullanılmış ve modelin performansı literatürde verilen iki örnek üzerinde test edilmiştir. Ardından, GA'nın optimizasyon modelinde nasıl kullanıldığı detaylı olarak anlatılmış ve literatürde verilen test fonksiyonları ile geliştirilen optimizasyon modelinin performansı test edilmiştir. Son olarak, simülasyon ve optimizasyon modelleri birleştirilerek elde edilen S/O modelinin performansı iki ayrı akifer modeli üzerinde farklı durumlar için test edilmiştir.

3.2. Simülasyon Modeli

Simülasyon işlemi, yeraltı suyu hareketini temsil eden kısmi diferansiyel denklem sisteminin incelenen çözüm bölgesi içerisinde verilen başlangıç ve sınır koşulları altında çözümüdür. Simülasyon işleminin amacı çözüm bölgesinin tümü için hidrolik yük dağılımını elde etmektir. Yeraltı suyu hareketini temsil eden kısmi diferansiyel denklemin çözümü analitik ve sayısal çözüm yöntemleri kullanılarak yapılabilmektedir. Analitik çözüm yöntemlerinin kullanılabilmesi için çözüm bölgesinin düzgün geometriye sahip olması ve akifer parametrelerinin homojen olması gibi koşulların sağlanması gerekmektedir. Bu nedenle, karmaşık geometriye sahip çözüm bölgesi ve/veya heterojen ve anizotrop akifer özelliklerinin olması durumunda sayısal çözüm yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Kısmi diferansiyel denklem sistemlerinin sayısal çözümü için literatürde sonlu farklar metodu (McDonald ve Harbough 1988; Wang ve Chunmaio 1998, Karahan ve Ayvaz 2005a, Karahan ve Ayvaz 2005b), sonlu elemanlar metodu (Grupta vd 1984, Aral ve Guan 1996, Mazzia ve Putti 2002), sınır

elemanlar metodu (Harrouni vd 1996, Eldho ve Rao 1997) gibi çeşitli çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çözüm yöntemlerinin birbirlerine göre birçok avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin sonlu farklar metodu çözüm tekniği bakımından daha kolay olduğu için sonlu elemanlar metoduna göre daha avantajlıdır. Ancak, sonlu farklar metodunda çözüm bölgesi ağırlıklı olarak kare yada dikdörtgen gridlere bölüldüğü için düzensiz sınır bölgelerinde sayısal çözümün duyarlılığı azalmaktadır. Buna karşın, sonlu elemanlar metodunda çözüm bölgesi kare, üçgen gibi farklı boyutlara sahip elemanlardan oluşabildiği için bu bölgelerde daha gerçekçi sonuçlar elde edilebilmektedir. Ancak, sonlu elemanlar metodu kullanılarak sistemin programlanması sonlu farklar metoduna göre daha karmaşıktır. Sınır elemanlar metodunda ise her türlü problem sayısal olarak çözülebilmekte ancak yöntem olarak ağır matematiksel ifadelerin çözümünü gerektirdiğinden dolayı sonlu farklar ve sonlu elemanlar metodlarına göre çözüm algoritmasının oluşturulması daha zor olmaktadır.

3.2.1. Yeraltı suyu akım denklemi

Bu çalışmada simülasyon modeli olarak; 2-boyutlu, heterojen-izotrop basınçlı bir akifer sisteminde yeraltı suyu hareketini temsil eden kısmi diferansiyel denklemin sayısal çözümü kullanılmıştır (Willis ve Yeh 1987).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \sum_{k=1}^c W(x_k, y_k) \delta(x - x_k, y - y_k) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

$$\delta(x - x_k, y - y_k) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } x = x_k \text{ ve } y = y_k \\ 0 & \text{eğer } x \neq x_k \text{ ve/veya } y \neq y_k \end{cases} \quad (2)$$

Denklem (1)'de; h , hidrolik yükü [L]; T , akifer iletim kapasitesini [L^2/T]; S , özgül depolama katsayısını, x ve y , bağımsız kartezyen koordinatları [L]; c , kuyu sayısını, W , kaynak/yitik terimini [L/T]; $\delta(x - x_i, y - y_i)$, Dirac-delta fonksiyonunu (Gündüz ve Aral 2005) göstermektedir.

Denklem (1)'in analitik ve sayısal yöntemlerle çözümünün yapılabilmesi için ilgili başlangıç ve sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Başlangıç koşulu, simülasyon işlemi başlamadan önce tüm çözüm bölgesinin aldığı hidrolik yük değeridir.

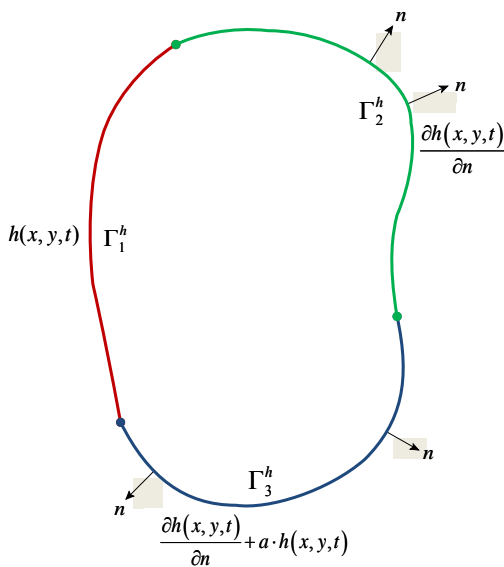
Pratikte, zamana bağlı çözümler için başlangıç koşulu olarak ilgili problemin kararlı durumdaki çözümü kullanılmaktadır (Delleur 2007). Sınır koşulları ise, çözüm bölgesinin sınırlarında hidrolik yük değerlerinin kendisinin ya da sınırın normaline göre alınan türevinin aldığı değer olarak tanımlanmaktadır (Delleur 2007). Yeraltı suyu modellemesinde aşağıda verilen üç tip sınır koşulu kullanılmaktadır.

$$\text{Dirichlet Sınır Koşulu: } h(x, y, t) = \text{sabit} \quad (x, y) \in \Gamma_1^h \quad (3)$$

$$\text{Neuman Sınır Koşulu: } \frac{\partial h(x, y, t)}{\partial n} = \text{sabit} \quad (x, y) \in \Gamma_2^h \quad (4)$$

$$\text{Cauchy Sınır Koşulu: } \frac{\partial h(x, y, t)}{\partial n} + a \cdot h(x, y, t) = \text{sabit} \quad (x, y) \in \Gamma_3^h \quad (5)$$

burada n , çözüm bölgesinin sınırına dik normal vektörü, Γ_1^h , Γ_2^h ve Γ_3^h , Dirichlet, Neuman ve Cauchy sınır koşullarının geçerli olduğu sınır bölgelerini, a ise sabit bir sayıyı göstermektedir. Fiziksel olarak Dirichlet sınır koşulu incelenen akiferin sınır bölgelerinde seviye değerlerinin (nehir, göl, vb.) bilinmesi, Neumann sınır koşulu geçirimsiz bir yüzey ya da komşu akiferlerden sızma olması, Cauchy sınır koşulu ise nehir ve göl gibi yüzeylerde hem seviye değerlerinin bilinmesi hem de akiferin bu yüzeylerden beslenmesi durumunda kullanılmaktadır (Delleur 2007). Sınır koşullarının örnek bir çözüm bölgesi üzerinde gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Sınır koşullarının örnek bir çözüm bölgesi üzerinde gösterilmesi

3.2.2. Sayısal çözümleme

Bu çalışmada, yeraltı suyu hareketiyle ilgili kısmi diferansiyel denklem sistemi sonlu farklar metodu ile çözülmüştür. Sayısal çözümleme yapılırken ilgili sonlu fark denklemleri heterojen/izotrop akifer özellikleri ve değişken grid aralıkları dikkate alınarak elde edilmiştir. Sonlu farklar metodu ile sayısal çözümünün nasıl yapıldığı detaylı olarak Ek-1'de verilmiştir. Sonuç olarak, Denklem (1)'in sonlu fark denklemleri olarak yazılmış hali aşağıdaki gibidir:

$$h_{i,j}^{m+1,n+1} = (1-w)h_{i,j}^{m+1,n} + \frac{w(CC \cdot h_{i,j}^{m,n+1} + CE \cdot h_{i+1,j}^{m+1,n} + CW \cdot h_{i-1,j}^{m+1,n+1} + CS \cdot h_{i,j+1}^{m+1,n} + CN \cdot h_{i,j-1}^{m+1,n+1} + W)}{CC + CE + CW + CS + CN} \quad (6)$$

burada m ise zaman adımını, n iterasyon adımını, CC , CE , CW , CS , CN ve W ilgili kısaltmaları ve w rahatlatma parametresini göstermektedir. Denklem (6)'da verilen değişkenler hakkında detaylı bilgi Ek-1'de verilmiştir.

3.2.3. Simülasyon modelinin testi

Bu bölümde, geliştirilen simülasyon modelinin performansı ilk olarak Prasad ve Rastogi (2001) ve Tsai vd (2003) tarafından incelenen iki ayrı akifer modeli üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçları karşılaştırmak amacıyla, her iki akifer modeli de aynı koşullar altında MODFLOW (McDonald ve Harbough 1988) ile çözülmüştür.

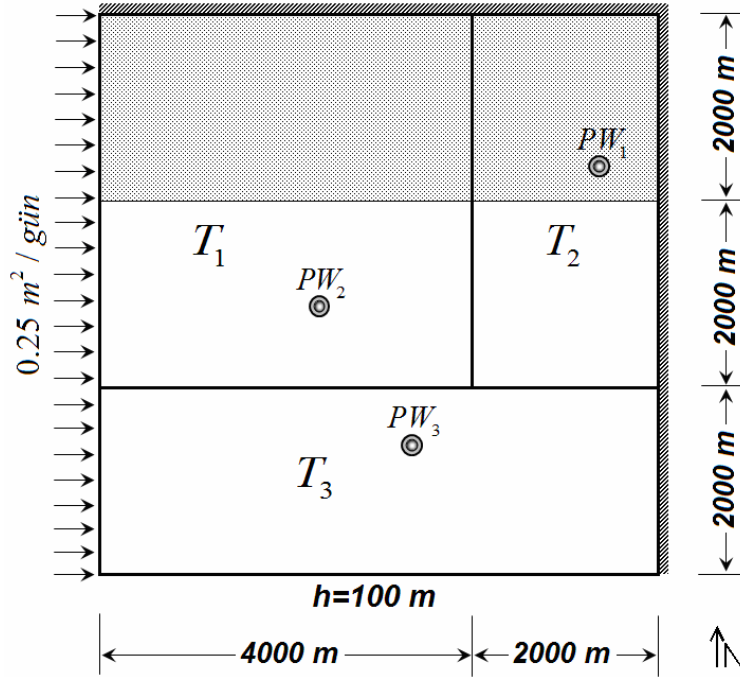
3.2.3.1. Uygulama 1

Bu uygulamada geliştirilen simülasyon modelinin performansı Prasad ve Rastogi (2001) tarafından incelenen 2-boyutlu bir basınçlı akifer modeli üzerinde test edilmiştir. Akifer modeline ait geometri ve sınır koşulları Şekil 3.2'de verilmiştir. Şekil 3.2'den görüleceği gibi, $6000 \text{ m} \times 6000 \text{ m}$ boyutlarındaki basınçlı akifer modeli güneyde 100 m sabit hidrolik yük, batıda $0.25 \text{ m}^2 / \text{gün}$ akı girişli geçirimli, diğer yönlerde ise geçirimsiz sınır koşuluna sahiptir.

Akifer üzerinde pompaj debileri $PW_1 = 800 \text{ m}^3 / \text{gün}$, $PW_2 = 3000 \text{ m}^3 / \text{gün}$ ve $PW_3 = 6000 \text{ m}^3 / \text{gün}$ olan üç adet pompaj kuyusu bulunmaktadır. Ayrıca, iletim

kapasitelerinin homojen olduğu üç farklı zon bulunmaktadır ve her bir zon için iletim kapasiteleri sırasıyla $T_1 = 150 \text{ m}^2 / \text{gün}$, $T_2 = 50 \text{ m}^2 / \text{gün}$ ve $T_3 = 200 \text{ m}^2 / \text{gün}$ 'dür.

Akiferin her yerinde özgül depolama katsayısı $S = 0.001$ 'dir ve kuzeyde (Şekil 3.2'deki taralı bölge) $R = 0.00015 \text{ m} / \text{gün}$ değerinde etkili yağış alan bir bölge bulunmaktadır.

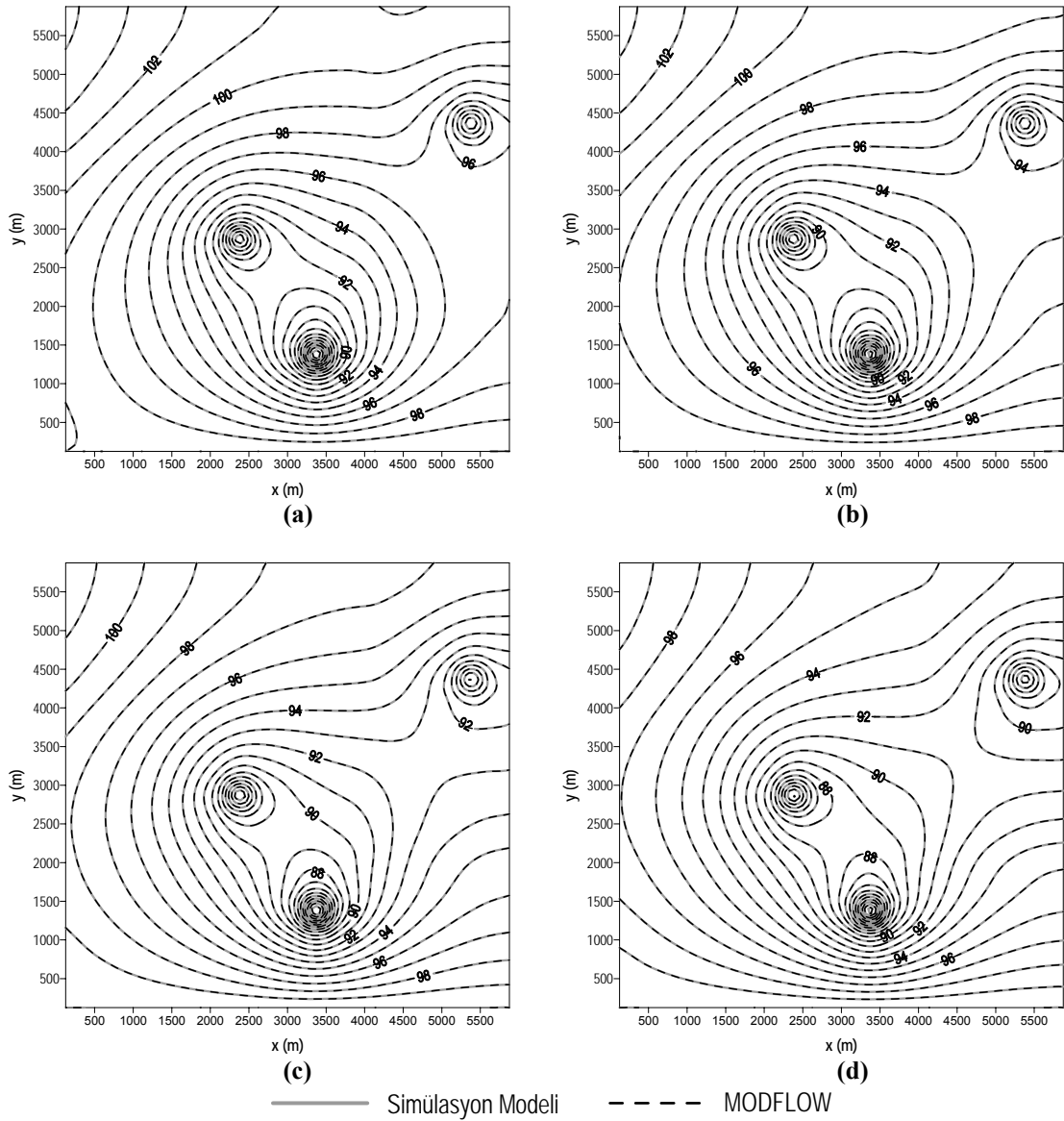


Şekil 3.2 Uygulama 1'e ait geometri ve sınır koşulları

Bu uygulama için toplam simülasyon süresi 360 ve zaman adımı $\Delta t = 1$ gün olarak alınmıştır. Çözüm bölgesinin geliştirilen simülasyon modeli ve MOFLOW ile çözümünde grid aralıkları $\Delta x = \Delta y = 250 \text{ m}$ kabul edilmiştir.

Geliştirilen simülasyon modeli ile MODFLOW'un verdiği sonuçların farklı simülasyon zamanları için karşılaştırılması Şekil 3.3'de yapılmıştır.

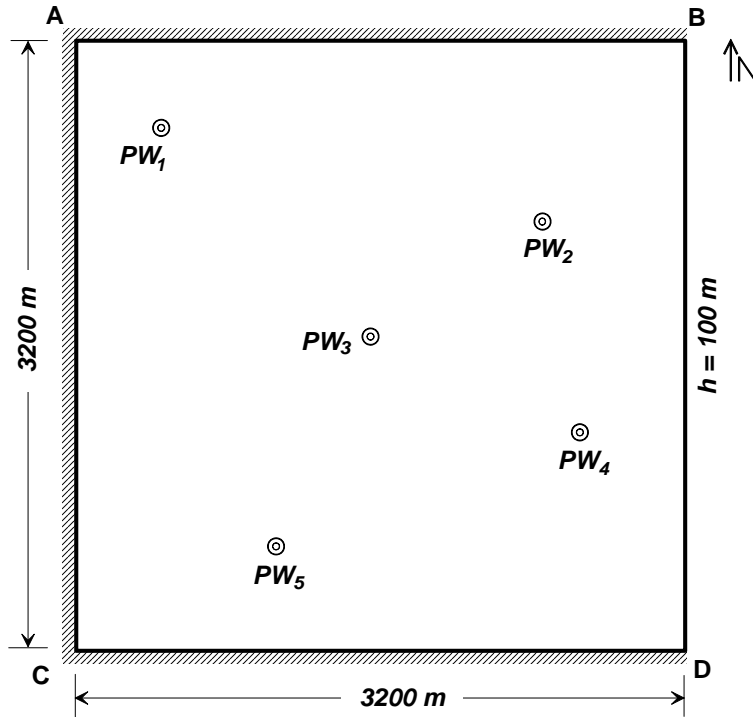
Şekil 3.3'den görüleceği gibi, geliştirilen simülasyon modeli ile MODFLOW sonuçları farklı simülasyon süreleri için iyi bir uyum içindedir.



Şekil 3.3 Simülasyon modeli ve MODFLOW sonuçlarının farklı simülasyon zamanları için karşılaştırılması; (a): $t = 30$ gün , (b): $t = 60$ gün , (c): $t = 120$ gün , (d): $t = 360$ gün

3.2.3.2. Uygulama 2

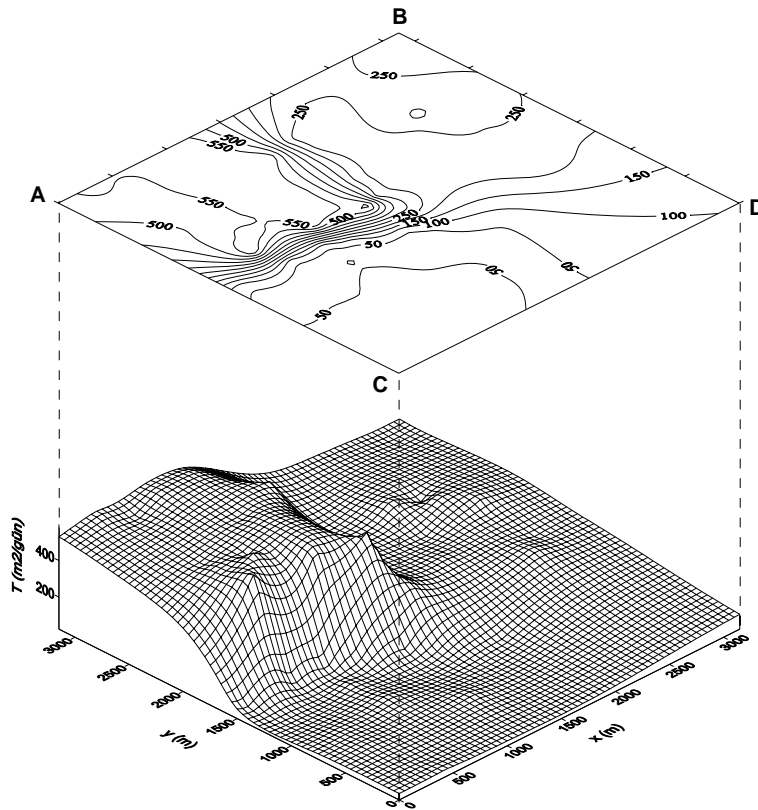
Bu uygulamada, geliştirilen simülasyon modelinin performansını test etmek amacıyla Tsai vd’de (2003) incelenen $3200\text{ m} \times 3200\text{ m}$ boyutlarındaki bir basınçlı akifer modeli kullanılmıştır. Akifer modeline ait geometri ve sınır koşulları Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4 Uygulama 2'ye ait geometri ve sınır koşulları

Şekil 3.4'den görüleceği gibi, akifer doğuda 100 m sabit hidrolik yük ve diğer yönlerde geçirimsiz sınır koşullarına sahiptir. Akifer üzerinde toplam 5 adet pompa kuyusu bulunmaktadır. Her bir kuyu için pompa debileri sırasıyla $PW_{1-4} = 4000 \text{ m}^3 / \text{gün}$ ve $PW_5 = 2000 \text{ m}^3 / \text{gün}$ 'dür. Denklem (1)'in sayısal çözümünün yapılabilmesi ve MODFLOW'da modellenebilmesi için ilgili çözüm bölgesi $\Delta x = \Delta y = 100 \text{ m}$ boyutlarındaki grid bloklarına ayrılmıştır. Bu uygulamada, bir öncekinden farklı olarak iletim kapasitesi değerleri akifer üzerinde sürekli değişken bir yapıdadır. Kullanılan iletim kapasitesi dağılımı Şekil 3.5'de verilmiştir. Şekil 3.5'e göre, çözüm yapılan her bir grid noktası için iletim kapasitelerinin bilindiği ve değişken olduğu kabul edilmiştir. Akifer üzerindeki en büyük ve en küçük iletim kapasitesi değerleri sırasıyla: $595 \text{ m}^2 / \text{gün}$ ve $33 \text{ m}^2 / \text{gün}$ 'dür.

Bu uygulama için toplam simülasyon süresi 10 ve zaman adımı $\Delta t = 1$ gün olarak alınmıştır. Akiferin her yerinde özgül depolama katsayısı $S = 0.0002$ 'dir. Geliştirilen simülasyon modeli ile MODFLOW'un verdiği sonuçların farklı simülasyon zamanları için karşılaştırılması Şekil 3.6'da yapılmıştır.



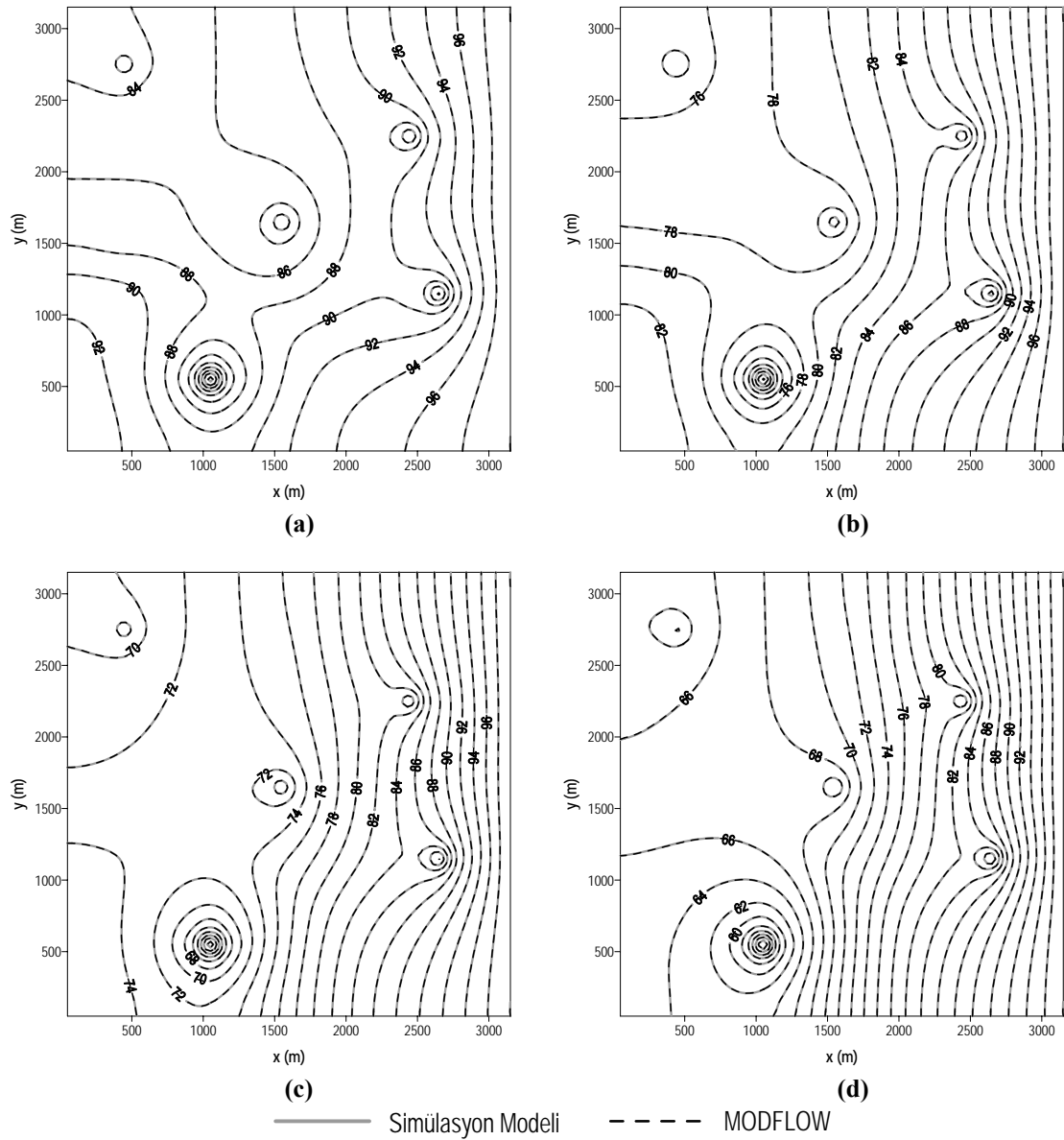
Şekil 3.5 Kullanılan iletim kapasitesi dağılımı ($m^2/gün$)

Şekil 3.6'dan görüleceği gibi, iletim kapasitesinin alansal olarak değişmesi durumunda da geliştirilen simülasyon modeli ile MODFLOW sonuçları iyi bir uyum içindedir.

3.3. Optimizasyon Modeli

Sınırlı sayıda gözlem değeri kullanarak bir akiferdeki pompaj kuyularının karakteristiklerinin belirlenmesi problemi matematiksel olarak bir optimizasyon modeli kullanılarak çözülebilmektedir. Optimizasyon modelinde, pompaj kuyularının karakteristiklerinin belirlenebilmesi için her bir pompaj kuyusunun zamanla değişen pompaj debisi ile kuyu koordinatları optimizasyon işleminde karar değişkeni olarak tanımlanmaktadır. Optimizasyon işleminin her bir hesap adımında belirlenen kuyu karakteristikleri için ilgili simülasyon modeli çalıştırılarak akiferin o çözüm için gösterdiği tepki belirlenmektedir. Akiferin gösterdiği tepkiye bağlı olarak, mevcut gözlem kuyularında daha önceden ölçülen ve optimizasyon işleminin ilgili hesap adımı

için hesaplanan hidrolik yükler arasındaki hata minimize edilerek, verilen durma koşulu sağlanıncaya kadar optimizasyon işlemine devam edilmektedir.



Şekil 3.6 Simülasyon modeli ve MODFLOW sonuçlarının farklı simülasyon zamanları için karşılaştırılması; (a): $t = 2$ gün , (b): $t = 4$ gün , (c): $t = 6$ gün , (d): $t = 10$ gün

Yeraltı suyu problemlerinin S/O modelleriyle çözümünde, incelenen problemin çözüm uzayının yapısından dolayı türeva dayalı optimizasyon algoritmalarının kullanılması yerel optimum çözümlerin elde edilmesine neden olabilmektedir. (Willis ve Yeh 1987). Bu nedenle, yeraltı suyu problemlerinin S/O modelleri ile çözümünde sezgisel optimizasyon algoritmalarının kullanımı yaygınlık kazanmıştır. Literatürde yaygın olarak kullanılan sezgisel optimizasyon algoritmalarından biri de GA'dır

(Holland 1975, Goldberg 1989). Aşağıda öncelikle GA'nın yapısı hakkında detaylı bilgi verilmiş ve GA ile bir fonksiyonun optimizasyonunun nasıl yapıldığı detaylı olarak anlatılmıştır. Son olarak, geliştirilen GA tabanlı optimizasyon modelinin performansı literatürde verilen bazı test fonksiyonları üzerinde test edilmiştir.

3.3.1. Genetik Algoritma (GA) optimizasyon tekniğine genel bakış

Yapay zekanın gittikçe genişleyen bir kolu olan evrimsel hesaplama tekniğinin önemli bir bölümünü oluşturan GA, Darwin'in evrim teorisinden esinlenerek oluşturulmuştur. Herhangi bir problemin GA ile çözümü, problemi sanal olarak evrimden geçirmek sureti ile yapılmaktadır. GA, Goldberg (1989), Gen ve Cheng (1997)'in kitaplarından sonra mühendislik problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Rastgele arama prensibine göre çözüm yapan GA optimizasyon tekniği ile teorik olarak global optimum sonuçlar bulunabilmesine karşılık, pratikte sadece global optimuma yakın sonuçlar elde edilebilmektedir (Goldberg 1989, Michalewicz 1992). GA'da, her bir karar değişkeni "kromozom" adı verilen ve genellikle ikilik sayı bitlerinden oluşan bir sayı zinciri ile temsil edilir. Optimizasyon işlemine başlangıç olarak rastgele üretilmiş kromozomları içeren bir toplum ile başlanır ve her bir kromozom genetik operatörler kullanılarak yapay olarak evrimden geçirilir. Örnek olarak, *elitizm* operatörü kullanılarak toplum içindeki amaç fonksiyonu bakımından en iyi bireyler doğrudan bir sonraki jenerasyona aktarılır. Ardından, amaç fonksiyonu değerlerine göre *seçim* operatörü ile mevcut toplumdaki yeni bir toplum oluşturulur. *Seçim* operatörünün ardından toplum içerisindeki bazı bireyler seçilerek *çaprazlama* operatörü ile bu bireylerden yeni bireyler üretilir. Son olarak mevcut toplum içerisinde genetik çeşitliliği (genetic diversity) sağlamak amacıyla, bazı bireyler *mutasyon* operatörü ile rastgele değişime uğratılırlar. GA'nın her bir döngüsünde (jenerasyon), "en iyi olan yaşar" prensibine göre yeni kromozomlar üretilir.

GA optimizasyon tekniği klasik optimizasyon teknikleri ile karşılaştırıldığında aşağıdaki farklılıklar ön plana çıkmaktadır (Goldberg 1989): *i*) GA ile optimizasyon işlemi ilgili karar değişkenlerinin kendileri yerine o karar değişkenlerinin kodlanmasıyla oluşturulmuş sayı dizileri kullanılır; *ii*) GA ile global optimuma yakın

sonuçlar bir tek çözüm yerine başlangıçta rastgele olarak üretilmiş birden çok çözüm ile araştırılır; *iii*) GA ile optimizasyon işlemi amaç fonksiyonunun karar değişkenlerine göre türevleri yerine doğrudan amaç fonksiyonunun değerine göre devam eder; *iv*) Optimizasyon işlemi deterministik ara işlemler yerine stokastik ara işlemlere göre yapılmaktadır.

Aşağıda bir optimizasyon probleminin GA optimizasyon tekniği ile çözülebilmesi için gerekli hesap adımları detaylı olarak anlatılmıştır.

3.3.1.1. Değişkenlerin kodlanması

GA ile optimizasyon için öncelikle kullanılan her bir değişkenin ikilik sayı sisteminde kodlanması gerekmektedir. Kodlama işleminde her bir karar değişkeninin çözüm uzayının alt ve üst sınırları dikkate alınarak ikilik bitler hesaplanır. Örnek olarak, k gerekli olan dijital sayısını göstermek üzere x_i karar değişkeni 0 ile $2^k - 1$ arasında bit değeri ile temsil edilebilmektedir. x_i değişkeninin sürekli olması ve çözüm uzayının $[(x_i)_{\min}, (x_i)_{\max}]$ kapalı aralığında olması durumunda, x_i değişkeninin duyarlılığı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$\Delta x_i = \frac{(x_i)_{\max} - (x_i)_{\min}}{2^k - 1} \quad (7)$$

Denklem (7)'de $(x_i)_{\min}$ ve $(x_i)_{\max}$, x_i karar değişkeni için alt ve üst sınır değerlerini, Δx_i ise ağırlık parametresinin duyarlılığını göstermektedir. İkilik sayı sisteminde hesaplanan sayıların gerçel sayılara dönüşümü aşağıdaki şekilde yapılmaktadır:

$$x_i = (x_i)_{\min} + \Phi_i \Delta x_i \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

Denklem (8)'de Φ_i , i nolu karar değişkeninin ikilik sayı sisteminde hesaplanan değerinin onluk sayı sistemine dönüştürülmüş hali, n ise karar değişkenlerinin sayısını göstermektedir.

3.3.1.2. Başlangıç toplumunun oluşturulması

GA ile optimizasyon işleminde ilk olarak verilen toplum büyüklüğü kadar başlangıç çözümü oluşturulmaktadır. Örnek olarak, optimizasyon işlemindeki karar değişkenlerinin sayısının n , toplum büyüklüğünün m ve her bir karar değişkeni için gerekli bit sayısının k olması durumunda $n \times k$ adet bitten oluşan m adet kromozom uniform dağılıma uygun olarak rastgele üretilmektedir. Optimizasyon işleminde, her bir karar değişkeninin kromozomlarla ifade edilişi ve oluşturulan başlangıç toplumu Şekil 3.7'de verilmektedir.

	x_1				x_2				.....	x_{n-1}				x_n			
1	0	1	1	0	0	1	1	1	.....	1	1	0	1	1	0	1	1
2	0	1	0	0	1	0	1	1	.....	0	1	0	1	1	1	0	0
3	1	0	0	1	1	1	0	0	.....	0	1	1	0	0	1	1	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
$m-2$	1	1	1	0	0	1	0	1	.....	0	0	1	0	1	1	0	0
$m-1$	0	1	1	0	0	0	1	1	.....	1	0	0	1	1	0	0	1
m	1	1	0	1	1	0	0	1	.....	0	0	0	1	1	0	0	0

Şekil 3.7 Değişkenlerin kromozomlarla temsil edilmesi ve başlangıç toplumu

3.3.1.3. Toplumdaki bireylerin değerlendirilmesi

GA'da toplum içindeki bireylerin oluşturduğu çözümlerin değerlendirilmesi, ilgili çözümler için hesaplanan amaç fonksiyonu değerlerine göre yapılmaktadır. Her bir birey için hesaplanan amaç fonksiyonu değeri, ilgili çözümün ne kadar iyi olup olmadığını göstergesidir. GA ile çözülen problem eğer bir maksimizasyon problemi ise, her bir birey için amaç fonksiyonu $z_i = f(x)$, minimizasyon problemi ise $z_i = 1/f(x)$ ya da $z_i = -f(x)$ şeklinde tanımlanmaktadır.

3.3.1.4. Bireylerin seçimi

Bu aşamada, *Seçim* operatörü kullanılarak oluşturulan başlangıç toplumundan yeni toplum oluşturulmaktadır. Başlangıç toplumundan bireylerin seçilmesi ilgili amaç

fonksiyonu değerlerine göre yapılmaktadır. Yeni toplumun oluşturulmasında ilgili bireyler aşağıda verilen rölatif seçim olasılığı'na (p_{si}) göre seçilmektedir:

$$p_{si} = \frac{z_i}{\sum_{i=1}^m z_i} \quad (9)$$

Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta; Denklem (9)'da verilen rölatif seçim olasılığı büyük olan bir bireyin yeni toplumda bulunma olasılığının daha yüksek olmasıdır. Yeni toplumun oluşturulması için çeşitli seçim yöntemleri geliştirilmiştir. Aşağıda bu yöntemlerden yaygın olarak kullanılan *Rulet Teker*i ve *Turnuva* (Goldberg ve Deb 1991) seçim yöntemlerinin açıklaması yapılmıştır.

3.3.1.4.1. Rulet tekeri seçim yöntemi

Rulet tekeri seçim yönteminde, toplum içerisindeki her bir bireye p_{si} değerlerine bağlı olarak bir rulet tekeri üzerinde bir pasta dilimi atanmakta ve rulet tekeri toplum büyüklüğü kadar çevrilmektedir. Her bir çevirme sonucunda rulet tekerinin durduğu noktadaki pasta dilimine ait birey yeni havuza atanmakta ve sonraki jenerasyona aktarılmaktadır.

3.3.1.4.2. Turnuva seçim yöntemi

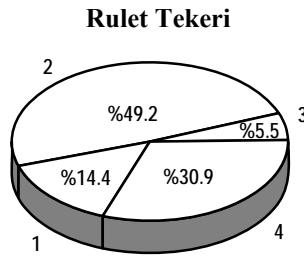
Turnuva seçim yönteminde, toplum içerisindeki her bir birey, yine toplum içerisinde rastgele seçilmiş diğer bir bireyle amaç fonksiyonunun değerlerine göre karşılaştırılmakta ve amaç fonksiyonu değeri büyük olan birey yeni toplum için seçilmektedir. Örnek olarak, büyüklüğü 4 olan bir toplumdaki bireylerin amaç fonksiyonlarının değerlerine göre rulet tekeri ve turnuva seçim yöntemleri ile seçilmesi Şekil 3.8'de detaylı olarak gösterilmiştir.

3.3.1.5. Yeni toplumun oluşturulması

Seçim aşamasının ardından oluşturulan yeni toplum 3 farklı genetik operatör kullanılarak bir sonraki jenerasyona aktarılır. Bu aşamada kullanılan operatörler: *Elitizm*, *Çaprazlama* ve *Mutasyon*.

Başlangıç Toplamı		$f(x)$	P_{si}
1		169	0.144
2		576	0.492
3		64	0.055
4		361	0.309
		1170	1.000

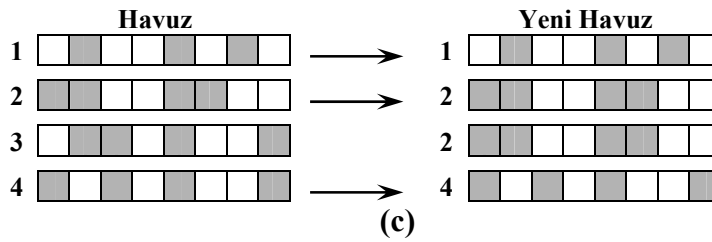
(a)



Turnuva

Birey	$f(x)$	Rastgele Birey	$f(x)$	Seçilen Birey
1	169	3	64	1
2	576	4	361	2
3	64	2	576	2
4	361	1	169	4

(b)



(c)

Şekil 3.8 (a): Başlangıç toplumunun değerlendirilmesi ve rölatif seçim olasılıklarının hesaplanması, (b): Rulet tekeri ve turnuva seçim yöntemleri ile yeni toplum için bireylerin seçilmesi, (c): Seçilen bireylerle yeni toplumun oluşturulması

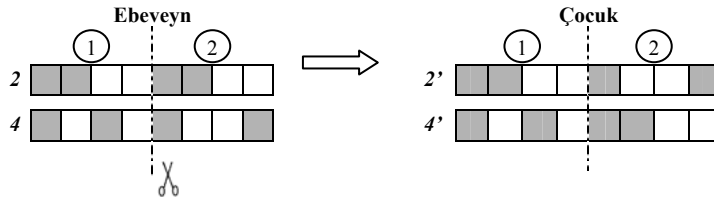
3.3.1.5.1. Elitizm

Elitizm operatörü ile toplum içindeki en büyük amaç fonksiyonu değerine sahip olan birey aynı rölatif seçim oranıyla doğrudan yeni topluma aktarılmakta ve böylece toplum içerisindeki en iyi birey korunmaktadır. Örnek olarak, Şekil 3.8’de ki 2 nolu birey yeni topluma elitizm operatörü ile doğrudan aktarılmıştır.

3.3.1.5.2. Çaprazlama

Çaprazlama operatörü ile bir çaprazlama olasılığına (p_c) bağlı olarak mevcut toplumdan rastgele seçilen iki birey kullanılarak yeni bir birey oluşturulmaktadır. İki birey seçildikten sonra 1 ile $n \times k - 1$ arasında üniform dağılıma uyan bir tamsayı üretilir ve her iki birey üretilen tamsayı değerine karşılık gelen bitin hemen sonrasında

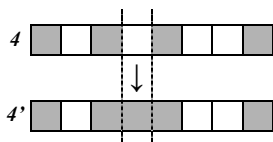
kesilerek ilgili parçalar yer değiştirilir. Sonuç olarak toplum içerisindeki iki ebeveyn bireyden iki yeni birey oluşturulmuş ve mevcut neslin devam etmesi sağlanmıştır. Çaprazlama işlemi ile iki yeni bireyin oluşumu Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Seçilen iki bireyin çaprazlanması

3.3.1.5.3. Mutasyon

Seçim ve çaprazlama işlemlerinin uygulanmasının ardından, toplum içerisindeki bireylere ait önemli genetik bilgilerin kaybolma olasılığı ile erken yakınsamayı önlemek ve genetik çeşitliliği arttırmak amacıyla mutasyon operatörü kullanılmaktadır. Mutasyon işlemi, verilen bir mutasyon olasılığına (p_m) bağlı olarak yapılmaktadır. Mutasyon işleminde toplum içerisindeki birey sayısı kadar üniform dağılıma uyan rastgele sayı üretilir ve p_m değeri ile kıyaslanır. p_m değerinden küçük olan rastgele sayıya sahip olan birey yada bireylerin rastgele seçilen bir bit’leri 0 ise 1, 1 ise 0 yapılır. Mutasyon işleminin detaylı gösterilmiş hali Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.10 Mutasyon işlemi

Literatürde p_m değerinin verilmesi için genellikle aşağıdaki eşitlikten faydalanılmaktadır (Goldberg ve Deb 1991):

$$p_m = \frac{1}{m} \quad (10)$$

Bu çalışmada, yukarıda verilen mutasyon işlemi yerine Guan (1998) tarafından önerilen geliştirilmiş mutasyon tekniği kullanılmıştır. Bu teknikte; toplum içindeki

bireylere amaç fonksiyonu değerlerine göre farklı p_m değerleri atanmaktadır. Tekniğin uygulanması aşağıdaki hesap adımlarına göre yapılmaktadır:

i) toplum içerisindeki bireyler, amaç fonksiyonlarının değerlerine göre küçükten büyüğe sıralanır;

ii) Denklem (11) kullanılarak en büyük mutasyon olasılığı hesaplanır ve amaç fonksiyonu değeri minimum olan bireye atanır:

$$(\hat{p}_m)_1 = (\hat{p}_m)_{\max} = \alpha p_m \quad (11)$$

burada $(\hat{p}_m)_\bullet$ her birey için değişken olan mutasyon oranı, α ise $[1,2]$ aralığında tanımlı olan bir katsayıdır.

iii) Denklem (12) kullanılarak en küçük mutasyon olasılığı hesaplanır ve amaç fonksiyonu değeri maksimum olan bireye atanır:

$$(\hat{p}_m)_m = (\hat{p}_m)_{\min} = (2 - \alpha) p_m \quad (12)$$

iv) Toplum içindeki diğer bireylere ait mutasyon olasılıklarının verilmesinde Denklem (13)' de verilen doğrusal interpolasyon eşitliği kullanılır:

$$(p_m)_i = (p_m)_{\max} + \frac{(p_m)_{\min} - (p_m)_{\max}}{m-1} (i-1) \quad \forall i = 2, 3, 4, \dots, m-1 \quad (13)$$

Bu teknikte dikkat edilmesi gereken önemli nokta; Denklem (11) ve (12)'de verilen α parametresinin değeri 1 aldığı anda \hat{p}_m değerinin Denklem (10)'da verildiği şekilde toplum içindeki tüm bireylerde aynı olacaktır. Buna karşın, α parametresinin değerinin 2 alınması durumunda \hat{p}_m değerleri için aşağıdaki durum ortaya çıkmaktadır:

$$(\hat{p}_m)_1 = 2p_m; \quad (\hat{p}_m)_m = 0; \quad (\hat{p}_m)_i = 2p_m \left(\frac{m-i}{m-1} \right) \quad \forall i = 2, 3, 4, \dots, m-1 \quad (14)$$

Mutasyon işleminde Denklem (14)'in kullanılması durumunda, toplum içerisinde en küçük amaç fonksiyonu değerine sahip olan birey en büyük, en büyük amaç fonksiyonu değerine sahip olan birey ise 0 mutasyon olasılığına sahip olacaktır. Böylece, toplum içerisindeki iyi bireyler korunacak ve kötü bireyler iyileşme eğilimine gireceklerdir.

3.3.1.6. Oluşturulan toplumun başlangıç toplumuna atanması

Mutasyon operatörünün uygulanmasının ardından oluşturulan yeni toplum başlangıç toplumunun bulunduğu havuza atanarak neslin devamı sağlanır. Buraya kadar olan kısım birinci jenerasyon olarak adlandırılır ve aynı işlem verilen durma kriteri sağlanıncaya kadar devam eder. Bu çalışma kapsamında optimizasyon işleminde durma kriteri olarak aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır:

$$\left(z_j\right)_{\max} - \left(z_{j-st}\right)_{\max} \leq \varepsilon \quad \forall j = 1, 2, 3, \dots, MJS \quad (15)$$

Denklem (15)'de, $\left(z_j\right)_{\max}$ j 'nci jenerasyondaki maksimum amaç fonksiyonu değerini, $\left(z_{j-st}\right)_{\max}$ $j-st$ 'nci jenerasyondaki maksimum amaç fonksiyonu değerini, st değişim jenerasyon sayısını, ε tolerans değerini, MJS ise maksimum jenerasyon sayısını göstermektedir.

3.3.2. Optimizasyon modelinin testi

Bu bölümde, geliştirilen GA tabanlı optimizasyon modelinin performansı literatürde verilen 5 test fonksiyonu (De Jong 1975, Rastrigin 1974, Michalewicz 1992, Goldstein ve Price 1971, Schwefel 1981) ile test edilmiştir. Test fonksiyonlarının çözümünde aşağıdaki GA çözüm parametreleri kullanılmıştır:

Toplum büyüklüğü (m)	: 50
Çaprazlama olasılığı (p_c)	: 0.75
Mutasyon olasılığı (p_m)	: 0.02
Değişim jenerasyon sayısı (st)	: 20
Tolerans (ε)	: 10^{-5}

Her bir test fonksiyonunun yapısı, global optimum çözümleri ve optimizasyon modeli ile elde edilen sonuçlar detaylı olarak Ek-2 ile Ek-6 arasında verilmiştir. Geliştirilen optimizasyon modeli ile elde edilen sonuçlar Tablo 3.1’de özetlenmiştir. Tablo 3.1’den görüleceği gibi, 5 test fonksiyonu için de optimizasyon modelinin verdiği sonuçlarla gerçek sonuçlar iyi uyum içindedir. Elde edilen sonuçlar arasında en belirgin fark Michalewicz’in 12. test fonksiyonunda olmaktadır. İlgili test fonksiyonu için global optimum çözüm -4.68732 iken geliştirilen optimizasyon modelinin bulduğu sonuç -4.52721 ’dir. Her iki çözüm arasındaki bu fark yaklaşık olarak % 3.41’lik bir göreceli hata değerine karşılık gelmektedir. Bulunan sonuçlar arasındaki farklar, kullanılan genetik operatörlerin değiştirilmesi, değişim jenerasyon limitinin artırılması (st) veya tolerans değerinin (ε) azaltılmasıyla düşürülebilir.

Tablo 3.1 Optimizasyon modelinin sonuçlarının değerlendirilmesi

Ek	Fonksiyon	Global Optimum		Bulunan Sonuçlar	
		$f(x)$	x_i	$f(x)$	x_i
2	De Jong 1	0	$x_1 = 0$ $x_2 = 0$	4.77×10^{-11}	$x_1 = -4.88 \times 10^{-6}$ $x_2 = -4.88 \times 10^{-6}$
3	Rastrigin 6	0	$x_1 = 0$ $x_2 = 0$	9.47×10^{-9}	$x_1 = -4.88 \times 10^{-6}$ $x_2 = 4.88 \times 10^{-6}$
4	Michalewicz 12	-4.68732	—	-4.52721	$x_1 = 2.20895$ $x_2 = 1.57153$ $x_3 = 1.27608$ $x_4 = 1.91898$ $x_5 = 0.99552$
5	Goldstein-Price	3	$x_1 = 0$ $x_2 = -1$	3.00000	$x_1 = -0.00003$ $x_2 = -1.00000$
6	Schwefel 7	-837.96584	$x_1 = 420.96872$ $x_2 = 420.96872$	-837.8614	$x_1 = 420.89828$ $x_2 = 421.87518$

3.4. Simülasyon ve Optimizasyon Modellerinin Birleştirilmesi

Sınırlı sayıda gözlem değeri ile bir akiferdeki pompaj kuyularının karakteristiklerinin belirlenmesi problemi simülasyon modeli ile optimizasyon modelinin eşzamanlı olarak kullanılmasıyla belirlenebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, simülasyon modeli ile optimizasyon modeli yerleşik yaklaşım (Aguado ve Remson 1974) kullanılarak birleştirilmiştir. Optimizasyon işleminin her bir hesap adımında, ilgili simülasyon modeli çalıştırılarak o hesap adımında belirlenen kuyu

karakteristikleri için akiferde bulunan gözlem kuyularındaki hidrolik yüklerle hesaplanan hidrolik yükler arasındaki hata değeri hesaplanmaktadır. Matematiksel olarak bu problem aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$RE = \text{Min} \left[\sum_{t=1}^{t_{\max}} \sum_{\mu=1}^{N_d} (h_{\mu}(t) - \tilde{h}_{\mu}(t))^2 \right] \quad (16)$$

kısıtlar:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \sum_{k=1}^c \hat{W}(x_k, y_k) \delta(x - x_k, y - y_k) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (17)$$

$$\hat{W}(x_k, y_k) = \frac{\pm \hat{Q}(x_k, y_k)}{\Delta x \Delta y} \quad \forall k = 1, 2, \dots, c \quad (18)$$

$$(Q_{\min})_k \leq \hat{Q}(x_k, y_k) \leq (Q_{\max})_k \quad (19)$$

$$(x_{\min})_k \leq x_k \leq (x_{\max})_k \quad (20)$$

$$(y_{\min})_k \leq y_k \leq (y_{\max})_k \quad (21)$$

burada; RE , artık hata değerini [L]; h_{μ} ve \tilde{h}_{μ} , μ . gözlem kuyusunda hesaplanan ve ölçülen hidrolik yük değerlerini [L]; t_{\max} , simülasyon süresini [T]; N_d , gözlem kuyularının sayısını; (x_k, y_k) , k . pompaj kuyusunun belirlenecek koordinatlarını [L]; $\hat{Q}(x_k, y_k)$, k . pompaj kuyusunun belirlenecek pompaj debisini [L^3/T]; $(Q_{\min})_k$ ve $(Q_{\max})_k$, k . pompaj kuyusu için pompaj debilerinin alabileceği alt ve üst sınır değerlerini [L^3/T], $(x_{\min})_k$, $(x_{\max})_k$, $(y_{\min})_k$, $(y_{\max})_k$ ise k . pompaj kuyusunun koordinatlarının alt ve üst sınır değerlerini göstermektedir [L]. Denklem (17)-(21)'den görüleceği gibi, kuyu koordinatları gerçel koordinatlar (x_k, y_k) olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmada ise, çözüm uzayını daraltmak için hesap yapılan grid noktalarının sütun ve satır numaraları

(I_k, J_k) kuyu koordinatları olarak kullanılmıştır. S/O modeli ile hesaplama süreci Denklem (15)'de verilen durma kriteri sağlanıncaya kadar devam etmektedir.

3.5. S/O Modelinin Testi

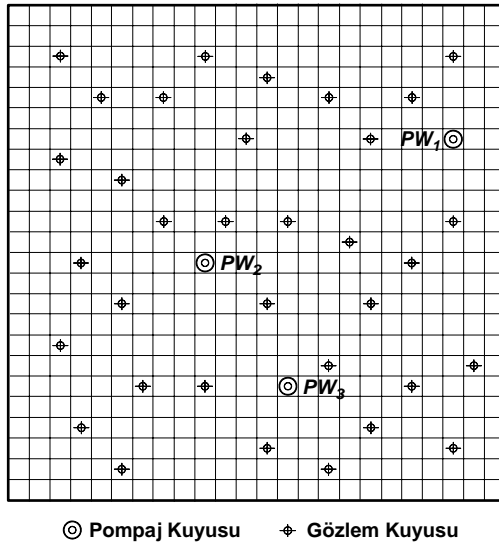
Geliştirilen S/O modelinin performansı Uygulama 1 ve 2'de verilen akifer modelleri üzerinde test edilmiştir. Tüm çözümlerde Denklem (16)-(21)'de verilen matematik model kullanılmıştır. Her iki uygulamanın çözümünde de aşağıda verilen GA çözüm parametreleri kullanılmıştır:

Toplum büyüklüğü (m)	: 50
Çaprazlama olasılığı (p_c)	: 0.50
Mutasyon olasılığı (p_m)	: 0.05
Değişim jenerasyon sayısı (st)	: 10 (500 simülasyon)
Tölerans (ε)	: 10^{-5}

3.5.1. Uygulama 3

Bu uygulamada geliştirilen S/O modeli, Uygulama 1'de verilen akifer modeli üzerinde test edilmiştir. Akifer üzerinde pompaj debileri ve yerleri belirlenecek 3 adet pompaj kuyusu ve hidrolik yük değerlerinin ölçüldüğü 34 adet gözlem kuyusu bulunmaktadır. Pompaj ve gözlem kuyularının yerleşimi Şekil 3.11'de verilmiştir.

Geliştirilen S/O modelinin performansı, hem kararlı durum hem de zamana bağlı durum için incelenmiştir. İncelenen örnek sentetik bir akifer modeli olduğu için optimizasyon modelinde kullanılacak gözlem verisi, ilgili simülasyon modelinin kararlı ve zamana bağlı durumlar için çalıştırılmasıyla elde edilmiştir. Zamana bağlı çözümde simülasyon süresi 360 gün olarak alınmış ve gözlem kuyularında her 90 günde bir seviye okuması yapıldığı kabul edilmiştir. Ayrıca, arazide yapılan ölçüm hatalarının etkisini dikkate almak amacıyla, hem kararlı hem de zamana bağlı durumlar için gözlem değerlerine, normal dağılıma uygun, ortalaması 0 ve standart sapması 0.10 m olan hata verisi eklenmiştir.



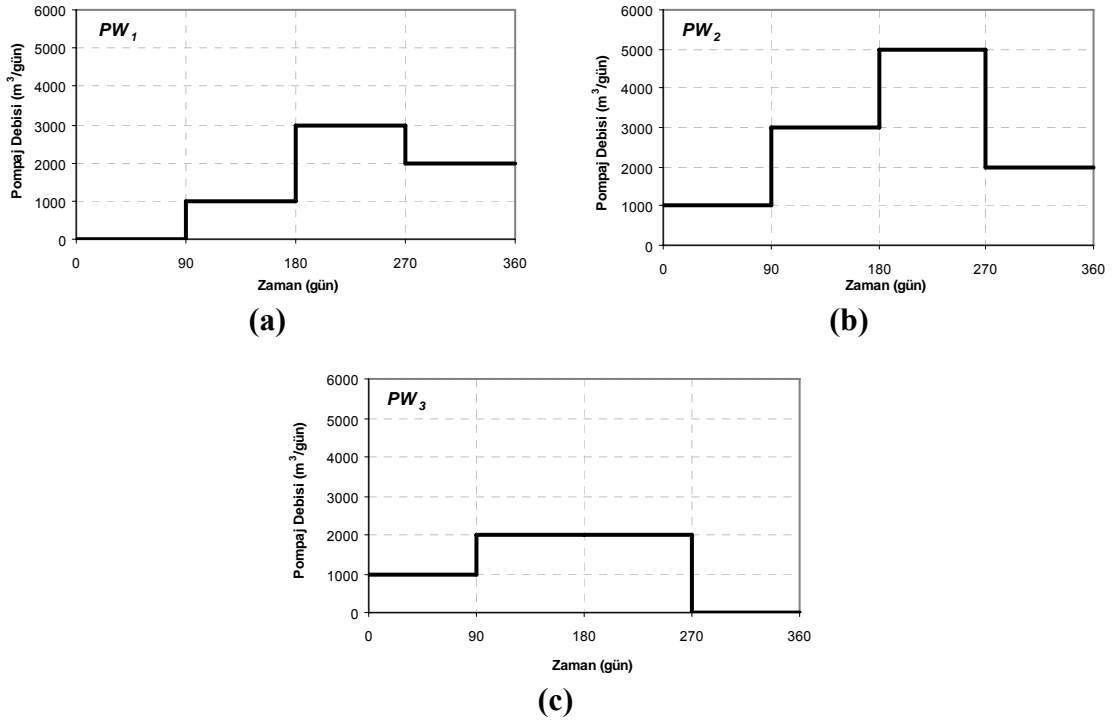
Şekil 3.11 Pompa ve gözlem kuyularının yerleşimi (Uygulama 3)

Optimizasyon işleminde karar değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri pompa debileri için: $0 \leq \hat{Q}(I_k, J_k) \leq 20,000 \text{ m}^3 / \text{gün}$, kuyu yerleri için: $1 < I_k < 24$ ve $1 < J_k < 24$ olarak alınmıştır. Ayrıca, optimizasyon işleminin başlangıcında pompa debilerinin başlangıç değerleri 0 kabul edilmiştir.

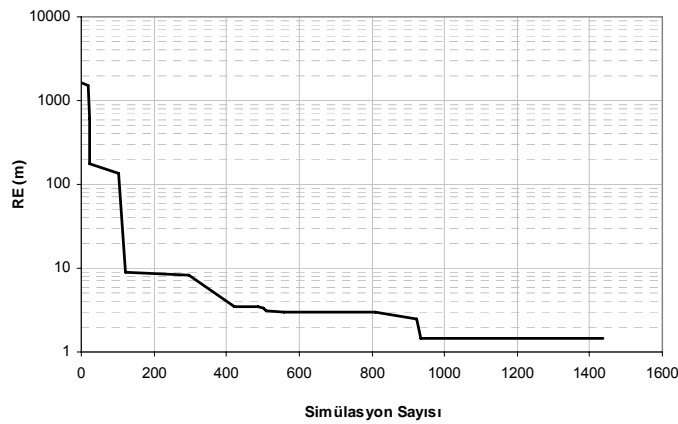
Bu uygulama kapsamında pompa kuyularının karakteristikleri 4 farklı senaryo için belirlenmiştir. Birinci senaryoda, kararlı durum için akifer üzerindeki PW_1 ve PW_3 kuyularının yerleri ve pompa debileri bilinmekte, buna karşın, PW_2 kuyusunun yeri ve debisi bilinmemektedir. İkinci senaryoda ise, birinci senaryoya ek olarak problem zamana bağlı olarak çözülmüştür. Üçüncü senaryoda, kararlı durum için akifer üzerindeki üç pompa kuyusunun da yerlerinin ve pompa debilerinin bilinmediği kabul edilmiş ve dördüncü senaryoda ise aynı problemin zamana bağlı durum için çözümü yapılmıştır. Kararlı durum için kuyulardan çekilen debiler Uygulama 1’de verildiği gibi alınmıştır. Zamana bağlı durumda ise pompa debilerinin Şekil 3.12’de verildiği şekilde olduğu kabul edilmiştir. Tüm analizlerde pompa süresinin bilindiği kabul edilmiştir.

3.5.1.1. Senaryo 1 (tek pompa kuyusu – kararlı durum)

Bu senaryoda geliştirilen S/O modeli ile kararlı durum için PW_2 kuyusunun yeri ve pompa debisi belirlenmiştir. Optimizasyon işleminin her bir hesap adımında Denklem (16)’nın değişimi Şekil 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3.12 Zamana bağlı çözüm için kullanılan pompa debileri (Uygulama 3);
(a): PW_1 ; (b): PW_2 ; (c): PW_3



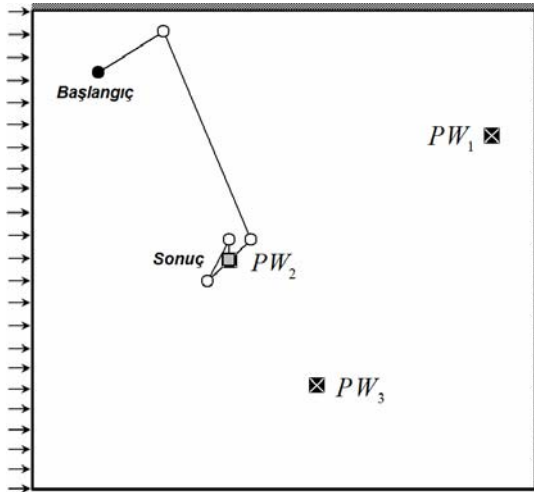
Şekil 3.13 Denklem (16)'nın simülasyon sayısı ile değişimi (Uygulama 3 – Senaryo 1)

Şekil 3.13'den görüleceği gibi, 1450 simülasyon sonucunda Denklem (15)'de verilen durma koşulu sağlanmıştır. Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar (Uygulama 3 – Senaryo 1)

Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE	Simülasyon Sayısı
	Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
PW_2	(4,4)	(10,13)	(10,13)	3000	2922	2.61	1.44	1450

Tablo 3.2'den görüleceği gibi, S/O modeli arama sürecine (4,4) noktasından başlamış ve 1450 simülasyon sonunda gerçek kuyu yeri olan (10,13) noktasını bulmuştur. 1450 simülasyon işlemi sonunda, RE değeri 1.44; belirlenen ve gerçek pompaj debileri arasındaki göreceli hata ise % 2.61 olarak elde edilmiştir. PW_2 kuyusunun optimizasyon işlemine başladığı nokta ve akifer üzerindeki hareketi Şekil 3.14'de görülmektedir.



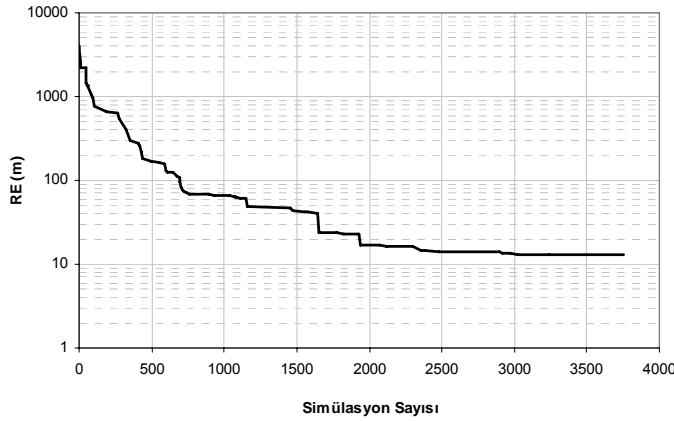
Şekil 3.14 PW_2 kuyusunun akifer üzerindeki hareketi (Uygulama 3 – Senaryo 1)

3.5.1.2. Senaryo 2 (tek pompaj kuyusu – zamana bağlı durum)

Bu senaryoda, geliştirilen S/O modeli ile PW_2 kuyusunun yeri ve zamanla değişen pompaj debisi Şekil 3.12'de verilen pompaj durumu dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu senaryo için Denklem (16)'nın simülasyon sayısı ile değişimi Şekil 3.15'de verilmiştir. Şekil 3.15'den görüleceği gibi, verilen durma koşulu 3750 simülasyon işlemi sonucunda sağlanmıştır. Bu senaryo için S/O modeli ile elde edilen sonuçlar Tablo 3.3'de verilmiştir.

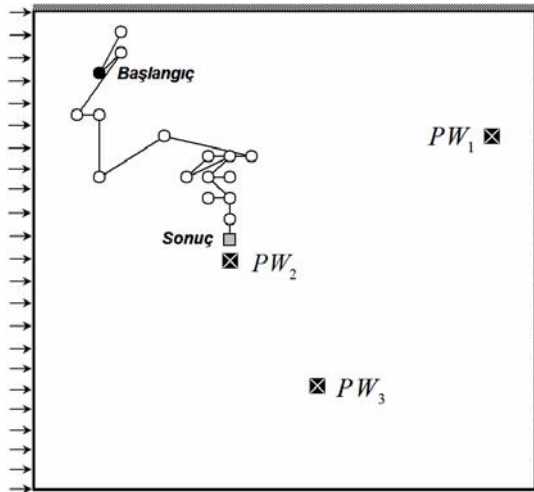
Tablo 3.3 Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar (Uygulama 3 – Senaryo 2)

Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE	Simülasyon Sayısı
	Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
PW_2	(4,4)	(10,12)	(10,13)	1000	909	9.13	11.16	3750
				3000	2699	10.04		
				5000	4477	10.45		
				2000	1857	7.13		



Şekil 3.15 Denklem (16)'nın simülasyon sayısı ile değişimi (Uygulama 3 – Senaryo 2)

Tablo 3.3'den görüleceği gibi, zamana bağlı durumda da geliştirilen S/O modeli optimizasyon işlemine (4,4) noktasından başlamış ve (10,12) noktasını çözüm olarak bulmuştur. Zamana bağlı olarak belirlenen pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata % 10.45'tir. Bu senaryo için RE değeri, 3750 simülasyon işlemi sonunda 11.16 olarak belirlenmiştir. Zamana bağlı pompaj durumu için PW_2 kuyusunun başlangıçtaki konumu ve akifer üzerindeki hareketi Şekil 3.16'da verilmiştir.

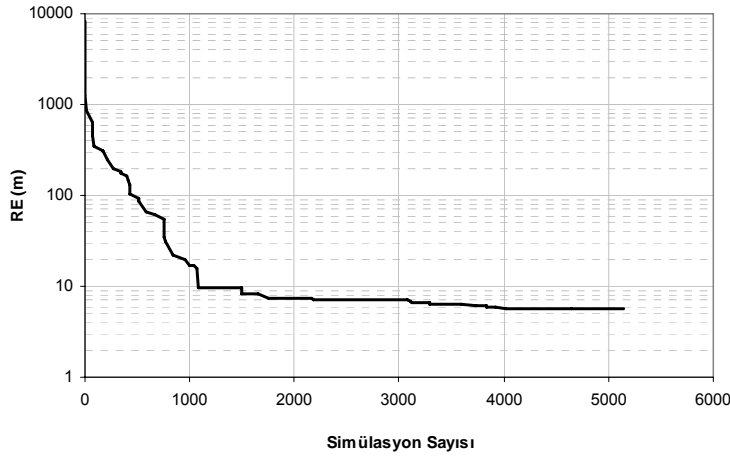


Şekil 3.16 PW_2 kuyusunun akifer üzerindeki hareketi (Uygulama 3 – Senaryo 2)

3.5.1.3. Senaryo 3 (3 pompaj kuyusu – kararlı durum)

Senaryo 1 ve 2'den görüleceği gibi, geliştirilen S/O modeli ile kararlı ve zamana bağlı durumlar için tek pompaj kuyusunun yeri ve pompaj debisi belirlenmiştir. Ancak, pratikte çoğu zaman birden çok pompaj kuyusunun karakteristiğinin belirlenmesi

gerekmektedir. Bu nedenle, bu senaryoda kararlı durum için üç pompaj kuyusunun da yerleri ve pompaj debilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu senaryo için Denklem (16)'nın simülasyon sayısı ile değişimi Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.17 Denklem (16)'nin simülasyon sayısı ile değişimi (Uygulama 3 – Senaryo 3)

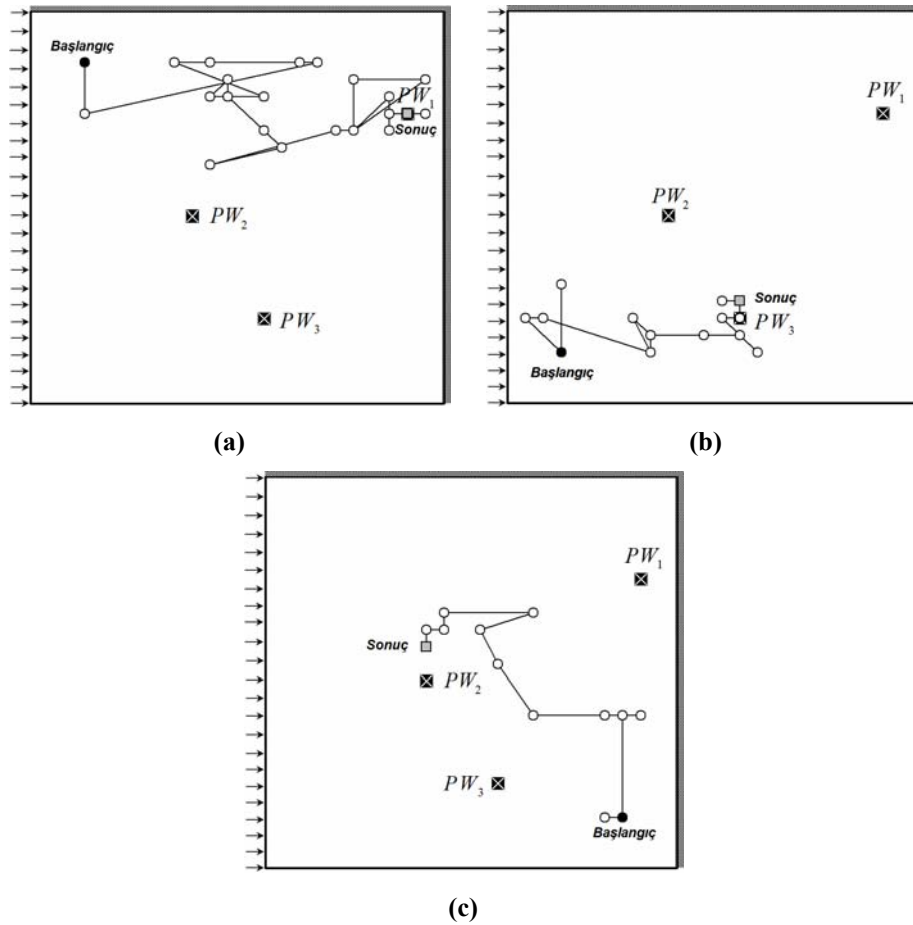
Şekil 3.17'den görüleceği gibi, kararlı durum için karakteristikleri belirlenecek pompaj kuyularının sayısının 1'den 3'e çıkması sonucu, optimizasyon probleminin matematiksel olarak boyutu ve dolayısı ile sonuca ulaşmak için gerekli simülasyon sayısı artmaktadır. Bu senaryoda Denklem (15)'in sağlanması için simülasyon modeli 5150 kere çalışmıştır. 5150 simülasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar Tablo 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3.4 Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar (Uygulama 3 – Senaryo 3)

Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE	Simülasyon Sayısı
	Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
PW_1	(4,4)	(22,7)	(22,7)	800	741	7.39	5.75	5150
PW_2	(21,21)	(10,11)	(10,13)	3000	2073	30.91		
PW_3	(4,21)	(14,18)	(14,19)	6000	6232	3.87		

Tablo 3.4'den görüleceği gibi, PW_1 kuyusu (4,4) noktasından arama sürecine başlamış ve gerçek kuyu yeri olan (22,7) noktasını yakalamıştır. PW_2 ve PW_3 kuyuları ise sırasıyla (21,21) ve (4,21) noktalarından çözüme başlamış ve işlem sonunda (10,11) ve (14,18) noktalarını çözüm olarak bulmuştur. Pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata ise % 30.91 ile PW_2 kuyusundadır. Optimizasyon işleminin

sonunda RE değeri 5.75 olarak elde edilmiştir. Optimizasyon işlemi esnasında her üç kuyunun yerlerinin akifer üzerindeki değişimi Şekil 3.18’de görülmektedir.

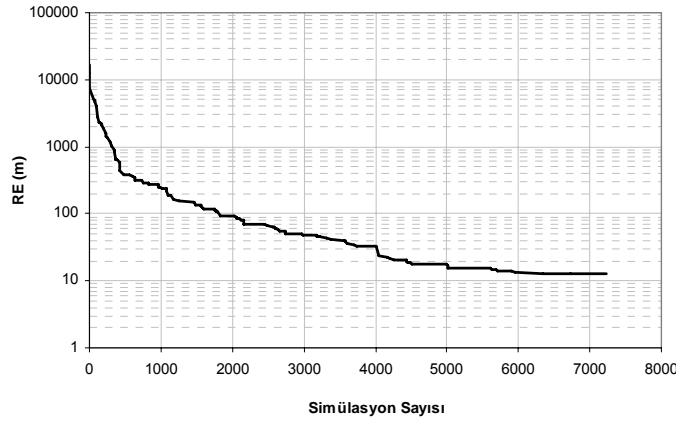


Şekil 3.18 Pompaj kuyularının akifer üzerindeki hareketi (Uygulama 3 – Senaryo 3); (a): PW_1 ; (b) PW_2 ; (c): PW_3 .

Şekil 3.18’den görüldüğü gibi, her üç kuyunun karakteristiklerinin optimizasyon işlemi bilinmeyen olarak kabul edilmesi, tüm çözüm bölgesinin ilgili kuyular tarafından taranmasına neden olmakta ve doğru çözümün elde edilmesini zorlaştırmaktadır.

3.5.1.4. Senaryo 4 (3 pompaj kuyusu – zamana bağlı durum)

Bu senaryoda, zamana bağlı durum için akiferde yer alan üç pompaj kuyusunun da yerleri ve pompaj debileri belirlenmiştir. Optimizasyon işlemi sırasında Denklem (16)’nın simülasyon sayısı ile değişimi Şekil 3.19’da verilmiştir.



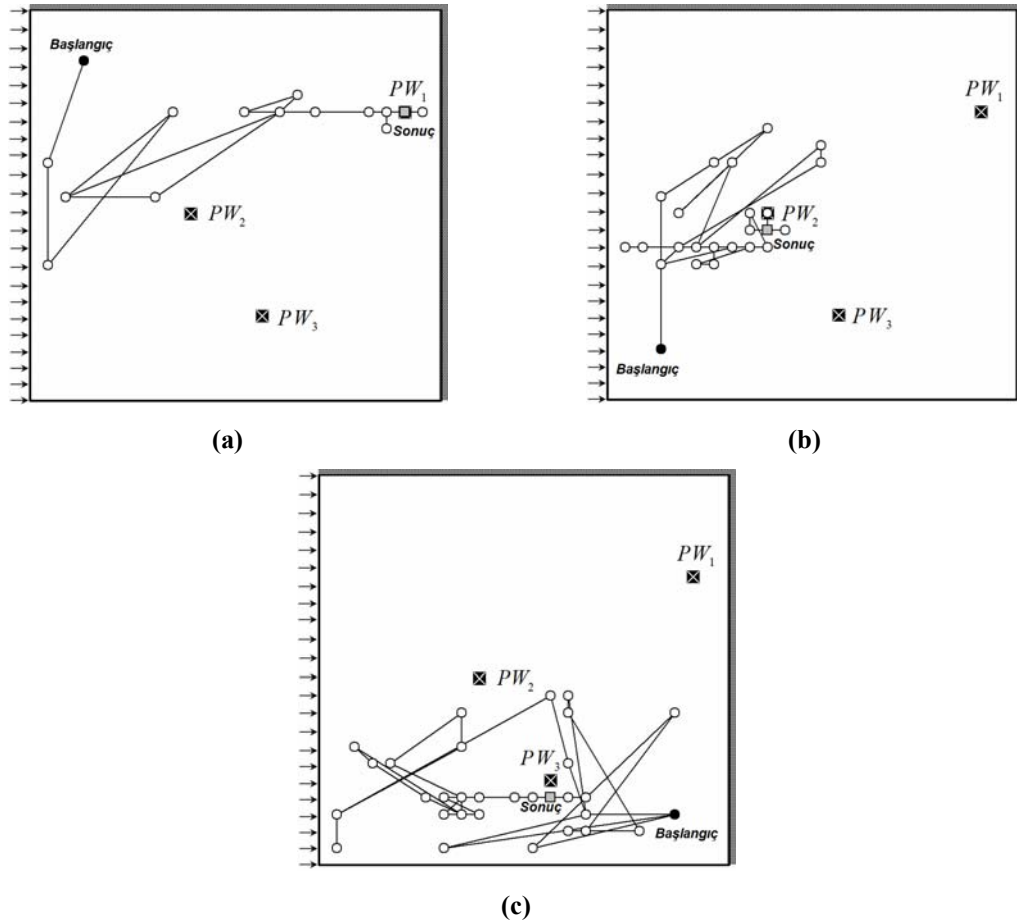
Şekil 3.19 Denklem (16)'nın simülasyon sayısı ile değişimi (Uygulama 3 – Senaryo 4)

Şekil 3.19'dan görüleceği gibi, zamana bağlı akım durumu için karakteristiği belirlenecek kuyu sayısının 1'den 3'e çıkması, sonuca ulaşmak için gerekli simülasyon sayısını 2700'den 7250'ye çıkarmıştır. 7250 simülasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar Tablo 3.5'de verilmiştir.

Tablo 3.5 Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar (Uygulama 3 – Senaryo 4)

Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE	Simülasyon Sayısı
	Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
PW_1	(4,4)	(22,7)	(22,7)	0	8	-	12.69	7250
				1000	1039	3,90		
				3000	3156	5,21		
PW_2	(4,21)	(10,14)	(10,13)	2000	2059	2,96		
				1000	970	2,96		
				3000	3534	17,79		
				5000	5811	16,22		
PW_3	(21,21)	(14,20)	(14,19)	2000	1847	7,66		
				1000	1453	45,28		
				2000	1745	12,77		
				2000	1252	37,41		
				0	290	-		

Tablo 3.5'den görüldüğü gibi, optimizasyon işlemi sonunda PW_1 kuyusu gerçek kuyu yeri olan (22,7) noktasını, PW_2 ve PW_3 kuyuları ise sırasıyla (10,14) ve (14,20) noktalarını çözüm olarak bulmuştur. Zamana bağlı pompaj debileri arasındaki maksimum göreceli hata % 45.28 ile PW_3 kuyusundadır. Optimizasyon sonunda RE değeri 12.69 olarak bulunmuştur. Optimizasyon işlemi esnasında kuyuların yerlerinin değişimi Şekil 3.20'de görülmektedir.



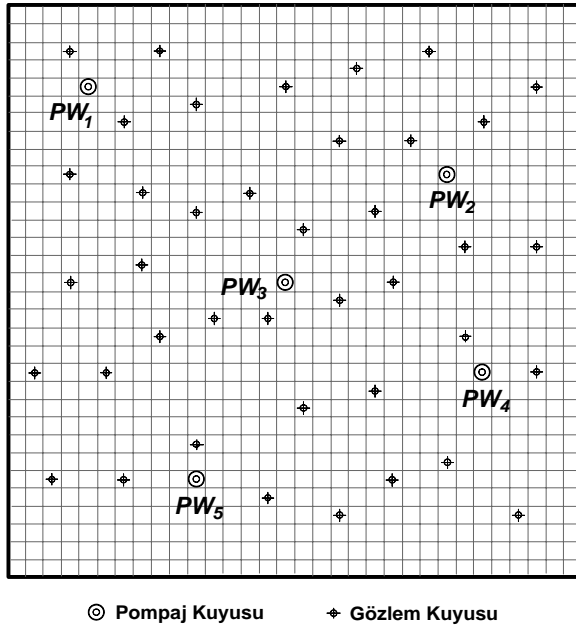
Şekil 3.20 Pompaj kuyularının akifer üzerindeki hareketi (Uygulama 3 – Senaryo 4);
(a): PW_1 ; (b) PW_2 ; (c): PW_3 .

3.5.2. Uygulama 4

Bu uygulamada ise, Uygulama 2’de verilen ve Tsai vd (2003) tarafından incelenen akifer modeli ile geliştirilen S/O modeli test edilmiştir. Akifer üzerinde 5 adet pompaj kuyusu ve hidrolik yük değerlerinin ölçüldüğü 40 adet gözlem kuyusu bulunmaktadır. Pompaj ve gözlem kuyularının akifer üzerindeki yerleşimi ve çözüm bölgesinin gridlere ayrılmış hali Şekil 3.21’de gösterilmiştir.

Yapılan analizlerin hepsinde yeraltı suyu akımının hem kararlı hem de zamana bağlı durumda olduğu kabul edilmiştir. Bu uygulama için de Uygulama 3 ile benzer şekilde hem kararlı hem de zamana bağlı çözümler için simülasyon modeli çalıştırılarak gözlem verileri oluşturulmuştur. Zamana bağlı çözümde simülasyon süresi 360 gün olarak alınmış ve gözlem kuyularında her 90 günde bir seviye okuması yapıldığı kabul edilmiştir. Benzer şekilde, ölçüm hatalarını dikkate almak için gözlem değerlerine normal dağılıma uygun, ortalaması 0 ve standart sapması 0.10 m olan hata değerleri

eklenmiştir. Pompaj debileri ve kuyu yerleri için alt ve üst sınır değerleri sırasıyla:
 $0 \leq \hat{Q}(I_k, J_k) \leq 20,000 \text{ m}^3 / \text{gün}$, $1 < I_k < 32$ ve $1 < J_k < 32$ olarak alınmıştır.

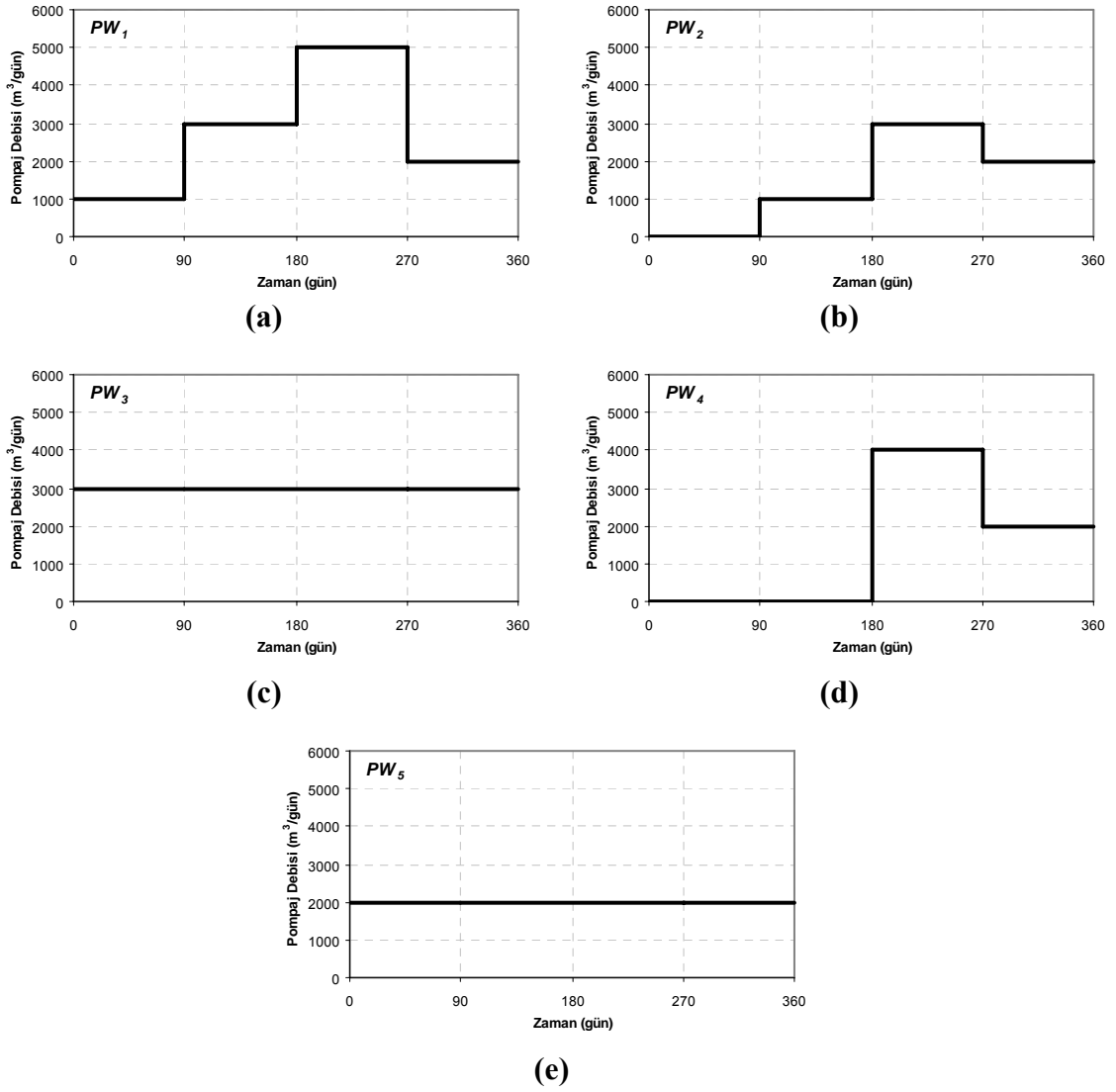


Şekil 3.21 Pompaj ve gözlem kuyularının yerleşimi (Uygulama 4)

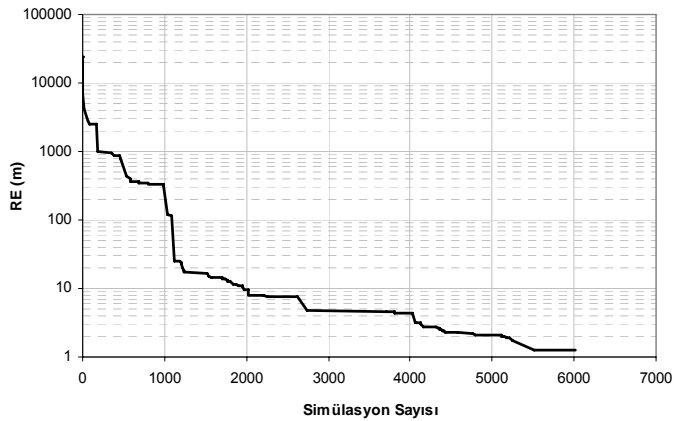
Uygulama 3'e benzer olarak bu uygulamada da pompaj kuyularının karakteristikleri 4 farklı senaryo için belirlenmiştir. Birinci ve ikinci senaryoda sırasıyla kararlı ve zamana bağlı durumlar için PW_1 ve PW_2 kuyularının yerleri ve pompaj debileri; üçüncü ve dördüncü senaryoda ise yine sırasıyla kararlı ve zamana bağlı durumlar için tüm pompaj kuyularının karakteristikleri belirlenmiştir. Kararlı durum için kuyulardan çekilen debiler Uygulama 2'de verildiği şekilde $PW_{1-4} = 4000 \text{ m}^3 / \text{gün}$ ve $PW_5 = 2000 \text{ m}^3 / \text{gün}$ olarak alınmıştır. Zamana bağlı durumda ise Uygulama 2'den farklı olarak pompaj debilerinin Şekil 3.22'de verildiği şekilde olduğu kabul edilmiştir.

3.5.2.1. Senaryo 1 (2 pompaj kuyusu – kararlı durum)

Bu senaryoda, kararlı durum için PW_1 ve PW_2 kuyularının yerleri ve pompaj debileri geliştirilen S/O modeliyle belirlenmiştir. Optimizasyon işlemi sırasında Denklem (16)'nın değerinin simülasyon sayısı ile değişimi Şekil 3.23'de verilmiştir.



Şekil 3.22 Zamana bağlı çözüm için kullanılan pompaj debileri (Uygulama 4)



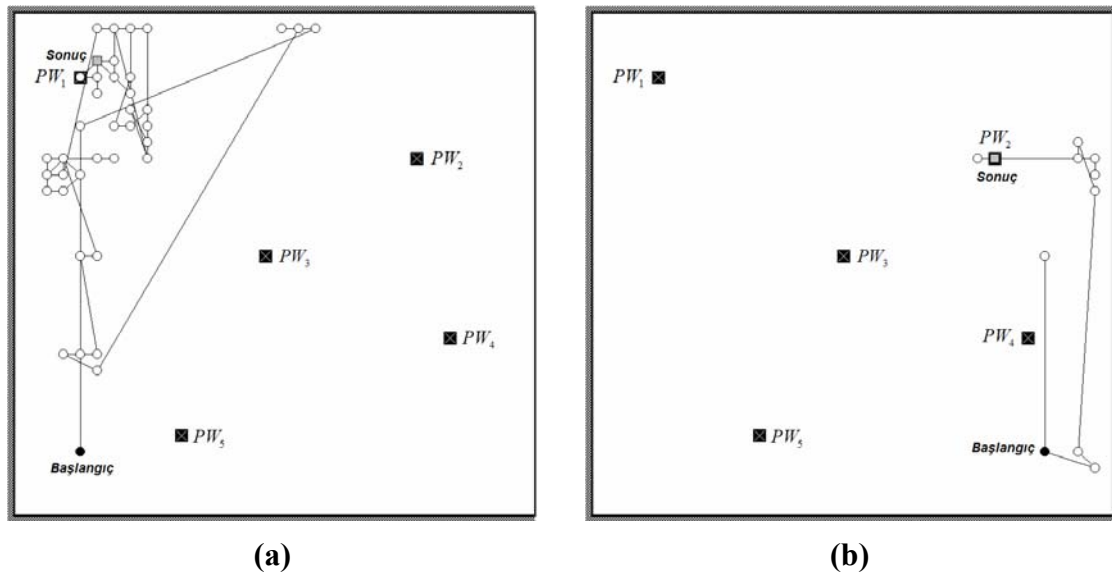
Şekil 3.23 Denklem (16)'nın simülasyon sayısı ile değişimi (Uygulama 4 – Senaryo 1)

Şekil 3.23'den görüleceği gibi verilen durma kriteri 6000 simülasyon işlemi sonunda sağlanmıştır. 6000 simülasyon işlemi sonunda S/O modelinin verdiği sonuçlar Tablo 3.6'da verilmiştir.

Tablo 3.6 Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar (Uygulama 4 – Senaryo 1)

Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE	Simülasyon Sayısı
	Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli		
						Hata (%)		
PW_1	(5,28)	(6,4)	(5,5)	4000	3937	1.59	1.26	6000
PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	4001	0.01		

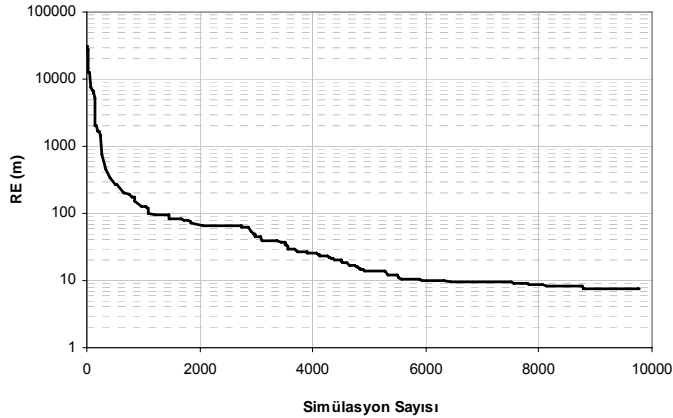
Tablo 3.6'dan görüleceği gibi, PW_1 ve PW_2 kuyuları arama işlemine sırasıyla (5,28) ve (28,28) noktalarından başlamış ve sonuç olarak (6,4) ve (25,10) noktalarını kuyu yeri olarak belirlemiştir. PW_2 kuyusunun gerçek yeri belirlenirken, PW_1 kuyusu tarafından bulunan kuyu yeri gerçek kuyu yerine yatay ve düşeyde bir grid aralığı mesafededir ($\Delta x = \Delta y = 100 m$). Belirlenen pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata değeri % 1.59 ile PW_1 kuyusundadır. Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen RE değeri 1.26'dır. PW_1 ve PW_2 kuyularının optimizasyon işlemi sırasında akiferdeki hareketi Şekil 3.24'de verilmiştir.



Şekil 3.24 Pompaj kuyularının akifer üzerindeki hareketi (Uygulama 4 – Senaryo 1); (a): PW_1 ; (b): PW_2

3.5.2.2. Senaryo 2 (2 pompaj kuyusu – zamana bağlı durum)

Bu senaryo kapsamında, Senaryo 1’de verilen problem zamana bağlı olarak çözülmüştür. Pompaj kuyularından çekilen debilerin Şekil 3.22’de verildiği şekilde zamanla değiştiği kabul edilmiştir. S/O modelinin çalıştırılması sonucu Denklem (16)’nın simülasyon sayısı ile değişimi Şekil 3.25’de verilmiştir.



Şekil 3.25 Denklem (16)'nin simülasyon sayısı ile değişimi (Uygulama 4 – Senaryo 2)

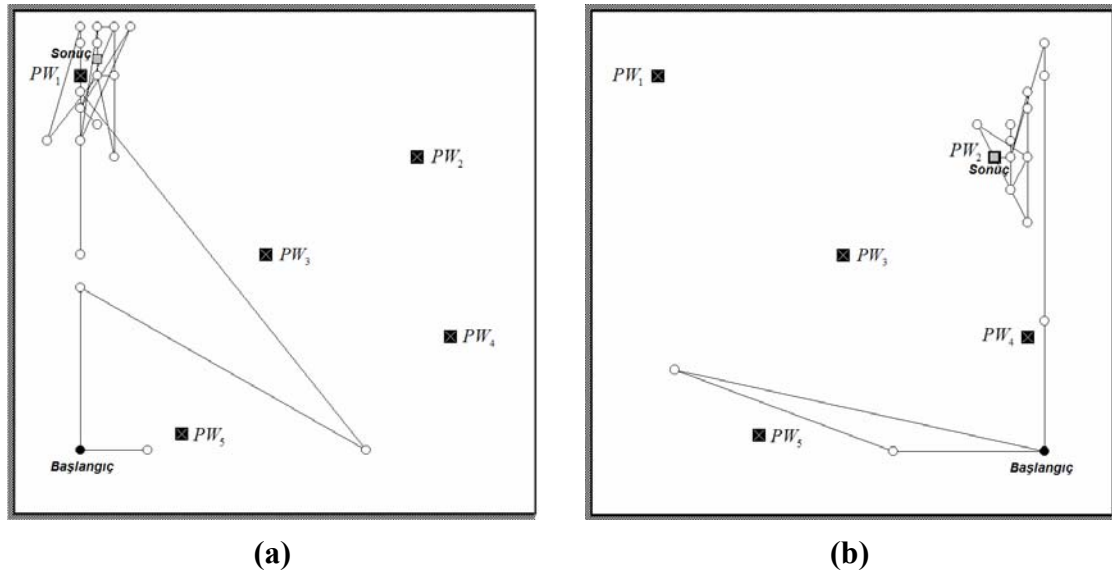
Bu senaryo için Denklem (15)'de verilen durma koşulu 9850 simülasyon işlemi sonunda sağlanmıştır. 9850 simülasyon sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7 Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar (Uygulama 4 – Senaryo 2)

Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE	Simülasyon Sayısı
	Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
PW_1	(5,28)	(6,4)	(5,5)	1000	877	12.34	7.39	9850
				3000	3122	4.07		
				5000	5066	1.32		
				2000	1986	0.68		
PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	0	47	-		
				1000	883	11.68		
				3000	2938	2.07		
				2000	1996	0.20		

Tablo 3.7'den görüleceği gibi, PW_1 ve PW_2 kuyuları için arama işlemine Senaryo 1 ile aynı başlangıç noktalarından başlanmış ve aynı kuyu yerleri elde edilmiştir. Belirlenen pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata değeri % 12.34 ile PW_1

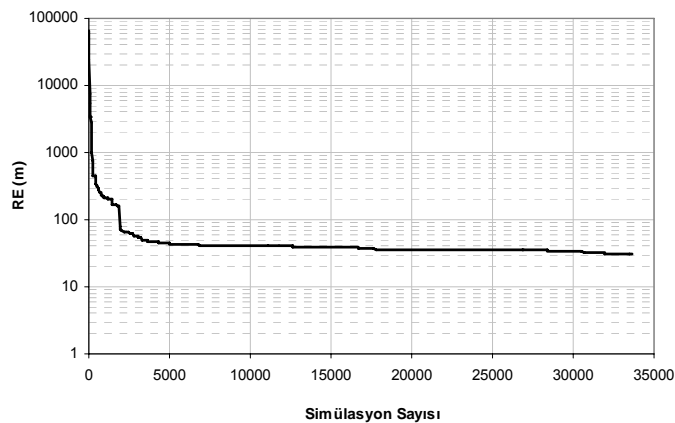
kuyusundadır. 9850 simülasyon işlemi sonunda elde edilen RE değeri 7.39'dur. PW_1 ve PW_2 kuyularının optimizasyon işlemi sırasında akifer üzerindeki hareketi Şekil 3.26'da verilmiştir.



Şekil 3.26 Pompaç kuyularının akifer üzerindeki hareketi (Uygulama 4 – Senaryo 2);
(a): PW_1 ; (b) PW_2

3.5.2.3. Senaryo 3 (5 pompaç kuyusu – kararlı durum)

Bu senaryo kapsamında, kararlı durum için akifer üzerindeki pompaç kuyularının tümünün yerlerinin ve pompaç debilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Optimizasyon işlemi esnasında Denklem (16)'nın değerinin simülasyon sayısı ile değişimi Şekil 3.27'de verilmiştir.



Şekil 3.27 Denklem (16)'nın simülasyon sayısı ile değişimi (Uygulama 4 – Senaryo 3)

Şekil 3.27'den görüleceği gibi, karakteristiği belirlenecek kuyu sayısının 2'den 5'e çıkması, matematiksel olarak optimizasyon probleminin boyutunun ve istenilen durma koşulunun sağlanması için gereken simülasyon sayısının artmasına sebep olmuştur. Bu senaryo için yapılması gereken simülasyon sayısı 33650'dir. Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8 Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar (Uygulama 4 – Senaryo 3)

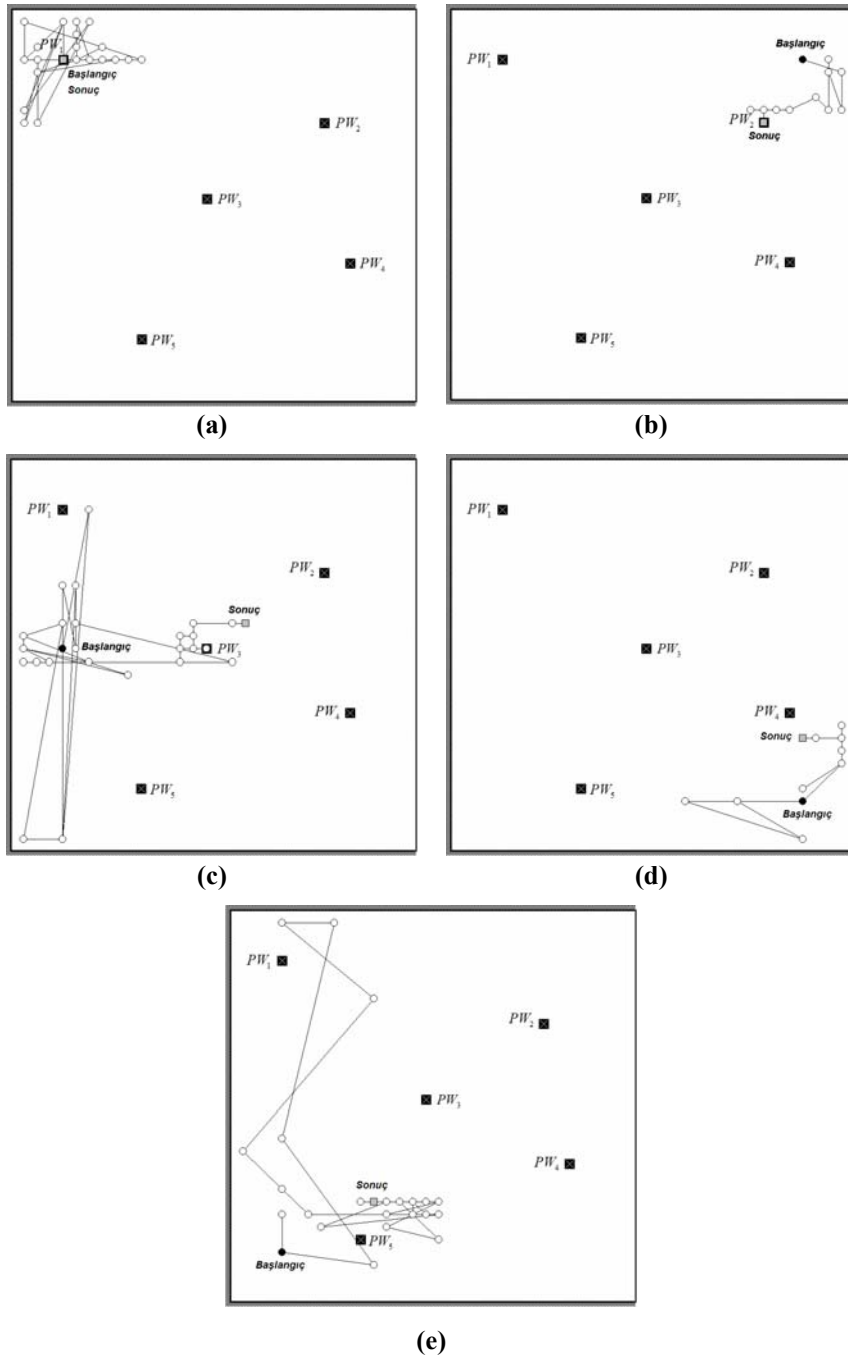
Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE	Simülasyon Sayısı
	Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
PW_1	(5,5)	(5,5)	(5,5)	4000	4435	10.88	31.39	33650
PW_2	(28,5)	(25,10)	(25,10)	4000	4021	0.53		
PW_3	(5,16)	(19,14)	(16,16)	4000	2723	31.93		
PW_4	(28,28)	(28,23)	(27,21)	4000	4752	18.80		
PW_5	(5,28)	(12,24)	(11,27)	2000	2698	34.90		

Tablo 3.8'den görüleceği gibi, sadece PW_1 ve PW_2 kuyuları için gerçek kuyu yerleri belirlenmiştir. PW_3 - PW_5 için belirlenen kuyu yerleri gerçek çözümlere: PW_3 için yatayda 3, düşeyde 2; PW_4 için yatayda 1, düşeyde 2; PW_5 için se yatayda 1, düşeyde 3 grid aralığı mesafededir ($\Delta x = \Delta y = 100 m$). Optimizasyon probleminin boyutunun ve bilinmeyen sayısının artması sonucu elde edilen pompaj debilerindeki hata değerlerinde büyük oranda artış olmuştur. Belirlenen pompaj debileri arasında maksimum göreceli hata % 34.90 ile PW_5 kuyusundadır. İşlem sonunda RE değeri kuyu sayısının artmasıyla 31.39'a çıkmıştır.

Her bir kuyunun arama sürecine başladığı çözüm noktası ve optimizasyon esnasında akifer üzerindeki hareketi Şekil 3.28'de verilmiştir.

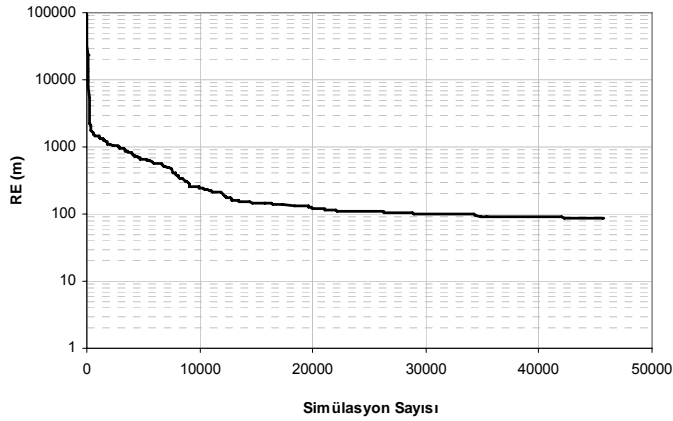
3.5.2.4. Senaryo 4 (5 pompaj kuyusu – zamana bağlı durum)

Bu senaryo kapsamında ise Senaryo 4 ile aynı problem zamana bağlı akım durumu dikkate alınarak çözülmüştür. Benzer şekilde, her bir pompaj kuyusunun Şekil 3.22'de verilen pompaj planına uygun olarak hareket ettiği kabul edilmiştir. Bu senaryo için Denklem (16)'nın simülasyon sayısı ile değişimi Şekil 3.29'da verilmiştir.



Şekil 3.28 Pompaj kuyularının akifer üzerindeki hareketi (Uygulama 4 – Senaryo 3);
 (a) PW_1 ; (b) PW_2 ; (c) PW_3 ; (d) PW_4 ; (e) PW_5

Şekil 3.29'dan görüleceği gibi, zaman boyutunun ve her bir çözüm periyodundaki pompaj debilerinin de bilinmeyen olarak optimizasyon işlemine girmesi sonucu durma koşulunun sağlanması için gerekli simülasyon sayısı 33650'den 45650'ye çıkmıştır. Optimizasyon işlemi sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 3.9'da verilmiştir.



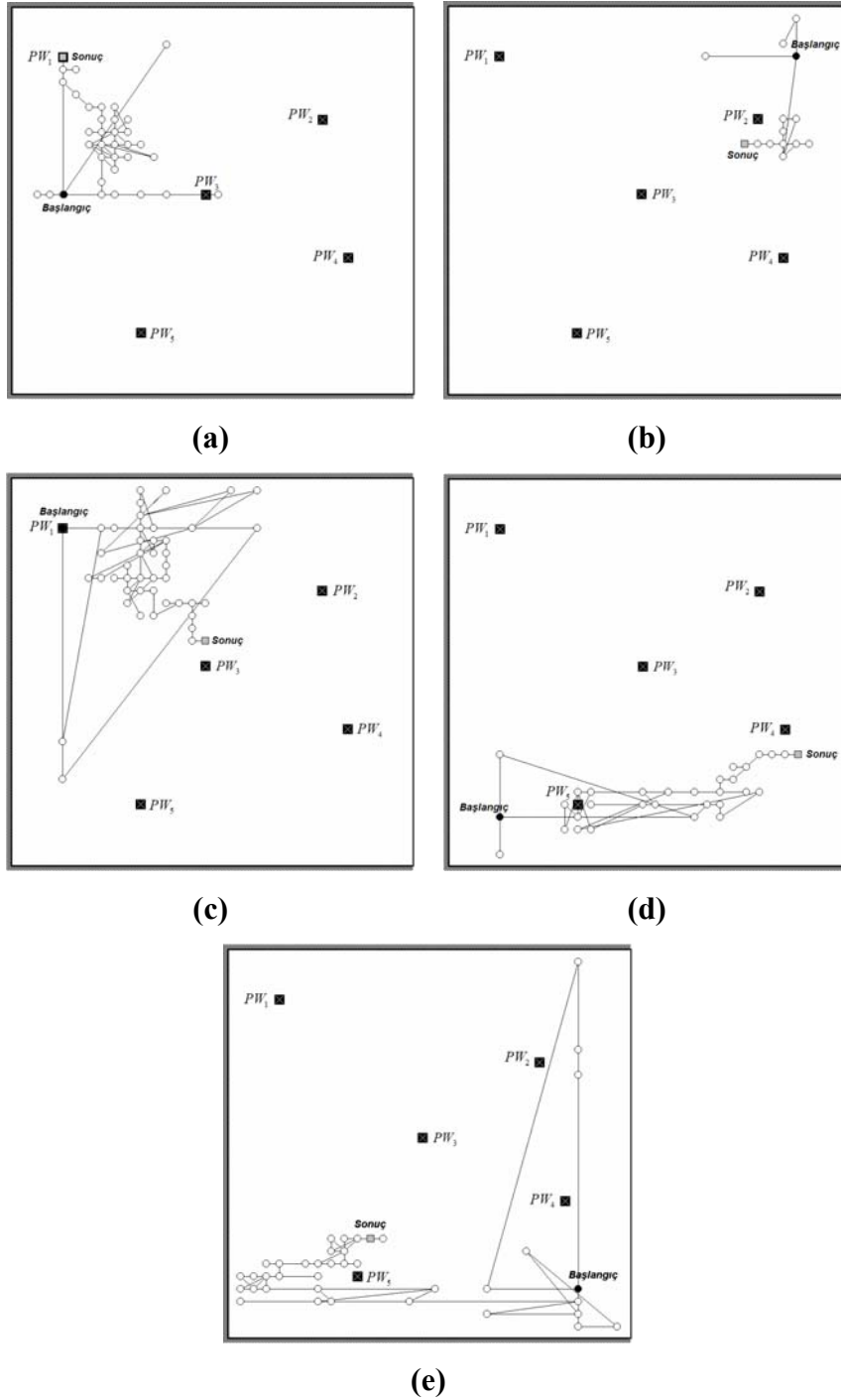
Şekil 3.29 Denklem (16)'nın simülasyon sayısı ile değişimi (Uygulama 4 – Senaryo 4)

Tablo 3.9 Optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar (Uygulama 4 – Senaryo 4)

Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE	Simülasyon Sayısı
	Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli		
						Hata (%)		
PW_1	(5,16)	(5,5)	(5,5)	1000	1127	12.70	87.59	45650
				3000	2164	27.87		
				5000	5290	5.80		
				2000	3099	54.95		
PW_2	(28,5)	(24,12)	(25,10)	0	76	-		
				1000	1114	11.40		
				3000	3923	30.77		
				2000	2637	31.85		
PW_3	(5,5)	(16,14)	(16,16)	3000	1326	55.80		
				3000	3922	30.73		
				3000	1830	39.00		
				3000	843	71.90		
PW_4	(5,28)	(28,23)	(27,21)	0	67	-		
				0	0	-		
				4000	4365	9.13		
				2000	2177	8.85		
PW_5	(28,28)	(12,24)	(11,27)	2000	3686	84.30		
				2000	844	57.80		
				2000	1696	15.20		
				2000	2053	2.65		

Tablo 3.9'dan görüleceği gibi, gerçek kuyu yeri sadece PW_1 kuyusu için belirlenebilmiştir. Diğer kuyu yerleri için elde edilen sonuçlar gerçek çözümlere sırasıyla: PW_2 için yatayda 1, düşeyde 2; PW_3 için düşeyde 2; PW_4 için yatayda 1, düşeyde 2; PW_5 için se yatayda 1, düşeyde 3 grid noktası mesafededir. Ancak, bu senaryo kapsamında belirlenen pompaj debilerinde hata miktarı büyüktür. Pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata % 84.30 ile PW_5 kuyusundadır. Optimizasyon

işlemi sonucunda elde edilen RE değeri 87.59'dur. Her bir kuyunun arama sürecine başladığı çözüm noktası ve optimizasyon esnasında akifer üzerindeki hareketi Şekil 3.30'da verilmiştir.



Şekil 3.30 Pompaj kuyularının akifer üzerindeki hareketi (Uygulama 4 – Senaryo 4);
(a): PW₁; (b) PW₂; (c) PW₃; (d) PW₄; (e) PW₅

3.6. Sonuçların İrdelenmesi

Bu bölümde, öncelikle yeraltı suyu hareketine ait kısmi diferansiyel denklem sisteminin verilen başlangıç ve sınır koşulları altında sonlu farklar yöntemi ile sayısal çözümü yapılmış ve bu çözüm simülasyon modeli olarak kullanılmıştır. Simülasyon modelinin performansı literatürde verilen iki akifer modeli (Prasad ve Rastogi 2001, Tsai vd 2003) üzerinde test edilmiştir. Her iki akifer modelinde, aynı koşullar altında geliştirilen simülasyon modeli ve literatürde yeraltı suyu modellemesinde yaygın olarak kullanılan MODFLOW (McDonald ve Harbough 1988) programı ile çözülmüş ve oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ardından, optimizasyon modelinde kullanılan GA optimizasyon tekniği hakkında detaylı bilgi verilmiş ve literatürde verilen 5 adet test fonksiyonu (Goldstein ve Price 1971, Rastrigin 1974, De Jong 1975, Schwefel 1981, Michalewicz 1992) ile geliştirilen GA tabanlı optimizasyon modeli test edilmiştir. Ardından yerleşik yaklaşım (Aguado ve Remson 1974) kullanılarak geliştirilen simülasyon ve optimizasyon modelleri birleştirilerek çalışmada kullanılan S/O modeli elde edilmiş ve model performansı simülasyon modelinin testinde kullanılan iki akifer modeli için test edilmiştir. S/O modelinin testinde kullanılan birinci akifer modelinin çözümünde, kararlı/zamana bağlı akım durumları ve tekli/çoklu kuyu karakteristiklerinin bilinmemesi durumları için model performansı ayrı ayrı test edilmiştir. İkinci akifer modelinin çözümünde ise, yine kararlı/zamana bağlı akım durumları için kuyu karakteristikleri ayrı ayrı belirlenmiştir. S/O modelinin testi ile ilgili olarak yapılan analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılabilmektedir:

- i) Akifer üzerinde karakteristikleri belirlenecek pompaj kuyularının sayısının az olması durumunda, geliştirilen S/O modeli oldukça iyi sonuçlar vermekte, buna karşın, bilinmeyen kuyu sayısının artması ile matematiksel olarak optimizasyon probleminin boyutu büyümekte ve doğru çözüme ulaşmak zorlaşmaktadır. Bu durum Uygulama 3 ve 4'de açık olarak görülebilmektedir. Her iki uygulamada da Senaryo 1 ve 2'de gerçeğe yakın sonuçlar elde edilirken Senaryo 3 ve 4'de problemin çözümü zorlaşmakta ve hata miktarı artmaktadır.
- ii) Uygulama 3 ve 4'ün her ikisinde de zamana bağlı çözümler için optimizasyon işlemi sonunda elde edilen RE değerleri kararlı durumda elde edilen RE değerlerinden büyük çıkmaktadır. Bunun nedeni, her iki durum için kullanılan

gözlem sayısının farklı olmasıdır. Örnek olarak, Uygulama 3’de verilen akifer üzerindeki 34 gözlem kuyusundan kararlı durum için 1, zamana bağlı durum için ise 4 kez seviye değeri okunmaktadır. Dolayısıyla, kararlı durum için kullanılan gözlem sayısı 34 olurken bu değer zamana bağlı durum için 136 olmaktadır.

iii) Kuyu karakteristiklerinin belirlenebilmesi için ilgili pompaj debileri ile birlikte kuyu yerlerinin de optimizasyon işleminde karar değişkeni olarak tanımlanması gerekmektedir. Ancak, optimizasyon işleminde kuyu yerlerinin alt ve üst sınır değerlerinin akiferin tümünü kapsayacak şekilde verilmesi sonucu, tüm akifer yüzeyi ilgili kuyular tarafından taranarak çözüme ulaşılmakta ve bunun sonucunda çözüme ulaşmak için gerekli simülasyon sayısı büyük oranda artmaktadır.

4. SİMÜLASYON / OPTİMİZASYON MODELİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

4.1. Giriş

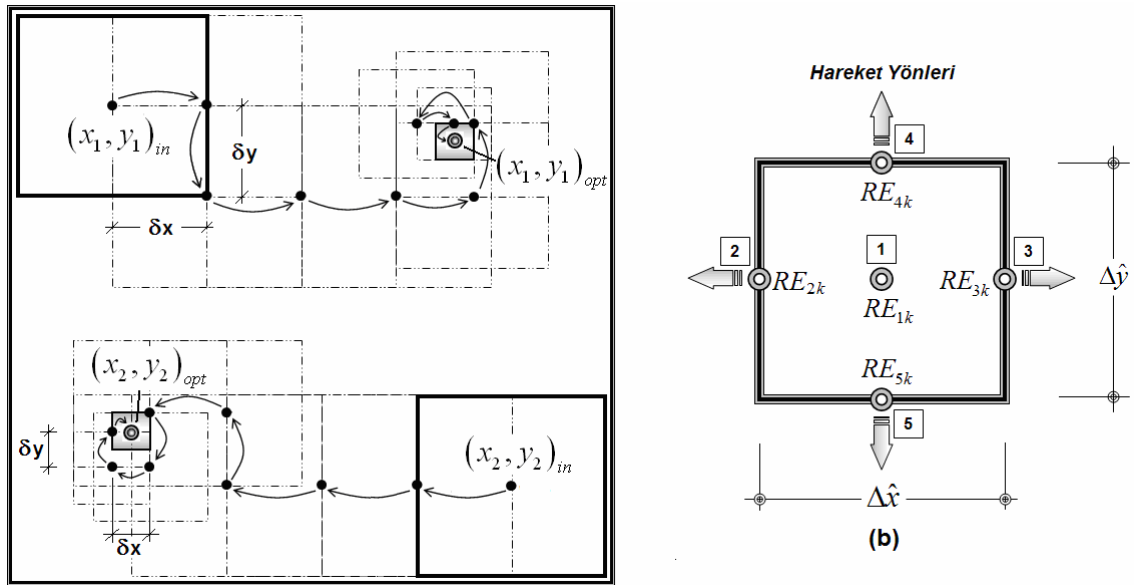
Bu bölümde, bir önceki bölümde geliştirilen S/O modelinin performansını iyileştirmek için "Hareketli alt bölge yaklaşımı" adı verilen bir çözüm tekniği geliştirilerek S/O modeli ile birleştirilmiştir. Aşağıda, öncelikle geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımına ait matematik model verilmiş, ardından model performansı bir önceki bölümde verilen uygulamalar üzerinde test edilmiştir. Ayrıca, pompaj kuyularının sayılarının bilinmemesi durumu için de model performansı test edilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir.

4.2. Hareketli Alt Bölge Yaklaşımı

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, literatürde kuyu yerleri ve pompaj debileri/konsantrasyon değerlerinin optimizasyon modelleri kullanılarak belirlenmesinde ilgili pompaj debileri/konsantrasyon değerleri ile kuyu koordinatları da karar değişkeni olarak kullanılmıştır (Huang ve Mayer 1997, Mahinthakumar ve Sayeed 2005). Ancak, kuyu koordinatlarına ait karar değişkenlerinin alt ve üst sınır değerlerinin akifer boyutlarını kapsayacak şekilde verilmesi, matematiksel olarak optimizasyon probleminin boyutunu arttırmakta ve çözüme ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, bu bölümde kuyu yerlerini karar değişkeni olarak kullanmadan kuyu karakteristiklerinin belirlenebildiği "Hareketli alt bölge yaklaşımı" adı verilen bir çözüm tekniği geliştirilmiş ve S/O modeli ile birleştirilmiştir.

Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımında, her pompaj kuyusu bir alt bölge içerisinde tanımlanmakta ve pompaj kuyuları alt bölgeler içinde önceden tanımlı çözüm noktalarına sırasıyla atanarak ilgili S/O modeli çalıştırılmaktadır. Bir alt bölge içindeki

tüm çözüm noktaları için S/O modeli çalıştırıldıktan sonra, hangi çözüm noktası için hata değeri minimum ise ilgili alt bölgenin merkez noktası o çözüm noktasına taşınarak alt bölgenin o yöne doğru hareketi sağlanmaktadır. Bu çözüm yaklaşımının sırasıyla tüm alt bölgelere uygulanmasıyla, çözüme nereden başlanırsa başlansın pompaj kuyularının yerleri ve pompaj debileri belirlenebilmektedir. Örnek olarak iki pompaj kuyusunun yerlerinin geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile belirlenmesi Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 (a): Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile iki adet pompaj kuyusunun yerlerinin belirlenmesi; **(b):** Hareketli alt bölgenin detaylı gösterimi

Şekil 4.1(a)’dan görüleceği gibi, akiferde iki adet pompaj kuyusu bulunmakta ve bunların yeri ve debisi iki adet alt bölge ile belirlenmektedir. Şekil 4.1(b)’den görüleceği gibi $\Delta \hat{x}$ ve $\Delta \hat{y}$ boyutlarındaki alt bölgelerin her biri önceden tanımlanmış 5 çözüm noktası içermektedir. Geliştirilen bu çözüm yaklaşımı matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

Akiferdeki pompaj kuyularının sayısı c olsun. Her bir pompaj kuyusunu bir alt bölge içinde göstermek üzere; x_k ve y_k , k no’lu alt bölgenin merkez noktasının koordinatları ($k = 1, 2, \dots, c$), $X = \{x_k\}_{k=1}^c$ ve $Y = \{y_k\}_{k=1}^c$, her bir alt bölgenin merkez noktalarının koordinatlarını içeren çözüm vektörleri, $f(\bullet)$ ise simülasyon modelinin çalıştırılması

sonucu elde edilen çözüm olsun (hidrolik yüklerin alansal dağılımı). k no'lu alt bölgenin hareket etmesiyle akifer sisteminin yeni çözümü aşağıdaki şekilde verilmektedir:

$$f(\tilde{X}, \tilde{Y}) = f\left(\left(x_1, y_1\right)_{in}, \dots, \left(\left(x_k\right)_{in} + s_x, \left(y_k\right)_{in} + s_y\right), \dots, \left(x_c, y_c\right)_{in}\right) \quad (22)$$

$$s_x = \left\{-\delta x, 0, +\delta x\right\} \quad (22a)$$

$$s_y = \left\{-\delta y, 0, +\delta y\right\} \quad (22b)$$

Denklem (22)'de: δx ve δy , alt bölgelerin hareket yönündeki adım boylarını, s_x ve s_y , adım boylarının alabileceği değerleri içeren çözüm uzaylarını, \tilde{X} ve \tilde{Y} , k no'lu alt bölgenin yeni konumunu ve diğer alt bölgelerin eski konumlarını içeren yer vektörlerini, $(\bullet)_{in}$ ise başlangıç konumlarını göstermektedir. k no'lu alt bölgenin yeni konumu aşağıdaki hesap adımlarına göre belirlenmektedir:

- i)* k no'lu pompaj kuyusunu l no'lu çözüm noktasına ata (burada “ l ” Şekil 4.1(b)'de verilen önceden tanımlanmış 5 çözüm noktasından birini tanımlamaktadır);
- ii)* Diğer kuyuları başlangıçta tanımlanan yerlerinde tut (alt bölgelerin merkez noktalarında);
- iii)* Her bir pompaj kuyusuna başlangıç pompaj debisini ata;
- iv)* Her bir kuyu için pompaj debilerini optimize et ve gözlem kuyularında gözlenen ve hesaplanan hidrolik yükler arasındaki hatayı hesapla;
- v)* k no'lu alt bölgede aynı işlemleri Şekil 4.1(b)'de verilen diğer çözüm noktaları için de tekrarla.

Verilen bu 5 hesap adımına göre, k no'lu alt bölgenin hareket yönü aşağıdaki gibi belirlenmektedir:

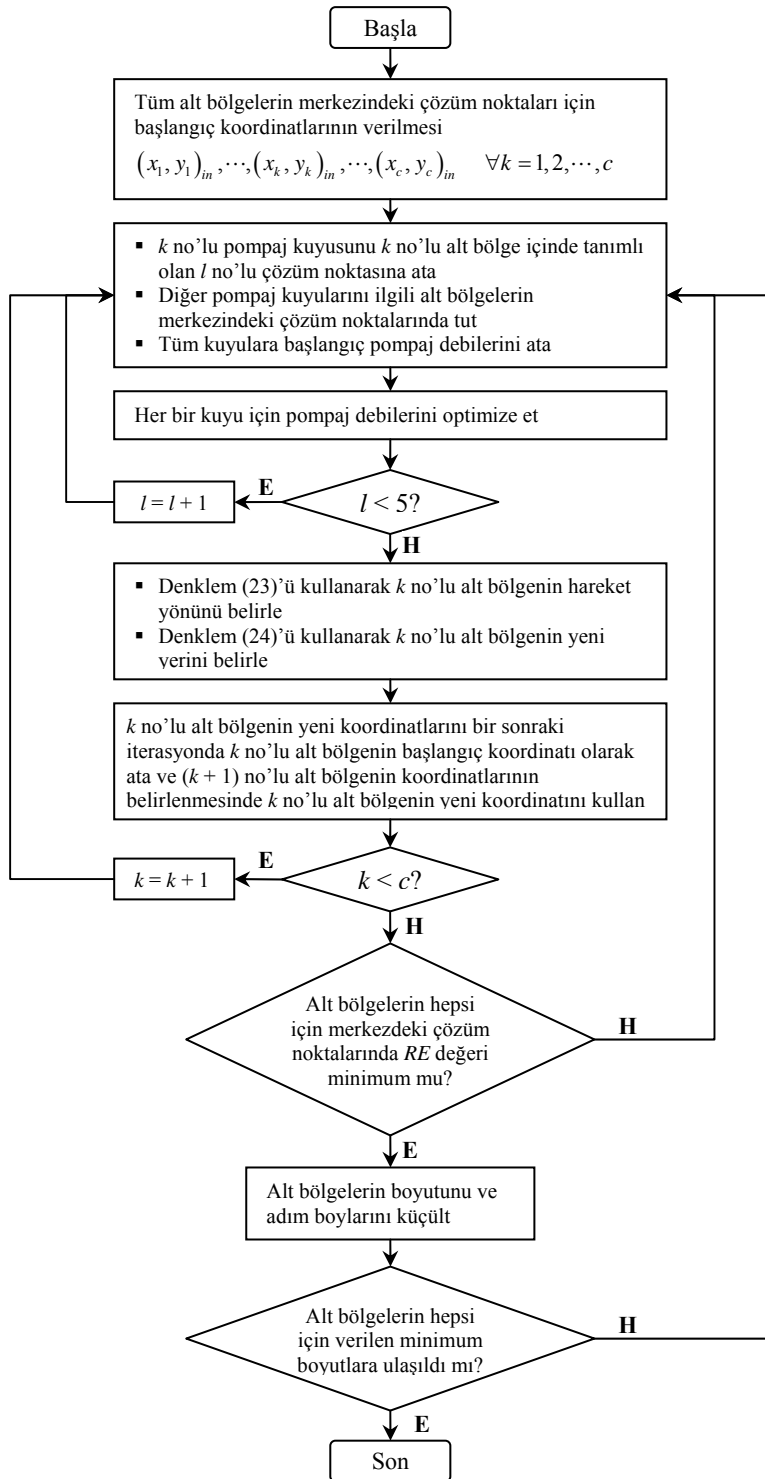
$$\lambda_k = \min(RE_{lk}) \quad (23)$$

burada, RE_{lk} k no'lu alt bölge içindeki l no'lu çözüm noktası için hesaplanmış hata değerini, λ_k ise k no'lu alt bölge için hesaplanmış hata değerlerinin minimum olanını göstermektedir. S/O modelinin çalışması sonucu k no'lu alt bölge içinde hangi çözüm noktasında hata değeri minimum ise, k no'lu alt bölgenin merkezi o çözüm noktasına aşağıda verilen eşitliğe bağlı olarak taşınmaktadır:

$$(\tilde{X}, \tilde{Y}) = \begin{cases} (x_1, y_1)_{in}, \dots, (x_k, y_k)_{in}, \dots, (x_c, y_c)_{in} & \text{eğer } \lambda_k = RE_{1k} \\ (x_1, y_1)_{in}, \dots, ((x_k)_{in} - \delta x, (y_k)_{in}), \dots, (x_c, y_c)_{in} & \text{eğer } \lambda_k = RE_{2k} \\ (x_1, y_1)_{in}, \dots, ((x_k)_{in} + \delta x, (y_k)_{in}), \dots, (x_c, y_c)_{in} & \text{eğer } \lambda_k = RE_{3k} \\ (x_1, y_1)_{in}, \dots, ((x_k)_{in}, (y_k)_{in} - \delta y), \dots, (x_c, y_c)_{in} & \text{eğer } \lambda_k = RE_{4k} \\ (x_1, y_1)_{in}, \dots, ((x_k)_{in}, (y_k)_{in} + \delta y), \dots, (x_c, y_c)_{in} & \text{eğer } \lambda_k = RE_{5k} \end{cases} \quad (24)$$

Denklem (24)'den görüldüğü gibi, k no'lu alt bölgenin yeni konumu belirlenirken, diğer alt bölgeler başlangıçta verilen konumlarında durmaktadır. k no'lu alt bölgenin konumu belirlendikten sonra, bir sonraki aşamada $(k+1)$ no'lu alt bölgenin yeni konumu belirlenmekte ve bu aşamada diğer alt bölgelerin hepsinin bir önceki hesap adımında belirlenen konumlarda olduğu kabul edilmektedir. Bu hesaplama süreci ile verilen durma koşulu sağlanıncaya kadar çözüm işlemine devam edilmektedir. Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile iyileştirilen S/O modeline ait akış diyagramı Şekil 4.2'de verilmiştir.

Şekil 4.2'den görüleceği gibi, her bir alt bölgenin merkez noktasındaki çözüm noktalarına pompaj kuyularının atanmasıyla elde edilen hata değerinin minimum olması durumunda, alt bölgelerin boyutları küçültülerek kuyuların gerçek yerleri lokal olarak belirlenmektedir.



Şekil 4.2 Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile iyileştirilen S/O modeline ait akış diyagramı

Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile kuyu karakteristiklerinin belirlenmesi iki aşamada yapılmaktadır. Birinci aşamada, kuyu yerlerinin belirlenmesi; ikinci aşamada ise pompaj debilerinin optimizasyonu ön plana çıkmaktadır. Yapılan

denemeler, birinci aşamanın çözümünde *RE* değerlerindeki değişimin; başlangıçtaki iterasyonlarda sonrakilere göre daha fazla olduğunu göstermiştir. Bu sonuç, GA ile optimizasyon sürecinde küçük toplum büyüklükleri ile çalışılabileceğini ve alt bölgelerin hareket yönlerinin başlangıçtaki iterasyonların sonuçlarına göre belirlenebileceğini göstermektedir. Alt bölgeler kullanılarak kuyu yerleri belirlendikten sonra, ikinci aşamada, belirlenen kuyu yerleri için ilgili pompaj debileri GA ile hassas bir şekilde belirlenmektedir.

Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımında dikkat edilmesi gereken diğer bir önemli konu da alt bölgelerin başlangıç boyutlarının ($\Delta\hat{x}$ ve $\Delta\hat{y}$) ve adım boylarının (δx ve δy) doğru bir şekilde verilmesidir. Başlangıçta, alt bölgelerin boyutlarının ve adım boylarının küçük verilmesi sonucu lokal optimum çözümler elde edilebilirken, alt bölge ve adım boylarının büyük verilmesi de çözüme ulaşmak için gerekli simülasyon sayısını ve dolaylı olarak bilgi işlem süresini arttırabilmektedir. Ayrıca, kuyu yerlerinin belirlenmesi, gözlem kuyularındaki seviyelere, dolayısı ile hidrolik iletkenliğin alansal değişimine bağlıdır (Huang ve Mayer 1997). Bu nedenle, alt bölgelerin başlangıç boyutlarının ve adım boylarının seçiminde, akifer boyutları, hidrolik iletkenliğin alansal değişimi ve gözlem verilerinin akiferi temsil edip edemeyeceği göz önünde bulundurulmalıdır.

4.3. S/O Modelinin Hareketli Alt Bölge Yaklaşımı ile Kullanılması

Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı bir önceki bölümde tanımlanan S/O modeli içerisinde aşağıda verilen matematik modele bağlı olarak kullanılmaktadır:

$$RE = \text{Min} \left[\sum_{t=1}^{t_{\max}} \sum_{\mu=1}^{N_d} (h_{\mu}(t) - \tilde{h}_{\mu}(t))^2 \right] \quad (25)$$

kısıtlar:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \sum_{k=1}^c \hat{W}(x_k, y_k) \delta(x - x_k, y - y_k) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (26)$$

$$\hat{W}(x_k, y_k) = \frac{\pm \hat{Q}(x_k, y_k)}{\Delta x \Delta y} \quad \forall k = 1, 2, \dots, c \quad (27)$$

$$(Q_{\min})_k \leq \hat{Q}(x_k, y_k) \leq (Q_{\max})_k \quad (28)$$

$$(\tilde{X}, \tilde{Y}) = \left((\tilde{x}_1, \tilde{y}_1), \dots, (\tilde{x}_k, \tilde{y}_k), \dots, (\tilde{x}_c, \tilde{y}_c) \right) \quad (29)$$

$$(x_k, y_k) = (\tilde{x}_k, \tilde{y}_k) \text{ eğer } \lambda_k = RE_{lk} \quad k = 1, 2, \dots, c; \quad l = 1, 2, \dots, 5 \quad (30)$$

burada; (x_k, y_k) ve $(\tilde{x}_k, \tilde{y}_k)$, k . pompaj kuyusunun eski ve yeni koordinatlarını göstermektedir. Denklem (17)-(21)'de olduğu gibi Denklem (25)-(30)'da da kuyu koordinatları gerçel koordinatlar (x_k, y_k) olarak tanımlanmıştır. Bir önceki bölümde olduğu gibi, bu bölümde de çözüm uzayını daraltmak amacıyla hesap yapılan grid noktalarının sütun ve satır numaraları (I_k, J_k) kuyu koordinatları olarak kullanılmıştır.

4.4. Hareketli Alt Bölge Yaklaşımı ile İyileştirilen S/O Modelinin Testi

Hareketli alt bölge yaklaşımı ile iyileştirilen S/O modelinin performansı Uygulama 3 ve 4'de verilen akifer modelleri üzerinde test edilmiştir. Her iki uygulamanın çözümü benzer şekilde 4 farklı senaryo altında yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Optimizasyon işleminde pompaj debilerinin alt ve üst sınırları bir önceki bölümde kullanıldığı gibi alınmıştır. Her iki uygulamanın çözümünde de aşağıda verilen GA parametreleri kullanılmıştır:

	<u>1. Aşama</u>	<u>2. Aşama</u>
Toplum büyüklüğü (m)	10	50
Çaprazlama olasılığı (p_c)	0.50	0.50
Mutasyon olasılığı (p_m)	0.15	0.05
Değişim simülasyon sayısı (st')	20	500
Tolerans (ε)	10^{-5}	10^{-5}

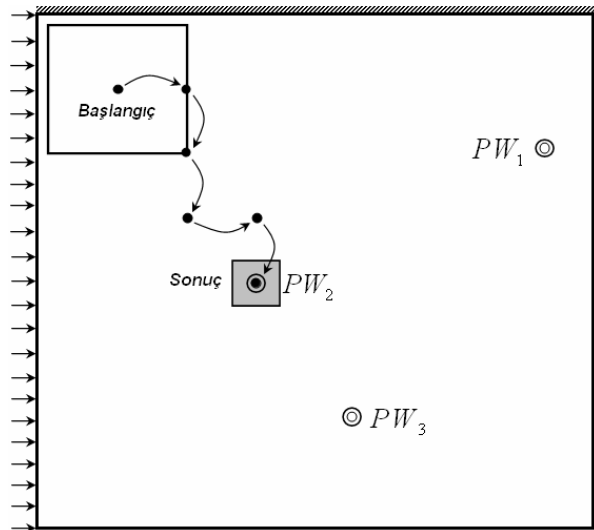
Çalışmanın bu bölümünden itibaren, optimizasyon modelinde durma kriteri olarak yukarıda verildiği gibi değişim jenerasyon sayısı (st) yerine değişim simülasyon sayısı (st') kullanılmıştır.

4.4.1. Uygulama 5

Bu uygulamada, Uygulama 3'de verilen akifer modeli geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile iyileştirilen S/O modeli kullanılarak çözülmüştür. Uygulama 3 ile aynı şekilde bu uygulamada da çözüm işlemi 4 farklı senaryo için yapılmıştır. Her bir senaryonun çözümünde Denklem (25) – (30)'da verilen matematik model kullanılmıştır. Arama sürecinin başlangıcında alt bölgelerin boyutları $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 7$ ve adım boyları ise $\delta x = \delta y = 3$ olarak kabul edilmiştir. Tüm alt bölgelerin merkezindeki çözüm noktalarında hesaplanan RE değerinin minimum olması durumunda, Şekil 4.2'de verilen akış diyagramında belirtildiği gibi grid aralıkları cinsinden alt bölge boyutları 2; adım boyları ise 1 birim azaltılmakta ve arama süreci $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 3$ ve $\delta x = \delta y = 1$ olduğu durumda sona erdirilmektedir.

4.4.1.1. Senaryo 1 (tek pompaj kuyusu – kararlı durum)

Bu senaryoda iyileştirilen S/O modeli ile kararlı durum için PW_2 kuyusunun yeri ve pompaj debisi belirlenmiştir. Alt bölge arama sürecine Uygulama 3 – Senaryo 1 ile aynı başlangıç noktasından başlamıştır. Arama sürecinde alt bölgenin akifer üzerindeki hareketi ve PW_2 kuyusunun yerinin belirlenmesi Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3 Hareketli alt bölge yaklaşımı ile PW_2 kuyusunun yerinin belirlenmesi (Uygulama 5 – Senaryo 1)

Şekil 4.3'den görüleceği gibi, ilgili alt bölge doğrudan ilgili kuyu yerine doğru hareket etmektedir. Bu senaryo için elde edilen sonuçlar Tablo 4.1'de verilmiştir.

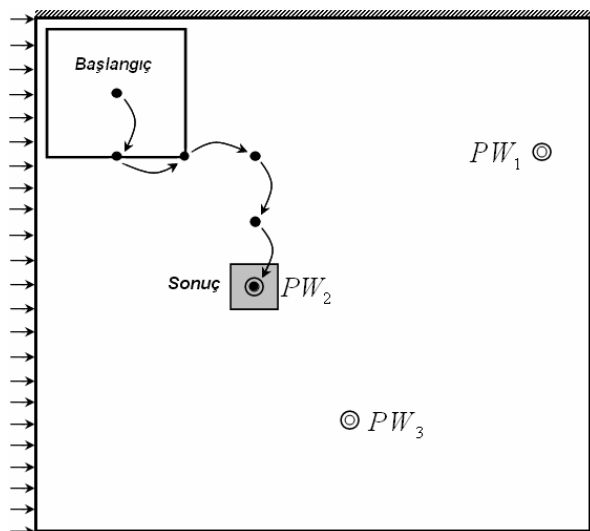
Tablo 4.1 Hareketli alt bölge ile elde edilen sonuçlar (Uygulama 5 – Senaryo 1)

Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE (m)	Simülasyon Sayısı
	Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
PW_2	(4,4)	(10,13)	(10,13)	3000	2999	0.02	0.34	2441

Tablo 4.1'den görüldüğü gibi, benzer şekilde optimizasyon işlemi (4,4) noktasından başlamış ve PW_2 kuyusunun gerçek yeri olan (10,13) noktasında sona ermiştir. Gerçek ve belirlenen pompaj debisi arasındaki göreceli hata değeri % 0.02'dir. Optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen RE değeri 0.34'tür ve bu değer 2441 simülasyon işlemi sonucunda elde edilmiştir.

4.4.1.2. Senaryo 2 (tek pompaj kuyusu – zamana bağlı durum)

Bu senaryoda, Senaryo 1'de verilen ve problem Uygulama 3 – Senaryo 2'de yapıldığı gibi zamana bağlı akım durumu için çözülmüştür. Bu senaryo için, alt bölgenin arama sürecinde akifer üzerindeki hareketi ve PW_2 kuyusunun yerinin belirlenmesi Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4 Hareketli alt bölge yaklaşımı ile PW_2 kuyusunun yerinin belirlenmesi (Uygulama 5 – Senaryo 2)

Şekil 4.4'den görüldüğü gibi, zamana bağlı akım durumunda da ilgili alt bölge doğrudan PW_2 kuyusunun gerçek yerine gitmektedir. Bu senaryo için elde edilen sonuçlar Tablo 4.2'de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 4.2 Hareketli alt bölge ile elde edilen sonuçlar (Uygulama 5 – Senaryo 2)

Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE (<i>m</i>)	Simülasyon Sayısı
	Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
PW_2	(4,4)	(10,13)	(10,13)	1000	1013	1.27	1.31	4772
				3000	2966	1.14		
				5000	5007	0.13		
				2000	1997	0.14		

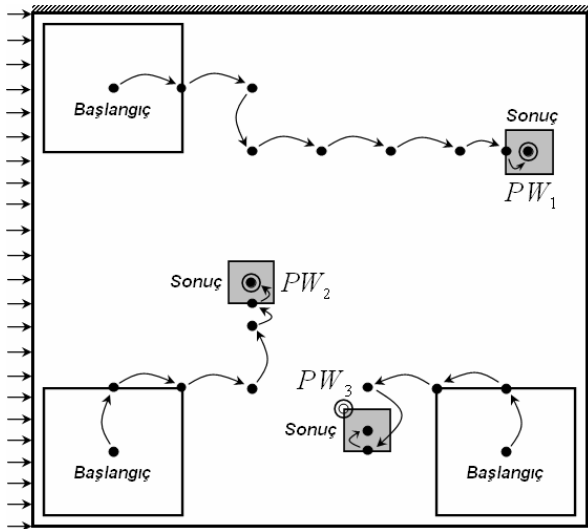
Tablo 4.2'den görüldüğü gibi, alt bölge arama sürecine (4,4) noktasından başlamış ve gerçek yeri olan (10,13) noktasını çözüm olarak belirlemiştir. Zamana bağlı pompaj debileri arasındaki maksimum göreceli hata değeri % 1.27'dir. Optimizasyon işlemi sonunda RE değeri 1.31 olarak elde edilmiştir. Bu senaryo için gerekli simülasyon sayısı 4772 olarak elde edilmiştir.

4.4.1.3. Senaryo 3 (3 pompaj kuyusu – kararlı durum)

Bu senaryo kapsamında, Uygulama 3 – Senaryo 3'e benzer şekilde kararlı durum için akifer üzerindeki 3 pompaj kuyusunun da yerleri ve pompaj debileri belirlenmiştir. Senaryo 1 ve 2 ile benzer şekilde, alt bölgeler arama sürecine aynı başlangıç noktalarından başlamıştır. Üç alt bölgenin, pompaj kuyularının yerlerinin belirlenmesi esnasında akifer üzerindeki hareketi Şekil 4.5'de verilmiştir. Şekil 4.5'den görüleceği gibi, kuyu sayısının birden çok olması durumunda da geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile kuyu yerleri etkin bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu senaryo için elde edilen sonuçlar Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3 Hareketli alt bölge ile elde edilen sonuçlar (Uygulama 5 – Senaryo 3)

Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE (<i>m</i>)	Simülasyon Sayısı
	Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
PW_1	(4,4)	(22,7)	(22,7)	800	872	9.01	3.27	8685
PW_2	(4,21)	(10,13)	(10,13)	3000	3382	12.74		
PW_3	(21,21)	(15,20)	(14,19)	6000	6125	2.09		



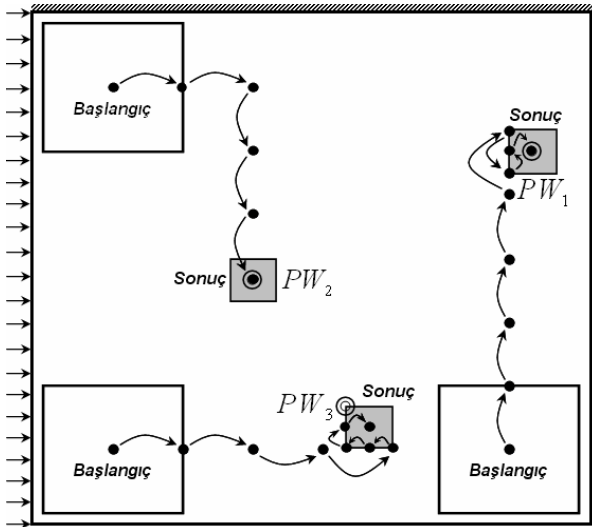
Şekil 4.5 Hareketli alt bölge yaklaşımı ile üç pompaj kuyusunun yerinin belirlenmesi (Uygulama 5 – Senaryo 3)

Tablo 4.3'den görüldüğü gibi, PW_1 kuyusu arama sürecine (4,4) noktasından başlamış ve (22,7) noktasını çözüm olarak belirlemiştir. PW_2 ve PW_3 kuyuları ise sırasıyla (4,21) ve (21,21) noktalarından çözüme başlamış ve optimizasyon işleminin sonunda (10,13) ve (15,20) noktalarını çözüm olarak bulmuştur. Belirlenen pompaj debileri arasındaki maksimum göreceli hata değeri % 12.74 ile PW_2 kuyusundadır. Optimizasyon işleminin sonunda RE değeri 3.27 olarak elde edilmiştir.

4.4.1.4. Senaryo 4 (3 pompaj kuyusu – zamana bağlı durum)

Bu senaryoda, Senaryo 3'de verilen problem Uygulama 3 – Senaryo 4'de olduğu gibi zamana bağlı akım durumu için çözülmüştür. Benzer şekilde, üç pompaj kuyusundan da Şekil 3.12'de verilen pompaj planına bağlı kalınarak su çekildiği varsayılmıştır. Alt bölgelerin arama sürecinde akifer üzerindeki hareketi Şekil 4.6'da, optimizasyon işlemi sonunda elde edilen sonuçlar da Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.4'den görüleceği gibi, bu senaryo için de kuyu yerleri bakımından uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Belirlenen pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata değeri % 23.30'dur. 14670 simülasyon işlemi sonucu RE değeri 2.60 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.6 Hareketli alt bölge yaklaşımı ile üç pompaj kuyusunun yerinin belirlenmesi (Uygulama 5 – Senaryo 4)

Tablo 4.4 Hareketli alt bölge ile elde edilen sonuçlar (Uygulama 5 – Senaryo 4)

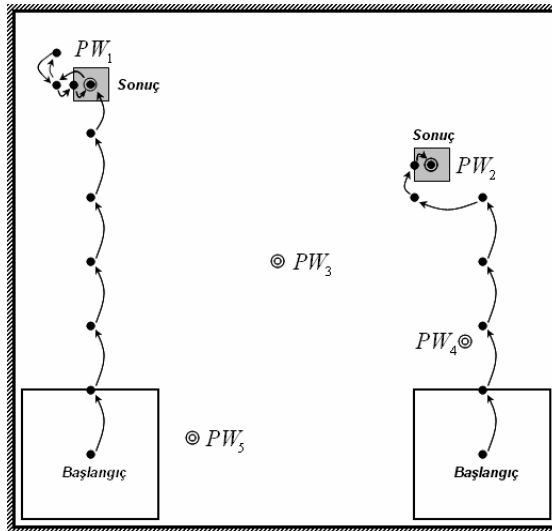
Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE (m)	Simülasyon Sayısı
	Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
PW_1	(21,21)	(22,7)	(22,7)	0	3	-	2.60	14670
				1000	987	1.34		
				3000	3006	0.21		
PW_2	(4,4)	(10,13)	(10,13)	2000	1992	0.38		
				1000	988	1.17		
				3000	3210	7.00		
				5000	5258	5.15		
PW_3	(4,21)	(15,20)	(14,19)	2000	1987	0.66		
				1000	1233	23.30		
				2000	1913	4.35		
				2000	1769	11.56		
				0	89	-		

4.4.2. Uygulama 6

Bu uygulamada, geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile iyileştirilen S/O modelinin performansı Uygulama 4’da incelenen akifer modeli üzerinde test edilmiştir. Uygulama 4 ile benzer şekilde bu uygulama da 4 farklı senaryo altında çözülmüştür. Arama sürecinin başlangıcında alt bölgelerin boyutları $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 9$ ve adım boyları ise $\delta x = \delta y = 4$ olarak kabul edilmiş ve $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 3$ ve $\delta x = \delta y = 1$ olduğu durumda arama işlemi sona erdirilmiştir. Uygulama 5 ile benzer şekilde, tüm hesaplamalarda Denklem (25) – (30)’da verilen matematik model kullanılmıştır.

4.4.2.1. Senaryo 1 (2 pompaj kuyusu – kararlı durum)

Bu senaryoda, geliştirilen model ile Uygulama 4 – Senaryo 1 ile benzer şekilde kararlı durum için PW_1 ve PW_2 kuyularının yerleri ve pompaj debileri belirlenmiştir. Alt bölgelerin başlangıç boyutları, arama sürecine başladığı çözüm noktaları ve akifer üzerindeki hareketleri Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7 Hareketli alt bölge yaklaşımı ile PW_1 ve PW_2 kuyularının yerlerinin belirlenmesi (Uygulama 6 – Senaryo 1)

Şekil 4.7’den görüleceği gibi, alt bölgeler arama sürecine Uygulama 4 – Senaryo 1 ile aynı çözüm noktalarından başlamışlar ve gerçek kuyu yerlerine doğru hareket etmişlerdir. Geliştirilen S/O modelinin hareketli alt bölge yaklaşımı ile kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.5 Hareketli alt bölge ile elde edilen sonuçlar (Uygulama 6 – Senaryo 1)

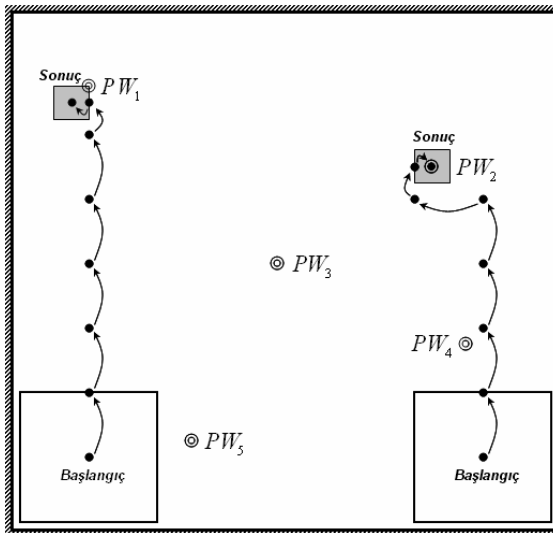
Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k)$ ($m^3 / gün$)			RE (m)	Simülasyon Sayısı
	Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4001	0.03	0.40	5511
PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3998	0.05		

Tablo 4.5’den görüldüğü gibi, her iki alt bölge de gerçek kuyu yerlerini belirlemişlerdir. Hesaplanan pompaj debileri arasındaki maksimum göreceli hata değeri

% 0.05'tir. Optimizasyon işlemi sonunda RE değeri 0.40 olarak elde edilmiş ve bu sonucun elde edilmesi için 5511 simülasyon işlemi yapılmıştır.

4.4.2.2. Senaryo 2 (2 pompaj kuyusu – zamana bağlı durum)

Bu senaryoda, Senaryo 1 ile aynı problem zamana bağlı yeraltı suyu akımı ve pompaj debileri dikkate alınarak çözülmüştür. Tüm çözüm parametreleri Uygulama 4 – Senaryo 2’de verildiği şekilde alınmıştır. Bu senaryo için, alt bölgelerin arama sürecine başladığı çözüm noktaları ve akifer üzerindeki hareketleri Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekil 4.8’den görüleceği gibi, zamana bağlı akım durumunda da geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı etkin bir şekilde kuyu yerlerini belirleyebilmektedir. Bu senaryo için elde edilen sonuçlar Tablo 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.8 Hareketli alt bölge yaklaşımı ile PW_1 ve PW_2 kuyularının yerlerinin belirlenmesi (Uygulama 6 – Senaryo 2)

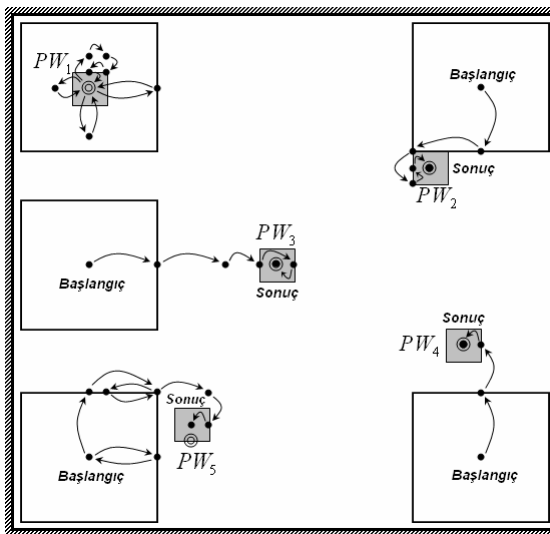
Tablo 4.6 Hareketli alt bölge ile elde edilen sonuçlar (Uygulama 6 – Senaryo 2)

Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE (m)	Simülasyon Sayısı
	Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
PW_1	(5,28)	(4,6)	(5,5)	1000	979	2.12	4.33	6226
				3000	3086	2.86		
				5000	5019	0.39		
				2000	1929	3.56		
PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	0	0	-		
				1000	961	3.90		
				3000	3017	0.55		
				2000	2055	2.75		

Tablo 4.6'dan görüldüğü gibi, hareketli alt bölge yaklaşımı ile PW_2 kuyusu için gerçek kuyu yeri belirlenebilirken PW_1 kuyusu için gerçek kuyu yerine yatay ve düşeyde 1 grid aralığı farkla çözüm bulunmuştur. Belirlenen kuyu yerleri için hesaplanan pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata değeri % 3.90'dır. Tablo 4.6'dan görüleceği gibi, optimizasyon işlemi sonunda RE değeri 4.33 olarak elde edilmiştir. Bu senaryo için gerekli simülasyon sayısı 6226'dır.

4.4.2.3. Senaryo 3 (5 pompaj kuyusu – kararlı durum)

Bu senaryo kapsamında, Senaryo 1 ve 2'den farklı olarak akifer üzerindeki pompaj kuyularının hiçbirinin yerinin ve pompaj debisinin bilinmediği kabul edilmiştir. Yeraltı suyu akımının kararlı durumda olduğu kabul edilmiş ve optimizasyon işleminde Uygulama 4 – Senaryo 3 ile aynı çözüm parametreleri ve başlangıç çözümleri kullanılmıştır. Alt bölgelerin başlangıç boyut ve konumları ve arama sürecinde akifer üzerindeki hareketleri Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9 Hareketli alt bölge yaklaşımı ile pompaj kuyularının yerlerinin belirlenmesi (Uygulama 6 – Senaryo 3)

Şekil 4.9'dan görüleceği gibi, tüm pompaj kuyularının yerlerinin ve pompaj debilerinin bilinmemesi durumunda da ilgili alt bölgeler akifer yüzeyinin tümünü taramadan doğrudan ilgili kuyu yerlerini belirleyebilmektedir. Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşım ile elde edilen sonuçlar Tablo 4.7'de verilmiştir.

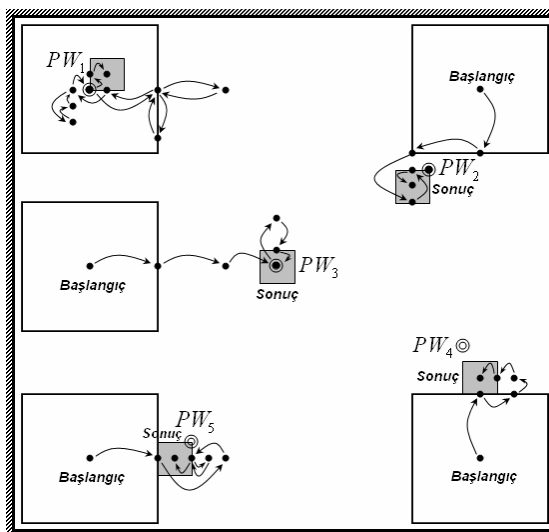
Tablo 4.7 Hareketli alt bölge ile elde edilen sonuçlar (Uygulama 6 – Senaryo 3)

Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k)$ ($m^3 / gün$)			RE (m)	Simülasyon Sayısı
	Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
PW_1	(5,5)	(5,5)	(5,5)	4000	4097	2.42	0.57	25467
PW_2	(28,5)	(25,10)	(25,10)	4000	4004	0.11		
PW_3	(5,16)	(16,16)	(16,16)	4000	3831	4.24		
PW_4	(28,28)	(27,21)	(27,21)	4000	4010	0.24		
PW_5	(5,28)	(11,26)	(11,27)	2000	1806	9.69		

Tablo 4.7’den görüldüğü gibi, geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile PW_5 kuyusu dışında diğer tüm kuyuların gerçek yerleri belirlenebilmiştir. Hesaplanan pompaj debileri bakımından da oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata değeri % 9.69’dur. 25467 simülasyon işlemi sonucunda elde edilen RE değeri ise 0.57’dir.

4.4.2.4. Senaryo 4 (5 pompaj kuyusu – zamana bağlı durum)

Bu senaryoda ise, Senaryo 3’de verilen problem Uygulama 4 – Senaryo 4 ile benzer şekilde yeraltı suyu akımının zamana bağlı olması durumu için çözülmüştür. Tüm pompaj kuyularının Şekil 3.22’de verilen pompaj şemasına bağlı olarak işletildiği kabul edilmiştir. Arama sürecinde, pompaj kuyularının akifer üzerindeki hareketi ve kabul edilen başlangıç çözümleri Şekil 4.10’da verilmiştir.

**Şekil 4.10** Hareketli alt bölge yaklaşımı ile pompaj kuyularının yerlerinin belirlenmesi (Uygulama 6 – Senaryo 4)

Bu senaryo için optimizasyon işlemi sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.8’de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 4.8 Hareketli alt bölge ile elde edilen sonuçlar (Uygulama 6 – Senaryo 4)

Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE (m)	Simülasyon Sayısı
	Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
PW_1	(5,5)	(6,4)	(5,5)	1000	1287	28.73	44.13	36914
				3000	3260	8.68		
				5000	4724	5.52		
				2000	2533	26.64		
PW_2	(28,5)	(24,11)	(25,10)	0	42	-		
				1000	1111	11.13		
				3000	3406	13.53		
				2000	2226	11.30		
PW_3	(5,16)	(16,16)	(16,16)	3000	2288	23.73		
				3000	2388	20.39		
				3000	3300	10.00		
				3000	2321	22.64		
PW_4	(28,28)	(28,23)	(27,21)	0	47	-		
				0	45	-		
				4000	4672	16.80		
				2000	2471	23.53		
PW_5	(5,28)	(10,28)	(11,27)	2000	2396	19.81		
				2000	2391	19.54		
				2000	1790	10.50		
				2000	2020	0.98		

Tablo 4.8’den görüleceği gibi, zaman boyutunun optimizasyon modeline girmesi sonucu her bir kuyu için belirlenecek pompaj debilerinin sayısının artmakta, dolayısıyla pompaj kuyularının gerçek yerlerinin belirlenmesi zorlaşmaktadır. Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile sadece PW_3 kuyusunun gerçek yeri belirlenebilmiş, diğer kuyular için ise gerçek kuyu yerlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Hesaplanan pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata değeri % 28.73’dir. Bu senaryo için 36914 simülasyon işlemi sonunda elde edilen RE değeri 44.13’tür.

4.4.3. Sonuçlarının değerlendirilmesi

Yapılan analizlerden görüleceği gibi, geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile iyileştirilen S/O modeli kullanılarak bir akiferdeki pompaj kuyularının yerleri ve pompaj debileri etkin bir şekilde belirlenebilmektedir. İyileştirilmiş S/O modelinin Bölüm 3’de ele alınan S/O modelinden en büyük farkı kuyu karakteristiklerinin belirlenmesinde kuyu yerlerinin karar değişkeni olarak kullanılmasına gerek

kalmamasıdır. Bunun yerine, kuyu yerleri tanımlanan alt bölgeler içerisinde verilen çözüm noktalarına sırasıyla atanarak o noktalar için S/O modeli çalıştırılmakta ve hata değerlerine göre alt bölgeler çözüme doğru hareket etmektedir.

Yapılan analizlerden görüleceği gibi hareketli alt bölge yaklaşımı ile iyileştirilen S/O modelinin performansı, Uygulama 3 ve 4'de verilen akifer modellerinin çözülmesiyle test edilmiştir. Çözüm aşamasında, Uygulama 3 ve 4 ile aynı çözüm parametreleri ve başlangıç koşulları kullanılmıştır. Her iki uygulamanın belirlenen kuyu yerleri cinsinden karşılaştırılması sırasıyla Tablo 4.9 ve 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.9 Uygulama 3 ve 4'de belirlenen kuyu yerlerinin karşılaştırılması

Senaryo No	Kuyu No	Uygulama 3	Uygulama 5	Gerçek
1	PW_2	(10,13)	(10,13)	(10,13)
2	PW_2	(10,12)	(10,13)	(10,13)
3	PW_1	(22,7)	(22,7)	(22,7)
	PW_2	(10,11)	(10,13)	(10,13)
	PW_3	(14,18)	(15,20)	(14,19)
4	PW_1	(22,7)	(22,7)	(22,7)
	PW_2	(10,14)	(10,13)	(10,13)
	PW_3	(14,20)	(15,20)	(14,19)

Tablo 4.10 Uygulama 4 ve 6'da belirlenen kuyu yerlerinin karşılaştırılması

Senaryo No	Kuyu No	Uygulama 4	Uygulama 6	Gerçek
1	PW_1	(6,4)	(5,5)	(5,5)
	PW_2	(25,10)	(25,10)	(25,10)
2	PW_1	(6,4)	(4,6)	(5,5)
	PW_2	(25,10)	(25,10)	(25,10)
3	PW_1	(5,5)	(5,5)	(5,5)
	PW_2	(25,10)	(25,10)	(25,10)
	PW_3	(19,14)	(16,16)	(16,16)
	PW_4	(28,23)	(27,21)	(27,21)
	PW_5	(12,24)	(11,26)	(11,27)
4	PW_1	(5,5)	(6,4)	(5,5)
	PW_2	(24,12)	(24,11)	(25,10)
	PW_3	(16,14)	(16,16)	(16,16)
	PW_4	(28,23)	(28,23)	(27,21)
	PW_5	(12,24)	(10,28)	(11,27)

Tablo 4.9 ve 4.10'dan görüleceği gibi, her iki akifer modelinde de geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı kullanılarak belirlenen kuyu yerleri (Uygulama 5 ve 6) ile Uygulama 3 ve 4'de elde edilen kuyu yerleri iyi uyum içindedir. Ayrıca, verilen durma koşulları için gerçek kuyu yerlerinin, kuyu sayısının az olması durumunda (Senaryo 1 ve 2) tam olarak belirlenebildiği, kuyu sayısının çok olması durumunda ise ağırlıklı olarak gerçek kuyu yerlerinin etrafındaki noktaların çözüm olarak bulunabildiği Tablo 4.9 ve 4.10'dan görülebilmektedir.

Her iki akifer modeli için, belirlenen kuyu yerlerinde hesaplanan pompaj debileri ile gerçek pompaj debileri arasındaki maksimum göreceli hata (%) değerlerinin karşılaştırılması ise sırasıyla Tablo 4.11 ve 4.12'de verilmiştir.

Tablo 4.11 Uygulama 3 ve 5 için hesaplanan pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata değerleri (%)

Maksimum Göreceli Hata Değerleri (%)		
Senaryo No	Uygulama 3	Uygulama 5
1	2.61	0.02
2	10.45	1.27
3	30.91	12.74
4	45.28	23.30

Tablo 4.12 Uygulama 4 ve 6 için hesaplanan pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata değerleri (%)

Maksimum Göreceli Hata Değerleri (%)		
Senaryo No	Uygulama 4	Uygulama 6
1	1.59	0.05
2	12.34	3.90
3	34.90	9.69
4	84.30	28.73

Tablo 4.11'den görüldüğü gibi, Uygulama 3'de hesaplanan pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata değeri % 45.28 ile Senaryo 4'de elde edilmiştir. Aynı akiferin geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile Uygulama 5'de çözülmesiyle maksimum göreceli hata değeri % 23.30'a düşmüştür. Benzer durum Tablo 4.12'de de görülmektedir. Uygulama 4'de hesaplanan pompaj debileri arasındaki maksimum göreceli hata değeri % 84.30 olarak elde edilirken, aynı uygulamanın hareketli alt bölge yaklaşımı ile çözülmesiyle bu hata değeri % 28.73'e düşmüştür. Hesaplanan pompaj debilerindeki hatanın düşme eğilimi, optimizasyon işlemi sonucu elde edilen RE

değerlerine de yansımıştır. Her iki akifer modeline ait RE değerlerinin karşılaştırılması Tablo 4.13 ve 4.14’de yapılmıştır.

Tablo 4.13 Uygulama 3 ve 5 için optimizasyon işlemi sonunda elde edilen RE değerleri

RE (m)		
Senaryo No	Uygulama 3	Uygulama 5
1	1.44	0.34
2	11.16	1.31
3	5.75	3.27
4	12.69	2.60

Tablo 4.14 Uygulama 4 ve 6 için optimizasyon işlemi sonunda elde edilen RE değerleri

RE (m)		
Senaryo No	Uygulama 4	Uygulama 6
1	1.26	0.40
2	7.39	4.33
3	31.39	0.57
4	87.59	44.13

Tablo 4.13’den görüleceği gibi, geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile iyileştirilen S/O modeli kullanılarak elde edilen RE değerleri tüm senaryolarda Uygulama 3’de elde edilenlerden daha düşüktür. Benzer durum Tablo 4.14’de de görülmektedir. Uygulama 6’da elde edilen RE değerlerinin hepsi Uygulama 4’de elde edilenlerden daha küçüktür. Her iki akifer modelinin simülasyon sayıları bakımından karşılaştırması ise sırasıyla Tablo 4.15 ve 4.16’da yapılmıştır.

Tablo 4.15 Uygulama 3 ve 5 için gerekli simülasyon sayıları

Simülasyon Sayısı		
Senaryo No	Uygulama 3	Uygulama 5
1	1450	2441
2	3750	4772
3	5150	8685
4	7250	14670

Tablo 4.16 Uygulama 4 ve 6 için gerekli simülasyon sayıları

Simülasyon Sayısı		
Senaryo No	Uygulama 4	Uygulama 6
1	6000	5511
2	9850	6226
3	33650	25467
4	45650	36914

Tablo 4.15'den görüldüğü gibi, Uygulama 5'de pompaj debileri ve RE değerleri bakımından daha iyi sonuçlar elde edilmesine karşın, tüm senaryolarda verilen durma koşulunun sağlanması için yapılması gereken simülasyon sayıları Uygulama 3'den daha fazladır. Buna karşın, Uygulama 4 ile 6 karşılaştırıldığında ise tam tersi bir durum ortaya çıkmıştır. Bu durumun aşağıda verilen sebeplerden kaynaklandığı düşünülmektedir:

Bir önceki bölümden bilindiği gibi, Uygulama 3 ve 5'in çözümünde Denklem (16) – (21)'de verilen S/O modeli kullanılmıştır. İlgili modelde, optimizasyon işleminde pompaj debileri ile birlikte kuyu yerleri de karar değişkeni olarak kullanılmıştır. Kuyu yerlerinin tanımlanmasında hesap yapılan grid noktalarının kullanılması ve Uygulama 3'de kullanılan akifer modelinin boyutlarının grid aralıkları cinsinden Uygulama 4'den daha küçük olmasından dolayı kuyu yerlerine ait çözüm uzayının büyüklüğü, Uygulama 3'de Uygulama 4'den daha küçüktür. Ayrıca, Uygulama 3'de kullanılan akifer modeli 3 iletim kapasitesi zonundan oluşmaktadır. Aynı iletim kapasitesi zonu içindeki grid noktalarında hesaplanan hidrolik yük değerleri, ilgili grid noktalarındaki iletim kapasiteleri sabit olduğu için sadece sınır koşullarından ve/veya pompaj planından etkilenmektedir. Buna karşın Uygulama 4'de, akifere ait iletim kapasitelerinin Şekil 3.5'de verildiği şekilde alansal olarak değiştiği kabul edilmiştir. Dolayısıyla, hidrolik yük değerlerinin hesaplanmasında grid noktalarındaki iletim kapasitelerinin değişimde çözümü büyük oranda etkilemekte ve Denklem (16) – (21)'de verilen S/O modeli ile kuyu yerlerinin belirlenmesi zorlaşmaktadır.

4.4.4. Uygulama 7

Buraya kadar ki kısımda, hareketli alt bölge yaklaşımı ile iyileştirilmiş S/O modelinin performansı test edilmiş ve bu yaklaşım kullanılarak pratik açıdan kabul edilebilir sonuçlar elde edilebileceği gösterilmiştir. Ancak, çözülen uygulamaların tümünde akiferde açılan pompaj kuyularının sayısının bilindiği kabul edilmiştir. Buna karşın, modelleme aşamasında çoğu zaman pompaj kuyularının sayısı tam olarak bilinmemekte ve izinsiz açılan ve/veya aşırı çekim yapılan pompaj kuyuları model kalibrasyonu sırasında ihmal edilmektedir. Bu nedenle, bu uygulamada pompaj kuyularının sayısı da dolaylı olarak bilinmeyen olarak kabul edilerek çözüm yapılmıştır.

Bu uygulamanın çözümünde, karşılaştırma amacıyla Uygulama 6 – Senaryo 3’de verilen akifer modeli kullanılmış ve yeraltı suyu akımının kararlı durumda olduğu kabul edilmiştir. Uygulama 6 ile benzer şekilde, arama sürecinin başlangıcında alt bölgelerin boyutları $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 9$ ve adım boyları ise $\delta x = \delta y = 4$ olarak kabul edilmiş ve $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 3$ ve $\delta x = \delta y = 1$ olduğu durumda arama işlemi sona erdirilmiştir. Optimizasyon işleminde pompaj debilerinin alt ve üst sınırları sırasıyla $Q_{\min} = 0$ ve $Q_{\max} = 20,000 \text{ m}^3 / \text{gün}$ olarak seçilmiş ve Uygulama 5 ve 6’nın çözümünde kullanılan GA çözüm parametreleri kullanılmıştır:

Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile $c = 1 - 7$ için elde edilen sonuçlar Tablo 4.17’de verilmiştir.

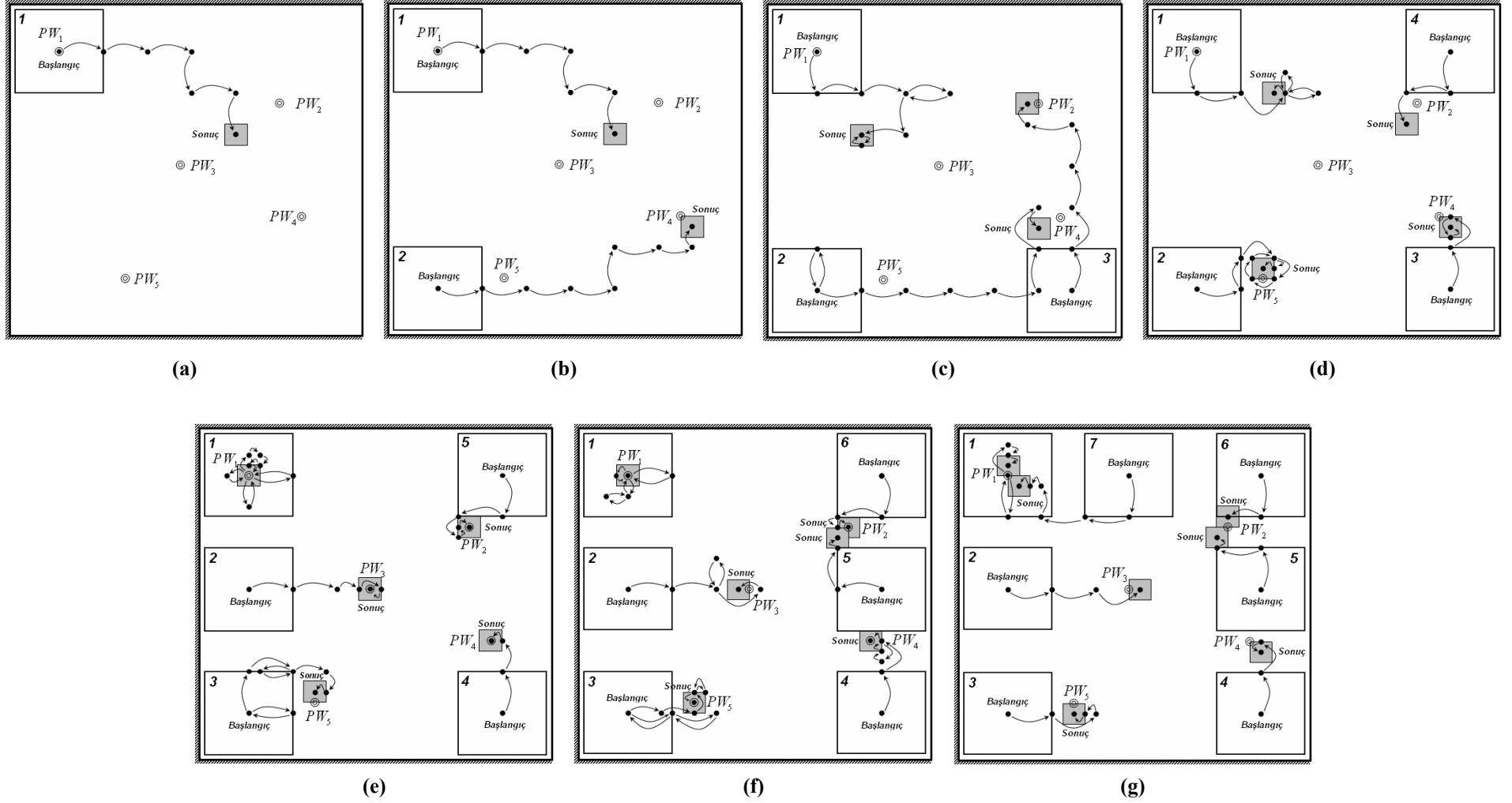
Tablo 4.17 Farklı kuyu sayıları için hareketli alt bölge yaklaşımının verdiği sonuçlar

Kuyu Sayısı (c)	$(I_k, J_k)_m$	(I_k, J_k)	$Q(I_k, J_k)$ ($\text{m}^3 / \text{gün}$)	RE (m)	Simülasyon Sayısı
1	(5,5)	(21,13)	14991	1191.38	2754
2	(5,5) (5,28)	(21,13) (28,22)	13236 3252	585.44	6776
3	(5,5) (5,28) (28,28)	(9,13) (25,22) (24,10)	7052 5932 4738	108.77	11950
4	(5,5) (5,28) (28,28) (28,5)	(12,9) (11,26) (28,22) (24,12)	6680 2924 3874 4945	71.97	14422
5	(5,5) (5,16) (5,28) (28,28) (28,5)	(5,5) (16,16) (11,26) (27,21) (25,10)	4097 3831 1806 4010 4004	0.57	25467
6	(5,5) (5,16) (5,28) (28,28) (28,16) (28,5)	(5,5) (15,16) (11,27) (27,21) (24,11) † (25,10) †	3738 3882 2543 3997 1932 2288	6.35	28031
7	(5,5) (5,16) (5,28) (28,28) (28,16) (28,5) (16,5)	(5,4) † (17,16) (11,28) (28,22) (24,11) * (25,9) * (6,6) †	2052 3380 2651 3930 3454 1049 2216	7.37	29614

†, * : Aynı pompaj kuyularının civarında bulunan sonuçlar

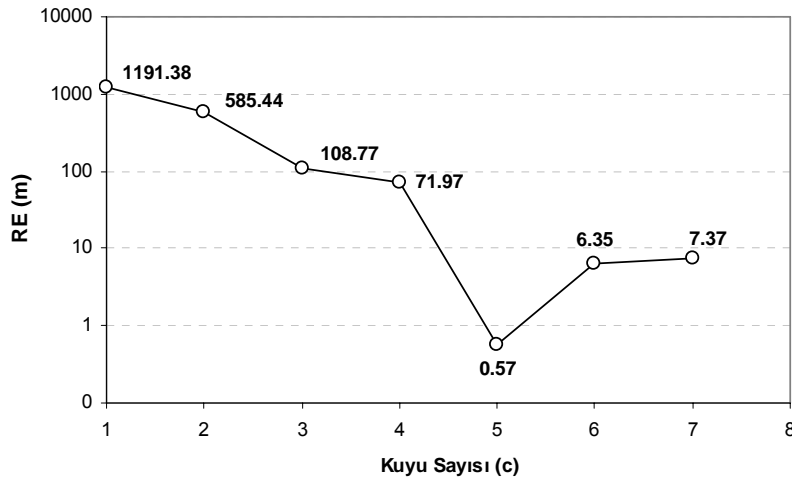
Tablo 4.17'den görüleceği gibi, $c = 1$ için çözüm bölgesinde sadece 1 pompaj kuyusunun aktif olarak çalıştığı kabul edilmektedir. Alt bölge araştırma işlemine (5,5) noktasından başlamış ve sonuç olarak $c = 1$ için kuyu yerini (21,13) olarak bulmuştur. (21,13) noktası için optimize edilmiş pompaj debisi $14991 \text{ m}^3 / \text{gün}$ 'dür. Kuyu karakteristikleri toplam 2754 simülasyon sonucu belirlenmiş ve optimizasyon işleminin sonunda RE değeri 1191.38 olarak elde edilmiştir. Bu sonuç gözlem kuyularında hesaplanan ve gözlenen hidrolik yük değerlerinin iyi uyum içerisinde olmadığını ve dolayısıyla, pompaj kuyularının sayısının 1'den çok olması gerektiği anlamına gelmektedir. $c = 2$ için, alt bölgeler (5,5) ve (5,28) noktalarından arama işlemine başlamış ve sonuç olarak sırasıyla (21,13) ve (28,22) noktalarını kuyu yerleri olarak belirlemiştir. Kuyu yerleri belirlendikten sonra her bir kuyu için ilgili pompaj debisi sırasıyla $13236 \text{ m}^3 / \text{gün}$ ve $3252 \text{ m}^3 / \text{gün}$ olarak belirlenmiştir. $c = 2$ için toplam 6776 simülasyon yapılmış ve optimizasyon sonucunda RE değeri 585.44 olarak elde edilmiştir. Görüleceği gibi pompaj kuyularının sayısının 1'den 2'ye çıkması RE değerini büyük oranda düşürmüştür. Bu nedenle, geliştirilen çözüm yaklaşımı ile en iyi kuyu sayısı ve yerleşimi elde edilinceye kadar kuyu sayısını bir arttırarak çözüm yapılmıştır.

$c = 1, 2, 3, \dots, 7$ için elde edilen çözümler Şekil 4.11'de verilmiştir. Görüleceği gibi, gerçek kuyu sayısının \tilde{c} olması durumunda, $c < \tilde{c}$ için global ya da global optimuma yakın sonuçların elde edilememektedir. Buna karşın, kuyu sayısının $c = \tilde{c} + c'$ ($c' > 0$) olması durumunda, mevcut kuyu sayısı \tilde{c} adet kuyunun etkisi altında kalmaktadır. Yani, c' adet kuyu yeni pompaj kuyularından oluşmayacaktır (Tung ve Chou 2004). Bu durum Tablo 4.17 ve Şekil 4.11'den de açıkça görülebilmektedir. Çözülen problem gerçekte 5 adet kuyu içermekte ve $c = 6$ ve $c = 7$ için problemin çözümü yine $c = 5$ için elde edilen çözüme yaklaşmaktadır. $c = 6$ için 5. ve 6. alt bölgeler kuyu yerlerini PW_2 'in etrafında bulmuşlardır. Elde edilen pompaj debileri sırasıyla $1932 \text{ m}^3 / \text{gün}$ ve $2288 \text{ m}^3 / \text{gün}$ 'dür. Benzer şekilde $c = 7$ için, 1. ve 7. alt bölgeler PW_1 'in etrafında; 5. ve 6. alt bölgeler ise PW_2 'ün etrafında kuyu yerlerini belirlemişlerdir. 1. ve 7. alt bölgeler için elde edilen pompaj debileri sırasıyla $2052 \text{ m}^3 / \text{gün}$ ve $2236 \text{ m}^3 / \text{gün}$; 5. ve 6. alt bölgeler için ise $3454 \text{ m}^3 / \text{gün}$ ve $1049 \text{ m}^3 / \text{gün}$ 'dür.



Şekil 4.11 Gerçek ve belirlenen kuyu yerleri; (a): $c = 1$, (b): $c = 2$, (c): $c = 3$, (d): $c = 4$, (e): $c = 5$, (f): $c = 6$, (g): $c = 7$

$c=1,2,3,\dots,7$ için RE değerlerinin değişimi ise Şekil 4.12’de verilmiştir. Görüleceği gibi kuyu sayısı $c=5$ ’e yaklaştıkça RE değeri azalmakta ve $c=6$ ve $c=7$ için tekrar artmaktadır. Buna karşın, $c=5$ ’den sonra RE değerindeki artış çok belirgin olmamaktadır. Bu sonuç incelenen problem için gerçek kuyu sayısının $c=5$ olduğunu; $c=6$ ve $c=7$ çözümlerinin de $c=5$ çözümü ile benzer çözümü verdiğini göstermektedir.



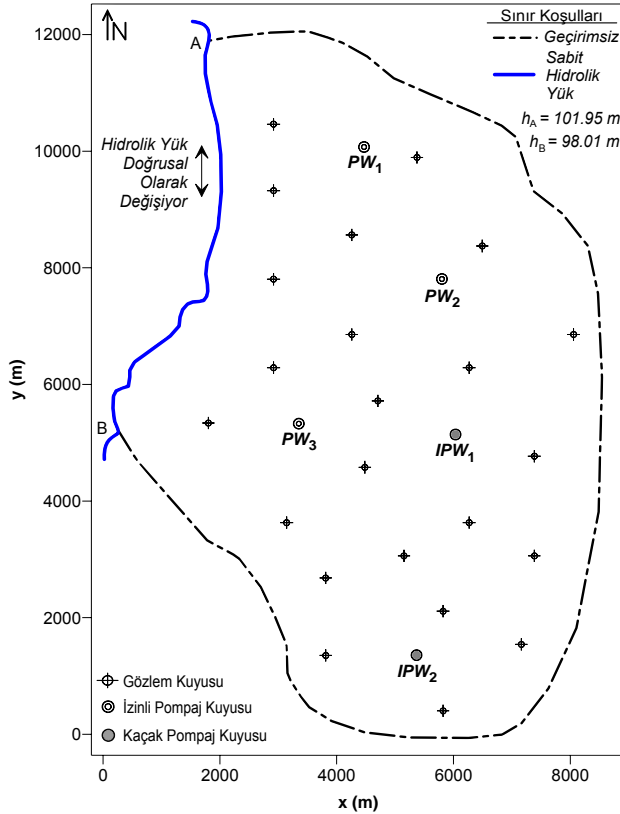
Şekil 4.12 Farklı kuyu sayıları için RE değerlerinin değişimi

4.4.5. Uygulama 8

Bir önceki uygulamada, geliştirilen çözüm yaklaşımı ile kararlı yeraltı suyu akımı için akiferde açılan kuyu sayıları ve pompaj debileri belirlenmiştir. Yapılan çözümlerin tümünde basit akifer geometrisi kullanılmıştır. Buna karşın, akifer geometrileri pratikte karmaşık olabilmektedir. Ayrıca, zamanla değişen yağış/akış ve pompajdan dolayı kararlı akım durumu için yapılan analizler akifer davranışını doğru olarak temsil edemebilmektedir. Bu nedenle, bu uygulamada zamana bağlı akım durumu ve karmaşık akifer geometrisi için geliştirilen modelin performansı test edilmiştir. Bu uygulama kapsamında kullanılan ve EMRL’den (2005) esinlenilerek oluşturulan 2-boyutlu kavramsal basınçlı akifer modeli Şekil 4.13’de verilmiştir.

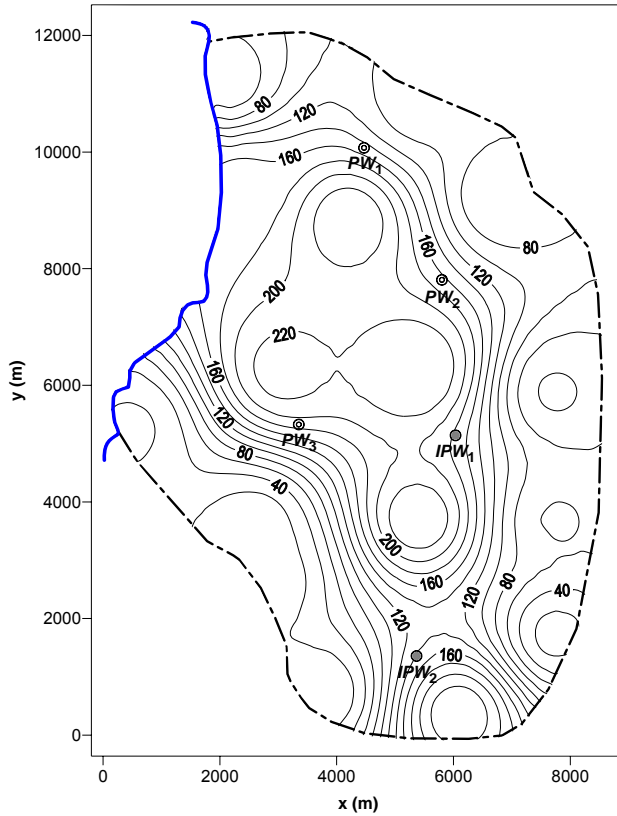
Şekil 4.13’den görüleceği gibi, akifer A ile B noktaları arasında doğrusal olarak değişen sabit hidrolik yük ve diğer yönlerde geçirimsiz sınır koşullarına sahiptir. A ve B noktalarındaki hidrolik yük değerleri sırasıyla 101.95 m ve 98.01 m’dir. Akiferin toplam

yüzey alanı 72 km^2 , maksimum yatay ve düşey boyutları ise sırasıyla 8.36 km and 12.16 km 'dir. Akiferin özgül depolama katsayısı 0.0001 olarak alınmıştır. Bu uygulama kapsamında da akiferin heterojen izotrop olduğu kabul edilmiştir. Çözümde kullanılan iletim kapasitesi dağılımı Şekil 4.14'de verilmiştir. İletim kapasitelerinin tüm grid noktalarında bilindiği kabul edilmiştir.

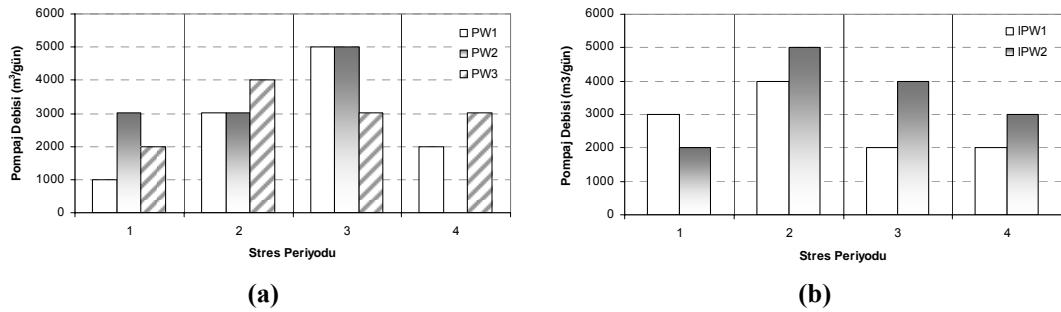


Şekil 4.13 Kullanılan 2-boyutlu kavramsal basınçlı akifer modeli

Akifer üzerinde 3'ü izinli (*PW*) ve 2'si kaçak (*IPW*) olmak üzere toplam 5 adet pompaj kuyusu bulunmaktadır. Ancak, kaçak pompaj kuyuları hakkında hiç bir ön bilgi bulunmamaktadır. Bu uygulamada, kaçak pompaj kuyularının sayılarının, yerlerinin ve zamanla değişen pompaj debilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kaçak pompaj kuyularının gerçek yerleri satır ve sütun numaraları cinsinden sırasıyla: (27,40) ve (24,60)'dır. Akifer üzerindeki pompaj kuyularının tümü, her birinin uzunluğu 90 gün olan 4 stres periyodu altında işletilmektedir. İzinli ve kaçak pompaj kuyularından her bir stres periyodunda çekilen debiler Şekil 4.15'de verilmiştir.



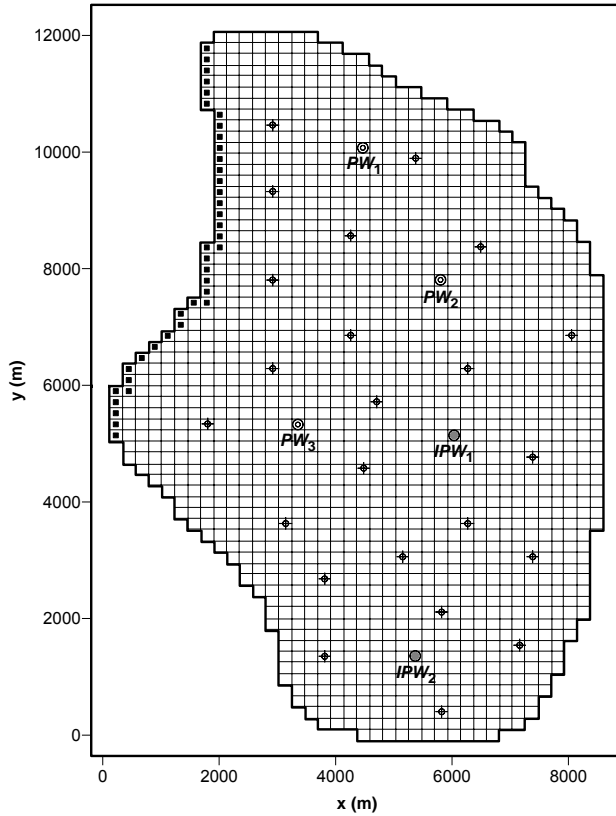
Şekil 4.14 Kullanılan iletim kapasitesi dağılımı ($m^2/gün$)



Şekil 4.15 (a): İzinli pompaj kuyularından çekilen debiler; (b): Kaçak pompaj kuyularından çekilen debiler

Simülasyon modelinin çalıştırılabilmesi için Şekil 4.13'de verilen kavramsal akifer modeli, boyutları $220\text{ m} \times 190\text{ m}$ olan dikdörtgen grid bloklarına ayrılmıştır. Çözüm bölgesinin grid bloklarına ayrılmış hali Şekil 4.16'da verilmiştir.

Akifer üzerinde hidrolik yük değerlerinin ölçüldüğü 23 gözlem kuyusu bulunmaktadır. Gözlem kuyularının tümü için ilgili stres periyotlarının sonunda seviye okuması yapıldığı kabul edilmiştir. Gözlem kuyularının akifer üzerindeki dağılımı Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Çözüm bölgesinin grid bloklarına ayrılmış hali

Bu uygulama kapsamında da tüm gözlem verileri simülasyon modelinin çalıştırılması ile elde edilmiştir. Önceki uygulamalara benzer şekilde ölçüm hatalarını dikkate almak amacıyla tüm gözlem verilerine normal dağılıma uygun, ortalaması 0 ve standart sapması 0.10 m olan hata verisi eklenmiştir. Bu uygulama için optimizasyon modelinde kullanılacak karar değişkenleri her bir stres periyodundaki pompaj debileridir. Arama sürecinin başlangıcında alt bölgelerin boyutları $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 11$ ve adım boyları ise $\delta x = \delta y = 5$ olarak kabul edilmiş ve $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 3$ ve $\delta x = \delta y = 1$ olduğu durumda arama işlemi sona erdirilmiştir. Pompaj debilerinin alt ve üst sınırları $0 \leq \hat{Q}(I_k, J_k) \leq 20,000 \text{ m}^3 / \text{gün}$ olarak verilmiş ve tüm çözümlerde aşağıda verilen GA çözüm parametreleri kullanılmıştır.

	<u>1. Aşama</u>	<u>2. Aşama</u>
Toplum büyüklüğü (m)	50	50
Çaprazlama olasılığı (p_c)	0.50	0.50
Mutasyon olasılığı (p_m)	0.05	0.05
Değişim simülasyon sayısı (st')	50	500
Tolerans (ε)	10^{-5}	10^{-5}

$c=1,2,3$ için elde edilen sonuçlar Tablo 4.18’de verilmiştir. Tablo 4.18’den görüleceği gibi, $c=1$ için akifer üzerinde sadece 1 alt bölgenin aktif olduğu kabul edilmiştir. İlgili alt bölge (14,11) noktasından arama sürecine başlamış ve (23,58) noktasını çözüm olarak bulmuştur. Bu çözüm için elde edilen RE değeri 142.91’dir ve bu sonuç 13503 simülasyon işlemi sonunda elde edilmiştir. $c=2$ için akifer üzerinde 2 alt bölgenin aktif olduğu kabul edilmiştir. Her iki alt bölgede arama sürecine (14,11) noktasından başlanmış ve (27,40) ve (24,60) noktaları sırasıyla birinci ve ikinci alt bölgeler tarafından çözüm olarak bulunmuştur. Bu durumda elde edilen RE değeri 0.90 ve gerekli simülasyon sayısı ise 32031’dir. $c=3$ için de aynı çözüm işlem yapılmıştır. Bu durum için de arama işlemi (14,11) noktasından başlamış ve alt bölgeler sırasıyla (27,40), (24,60) ve (27,41) noktalarını çözüm olarak bulmuşlardır.

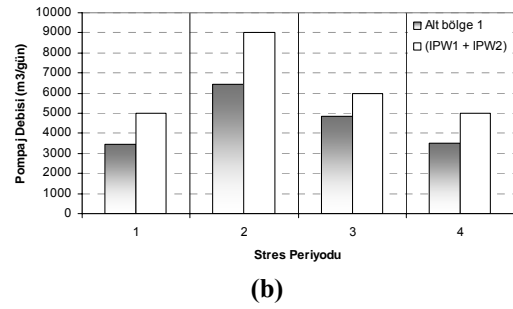
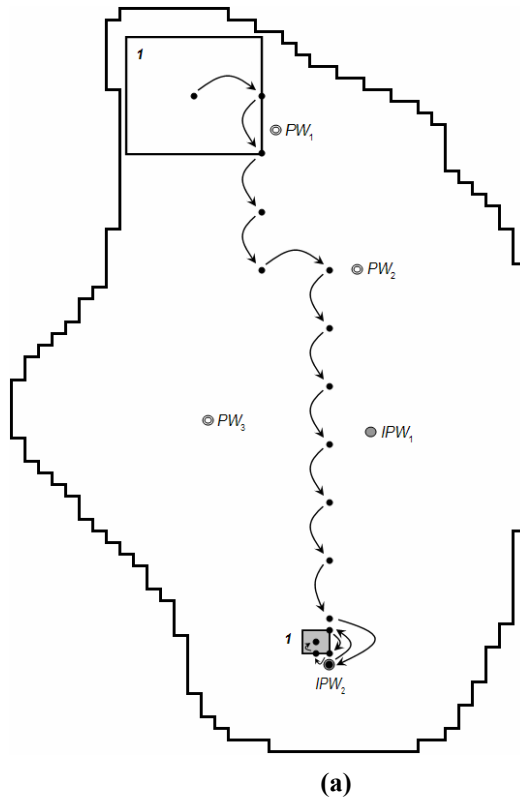
Elde edilen bu sonuçlar, $c=3$ için elde edilen kuyu yerlerinin $c=2$ için elde edilenlere yakınsadığını göstermektedir. $c=3$ için RE değeri 1.03, gerekli simülasyon sayısı ise 39331 olarak elde edilmiştir.

Tablo 4.18 $c=1,2,3$ için hareketli alt bölge yaklaşımının verdiği sonuçlar

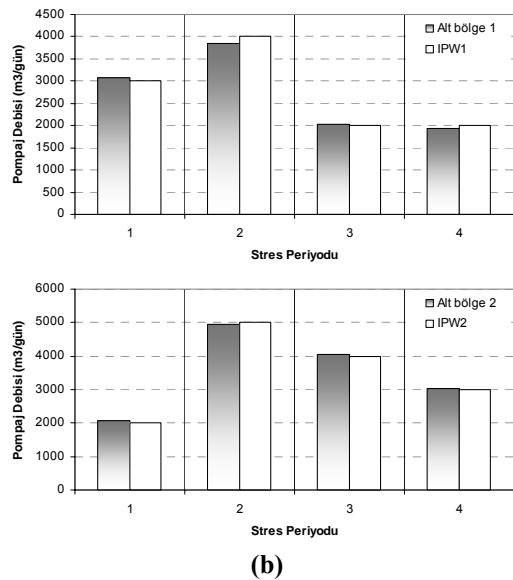
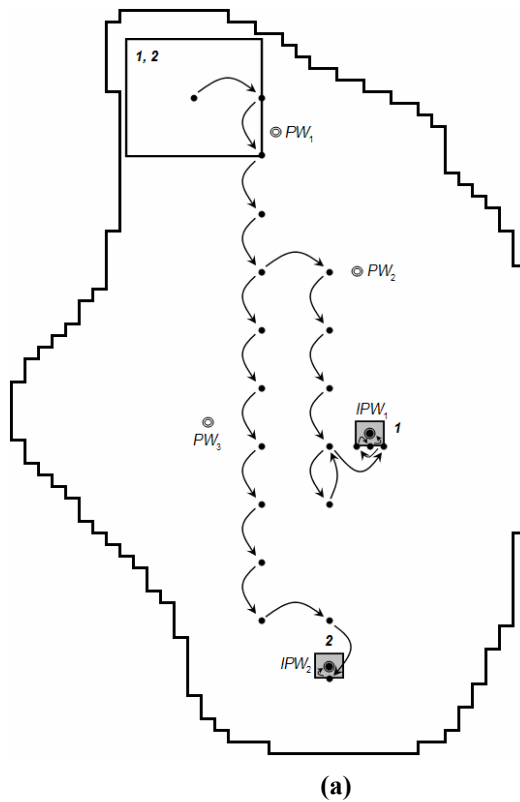
Kuyu Sayısı (c)	Alt Bölge Numarası	$(I_k, J_k)_{in}$	(I_k, J_k)	Her bir stres periyodu için belirlenen pompaj debileri ($m^3/gün$)				RE (m)	Simülasyon Sayısı
				1	2	3	4		
1	1	(14,11)	(23,58)	3479	6419	4842	3513	142.91	13503
2	1	(14,11)	(27,40)	3087	3841	2024	1944	0.90	32031
	2	(14,11)	(24,60)	2081	4937	4039	3026		
3	1 †	(14,11)	(27,40)	3050	1432	1866	1305	1.03	39331
	2	(14,11)	(24,60)	1898	5153	3848	3067		
	3 †	(14,11)	(27,41)	221	2117	380	650		

†: Aynı pompaj kuyularının civarında bulunan sonuçlar

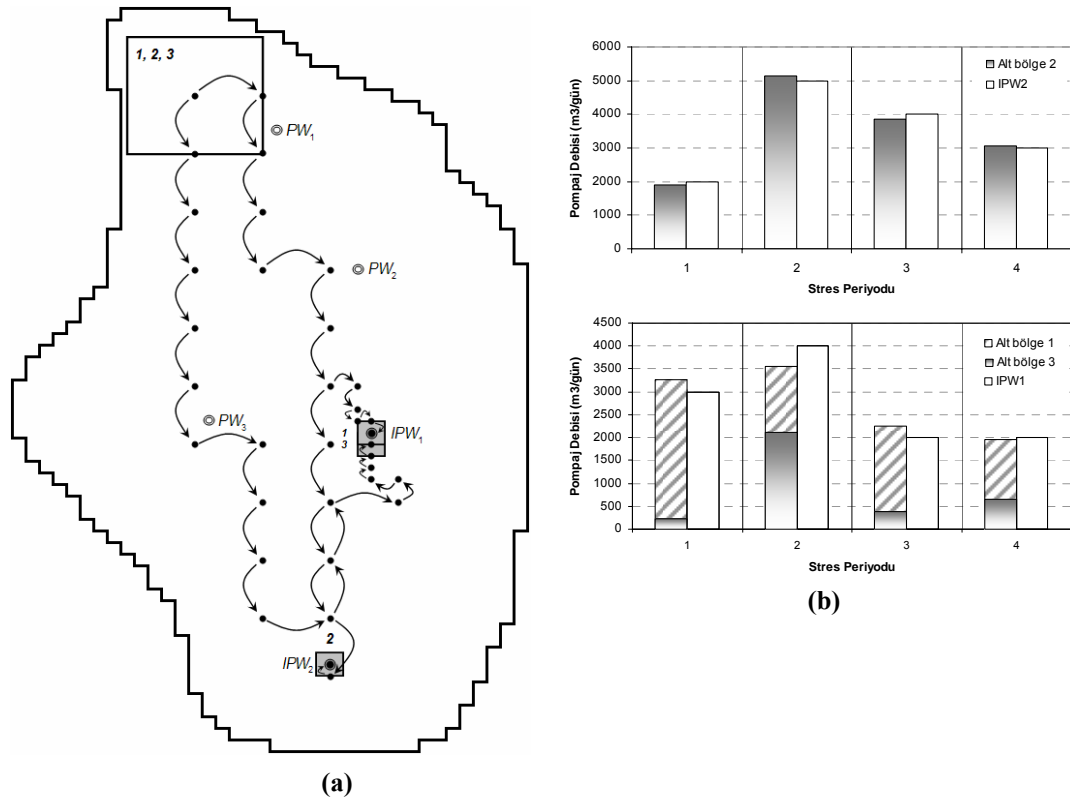
Her üç çözüm için alt bölgelerin akifer üzerindeki hareketi ve belirlenen kuyu yerleri için optimize edilen pompaj debilerinin gerçek pompaj debileri ile karşılaştırılması Şekil 4.17-4.19’da yapılmıştır.



Şekil 4.17 (a): $c=1$ için gerçek ve belirlenen kuyu yerleri; (b): $c=1$ için gerçek ve hesaplanan pompaj debilerinin karşılaştırılması



Şekil 4.18 (a): $c=2$ için gerçek ve belirlenen kuyu yerleri; (b): $c=2$ için gerçek ve hesaplanan pompaj debilerinin karşılaştırılması



Şekil 4.19 (a): $c = 3$ için gerçek ve belirlenen kuyu yerleri; **(b):** $c = 3$ için gerçek ve hesaplanan pompaj debilerinin karşılaştırılması

Şekil 4.17-4.19'dan görüldüğü gibi, $c = 1$ için doğru sonuç elde edilememiş, buna karşın $c = 2$ ve $c = 3$ için hem kuyu yerleri hem de zamanla değişen pompaj debileri bakımından yaklaşık olarak aynı çözüm bulunmaktadır. Sonuç olarak bu uygulama için izinsiz açılan pompaj kuyularının sayısının $c = 2$ olduğu ve kuyu yerlerinin ve pompaj debilerinin ise Şekil 4.18'de verildiği gibi olduğu söylenebilmektedir.

4.5. Sonuçların İrdelenmesi

Bu bölümde, bir önceki bölümde geliştirilen S/O modelinin performansını arttırmak amacıyla “Hareketli alt bölge yaklaşımı” adı verilen bir çözüm tekniği geliştirilmiş ve S/O modeli ile birleştirilmiştir. Geliştirilen model ile Bölüm 3’de çözülen Uygulama 3 ve 4’ün aynı koşullar altında çözümü yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, kararlı durum için pompaj kuyularının sayılarının, ve zamana bağlı akım durumu ve karmaşık akifer geometrisi için izinsiz açılan pompaj kuyularının belirlenebildiği iki sayısal uygulama çözülmüştür. Yapılan analizlerden aşağıdaki sonuçlara varılabilir:

- i)* Geliştirilen yaklaşımda, pompaj kuyularının yerleri alt bölgelerle belirlenmekte ve belirlenen kuyu yerleri için GA ile ilgili pompaj debilerinin optimizasyonu yapılmaktadır. Önerilen yaklaşımının en önemli avantajı optimizasyon işleminde kuyu yerlerinin karar değişkeni olarak kullanılmasına gerek kalmamasıdır. Ayrıca, çözümün alt bölgelerin içinde aranması sonucu çözüme ulaşmak için yapılacak gereksiz simülasyonlar önlenmektedir.
- ii)* Geliştirilen yaklaşım ile Uygulama 3 ve 4'ün çözümü yapılmış ve tüm senaryolar için daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, küçük çözüm bölgelerinde, Bölüm 3'de geliştirilen S/O modeli ile hareketli alt bölge yaklaşımına göre daha düşük simülasyon sayısı ve bilgi işlem sürelerinde çözüme ulaşılmıştır.
- iii)* Geliştirilen yaklaşım ile, kararlı/zamana bağlı akım durumları ve karmaşık akifer geometrileri için bir akiferdeki kuyu sayıları da dolaylı olarak belirlenebilmektedir. Elde edilen sonuçlar, belirlenen kuyu sayısının gerçek kuyu sayısından fazla olması durumunda da bulunan sonuçların gerçek çözüme yakınsadığını göstermiştir.

5. DUYARLILIK ANALİZİ

5.1. Giriş

Bir önceki bölümden görüleceği gibi, hareketli alt bölge yaklaşımı ile iyileştirilen S/O modeli kullanılarak kuyu sayılarının, pompaj debilerinin ve kuyu yerlerinin bilinmemesi durumunda pompaj kuyularının karakteristikleri belirlenebilmektedir. Buna karşın, detaylı analiz gerektiren bazı konular bulunmaktadır. Bu konular sırasıyla aşağıda verilmiştir:

- i) Geliştirilen yaklaşım ile pompaj kuyularının karakteristiklerinin belirlenebilmesi için her bir alt bölge için bir başlangıç noktasının verilmesi gereklidir. Optimizasyon işleminin verdiği sonuçlara göre alt bölgelerin hareket yönleri belirlenmekte ve kuyu yerlerine doğru hareket etmektedir. Ancak, farklı başlangıç noktaları için alt bölgelerin daima doğru sonucu bulup bulmadığının test edilmesi gereklidir.
- ii) Hareketli alt bölge yaklaşımı ile kuyu karakteristiklerinin belirlemedeki diğer bir önemli konu da alt bölgelerin başlangıç boyutlarının doğru bir şekilde seçilmesidir. Alt bölge boyutlarının doğru bir şekilde seçilmemesi lokal optimum sonuçların elde edilmesine ya da çözüme ulaşmak için gerekli simülasyon sayısının artmasına neden olabilmektedir.
- iii) İyileştirilmiş S/O modeli ile kuyu karakteristiklerinin belirlenmesinde gözlem kuyularında ölçülen seviye değerleri kullanılmaktadır. Ancak, geliştirilen modelin doğru sonuçlar verebilmesi için gözlem kuyularının sayısının ne olması gerektiğinin belirlenmesi gereklidir.
- iv) Diğer bir önemli konu da gözlem kuyularında ölçülen değerlerdeki ölçüm hatalarıdır. Buraya kadar yapılan analizlerin tümünde gözlem değerlerine normal dağılıma uyan, ortalaması 0 ve standart sapması 0.10 m olan hata verisi eklenmiştir.

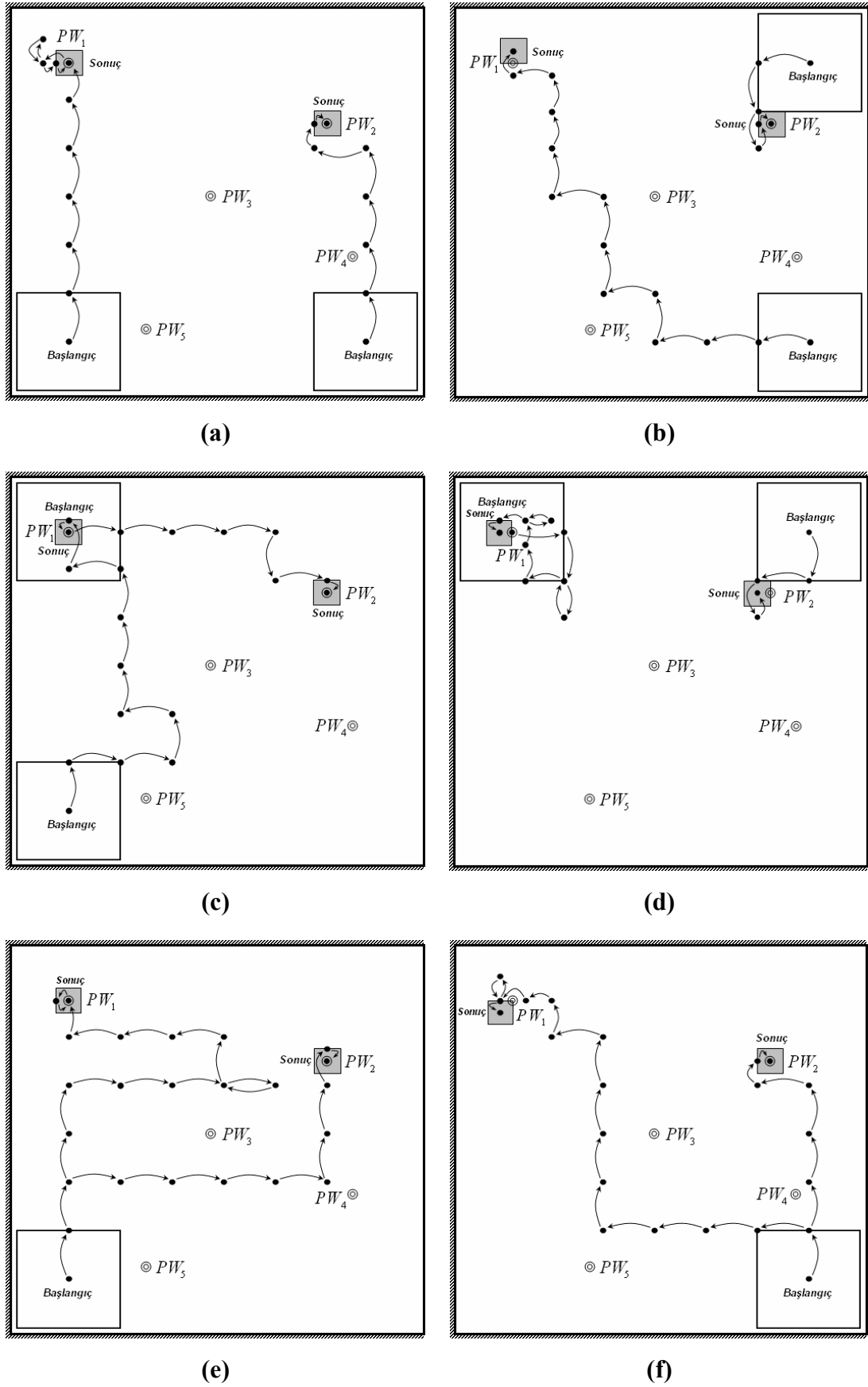
Ancak, farklı büyüklükteki hata verileri için de modelin performansının test edilmesi gerekmektedir.

- v) Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı, alt bölgeler içinde önceden tanımlı çözüm noktalarına pompaj kuyularının sırasıyla atanarak pompaj debilerinin optimize edilmesi prensibine dayanmaktadır. İlgili çözüm noktaları için yapılan optimizasyon işlemi Denklem (15)'de verilen durma koşulu sağlanıncaya kadar devam etmektedir. Ancak, durma koşulu olarak Denklem (15)'in kullanılabilmesi için değişim simülasyon sayısının (st') verilmesi gereklidir. Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile yapılan analizlerin tümünde, kuyu yerleri belirlenirken st' değeri 20 olarak verilmiştir. Ancak, farklı st' değerleri için geliştirilen modelin performansının test edilmesi gereklidir.
- vi) Geliştirilen çözüm yaklaşımı, optimizasyon modelinde GA optimizasyon tekniğini kullanmaktadır. Sezgisel bir optimizasyon tekniği olan GA ile çözüm yapılabilmesi için; toplum büyüklüğü (m), çaprazlama oranı (p_c), mutasyon oranı (p_m) gibi parametreler gereklidir. Buraya kadar çözülen uygulamaların tümünde kuyu yerleri belirlenirken (1. aşama): $m=10$, $p_c=0.50$ ve $p_m=0.15$ alınmıştır. Dolayısıyla, geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımının performansının farklı parametre değerleri için de test edilmesi gereklidir.

Bu bölümde, yukarıda verilen durumların model performansı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla detaylı bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Duyarlılık analizinin çözümünde, Uygulama 6 – Senaryo 1'de verilen akifer modeli kullanılmıştır. Yapılan analizlerin tümünde Uygulama 6 ile aynı çözüm parametreleri kullanılmıştır.

5.2. Farklı Başlangıç Noktaları için Model Performansının Test Edilmesi

Bu bölümde, geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımının performansı farklı başlangıç noktaları için test edilmiştir. İncelenen durumda, $PW_3 - PW_5$ kuyularının yerlerinin ve pompaj debilerinin bilindiği, buna karşın PW_1 ve PW_2 'nin bilinmediği kabul edilmiştir. Başlangıç koordinatları bakımından 6 farklı senaryo dikkate alınmıştır. PW_1 ve PW_2 'nin yerlerinin belirlenmesi esnasında alt bölgelerin akifer üzerindeki hareketi ve Şekil 5.1'de detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Farklı başlangıç noktaları için kuyu yerlerinin belirlenmesi; (a): Senaryo 1; (b): Senaryo 2;(c): Senaryo 3; (d): Senaryo 4; (e): Senaryo 5; (f): Senaryo 6

Şekil 5.1'den görüleceği gibi, ilk 4 senaryoda alt bölgeler farklı, son iki senaryoda ise aynı başlangıç noktalarından arama işlemine başlamışlar ve her durumda da çözüme ulaşmışlardır. PW_1 ve PW_2 için başlangıç koordinatları ve belirlenen kuyu karakteristiklerinin gerçek sonuçlarla karşılaştırılması Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Farklı başlangıç noktaları için belirlenen kuyu karakteristikleri

Senaryo No	Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k)$ ($m^3 / gün$)			RE (m)	Simülasyon Sayısı
		Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
1	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4001	0.02	0.40	5511
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3998	0.06		
2	PW_1	(28,5)	(5,4)	(5,5)	4000	3980	0.50	0.63	7399
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3998	0.05		
3	PW_1	(5,5)	(5,5)	(5,5)	4000	4000	0.01	0.40	5390
	PW_2	(5,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3998	0.04		
4	PW_1	(5,5)	(4,5)	(5,5)	4000	3965	0.88	1.27	5897
	PW_2	(28,5)	(25,10)	(25,10)	4000	4021	0.54		
5	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4000	0.01	0.40	6693
	PW_2	(5,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3998	0.04		
6	PW_1	(28,28)	(4,6)	(5,5)	4000	4014	0.35	1.10	6940
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	4012	0.30		

Tablo 5.1'den görüleceği gibi, Senaryo 1, 3 ve 5'de her iki kuyu için gerçek kuyu yerleri bulunmuş, buna karşın Senaryo 2, 4, ve 6'da PW_2 için gerçek kuyu yerleri belirlenmiş, PW_1 için gerçek kuyu yerinin yanındaki grid noktası çözüm olarak bulunmuştur. Belirlenen kuyu yerleri için hesaplanan pompaj debileri arasındaki maksimum göreceli hata değeri % 0.88'dir. Optimizasyon işlemi sonucu elde edilen maksimum RE değeri ise 1.27'dir. Görüleceği gibi, başlangıç noktalarının değişmesi sonucu alt bölgeler ile çözüme ulaşmak için yapılması gereken simülasyon sayıları değişim göstermektedir.

5.3. Alt Bölge Boyutları için Model Performansının Test Edilmesi

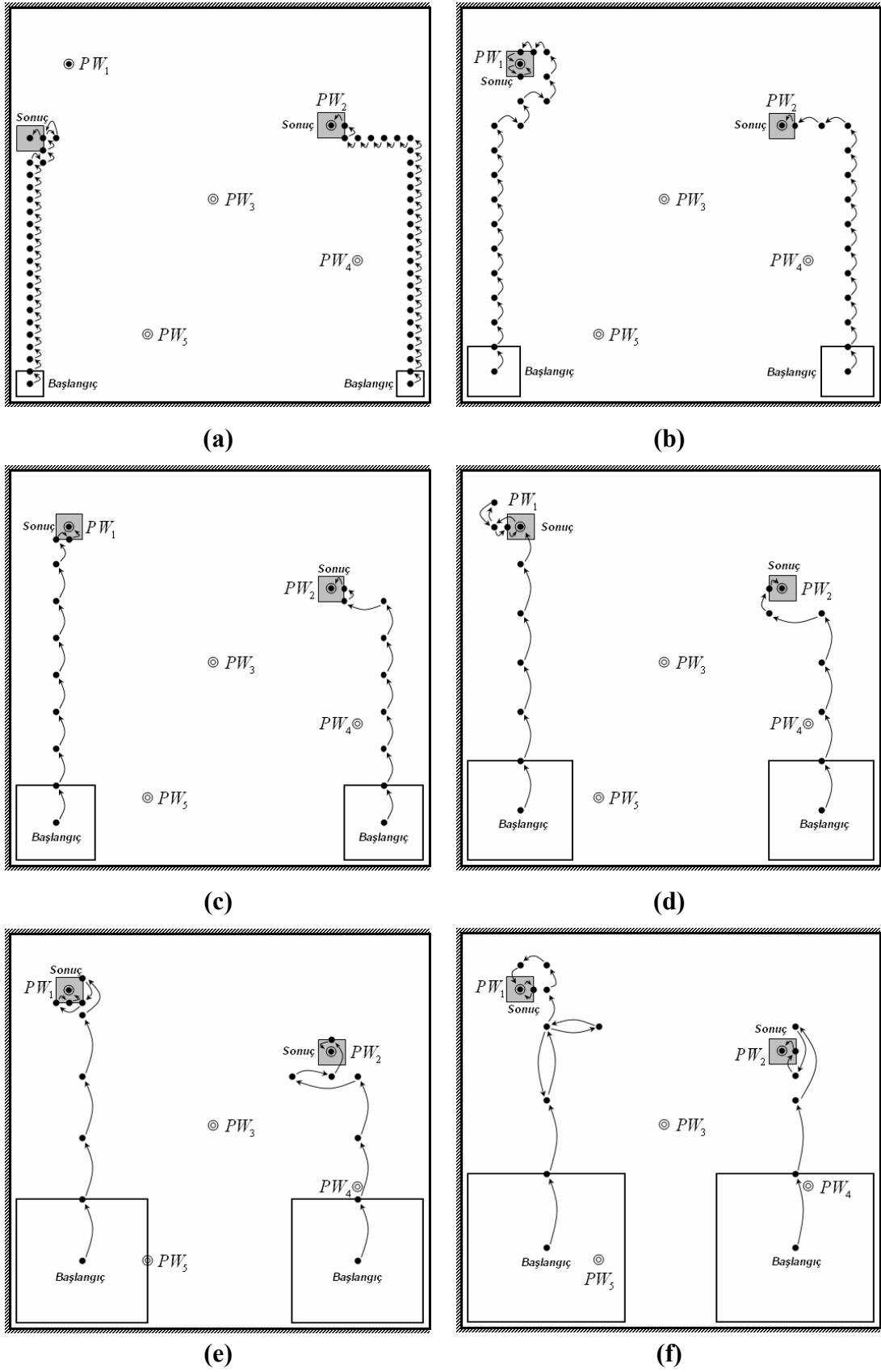
Buraya kadar yapılan analizlerden görüleceği gibi, hareketli alt bölge yaklaşımı ile iyileştirilen S/O modeli kullanılarak pompaj kuyularının karakteristikleri etkin bir şekilde belirlenebilmektedir. Ancak, geliştirilen yaklaşımda alt bölgelerin arama

sürecinin başlangıcındaki boyutlarının $(\Delta\hat{x}, \Delta\hat{y})$ doğru seçilmesi gerekmektedir. Alt bölge boyutlarının başlangıçta küçük seçilmesi kuyu yerlerine ulaşmak için gerekli simülasyon sayısını arttırdığı gibi lokal optimum çözümlerin de elde edilmesine, buna karşın büyük verilmesi ise çözüm uzayını büyüttüğünden dolayı gerekli simülasyon sayısının artmasına yol açmaktadır. Bu çalışma kapsamında Uygulama 6'nın çözümünde alt bölgelerin başlangıç boyutları kullanılan grid aralıkları cinsinden $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 9$ olarak verilmiştir. Bu bölümde ise, $\Delta\hat{x}$ ve $\Delta\hat{y}$ boyutlarının 3, 5, 7, 11 ve 13 olması durumları için geliştirilen yaklaşımın performansı test edilmiştir. Geliştirilen S/O modelinin hareketli alt bölge yaklaşımı ile farklı $\Delta\hat{x}$ ve $\Delta\hat{y}$ değerleri için çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçlar Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2 Farklı alt bölge boyutları için belirlenen kuyu karakteristikleri

$\Delta\hat{x}, \Delta\hat{y}$	Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE (m)	Simülasyon Sayısı
		Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
3	PW_1	(5,28)	(2,11)	(5,5)	4000	4216	5.40	15.83	11744
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	4036	0.91		
5	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4000	0.00	0.40	8253
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3998	0.05		
7	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4000	0.00	0.40	6425
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3998	0.05		
9	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4001	0.02	0.40	5511
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3998	0.06		
11	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	3991	0.22	0.41	8047
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	4005	0.12		
13	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4000	0.01	0.40	8594
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3998	0.04		

Tablo 5.2'den görüleceği gibi, $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 3$ durumunda, PW_1 kuyusunun yeri doğru olarak belirlenememiştir. Alt bölge boyutlarının $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} \geq 5$ olması durumunda ise kuyu yerleri ile pompaj debileri bakımından etkili sonuçlar elde edilmektedir. Ancak, $\Delta\hat{x}$ ve $\Delta\hat{y}$ değerlerinin değişimi, sonuca ulaşmak için gerekli simülasyon sayılarını büyük oranda etkilemektedir. Tablo 5.2'den görüleceği gibi, çözüme ulaşmak gerekli simülasyon sayıları $\Delta\hat{x}$ ve $\Delta\hat{y}$ değerleri 9'a yaklaştıkça azalmakta, 9'dan büyüdükçe artmaktadır. Farklı $\Delta\hat{x}$ ve $\Delta\hat{y}$ değerleri için alt bölgelerin akifer üzerindeki hareketi ise Şekil 5.2'de verilmiştir.

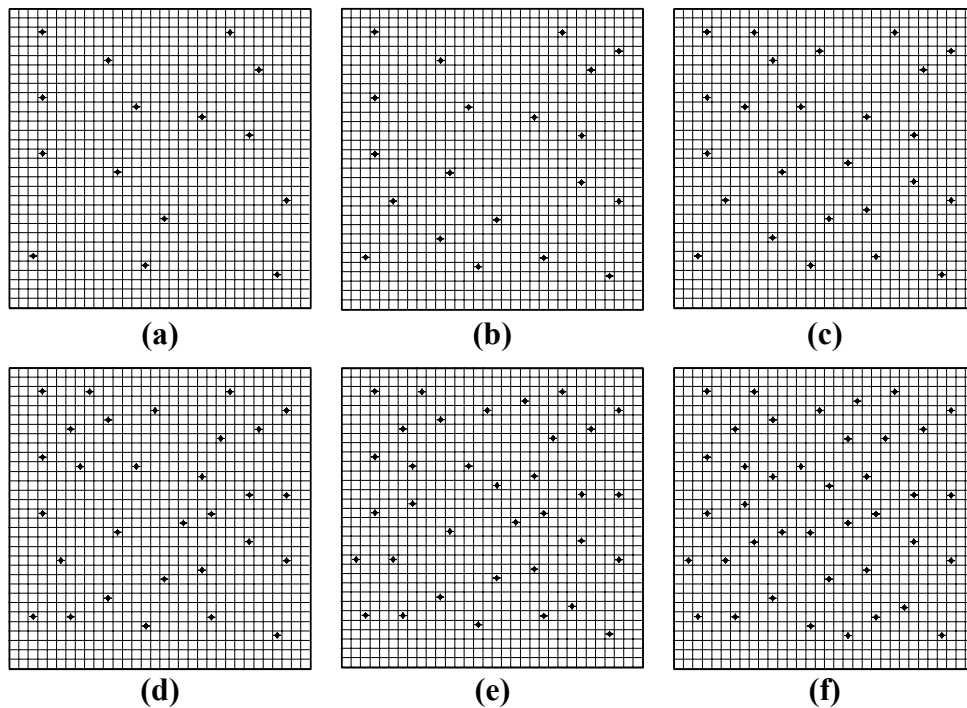


Şekil 5.2 Farklı alt bölge boyutları için kuyu yerlerinin belirlenmesi; (a): $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 3$; (b): $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 5$; (c): $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 7$; (d): $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 9$; (e): $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 11$; (f): $\Delta\hat{x} = \Delta\hat{y} = 13$

Şekil 5.2'den görüleceği gibi, özellikle küçük $\Delta\hat{x}$ ve $\Delta\hat{y}$ 'ler için hesap yapılan grid noktalarının sayısı ve dolayısıyla çözüme ulaşmak için gerekli simülasyon sayıları artmaktadır. Buna karşın, büyük $\Delta\hat{x}$ ve $\Delta\hat{y}$ değerleri için kuyu yerlerine ait çözüm uzayı büyümekte, ve yine çözüme ulaşmak için gerekli simülasyon sayıları artmaktadır.

5.4. Gözlem Kuyularının Sayısı için Model Performansının Test Edilmesi

Bu çalışma kapsamında, pompaj kuyularının karakteristiklerinin belirlenebilmesi için gözlem kuyularında ölçülen hidrolik yük değerlerinin Denklem (25)'de verilen amaç fonksiyonu içerisinde kullanılması gerekmektedir. Ancak, geliştirilen yaklaşım ile kuyu karakteristiklerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gözlem kuyularının sayısına (N_d) büyük oranda bağlıdır. Bu amaçla, gözlem kuyularının sayısının ne olması gerektiğinin belirlenmesi gereklidir. Bu bölümde, geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımının performansı N_d değerinin 15, 20, 25, 30, 35 ve 40 olması durumları için test edilmiştir. Her bir durum için gözlem kuyularının akifer üzerindeki yerleşimi Şekil 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.3 Gözlem kuyularının akifer üzerindeki yerleşimi; (a): $N_d = 15$; (b): $N_d = 20$; (c): $N_d = 25$; (d): $N_d = 30$; (e): $N_d = 35$; (f): $N_d = 40$

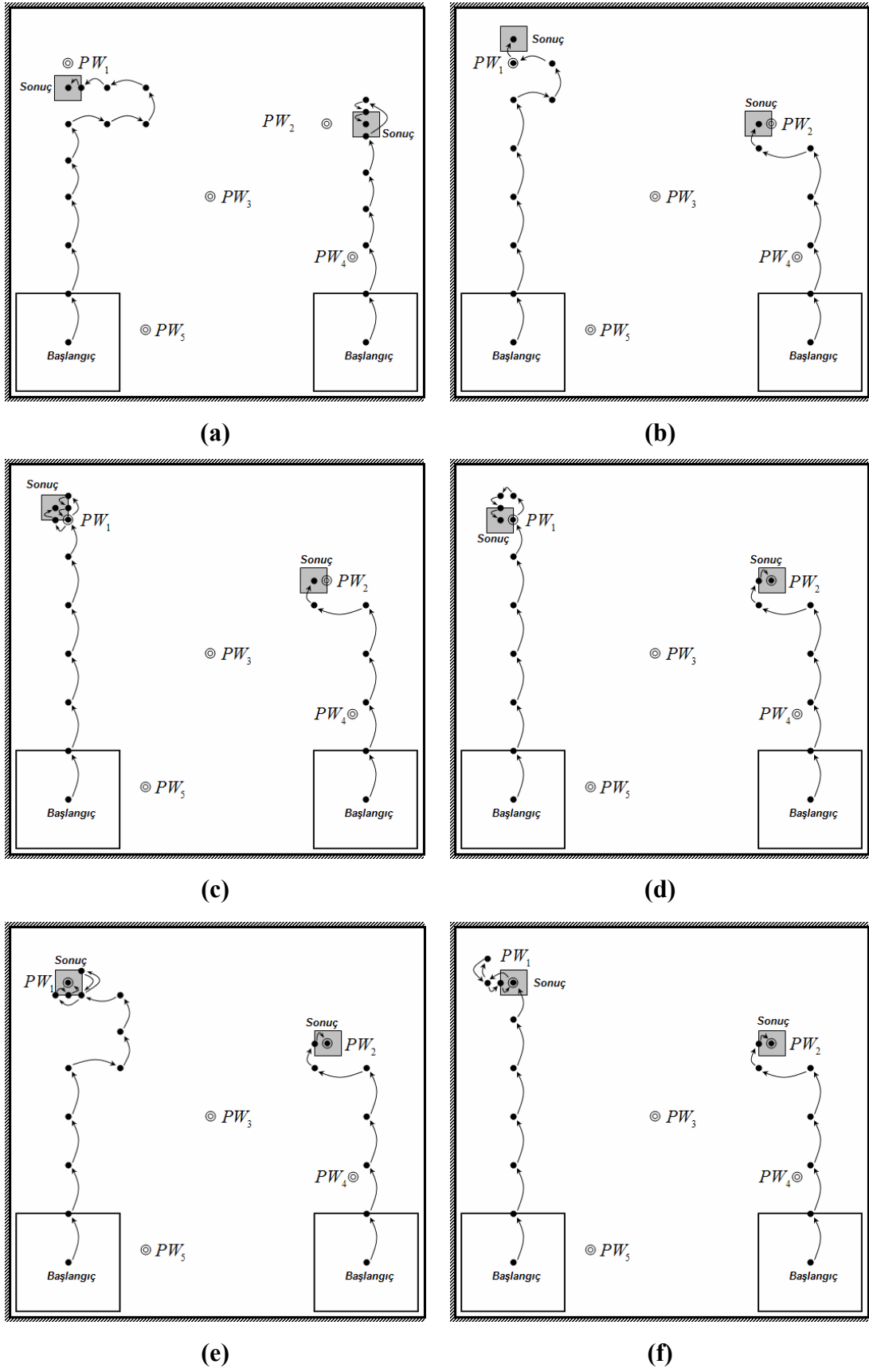
Şekil 5.3’de verilen 6 farklı kuyu yerleşimi için elde edilen sonuçlar Tablo 5.3’de verilmiştir.

Tablo 5.3 Farklı gözlem kuyu sayıları için belirlenen kuyu karakteristikleri

N_d	Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE (m)	Simülasyon Sayısı
		Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
15	PW_1	(5,28)	(5,7)	(5,5)	4000	4650	16.24	18.04	8777
	PW_2	(28,28)	(28,10)	(25,10)	4000	3146	21.35		
20	PW_1	(5,28)	(5,3)	(5,5)	4000	3475	13.12	11.61	6632
	PW_2	(28,28)	(24,10)	(25,10)	4000	4471	11.78		
25	PW_1	(5,28)	(4,4)	(5,5)	4000	3612	9.70	12.83	6259
	PW_2	(28,28)	(24,10)	(25,10)	4000	4419	10.47		
30	PW_1	(5,28)	(4,5)	(5,5)	4000	3992	0.20	0.96	6708
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	4006	0.16		
35	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	3929	1.78	0.93	6750
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	4043	1.08		
40	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4001	0.02	0.40	5511
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3998	0.06		

Tablo 5.3’den görüleceği gibi, N_d değeri azaldıkça RE değerleri büyümekte ve belirlenen kuyu karakteristiklerinde farklılıklar oluşmaktadır. Örnek olarak, $N_d = 15$ için elde edilen çözümde, gerçek kuyu yerlerine PW_1 için düşeyde 2, PW_2 için ise yatayda 3 grid aralığı mesafedeki noktalar çözüm olarak bulunmuştur. Bu noktalar için hesaplanan pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata değeri % 21.35; optimizasyon işlemi sonunda elde edilen RE değeri ise 18.04’tür. Görüleceği gibi, N_d değerinin 30 olduğu noktadan itibaren RE değerinde önemli bir düşüş olmakta ve elde edilen sonuçlar gerçeğe daha yakın olmaktadır. $N_d = 30$ için yapılan çözümde, PW_2 için gerçek kuyu yeri belirlenebilirken PW_1 için yatayda 1 grid aralığı mesafedeki nokta çözüm olarak bulunmuştur. Pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata ise % 0.20’dir. Bu sonuç, incelenen bu uygulamada $N_d \geq 30$ için pratik açıdan kabul edilebilir sonuçlar elde edilebileceğini göstermektedir.

Her bir durum için alt bölgelerin akifer üzerindeki hareketi ve belirlenen kuyu yerleri Şekil 5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.4 Farklı gözlem kuyu sayıları için kuyu yerlerinin belirlenmesi; (a): $N_d = 15$; (b): $N_d = 20$; (c): $N_d = 25$; (d): $N_d = 30$; (e): $N_d = 35$; (f): $N_d = 40$

5.5. Ölçüm Hataları için Model Performansının Test Edilmesi

Bu çalışma kapsamında geliştirilen optimizasyon modelinde, akifer üzerinde bulunan gözlem kuyularında ölçülen ve hesaplanan hidrolik yükler arasındaki hatanın minimize edildiği bir amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Geliştirilen S/O modelinde, kuyu karakteristikleri bakımından en iyi sonuç, amaç fonksiyonunun minimum olması ile mümkündür. Pratikte gözlem kuyularındaki hidrolik yük değerleri okunurken çoğu zaman ölçüm hataları yapılmaktadır. Yapılan ölçüm hatalarının etkisini yansıtmak amacıyla bu çalışma kapsamında yapılan analizlerin tümünde sentetik olarak üretilen gözlem değerlerinin tümüne normal dağılıma uyan, ortalaması 0 ve standart sapması 0.10 *m* olan bir hata verisi eklenmiştir. Ancak geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımının performansının farklı hata verileri için de test edilmesi gereklidir. Bu amaçla, gözlem verilerinin hiç hata içermemesi ve normal dağılıma uyan, ortalamaları 0 ve standart sapmaları sırasıyla 0.20, 0.30, 0.50 ve 1.00 *m* olan hata verileri için de model performansı test edilmiştir. Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile farklı hata verileri için elde edilen sonuçlar Tablo 5.4’de verilmiştir.

Tablo 5.4 Farklı hata verileri için belirlenen kuyu karakteristikleri

Hata Verisi	Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE (<i>m</i>)	Simülasyon Sayısı
		Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
Hatasız	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	3999	0.04	0.0002	6593
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	4001	0.02		
$\sigma = 0.10$	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4001	0.02	0.40	5511
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3998	0.06		
$\sigma = 0.20$	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	3941	1.49	2.22	6405
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	4046	1.15		
$\sigma = 0.30$	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	3978	0.56	3.64	9802
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	4009	0.23		
$\sigma = 0.50$	PW_1	(5,28)	(4,5)	(5,5)	4000	3495	12.62	17.66	8254
	PW_2	(28,28)	(24,10)	(25,10)	4000	4466	11.64		
$\sigma = 1.00$	PW_1	(5,28)	(5,3)	(5,5)	4000	3495	12.62	47.74	6032
	PW_2	(28,28)	(24,10)	(25,10)	4000	4425	10.62		

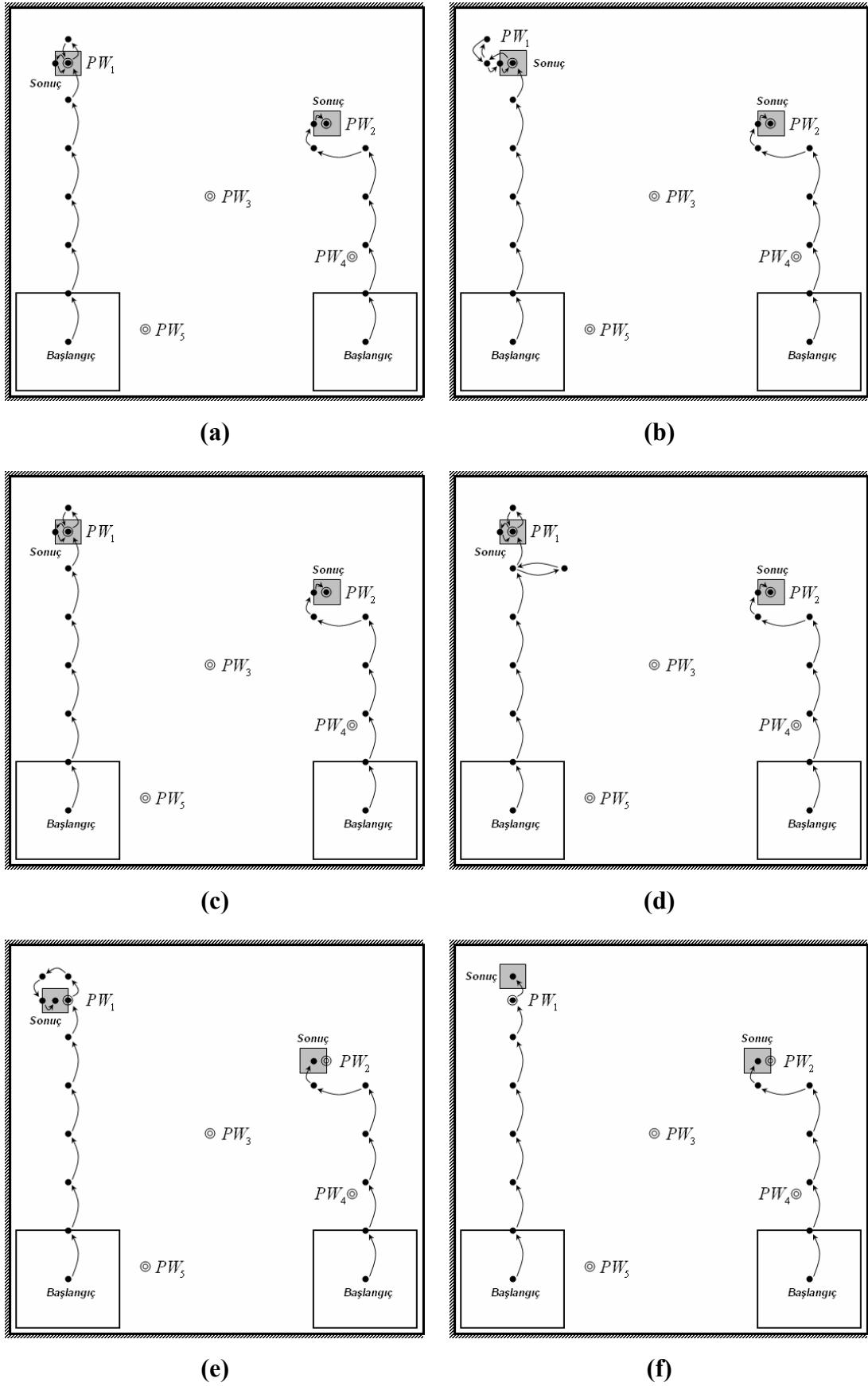
Tablo 5.4’den görüleceği gibi, gözlem verilerinin hata içermemesi durumunda, geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile kuyu yerleri ve pompaj debileri doğru bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu durum için hesaplanan pompaj debileri arasındaki

maksimum göreceli hata değeri % 0.04'tür. 6593 simülasyon işlemi sonunda RE değeri 0.0002 olarak elde edilmiştir. $\sigma = 0.20$ m durumunda ise, $\sigma = 0.10$ m ile yapılan çözüme göre RE değerinde bir artma gözlenmiş, ancak belirlenen kuyu yerleri ve pompaj debileri bakımından oldukça duyarlı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum için hesaplanan pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata değeri % 1.49'dur. Görüleceği gibi, geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile $\sigma = 0.30$ m için de benzer şekilde hassas sonuçlar elde edilmiş, ancak bu noktadan sonra RE değerlerinde bir artış gözlenmiştir. $\sigma = 0.50$ m için gerçek kuyu yerlerine yatayda 1 grid aralığı mesafedeki noktalar çözüm olarak bulunmuştur. Hesaplanan pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata değeri % 12.62'ye çıkmıştır. $\sigma = 1.00$ m için ise, kuyu yerleri bakımından PW_1 kuyusunun gerçek yerine düşeyde 2 grid aralığı, PW_2 kuyusunun gerçek yerine ise yatayda 1 grid aralığı mesafedeki noktalar çözüm olarak bulunmuştur. $\sigma = 1.00$ m için hesaplanan pompaj debileri arasındaki maksimum göreceli hata değeri % 12.62, RE değeri ise 47.74'tür. Görüleceği gibi, hata verilerine ait standart sapma değerlerinin artması sonucu elde edilen RE değerlerinde bir artış gözlenmektedir. Ancak, dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, geliştirilen S/O modeli ile tam olarak gerçek kuyu karakteristikleri belirlense bile, eklenen hata terimlerinden dolayı RE'nin minimum değeri $N_d \times \sigma^2$ 'ye (N_d : gözlem kuyularının sayısı) eşit olmaktadır. Örnek olarak, $\sigma = 0.10$ m için RE değerinin minimum değeri 0.40; $\sigma = 1.00$ m için ise 40.00'dır. Bu durum değerlendirildiğinde $\sigma = 0.50$ m ve $\sigma = 1.00$ m için Tablo 5.4'de verilen sonuçların da pratik açıdan kullanılabilmesi düşünülmektedir.

Farklı hata verileri için alt bölgelerin akifer üzerindeki hareketi Şekil 5.5'de verilmiştir. Şekil 5.5'den de görüleceği gibi, özellikle $\sigma = 0.50$ m'den sonra belirlenen kuyu yerleri bakımından farklılıklar bulunmaktadır.

5.6. Değişim Simülasyon Sayısı için Model Performansının Test Edilmesi

Bu çalışmada, hareketli alt bölge yaklaşımı ile geliştirilen S/O modelinin eşzamanlı kullanılmasında değişim simülasyon sayısı (st') durma kriteri olarak kullanılmıştır. Kullanılan bu durma kriterinde; yapılan mevcut simülasyon işlemi sonucu toplumdaki



Şekil 5.5 Farklı hata verileri için kuyu yerlerinin belirlenmesi; (a): Hatasız; (b): $\sigma = 0.10$; (c): $\sigma = 0.20$; (d): $\sigma = 0.30$; (e): $\sigma = 0.50$; (f): $\sigma = 1.00$

amaç fonksiyonlarının maksimum olanı ile mevcut simülasyondan st' simülasyon önceki amaç fonksiyonlarının maksimum olanı arasındaki fark verilen bir hassaslıkdeğerinden küçük yada eşitse optimizasyon işlemi sona ermektedir. Buraya kadar yapılan analizlerin tümünde, alt bölgeler ile kuyu yerlerinin belirlenmesinde $st' = 20$ olarak kullanılmıştır. Bu bölümde ise, geliştirilen modelin performansı farklı st' değerleri için ayrı ayrı test edilmiştir. Yapılan analizler sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 5.5'de verilmiştir.

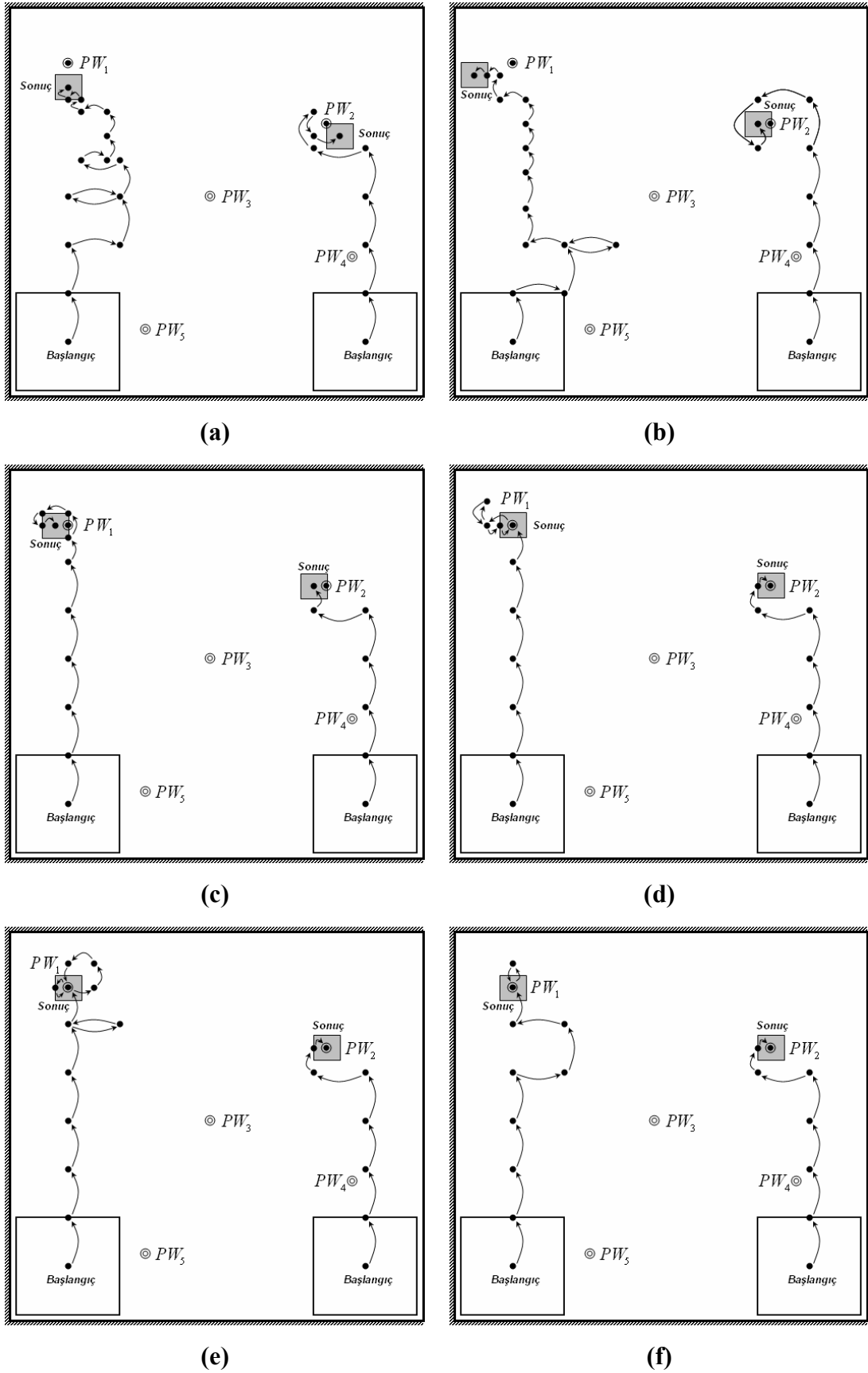
Tablo 5.5 Farklı değişim simülasyon sayıları için belirlenen kuyu karakteristikleri

st'	Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE (m)	Simülasyon Sayısı
		Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
5	PW_1	(5,28)	(5,7)	(5,5)	4000	4269	6.73	36.18	2648
	PW_2	(28,28)	(26,11)	(25,10)	4000	3945	1.38		
10	PW_1	(5,28)	(2,6)	(5,5)	4000	3424	14.39	16.15	4131
	PW_2	(28,28)	(24,10)	(25,10)	4000	4517	12.94		
15	PW_1	(5,28)	(4,5)	(5,5)	4000	3537	11.58	14.39	5082
	PW_2	(28,28)	(24,10)	(25,10)	4000	4438	10.96		
20	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4001	0.02	0.40	5511
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3998	0.06		
25	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4002	0.06	0.40	9635
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3997	0.07		
30	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4000	0.00	0.40	11226
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3998	0.04		

Tablo 5.5'den görüleceği gibi, st' değerinin artmasıyla RE değerleri azalmakta, buna karşın simülasyon sayıları artmaktadır. Görüleceği gibi, $st' = 20$ 'den sonra RE değerlerinde belirgin bir değişim olmamaktadır. Bu sonuç $st' \geq 20$ için yapılacak çözümlerin pratik açıdan kabul edilebileceği anlamına gelmektedir. Farklı st' değerleri için alt bölgelerin akifer üzerindeki hareketi Şekil 5.6'da verilmiştir.

5.7. GA Çözüm Parametreleri için Model Performansının Test Edilmesi

Bu bölümde, geliştirilen modelin performansı farklı GA çözüm parametreleri için test edilmiştir. Yapılan analizlerin tümünde, hangi parametrenin duyarlılığı araştırılıyorsa sadece o parametre değiştirilmiş ve modelin göstereceği tepki belirlenmiştir. İlgili parametre değişiklikleri sadece alt bölgeler ile kuyu yerlerinin belirlenmesinde (1. aşama) yapılmıştır.



Şekil 5.6 Farklı değişim simülasyon sayıları için kuyu yerlerinin belirlenmesi; (a): $st' = 5$; (b): $st' = 10$; (c): $st' = 15$; (d): $st' = 20$; (e): $st' = 25$; (f): $st' = 30$

5.7.1. Toplum büyüklüğünün model performansı üzerine etkisi

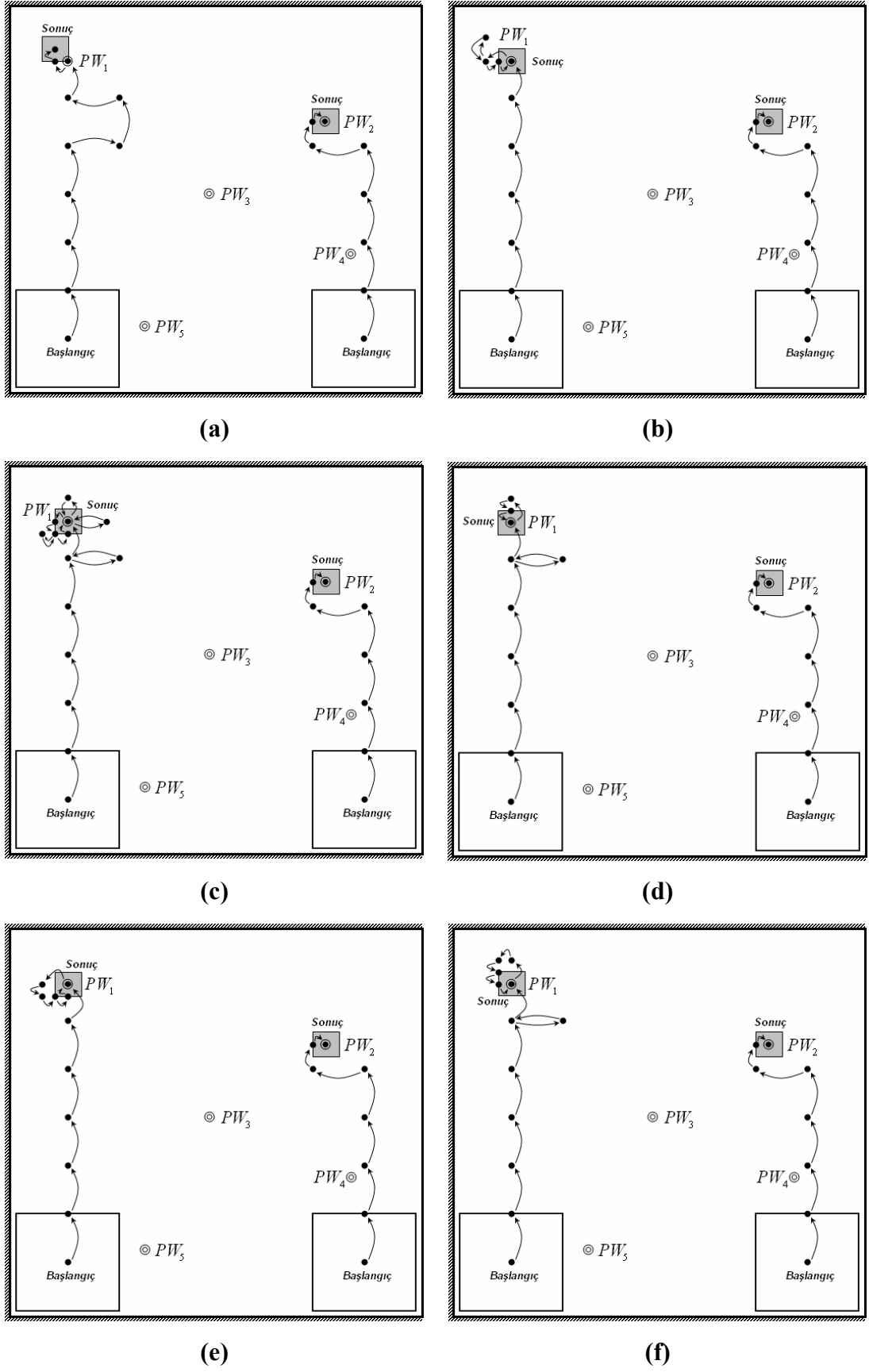
Bölüm 3’de belirtildiği gibi, GA optimizasyon tekniği ile global ya da global optimuma yakın sonuçlar tek bir çözüm yerine birden çok çözümden oluşan bir toplum ile araştırılmakta, böylece lokal optimum çözümlerden kaçılmaktadır (Goldberg 1989). Bu bölümde, geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımının performansı farklı toplum büyüklükleri (m) için test edilmiştir. Önceki bölümlerde yapılan analizlerin tümünde arama sürecinde $m=10$ kabul edilmiştir. Bu bölümde ise, model performansı m değerinin 5, 10, 15, 20, 30 ve 50’ye eşit olması durumu için test edilmiştir. Farklı m değerleri için alt bölgelerin akifer üzerindeki hareketi Şekil 5.7’de verilmiştir.

Şekil 5.7’den görüldüğü gibi, $m=5$ olması durumu dışında tüm çözümlerde gerçek kuyu yerleri belirlenmiştir. $m=5$ için ise, PW_2 kuyusunun gerçek yeri belirlenmiş, buna karşın PW_1 için gerçek kuyu yerine yatay ve düşeyde 1 grid aralığı mesafedeki nokta çözüm olarak bulunmuştur.

PW_1 ve PW_2 için optimizasyon işlemi sonucu bulunan sonuçlar Tablo 5.6’da verilmiştir.

Tablo 5.6 Farklı toplum büyüklükleri için belirlenen kuyu karakteristikleri

m	Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE (m)	Simülasyon Sayısı
		Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
5	PW_1	(5,28)	(4,4)	(5,5)	4000	3944	1.40	2.87	7943
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	4020	0.50		
10	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4001	0.02	0.40	5511
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3998	0.06		
15	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4011	0.28	0.42	8656
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3989	0.28		
20	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	3982	0.44	0.53	6708
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3997	0.08		
30	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4015	0.39	0.44	5545
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3985	0.37		
50	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4000	0.00	0.40	6378
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3998	0.04		



Şekil 5.7 Farklı toplum büyüklükleri için kuyu yerlerinin belirlenmesi; (a): $m = 5$; (b): $m = 10$; (c): $m = 15$; (d): $m = 20$; (e): $m = 30$; (f): $m = 50$

Tablo 5.6'dan görüleceği gibi, hesaplanan pompaj debileri arasındaki maksimum göreceli hata % 1.40 ile $m=5$ için yapılan çözümdedir. Bu bölümde yapılan çözümlerin hepsinde, Uygulama 6'da verilen çözüm parametreleri kullanılmıştır. İlgili uygulamada, st' değeri 20 olarak verilmiştir. Bu durumda, $m=5$ için her bir çözüm noktasında GA ile minimum 4 jenerasyon yapılmaktadır. Bu durum, $m=10$ için ise minimum 2 jenerasyona karşı gelmektedir. Ancak, m değerinin st' değerinden büyük olması durumunda, alt bölgeler kuyu yerlerine yaklaştığında GA ile yeniden üretim yapılma olasılığı azalabilmektedir. Bu nedenle, karmaşık problemlerin çözümü için, arama sürecinde st' değerinin m değerinden büyük ya da eşit verilmesi önerilmektedir.

5.7.2. Çaprazlama oranının model performansı üzerine etkisi

Bölüm 3'de belirtildiği gibi, GA optimizasyon işleminde mevcut toplumdaki rastgele iki birey seçilmekte ve seçilen bu iki birey çaprazlanarak iki yeni birey oluşturulmaktadır. Bir sonraki jenerasyona, seçilen iki bireyin mi yoksa çaprazlanarak üretilen bireylerin mi aktarılacağına çaprazlama oranına (p_c) göre karar verilmektedir (Goldberg 1989). Bu bölümde, p_c değerlerinin sırasıyla 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70 ve 0.80 olması durumları için hareketli alt bölge yaklaşımının performansı test edilmiştir. Her bir p_c değeri için elde edilen sonuçlar Tablo 5.7'de verilmektedir.

Tablo 5.7 Farklı çaprazlama oranları için belirlenen kuyu karakteristikleri

p_c	Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE (m)	Simülasyon Sayısı
		Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
0.30	PW_1	(5,28)	(3,6)	(5,5)	4000	3556	11.10	14.37	6886
	PW_2	(28,28)	(24,10)	(25,10)	4000	4446	11.16		
0.40	PW_1	(5,28)	(3,6)	(5,5)	4000	4005	0.12	1.92	7798
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	4021	0.53		
0.50	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4001	0.02	0.40	5511
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3998	0.06		
0.60	PW_1	(5,28)	(5,4)	(5,5)	4000	3982	0.44	0.63	6038
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3997	0.08		
0.70	PW_1	(5,28)	(4,5)	(5,5)	4000	3980	0.49	1.24	7880
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	4015	0.37		
0.80	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4002	0.04	0.40	8068
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3997	0.07		

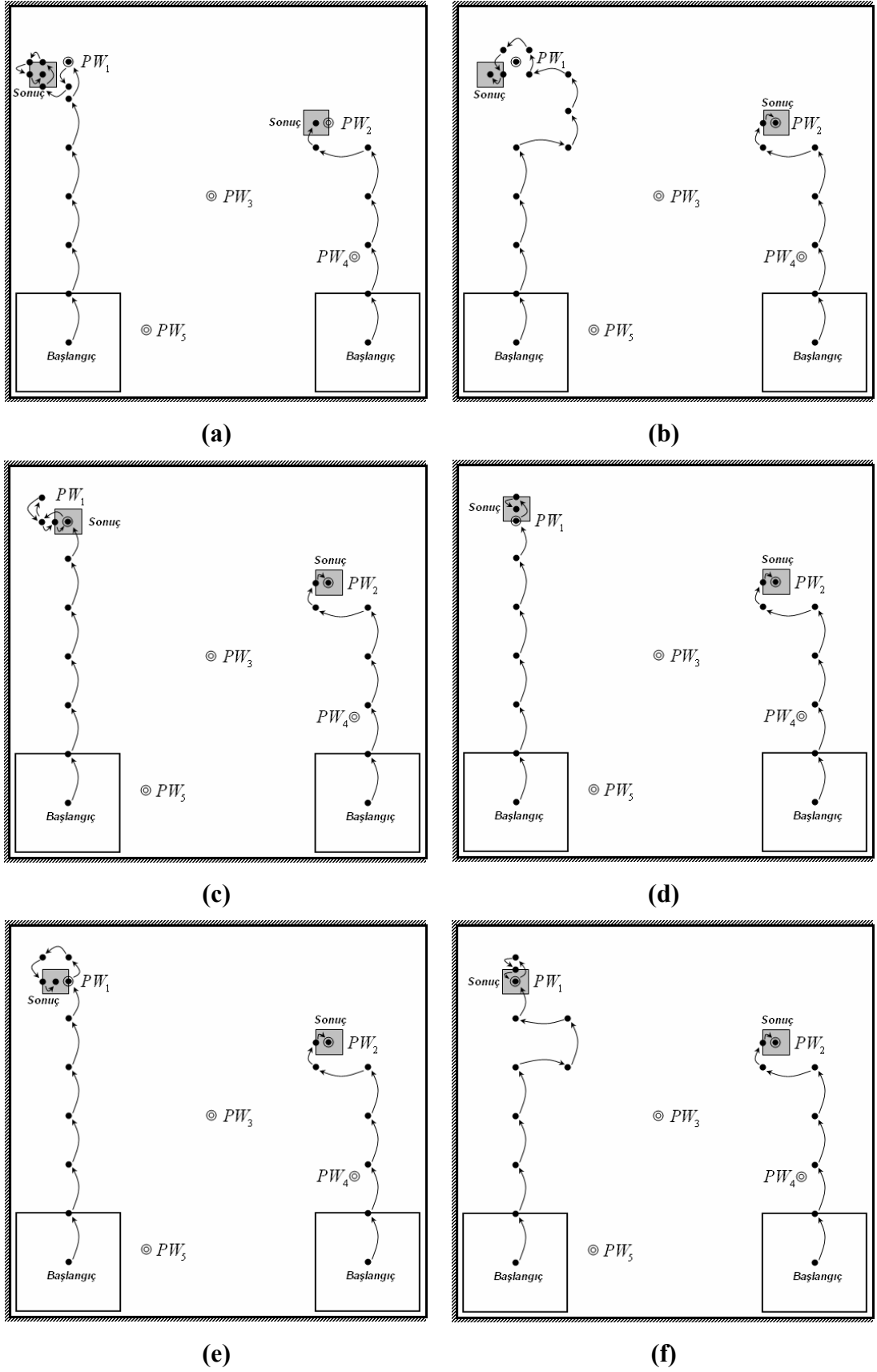
Tablo 5.7'den görüleceği gibi, RE değerleri bakımından en iyi sonuçlar $p_c = 0.50$ ve $p_c = 0.80$ için elde edilmiştir. İlgili çözümlerin her ikisinde de PW_1 ve PW_2 için gerçek kuyu yerleri belirlenmiştir. Buna karşın, RE değeri bakımından en kötü sonuç ise $p_c = 0.30$ için yapılan çözümden elde edilmiştir. İlgili çözümde, PW_1 ve PW_2 için sırasıyla (3,6) ve (24,10) noktaları çözüm olarak bulunmuştur. Hesaplanan pompaj debileri arasındaki maksimum göreceli hata değeri ise % 11.16'dır. Her bir çözüm için ilgili kuyuların akifer üzerindeki hareketi Şekil 5.8'de verilmiştir. Şekil 5.8'den görüleceği gibi, tüm çözümlerde alt bölgeler kuyu yerlerinin olduğu bölgeleri kabaca belirlemektedir. Ancak, kullanılan p_c değerlerinin farklılığından dolayı kuyu yerlerinin lokal olarak belirlenmesinde farklılıklar bulunmaktadır.

5.7.3. Mutasyon oranının model performansı üzerine etkisi

Mutasyon işlemi, verilen bir mutasyon oranı değerine (p_m) bağlı olarak toplum içindeki bireylerin genetik çeşitliliğinin korunması ve erken yakınsamanın önlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu bölümde, geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımının performansı p_m değerinin 0.01, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 ve 0.25'e eşit olması durumları için test edilmiştir. Farklı p_m değerleri için elde edilen sonuçlar Tablo 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.8 Farklı mutasyon oranları için belirlenen kuyu karakteristikleri

p_m	Kuyu	(I_k, J_k)			$Q(I_k, J_k) (m^3 / gün)$			RE (m)	Simülasyon Sayısı
		Başlangıç	Belirlenen	Gerçek	Gerçek	Belirlenen	Göreceli Hata (%)		
0.01	PW_1	(5,28)	(3,6)	(5,5)	4000	3560	11.00	14.37	7539
	PW_2	(28,28)	(24,10)	(25,10)	4000	4445	11.11		
0.05	PW_1	(5,28)	(4,5)	(5,5)	4000	3527	11.83	14.40	7472
	PW_2	(28,28)	(24,10)	(25,10)	4000	4443	11.08		
0.10	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	3977	0.56	0.45	8472
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	4011	0.27		
0.15	PW_1	(5,28)	(5,5)	(5,5)	4000	4001	0.02	0.40	5511
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	3998	0.06		
0.20	PW_1	(5,28)	(4,5)	(5,5)	4000	3982	0.46	1.24	7660
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	4013	0.33		
0.25	PW_1	(5,28)	(3,6)	(5,5)	4000	3966	0.86	2.19	9052
	PW_2	(28,28)	(25,10)	(25,10)	4000	4054	1.34		



Şekil 5.8 Farklı çaprazlama oranları için kuyu yerlerinin belirlenmesi; (a): $p_c = 0.30$;
 (b): $p_c = 0.40$; (c): $p_c = 0.50$; (d): $p_c = 0.60$; (e): $p_c = 0.70$; (f): $p_c = 0.80$

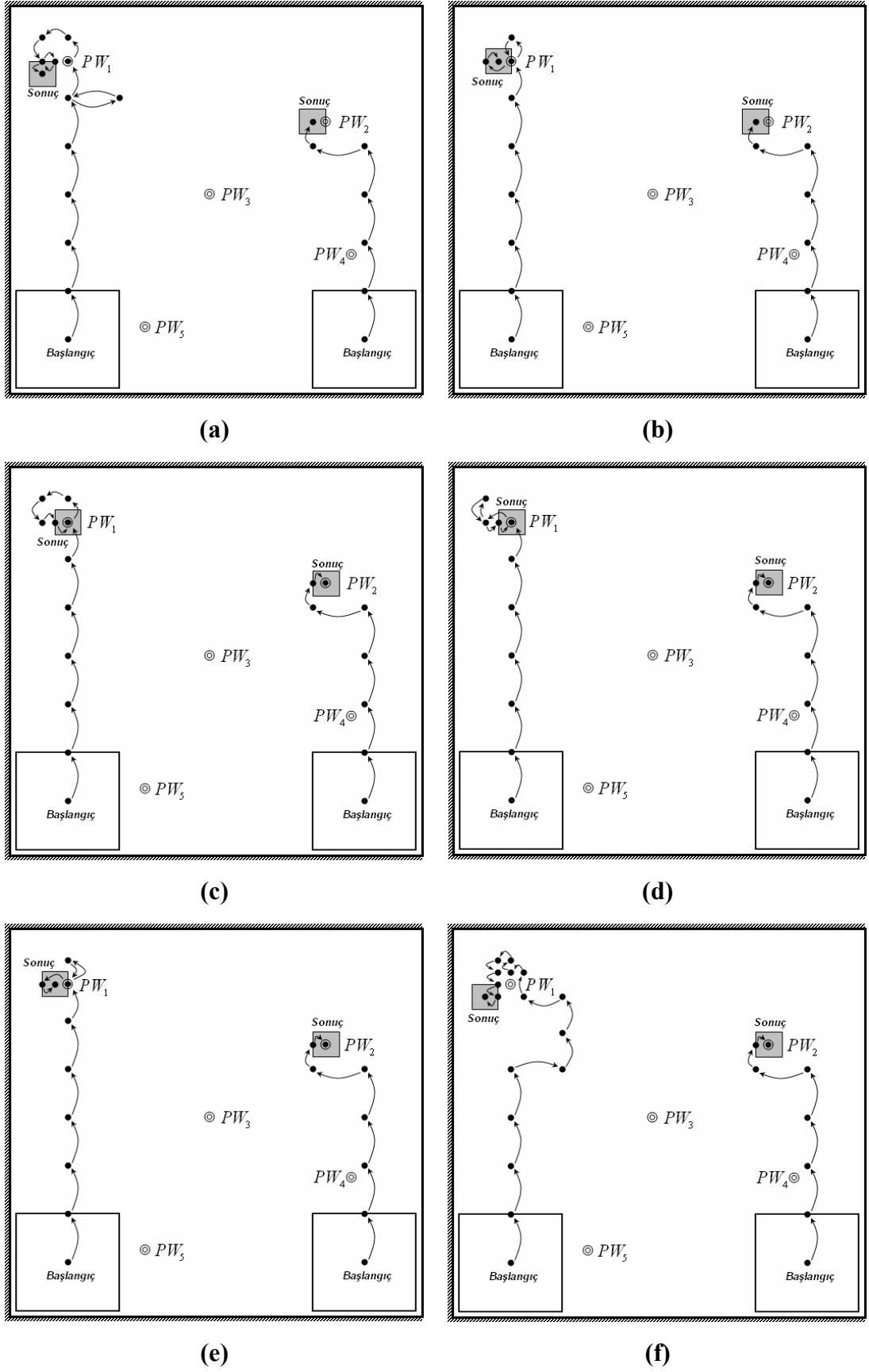
Tablo 5.8'den görüleceği gibi, gerçek kuyu yerleri p_m değerinin 0.10 ve 0.15 olması durumlarında elde edilmiştir. Hesaplanan pompaj debilerindeki maksimum göreceli hata değeri % 11.83 ile $p_m = 0.05$ için yapılan çözümdedir. Görüleceği gibi, belirlenen kuyu yerleri ve pompaj debilerinde p_m değerleri için farklılıklar olmasına karşılık elde edilen sonuçlar pratik açıdan kullanılabilir seviyede olmaktadır. Farklı p_m değerleri için alt bölgelerin akifer üzerindeki hareketi Şekil 5.9'da verilmiştir.

Şekil 5.9'dan görüleceği gibi, farklı p_m değerleri için ilgili alt bölgeler kuyu yerlerine doğru hareket etmektedir. Ancak, p_m değerinin 0.10 değerinden küçük ve 0.15'den büyük olması durumlarında özellikle PW_1 kuyusu için gerçek kuyu yerlerinin yakınındaki grid noktaları kuyu yeri olarak belirlenmektedir.

5.8. Sonuçların İrdelenmesi

Bu bölümde, geliştirilen modelin performansının farklı çözüm parametreleri için test edildiği bir duyarlılık analizi yapılmıştır. İlgili çözümlerde, Uygulama 6 – Senaryo 1'de verilen akifer modeli kullanılmıştır. Yapılan duyarlılık analizinden aşağıdaki sonuçlara varılabilir:

- i) Hareketli alt bölge yaklaşımı ile iyileştirilen S/O modeli ile farklı başlangıç noktaları için kuyu yerleri etkin bir şekilde belirlenebilmektedir. İncelenen senaryoların üçünde her iki kuyu için gerçek kuyu yerleri belirlenirken, diğer üç senaryoda ise gerçek kuyu yerlerine yakın noktalar çözüm olarak bulunmuştur. Yapılan analizler, farklı başlangıç noktalarından çözüme başlamanın gerekli simülasyon sayısını etkilediğini göstermiştir.
- ii) Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımının performansını etkileyen önemli bir parametre alt bölgelerin başlangıç boyutlarının doğru bir şekilde seçilmesidir. Yapılan analizler sonucu, küçük alt bölge boyutlarının kullanılmasıyla yerel optimum çözümlerin elde edilebileceği anlaşılmıştır. Ayrıca, alt bölge boyutlarının uygun seçilmemesi sonucu çözüme ulaşmak için yapılması gereken simülasyon sayılarında artış gözlenmiştir.



Şekil 5.9 Farklı Mutasyon oranları için kuyu yerlerinin belirlenmesi; (a): $p_m = 0.01$; (b): $p_m = 0.05$; (c): $p_m = 0.10$; (d): $p_m = 0.15$; (e): $p_m = 0.20$; (f): $p_m = 0.25$

- iii) Geliştirilen modelin performansı farklı gözlem kuyu sayıları için test edilmiştir. Yapılan analizler, 30 ve daha fazla gözlem kuyusu kullanılmasıyla geliştirilen çözüm yaklaşımının etkin sonuçlar verebileceğini göstermiştir.
- iv) Gözlem verilerinin içerdiği hatalar için de geliştirilen modelin performansı test edilmiştir. Gözlem verilerine farklı büyüklüklerde normal dağılıma uyan hata verileri eklenmiş ve pratik açıdan model performansının eklenecek hata verilerinden çok fazla etkilenmediği görülmüştür.
- v) Kullanılan GA tabanlı optimizasyon modeli, verilen değişim simülasyon sayısının durma kriteri olarak kullanılmasıyla arama sürecine son vermektedir. Dolayısıyla geliştirilen modelin performansı farklı değişim simülasyon sayıları için test edilmiştir. Yapılan analizler, değişim simülasyon sayısının 20'ye eşit olması durumunda kuyu karakteristikleri bakımından etkin sonuçların elde edilebileceğini göstermiştir. 20'den büyük değerlerde ise, yine iyi sonuçlar elde edilebilmesine karşılık, daha çok işlem yapılacağından çözüme ulaşmak için gerekli simülasyon sayılarında belirgin bir artış olmaktadır.
- vi) Geliştirilen modelin performansı ayrıca farklı GA çözüm parametreleri için de test edilmiştir. Toplum büyüklüğünün model performansı üzerindeki etkisi test edilirken; kullanılan toplum büyüklüğü ile değişim simülasyon sayıları arasında bir ilişki olduğu anlaşılmıştır. Arama sürecinde toplum büyüklüğünün 5'den büyük kullanılmasıyla kuyu karakteristiklerinin etkin bir şekilde belirlenebileceği anlaşılmıştır. Ayrıca, çaprazlama oranının model performansı üstündeki etkisi test edilmiş ve çaprazlama oranının 0.50 ve 0.80 alınması sonucu en iyi sonuçların elde edildiği görülmüştür. Son olarak, mutasyon oranının da model performansı üzerine olan etkisi test edilmiş ve arama sürecinde 0.10 ve daha büyük mutasyon olasılığının pratik açıdan kabul edilebilir sonuçlar verdiği görülmüştür.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, sınırlı sayıda gözlem değeri kullanılarak heterojen bir akiferdeki pompaj kuyularının karakteristiklerinin (yerlerinin, sayılarının ve debilerinin) belirlenebildiği bir S/O modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen S/O modeli, yeraltı suyu akım denkleminin verilen başlangıç ve sınır koşulları için sayısal olarak sonlu farklar metodu ile çözüldüğü bir simülasyon modeli ile GA tabanlı bir optimizasyon modelinin birleşiminden oluşmaktadır. Geliştirilen S/O modelinde, simülasyon modeli ile optimizasyon modeli yerleşik yaklaşım kullanılarak birleştirilmiştir. S/O modeli ile pompaj kuyularının karakteristikleri, her bir kuyunun yerinin ve pompaj debilerinin optimizasyon işleminde karar değişkeni olarak kullanılmasıyla belirlenmektedir. Ancak bu çözüm yaklaşımında, kuyu yerlerine ait karar değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri akiferin tümünü kapsayacak şekilde verilmekte ve pompaj kuyuları akifer yüzeyinin tümünde aranmaktadır. Ayrıca, kuyu sayısının fazla olması durumunda matematiksel olarak optimizasyon probleminin boyutu büyümekte ve çözüme ulaşmak zorlaşmaktadır. Bu nedenle, pompaj kuyularının karakteristiklerinin kuyu yerlerini optimizasyon işleminde karar değişkeni olarak kullanmadan belirlenebildiği “hareketli alt bölge yaklaşımı” adı verilen bir çözüm tekniği geliştirilmiş ve kullanılan S/O modeli ile birleştirilmiştir.

Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımında, her bir pompaj kuyusu bir alt bölge içerisinde tanımlanmakta ve kuyu karakteristikleri bu alt bölgeler içerisinde aranmaktadır. İlgili pompaj kuyuları sırasıyla alt bölgeler içinde tanımlı çözüm noktalarına atanmakta ve o noktalar için ilgili S/O modeli çalıştırılmaktadır. Her bir çözüm noktası için hesaplanan RE değerlerine göre ilgili alt bölgenin merkez noktası minimum RE değerinin elde edildiği çözüm noktasına taşınmaktadır. Bu çözüm yaklaşımının sırasıyla tüm alt bölgelere uygulanmasıyla çözüme nereden başlanırsa

başlansın pompaj kuyularının olduğu bölgeler belirlenebilmektedir. Bu bölgeler belirlendikten sonra, her bir alt bölgenin boyutu küçültülerek pompaj kuyularının yerleri belirlenebilmektedir. Geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımının en önemli avantajı kuyu yerlerinin optimizasyon işleminde karar değişkeni olarak kullanılmasına gerek kalmamasıdır. Ayrıca, kuyu yerlerine ait çözüm uzayı ilgili alt bölgeler içinde tanımlı olduğundan kuyu yerlerinin çözüm bölgesinin tümünde aranmasına gerek kalmamaktadır.

Geliştirilen S/O modelinin ve hareketli alt bölge yaklaşımının performansını test etmek amacıyla üç akifer modeli kararlı ve zamanla değişen akım durumları için çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar, hareketli alt bölge yaklaşımının kuyu yerleri ve pompaj debileri bakımından daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Ayrıca, geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımı ile pompaj kuyularının sayısının dolaylı olarak belirlenebildiği iki adet uygulama çözülmüştür. Bu uygulamaların sonucunda, belirlenen pompaj kuyularının sayısının gerçek kuyu sayısından fazla olması durumunda çözümün gerçek kuyu sayısına yakınsadığı görülmüştür. Son olarak, geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımının performansını test etmek amacıyla; alt bölgelerin farklı başlangıç noktalarından başlaması, arama süreci başlangıcında farklı alt bölge boyutlarının kullanılması, akiferi temsil eden gözlem kuyularının sayısı, gözlem değerlerinin içerdiği hataların mertebesi, optimizasyon işlemini durdurma kriteri ve GA çözüm parametrelerinin model performansı üzerindeki etkisinin belirlendiği bir duyarlılık analizi yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Yapılan analizlerden aşağıdaki sonuçlara varılmaktadır:

Geliştirilen S/O modeli ile küçük çözüm bölgelerinde kuyu karakteristiklerinin belirlenmesi için gerekli simülasyon sayısının hareketli alt bölge yaklaşımından daha az olduğu görülmüştür. Buna karşın, çözüm bölgesinin büyümesiyle kuyu yerlerine ait çözüm uzayı da büyüyeceğinden dolayı geliştirilen S/O modeli ile çözüme ulaşmak daha çok simülasyon işlemi gerektirmektedir. Ancak, her durumda hareketli alt bölge yaklaşımı ile elde edilen sonuçlar S/O modeli ile elde edilenlere göre daha iyi olmaktadır.

Akifer üzerinde karakteristikleri belirlenecek pompaj kuyularının sayısının az olması durumunda, geliştirilen S/O modeli oldukça iyi sonuçlar vermesine karşılık

bilinmeyen kuyu sayısının artması ile doğru çözüme ulaşmak zorlaşmaktadır. Bu durumda geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımının kuyu karakteristiklerinin belirlenmesindeki performansı daha iyi olmaktadır.

Gerek geliştirilen S/O modelinde, gerek se hareketli alt bölge yaklaşımında zamana bağlı akım durumu için yapılan çözümlerde elde edilen RE değerleri kararlı durum için yapılanlara göre daha büyük olmaktadır. Bunun nedeni, her bir gözlem kuyusunun kararlı durum için 1, zamana bağlı durum için ise 1'den çok gözlem değeri içermesidir.

Yapılan analizler, alt bölgelerin hareket yönlerinin belirlenmesinde başlangıçta yapılan simülasyon sonuçlarına göre hesaplanan RE değerlerinin yeterli olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, kuyu karakteristikleri iki aşamada belirlenmiştir. Birinci aşamada, ilgili S/O modeli küçük toplum büyüklükleri ve değişim simülasyon sayıları kullanılarak çalıştırılmakta ve kuyu yerleri araştırılmaktadır. İkinci aşamada ise, belirlenen kuyu yerleri için hassas bir şekilde pompaj debilerinin optimizasyonu yapılmaktadır. Bu sayede, çözüme ulaşmak için gerekli simülasyon sayıları azaltılmaktadır.

Yapılan duyarlılık analizi sonuçları, geliştirilen hareketli alt bölge yaklaşımının başlangıç noktalarından bağımsız olduğunu ve her durumda gerçek ya da gerçeğe yakın kuyu yerlerini belirleyebildiğini göstermektedir.

Geliştirilen modelin performansı alt bölgelerin arama süreci başlangıcındaki boyutlarına büyük oranda bağlıdır. Yapılan analizlerin sonucunda, küçük alt bölgelerle çalışmanın doğru olmayan çözümlerin elde edilmesine ve gerekli simülasyon sayılarının artmasına sebep olduğu görülmüştür.

Geliştirilen modelin performansı ayrıca gözlem kuyularının sayısı ve gözlem değerlerin içerdiği ölçüm hatalarının büyüklüğü için de test edilmiş ve elde edilen sonuçların pratik açıdan kullanılabilir olduğu anlaşılmıştır.

Model performansını etkileyen diğer bir önemli konu da arama sürecinde verilen toplum büyüklüğü ve değişim simülasyon sayısıdır. Yukarıda belirtildiği gibi, alt bölgelerin hareket yönlerinin belirlenmesinde başlangıçtaki simülasyon sonuçları yeterli

olduğundan arama sürecinde küçük toplum büyüklükleri ile çalışmak yeterli olmaktadır. Ancak, kullanılan küçük toplum büyüklükleri ile GA optimizasyon işleminde yeniden üretim yapılabilmesi için toplum büyüklüğünün kullanılan değişim simülasyon sayısından küçük ya da eşit alınması önerilmektedir. Aksi takdirde belirlenen sonuçlar GA ile yeniden üretim sonucu değil rastgele olarak üretilen başlangıç toplumu ile elde edilmiş sonuçlar olmaktadır.

6.2. Öneriler

Bu çalışma kapsamında geliştirilen çözüm yaklaşımları kullanılarak kuyu karakteristikleri etkin bir şekilde belirlenmesine karşılık, gerçek akifer sistemlerinde pompaj kuyularının tümünün yerlerinin ve pompaj debilerinin belirlenmesi, kuyu sayılarının genellikle fazla olmasından dolayı gerçekçi olmayabilir. Bu gibi durumlarda, çözüm bölgesinin sınırları daraltılarak izinsiz kuyu açıldığından ya da aşırı pompaj yapıldığından şüphelenilen bölgeler için modelin çalıştırılması daha gerçekçi sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır.

Hareketli alt bölge yaklaşımı ile çözülen uygulamaların tümünde, kuyu karakteristikleri iki aşamada belirlenmiştir. Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, alt bölgelerin hareket yönleri optimizasyon işleminin başlangıcındaki çözümlere göre belirlenmekte ve bu yaklaşım sayesinde birinci aşamanın çözümünde küçük toplum büyüklükleri ve/veya daha az simülasyon sayıları ile çalışmak mümkün olmaktadır. Ancak, çözülen uygulamaların tümünde incelenen akiferlerin basınçlı akifer sistemleri olduğu kabul edilmiştir. Buna karşın, pratikte basınçlı akifer sistemleri ile olduğu kadar serbest yüzeyli akifer sistemleri ile de karşılaşılmaktadır. Serbest yüzeyli akifer sistemlerinde, akiferin doymun kalınlığı basınçlı akiferlerde olduğu gibi sabit olmadığından dolayı sayısal çözüm zorlaşmaktadır. Dolayısıyla, mevcut uygulamalarda ele alınan iki aşamalı çözüm yaklaşımının serbest yüzeyli akifer sistemlerine uygulanabilirliği incelenmelidir.

Zamana bağlı akım durumu için incelenen uygulamaların tümünde kuyulardaki pompaj sürelerinin bilindiği kabul edilmiştir. Ancak, pratik açıdan bakıldığında izinsiz olarak açılan bir kuyudan hangi zaman dilimlerinde çekim yapıldığının da belirlenmesi

gereklidir. Dolayısıyla, ileride yapılacak çalışmalarda pompaj sürelerinin de belirlenebildiği uygulamalar üzerinde çalışılmalıdır.

Tüm uygulamalarda akifer parametrelerinin alansal dağılımının bilindiği kabul edilmiştir. Ancak, pratikte bu değerler noktasal olarak bilinmemekte ve parametre değerleri üzerinde belirsizlikler olmaktadır. Bu gibi durumlar için de geliştirilen çözüm yaklaşımının performansının test edilmesi ve akifer parametrelerindeki belirsizliğin çözüm üzerindeki etkisinin araştırılması gerekmektedir.

İncelenen uygulamalarda, gözlem kuyuları ile sadece ilgili akiferden seviye okuması yapıldığı kabul edilmiştir. Ancak, pratikte gözlem kuyularının derinlikleri farklı olabilmekte ve bu gözlem kuyuları ile farklı akiferlerden hidrolik yük değerleri okunabilmektedir. Dolayısıyla, geliştirilen çözüm yaklaşımının performansının, 3-boyutlu modeller üzerinde tabakalaşmış akifer sistemleri için de test edilmesi gerekmektedir.

Geliştirilen çözüm yaklaşımında, yeraltı suyu hareketine ait kısmi diferansiyel denklemin sayısal çözümü sonlu farklar metodu ile yapıldığı için kuyu yerlerinin hesap yapılan grid bloklarının merkezine atanması gerekmektedir. Ancak, önerilen yöntemde büyük grid aralıkları ile çalışılması durumunda, kuyu yerleri doğru bir şekilde belirlenmemektedir. Bu gibi durumlarda, daha hassas sonuç elde etmek için küçük grid aralıkları ile çalışmak ya da kuyu yerlerinin sürekli karar değişkeni olarak kullanılabilmesi için sonlu elemanlar metodu gibi sayısal çözüm yöntemlerinin simülasyon modelinde kullanılması gerekmektedir.

Geliştirilen çözüm yaklaşımı ile yeraltı suyu kirlenici kaynak yerlerinin ve konsantrasyon değerlerinin belirlenmesi, kıyı bölgelerinde tuzlu su girişi problemi önleyecek şekilde optimum pompaj kuyu yerlerinin ve pompaj debilerinin belirlenmesi, kazı alanlarındaki yeraltı suyunu uzaklaştırmak için optimum pompaj kuyu yerlerinin ve pompaj planlarının belirlenmesi gibi problemler çözülebilir. Ancak, bu problemlerin çözülebilmesi için konuyla ilgili kısmi diferansiyel denklemlerin ve kısıtların geliştirilen çözüm yaklaşımına dahil edilmesi gerekmektedir.

7. KAYNAKLAR

- Aguado, E., and Remson, I. (1974) Groundwater Hydraulics in Aquifer Management. *Journal of Hydraul. Div.-ASCE*, 100: (HY1) 103-118.
- Aguado, E., Remson, I., Pikul, M. F. and Thomas, W. A. (1974) Optimal Pumping for Aquifer Dewatering. *Journal of Hydraulic Division – ASCE*, 100: (HY7) 860-877.
- Anderson, M. P. and Bair, E. S. (2001) The Power of Spreadsheet Models, *MODFLOW 2001 and Other Modeling Odysseys Proceedings*, Colorado, USA, s. 815-822.
- Aral, M. M. (1989) Waste Stabilization in Multilayer Aquifers by Optimal Hydraulic Control. *Ground Water*, 27: (4) 517-523.
- Aral, M. M. and Guan, J. (1996) Genetic Algorithms in Search of Groundwater Pollution Sources, Advances in Groundwater Pollution Control and Remediation, (Aral, M. M., Eds.), NATO ASI Series 2, *Kluwer Publ.*, 9: 346-371.
- Aral, M. M., Guan, J. B. and Maslia, M. L. (2001) Identification of Contaminant Source Location and Release History in Aquifers. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6: (3) 225-234.
- Ayvaz, M. T., Karahan, H. and Gürarlan, G. (2007) Yeraltı Suyu Kirletici Kaynak Debininin Yapay Sinir Ağları ile Belirlenmesi, *3. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu*, Gümüşdör / İzmir.
- Başağaoğlu, H. and Yazıcıgil, H. (1994) Multiaquifer Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120: (6) 836-856.
- Bear, J. (1979) Hydraulics of Groundwater, *McGraw-Hill*, New York, 569 p.
- Chang, L.-C., Chu, H.-J. and Hsiao, C.-T. (2007) Optimal Planning of a Dynamic Pump-Treat-Inject Groundwater Remediation System. *Journal of Hydrology*, 342: 295-304.
- Cheng, A. H.-D., Halhal, D., Naji, A. and Ouazar, D. (2000) Pumping Optimization in Saltwater-Intruded Coastal Aquifers. *Water Resources Research*, 36: (8) 2155–2166.
- Cieniawski, S. E., Eheart, J. W. and Ranjithan, S. (1995) Using Genetic Algorithms to Solve a Multiobjective Groundwater Monitoring Problem. *Water Resources Research*, 31: (2) 339-409.

- Colarullo, S. J., Heidari, M. and Maddock, TIII. (1984) Identification of an Optimal Groundwater Management Strategy in a Contaminated Aquifer. *Water Resources Bulletin*, 20: (5) 747-760.
- Covalla, E., Pandarinath, C., Williams, J., Williams, J. and Wingo, A. (2001) Managing Agricultural Water Impacts, Final Paper, E497B—*The Benjamin Franklin Scholars Capstone Course*, North Carolina State University.
- Das, A. and Datta, B. (1999a) Development of Management Models for Sustainable Use of Coastal Aquifers. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 125: (3) 112-121.
- Das, A. and Datta, B. (1999b) Development of Multiobjective Management Models for Coastal Aquifers. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125: (2) 76-87.
- Das, A. and Datta, B. (2001) Application of Optimization Techniques in Groundwater Quantity and Quality Management. *Sadhana*, 26: (4) 293-316.
- Daskin, W. R. and Gorelick, S. M. (1985) A Policy Evaluation Tool: Management of a Multiaquifer System using Controlled Stream Recharge. *Water Resources Research*, 21: (11) 1731-1747.
- Datta, B., Beegle, J. E., Kavvas, M. L. and Orlob, G. T. (1989) Development of an Expert System Embedding Pattern Recognition Techniques for Pollution Source Identification. *Completion Rep. For USGS, Grant No: 14-08-001-G1500*, Dept. of Civil Eng., Univ. of California, Davis.
- De Jong, K. D. (1975) An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems, Doktora Tezi, *Department of Computer and Communication Sciences, University of Michigan*, Ann Arbor, Michigan, USA.
- Delleur, J. W. (2007) *The Handbook of Groundwater Engineering*, CRC Press, Boca Raton.
- Deninger, R. A. (1970) System Analysis of Water Supply Systems. *Water Resour. Bull.*, 6: (4) 573-579.
- Eldho, T. I. and Rao, B. V. (1997) Simulation of Two-Dimensional Contaminant Transport with Dual Reciprocity Boundary Elements. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 20: 213-228.
- EMRL (2005) Groundwater Modeling System (GMS) Version 6.0 Tutorial Document, Volume 2, *Environmental Modeling Research Laboratory*, Brigham Young University, Provo, Utah.
- Finney, B. A., Samsuhadi, and Willis, R. (1992) Quasi Three-Dimensional Optimization Model of Jakarta Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 118: (1) 18-31.

- Freeze, R. A. (1971) Three Dimensional, Transient, Saturated-Unsaturated Flow in a Groundwater Basin. *Water Resources Research*, 7: (2) 347-366.
- Gen, M. and Cheng, R. (1997) Genetic Algorithms and Engineering Design, *John Wiley*, New York, USA.
- Goldberg, D. E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. *Addison-Wesley Pub. Co.*, Reading, MA, xiii, 412p.
- Goldberg, D. E. and Deb, K. A. (1991) Comparative Analysis of Selection Schemes used in Genetic Algorithms, Foundations of Genetic Algorithms, *Morgan Kaufmann Publishers*, San Mateo., CA, USA.
- Goldstein, A. A. and Price, I. F. (1971) On Descent from Local Minima. *Math. Comput.*, 25: (115).
- Gorelick, S. M. (1983) A Review of Distributed Parameter Groundwater Management Modeling Methods. *Water Resources Research*, 19: (2) 305-319.
- Gorelick, S. M. and Remson, I. (1982) Optimal Dynamic Management of Groundwater Pollution Sources. *Water Resources Research*, 18: (1) 71-76.
- Gorelick, S. M., Voss, C. I., Gill, P. E., Murray, W., Saunders, M. A. and Wright, M. H. (1984) Aquifer Reclamation Design: The Use of Contaminant Transport Simulation Combined with Nonlinear Programming. *Water Resources Research*, 20: 415-427.
- Grupta, S. K., Cole, C. R. and Pinder, G. F. (1984) A Finite Element Three-Dimensional Groundwater (FE3DGW) Model for a Multiaquifer System. *Water Resources Research*, 20: (5) 553-563.
- Guan, J. (1998) Genetic Algorithms in Groundwater Quality Management, Doktora Tezi, *School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology*, Atlanta, GA, USA.
- Guan, J. and Aral, M. M. (1999) Optimal Remediation with Well Locations and Pumping Rates Selected as Continuous Decision Variables. *Journal of Hydrology*, 221: 20-42.
- Gunduz, O. and Aral, M. M. (2005) A Dirac-Delta Function Notation for Source/Sink Terms in Groundwater Flow. *Journal of Hydrologic Engineering*, 10: (5) 420-427.
- Hallaji, K. and Yazıcıgil, H. (1996) Optimal Management of Coastal Aquifer in Southern Turkey. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122: (4) 233-244.
- Harrouni, K. E., Ouazar, D., Wrobel, L. C., and Cheng., A. H. -D. (1996) Aquifer Parameter Estimation by Extended Kalman Filtering and Boundary Elements. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 19: (3) 231-237.

- Holland, J. H. (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. **University of Michigan Press**, Ann Arbor, viii, 183p.
- Huang, C. and Mayer, A. S. (1995) Dynamic Optimal Control for Groundwater Remediation Management using Genetic Algorithms, in *Models for Assessing and Monitoring Groundwater Quality*, Proceedings of a Boulder Symposium, (Wagner, B. J., Illangasekere, T. H. and Jensen, K. H., Eds.), **IAHS Publication**, Boulder, Colo., s149-155.
- Huang, C. and Mayer, A. S. (1997) Pump-and-Treat Optimization using Well Locations and Pumping Rates as Decision Variables. **Water Resources Research**, 33: (5) 1001-1012.
- Júlio F. Ferreira da Silva, J. F. F. S. and Haie, N. (2007) Optimal Locations of Groundwater Extractions in Coastal Aquifers. **Water Resources Management**, 21: 1299-1311.
- Karahan, H. and Ayvaz, M. T. (2005a) Time-Dependent Groundwater Modelling using Spreadsheets. **Computer Applications in Engineering Education**, 13: (3) 192-199.
- Karahan, H. and Ayvaz, M. T. (2005b) Transient Groundwater Modeling using Spreadsheets. **Advances in Engineering Software**, 36: (6) 374-384.
- Karahan, H., Gürarlan, G. and Ayvaz, M. T. (2006) Yeraltısuyu Modellemesinde İteratif ve Doğrudan Çözüm Algoritmalarının Karşılaştırılması, **Yedinci Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi**, İstanbul, Türkiye.
- Kinzelbach, K. (1986) *Groundwater Modelling*, **Elsevier**, Netherlands, 333p.
- Larson, S. P., Maddock, T. and Papadopoulos, S. (1977) Optimization Techniques Applied to Groundwater Development. **Memo International Association Hydrogeology**, 13: E57-E67.
- Liu, W. H., Medina, M. A., Thomann, W., Piver, W. T. and Jacobs, T. L. (2000) Optimization of Intermittent Pumping Schedules for Aquifer Remediation using a Genetic Algorithm. **Journal of the American Water Resources Association**, 36: (6) 1335-1348.
- Mahar, P. S. and Datta, B. (2000) Identification of Pollution Sources in Transient Groundwater Systems. **Water Resources Management**, 14: 209-227.
- Mahar, P. S. and Datta, B. (2001) Optimal Identification of Ground-Water Pollution Sources and Parameter Estimation. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 127: (1) 20-29.
- Mahinthakumar, G. and Sayeed, M. (2005) Hybrid Genetic Algorithm-Local Search Methods for Solving Groundwater Source Identification Inverse Problems. **Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE**, 131: (1) 45-57.

- Mantoglou, A. and Kourakos, G. (2007) Optimal Groundwater Remediation under Uncertainty using Multi-Objective Optimization. *Water Resources Management*, 21: 835–847.
- Mazzia, A. and Putti, M. (2002) Mixed-Finite Element and Finite Volume Discretization for Heavy Brine Simulations in Groundwater. *Journal of Comp. and Appl. Math.*, 147: (1) 191-213.
- McDonald, M. G. and Harbough, A. W. (1988) A Modular Three-Dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model, *USGS Techniques of Water Resources Investigations, Book 6* (Chapter A1), s. 586.
- McKinney, D. C. and Lin, M. D. (1994) Genetic Algorithm Solution of Groundwater Management Models. *Water Resources Research*, 30: (6) 1897-1906.
- Michalewicz, Z. (1992) Genetic Algorithm + Data Structure = Evolution Programs, *Springer-Verlag*, New York.
- Mylopoulos, Y. A., Theodosiou, N. and Mylopoulos, N. A. (1999) A Stochastic Optimization Approach in the Design of an Aquifer Remediation Under Hydrogeological Uncertainty. *Water Resources Management*, 13: 335-351.
- Park, C.-H. and Aral, M. M. (2004) Multi-Objective Optimization of Pumping Rates and Well Placement in Coastal Aquifers. *Journal of Hydrology*, 290: 80-99.
- Peralta, R. C. (2004) Optimization Modelling for Groundwater and Conjunctive Use Water Policy Development, *FEM – MODFLOW – Karlovy Vary*, Czech Republic, s317-320.
- Peralta, R. C. and Datta, B. (1990) Reconnaissance – Level Alternative Optimal Groundwater Use Strategies. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116: 676-692.
- Prasad, K. L., and Rastogi, A. K. (2001) Estimating Net Aquifer Recharge and Zonal Transmissivity Values for Mahi Right Canal Project Area, India by Genetic Algorithm. *Journal of Hydrology*, 243: 149-161.
- Rao, S. V. N. (2006) A Computationally Efficient Technique for Source Identification Problems in Three-Dimensional Aquifer Systems Using Neural Networks and Simulated Annealing. *Environmental Forensics*, 7: 233–240.
- Rastrigin, L. A. (1974) Extremal Control Systems, *In Theoretical Foundations of Engineering Cybernetics Series*, Moscow, Russia.
- Ritzel, B. J., Eheart, J.W. and Ranjithan, S. (1994) Using Genetic Algorithms to Solve a Multiple Objective Groundwater Pollution Containment Problem. *Water Resources Research*, 30: (5) 1589-1603.

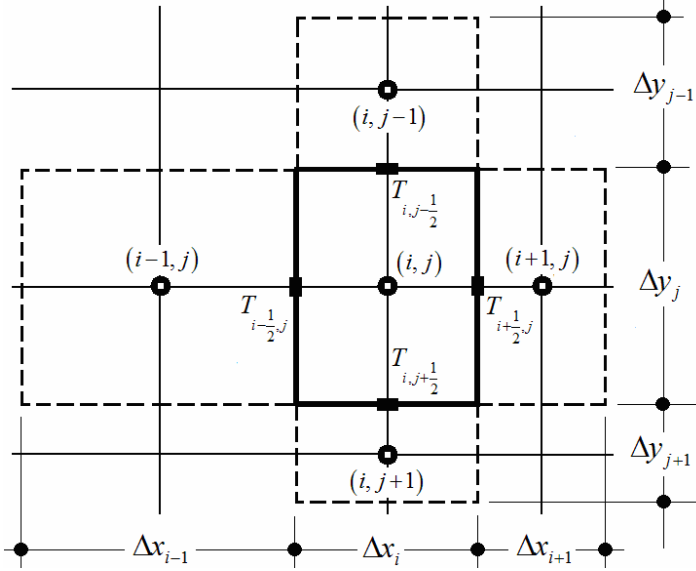
- Rogers, L. L. and Dowla, F. U. (1994) Optimization of groundwater remediation using artificial neural networks with parallel solute transport modeling. *Water Resources Research*, 30: (2) 457-482.
- Rogers, L. L., Dowla, F. U. and Johnson, V. M. (1995) Optimal Field-Scale Groundwater Remediation using Neural Networks and the Genetic Algorithm. *Env. Sci. Tech.*, 29: (5) 1145-1155.
- Ruperti, N. J. (2002) Estimation of the Release History of a Contaminant Source in 2-D Groundwater Systems. *4th International Conference on Inverse Problems in Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil.
- Saffi, M. and Cheddadi, A. (2007) Explicit Algebraic Influence Coefficients: A One-Dimensional Transient Aquifer Model. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences*, 52: (4) 763-776.
- Schwefel, H. -P. (1981) Numerical Optimization of Computer Models, *Wiley & Sons*, Chichester.
- Shen, W.-B., Dong, D.-M. and Yu, M.-Q. (2004) Optimal Groundwater Management Model in a Two-Aquifer System. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 8: (2) 119-129.
- Singh, R. M. and Datta, B. (2004) Groundwater Pollution Source Identification and Simultaneous Parameter Estimation Using Pattern Matching by Artificial Neural Network. *Environmental Forensics*, 5: 143-153.
- Singh, R. M., Datta, B. and Jain, A. (2004) Identification of Unknown Groundwater Pollution Sources using Artificial Neural Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130: (6) 506-514.
- Skaggs, T. H. and Kabala, Z. H. (1994) Recovering the Release History of a Groundwater Contaminant. *Water Resources Research*, 30: (1) 71-79.
- Sun, A. Y., Painter, S. L. and Wittmeyer, G. W. (2006) A Robust Approach for Iterative Contaminant Source Location and Release History Recovery. *Journal of Contaminant Hydrology*, 88: 181-196.
- Sun, N.-Z. (1994) Inverse Problems in Groundwater Modeling. *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht, 352 pp.
- Tokgöz, M., Yılmaz, K. K. and Yazıcıgil, H. (2002) Optimal Aquifer Dewatering Schemes for Excavation of Collector Line. *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, 128: (4) 248-261.
- Tsai, F. T. -C., Sun, N. Z. and Yeh, W. W. G. (2003) A Combinatorial Optimization Scheme for Parameter Structure Identification in Ground-Water Modeling. *Groundwater*, 41: (2) 156-169.

- Tung, C. P. and Chou, C. A. (2004) Pattern Classification using Tabu Search to Identify the Spatial Distribution of Groundwater Pumping. *Hydrogeology Journal*, 12: (5) 488-496.
- USGS (1995) Ground water studies. United States Geological Survey. <http://water.usgs.gov/wid/html/GW.html> (20.12.2007).
- Wagner, J. M., Shamir, U. and Nemati, H. R. (1992) Groundwater Quality Management under Uncertainty: Stochastic Programming Approaches and the Value of Information. *Water Resources Research*, 28: (5) 1233-1246.
- Wang, P. P. and Chunmaio, Z. (1998) An Efficient Approach for Successively Perturbated Groundwater Models. *Advances in Water Resources*, 21: (6) 499-508.
- Wang, W. and Ahlfeld, D. P. (1994) Optimal Groundwater Remediation with Well Location as a Decision Variable: Model Development. *Water Resources Research*, 30: (5) 1605-1618.
- Willis, R. (1983) A Unifid Approach to Regional Groundwater Management. Groundwater Hydraulics, (Rosenshein, J. S. and Bennett, G. D., Eds.), *Water Resources Monograph Series*, Washington, DC.
- Willis, R. L. and Yeh, W. W.-G. (1987) Groundwater Systems Planning and Management, *Prentice-Hall*, Englewood Cliffs, N. J.
- Yazdani, A. and Peralta, R. C. (1986) Sustained-Yield Groundwater Planning by Goal Programming. *Ground Water*, 24: (2) 157-165.
- Yazıcıgil, H. and Rasheeduddin, M. (1987) Optimization Model for Groundwater Management in Multi-Aquifer Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 113: (2) 257-273.
- Yazıcıgil, H., Al-Layla, R. I. and Jong, R. L. D. (1987) Optimal Management of a Regional Aquifer in Eastern Saudi Arabia. *Water Resources Bulletin*, 23: (3) 423-434.
- Zheng, C. M. and Wang, P. P. (1999) An Integrated Global and Local Optimization Approach for Remediation System Design. *Water Resources Research*, 35: (1) 137-148.
- Zhou, X., Chen, M. and Liang, C. (2003) Optimal Scheme of Groundwater Exploitation for Prevention of Seawater Intrusion in the Leizhou Peninsula in Southern China. *Environmental Geology*, 43: 978-985.

EKLER

Ek-1 Yeraltı Suyu Hareketini Temsil Eden Kısmi Diferansiyel Denklemin Sonlu Farklar Metodu ile Çözülmesi

Denklem (1)'in sonlu farklar metodu ile çözümünde kullanılan blok-merkezli grid yapısı Şekil Ek-1.1'de verilmiştir.



Şekil Ek-1.1 Denklem (1)'in çözümünde kullanılan blok merkezli grid yapısı

Şekil Ek-1.1'de, Δx_i , Δx_{i-1} , Δx_{i+1} , Δy_j , Δy_{j-1} ve Δy_{j+1} her bir grid bloğunun x - ve y - yönlerindeki boyutlarını göstermektedir. Şekil Ek-1.1'de verilen blok-merkezli grid yapısı kullanılarak Denklem (1)'in kapalı formda sonlu farklar metodu ile yazılmış hali aşağıdaki gibidir:

$$\frac{1}{\Delta x_i} \left[T_{i+\frac{1}{2},j} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{i+\frac{1}{2},j}^{m+1} - T_{i-\frac{1}{2},j} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{i-\frac{1}{2},j}^{m+1} \right] + \frac{1}{\Delta y_j} \left[T_{i,j+\frac{1}{2}} \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1} - T_{i,j-\frac{1}{2}} \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)_{i,j-\frac{1}{2}}^{m+1} \right] + W_{i,j} = S_{i,j} \frac{h_{i,j}^{m+1} - h_{i,j}^m}{\Delta t} \quad (E1)$$

burada $T_{i+\frac{1}{2},j}$, $T_{i-\frac{1}{2},j}$, $T_{i,j+\frac{1}{2}}$ ve $T_{i,j-\frac{1}{2}}$ grid bloklarının ara yüzeylerindeki akifer iletim

kapasitelerini $[L^2/T]$, $\left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{i+\frac{1}{2},j}^{m+1}$, $\left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{i-\frac{1}{2},j}^{m+1}$, $\left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)_{i,j+\frac{1}{2}}^{m+1}$ ve $\left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)_{i,j-\frac{1}{2}}^{m+1}$ grid bloklarının ara

yüzeylerinde hidrolik yüklerin x - ve y - yönlerindeki türevlerini, Δt , zaman adımını $[T]$, m ise zaman indisini göstermektedir. Denklem (E1)'de verilen iletim kapasitelerinin

hesap yapılan grid noktalarında yazılması için aritmetik, harmonik ve geometrik ortalamalar kullanılabilir. Ancak literatürde, akifer özelliklerinin heterojen olması durumunda harmonik ortalamaların kullanılması önerilmektedir (Anderson ve Bair 2001). Örnek olarak $T_{i+\frac{1}{2},j}$ değerinin değişken grid aralıkları için ağırlıklı harmonik

ortalama değeri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$T_{i+\frac{1}{2},j} = \frac{\frac{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}}{2}}{\frac{\frac{1}{2}\Delta x_i}{T_{i,j}} + \frac{\frac{1}{2}\Delta x_{i+1}}{T_{i+1,j}}} = \frac{T_{i,j}T_{i+1,j}(\Delta x_i + \Delta x_{i+1})}{T_{i,j}\Delta x_{i+1} + T_{i+1,j}\Delta x_i} \quad (E2)$$

Denklem (E1)'de verilen hidrolik yük türevlerinin merkezi fark alınarak hesap yapılan grid noktalarına taşınması ve iletim kapasitelerinin Denklem (E2)'de verildiği gibi yazılmasıyla yeraltı suyu hareketi için aşağıdaki sonlu fark denklemi elde edilmektedir:

$$S_{i,j} \frac{h_{i,j}^{m+1} - h_{i,j}^m}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x_i} \left[\frac{T_{i,j}T_{i+1,j}(\Delta x_i + \Delta x_{i+1})}{T_{i,j}\Delta x_{i+1} + T_{i+1,j}\Delta x_i} \cdot \frac{h_{i+1,j}^{m+1} - h_{i,j}^{m+1}}{2} - \frac{T_{i,j}T_{i-1,j}(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})}{T_{i,j}\Delta x_{i-1} + T_{i-1,j}\Delta x_i} \cdot \frac{h_{i,j}^{m+1} - h_{i-1,j}^{m+1}}{2} \right] + \quad (E3)$$

$$\frac{1}{\Delta y_j} \left[\frac{T_{i,j}T_{i,j+1}(\Delta y_j + \Delta y_{j+1})}{T_{i,j}\Delta y_{j+1} + T_{i,j+1}\Delta y_j} \cdot \frac{h_{i,j+1}^{m+1} - h_{i,j}^{m+1}}{2} - \frac{T_{i,j}T_{i,j-1}(\Delta y_j + \Delta y_{j-1})}{T_{i,j}\Delta y_{j-1} + T_{i,j-1}\Delta y_j} \cdot \frac{h_{i,j}^{m+1} - h_{i,j-1}^{m+1}}{2} \right] + \frac{Q_{i,j}^{m+1}}{\Delta x_i \Delta y_j}$$

Denklem (E3)'de ilgili düzenlemeler ve sadeleştirmelerin yapılmasıyla aşağıdaki sonlu fark denklemi elde edilmektedir:

$$h_{i,j}^{m+1,n+1} = \frac{CC \cdot h_{i,j}^{m,n+1} + CE \cdot h_{i+1,j}^{m+1,n} + CW \cdot h_{i-1,j}^{m+1,n+1} + CS \cdot h_{i,j+1}^{m+1,n} + CN \cdot h_{i,j-1}^{m+1,n+1} + W}{CC + CE + CW + CS + CN} \quad (E4)$$

Denklem (E4)'de n iterasyon adımını, CC , CE , CW , CS , CN ve W ise aşağıdaki verilen kısaltmaları göstermektedir:

$$CC = \frac{S_{i,j}}{\Delta t} \quad (E4a)$$

$$CE = \frac{2T_{i,j}T_{i+1,j}}{(T_{i,j}\Delta x_{i+1} + T_{i+1,j}\Delta x_i)\Delta x_i} \quad (E4b)$$

$$CW = \frac{2T_{i,j}T_{i-1,j}}{(T_{i,j}\Delta x_{i+1} + T_{i+1,j}\Delta x_i)\Delta x_i} \quad (E4c)$$

$$CS = \frac{2T_{i,j}T_{i,j+1}}{[T_{i,j}\Delta y_{j+1} + T_{i,j+1}\Delta y_j]\Delta y_j} \quad (E4d)$$

$$CN = \frac{2T_{i,j}T_{i,j-1}}{[T_{i,j}\Delta y_{j-1} + T_{i,j-1}\Delta y_j]\Delta y_j} \quad (E4e)$$

$$W = \frac{\pm Q_{i,j}^{m+1}}{\Delta x_i \Delta y_j} \quad (E4f)$$

Denklem (E4)'den görüleceği gibi, sayısal çözümlemede tüm akifer özellikleri ve grid aralıkları değişken kabul edilmiştir. Denklem (E4)'ün çözümü iteratif Gauss-Seidel (Freeze 1971) algoritması ile yapılmıştır. Çözüm esnasında iterasyon sayısını azaltmak amacıyla Ardışık Aşırı Rahatlatma (Successive Over-Relaxation – SOR) tekniği kullanılmıştır. Bu teknikte, bir önceki iterasyon ile mevcut iterasyonda elde edilen sonuçlar belli bir ağırlık katsayısı ile çarpılmaktadır. Bu işlem sayısal çözümlemede yakınsama hızını önemli ölçüde arttırmaktadır (Kinzelbach 1986). Denklem (E4)'ün ardışık aşırı rahatlatma tekniği ile düzenlenmiş hali aşağıdaki gibidir.

$$h_{i,j}^{m+1,n+1} = (1-w)h_{i,j}^{m+1,n} + \frac{w(CC \cdot h_{i,j}^{m,n+1} + CE \cdot h_{i+1,j}^{m+1,n} + CW \cdot h_{i-1,j}^{m+1,n+1} + CS \cdot h_{i,j+1}^{m+1,n} + CN \cdot h_{i,j-1}^{m+1,n+1} + W)}{CC + CE + CW + CS + CN} \quad (E5)$$

burada w rahatlatma parametresidir ve hızlı yakınsama için değeri 1 ile 2 arasında alınmaktadır (Kinzelbach 1986). w 'nin optimum değeri problemin parametrelerine ve geometrisine bağlı olarak değişmektedir (Karahan vd 2006). Yapılan denemeler, bu çalışma için en iyi sonucun $w = 1.82$ olması durumunda elde edildiğini göstermiştir.

Ek-2 De Jong'un 1. Test Fonksiyonu

De Jong'un (De Jong 1975) sürekli ve konveks yapıda olan birinci test fonksiyonu performans değerlendirilmesinde kullanılan en basit fonksiyonlardan biridir. Fonksiyonun yapısı, çözüm uzayı ve minimum noktası aşağıda verilmiştir.

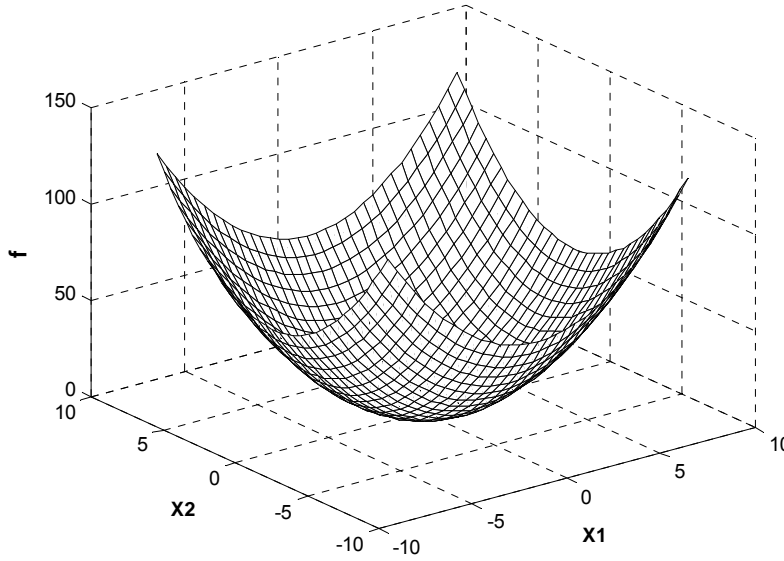
$$\text{Amaç Fonksiyonu} : f(x) = \min \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 \right]$$

$$\text{Çözüm Uzayı} : x_i \in [-5.12, 5.12]$$

$$\text{Global Optimum} : f(x) = 0$$

$$\text{Optimum Çözüm} : x_i = 0 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Değişken sayısının $n = 2$ olması durumunda fonksiyonun grafiği Şekil Ek-2.1'de, amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi ise Şekil Ek-2.2'de verilmiştir.

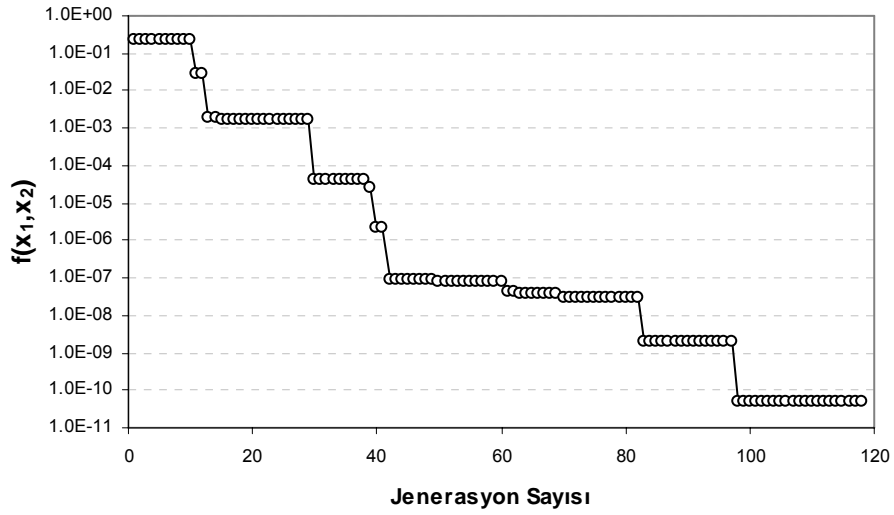


Şekil Ek-2.1 De Jong'un 1. test fonksiyonu

118. jenerasyon sonucunda bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

$$\text{Fonksiyon Değeri} : f(x) = 4.77 \times 10^{-11}$$

$$\text{Çözüm} : x_1 = x_2 = -4.88 \times 10^{-6}$$



Şekil Ek-2.2 Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi

Elde edilen sonuçlardan görüleceği gibi, optimizasyon modelinin bulduğu sonuçlarla test fonksiyonunun ve karar değişkenlerinin global optimum çözümleri iyi uyum içindedir.

Ek-3 Rastrigin'in 6. Test Fonksiyonu

Bir çok lokal optimum çözüme sahip olan Rastrigin'in 6. test fonksiyonunun (Rastrigin 1974) yapısı, çözüm uzayı ve minimum noktası aşağıda verilmiştir.

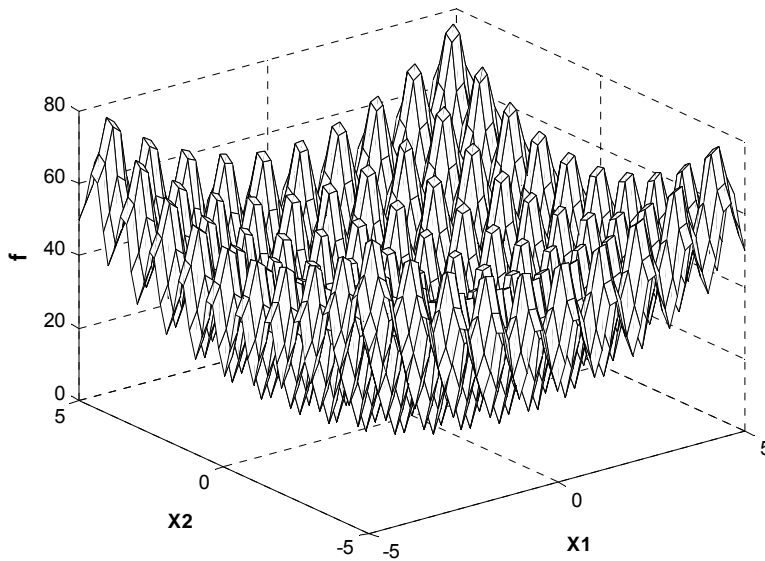
$$\text{Amaç Fonksiyonu} : f(x) = \min \left[10n + \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)) \right]$$

$$\text{Çözüm Uzayı} : x_i \in [-5.12, 5.12]$$

$$\text{Global Optimum} : f(x) = 0$$

$$\text{Optimum Çözüm} : x_i = 0 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Değişken sayısının $n = 2$ olması durumunda fonksiyonun grafiği Şekil Ek-3.1'de, amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi ise Şekil Ek-3.2'de verilmiştir.

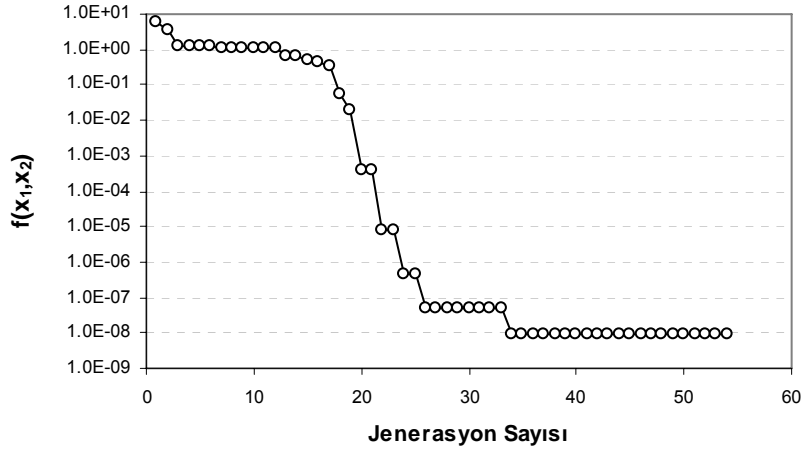


Şekil Ek-3.1 Rastrigin'in 6. test fonksiyonu

54 jenerasyon sonucunda bulunan sonuç aşağıdakigibidir:

$$\text{Fonksiyon Değeri} : f(x) = 9.47 \times 10^{-9}$$

$$\text{Çözüm} : x_1 = -4.88 \times 10^{-6} \quad x_2 = 4.88 \times 10^{-6}$$



Şekil Ek-3.2 Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi

Elde edilen sonuçlardan görüleceği gibi, bu uygulama için de optimizasyon modelinin sonuçları ile gerçek sonuçlar birbirlerine çok yakındır.

Ek-4 Michalewicz'in 12. Test Fonksiyonu

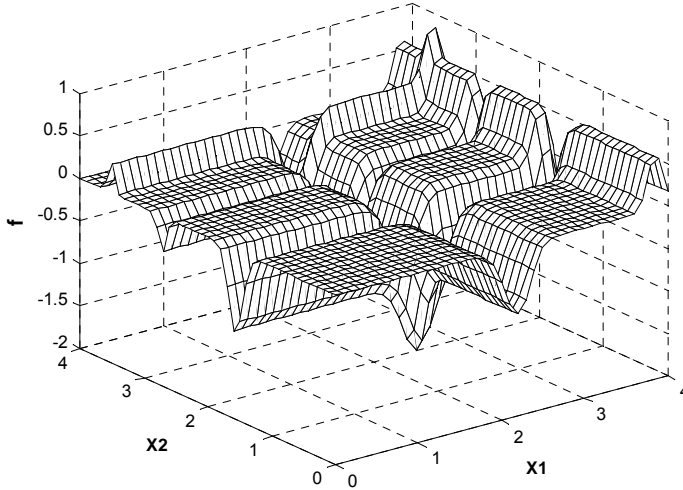
Michalewicz'in 12. test fonksiyonu (Michalewicz 1992), değişken sayısının faktöriyeli kadar ($n!$) lokal minimum içeren bir fonksiyondur. Fonksiyondaki m parametresi çözüm yüzeyindeki vadi şekillerinin dikliğini temsil etmektedir ve büyük m değerleri global minimum çözüme ulaşılmasını zorlaştırmaktadır. Fonksiyonun yapısı, çözüm uzayı ve minimum noktası aşağıda verilmiştir.

$$\text{Amaç Fonksiyonu} \quad : \quad f(x) = \min \left[-\sum_{i=1}^n \sin(x_i) \left[\sin\left(\frac{i \cdot x_i^2}{\pi}\right) \right]^{2m} \right] \quad m = 10$$

$$\text{Çözüm Uzayı} \quad : \quad x_i \in [0, \pi]$$

$$\text{Global Optimum} \quad : \quad f(x) = -4.68732 \quad (n = 5 \text{ olması durumunda})$$

Değişken sayısının $n = 2$ kabul edildiği durumda fonksiyonun yapısı Şekil Ek-4.1'de ve $n = 5$ olması durumunda amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi ise Şekil Ek-4.2'de görülmektedir.

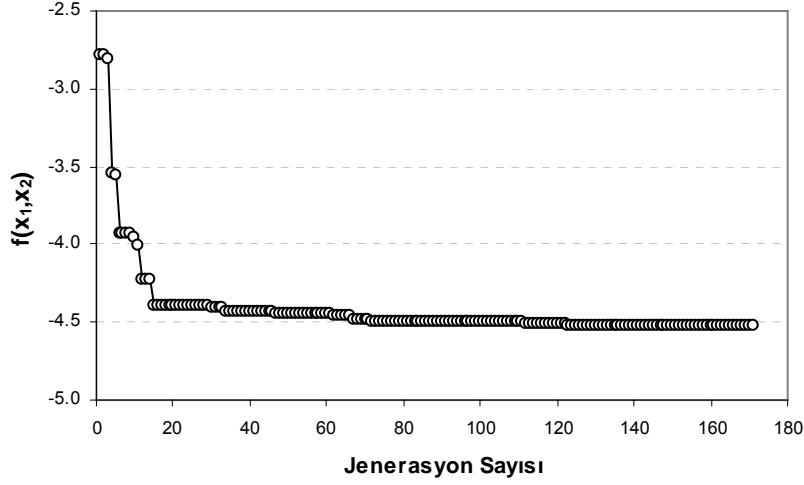


Şekil Ek-4.1 Michalewicz'in 12. test fonksiyonu

$n = 5$ için 171. jenerasyon sonucunda bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

$$\text{Fonksiyon Değeri} \quad : \quad f(x) = -4.52744$$

$$\text{Çözüm} \quad : \quad \begin{array}{l} x_1 = 2.20895 \quad x_2 = 1.57153 \quad x_3 = 1.27608 \\ x_4 = 1.91898 \quad x_5 = 0.99552 \end{array}$$



Şekil Ek-4.2 Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi

Yukarıdaki sonuçlardan görüleceği gibi, optimizasyon modelinin bulduğu sonuç ile ilgili problemin global optimum çözümü arasında biraz farklılık bulunmaktadır. Ancak, aradaki bu fark değişim jenerasyon sayısının (*st*) artırılmasıyla azaltılabilmektedir.

Ek-5 Goldstein-Price'ın Test Fonksiyonu

Goldstein-Price'in test fonksiyonunun (Goldstein ve Price 1971) yapısı, çözüm uzayı ve global minimum noktası aşağıda verilmiştir.

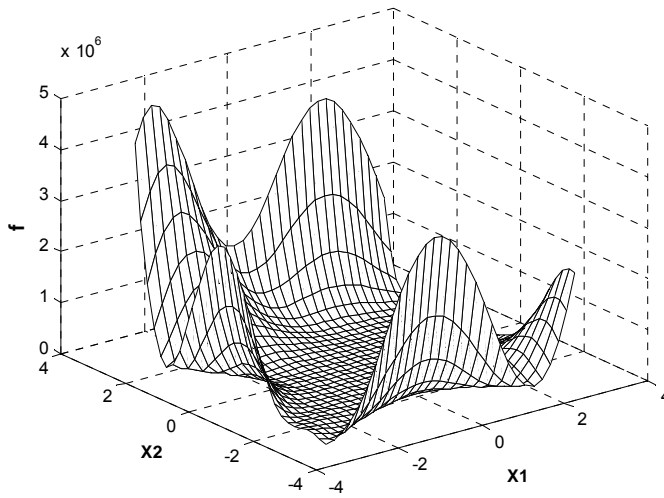
$$\text{Amaç Fonksiyonu} : f(x) = \min \left[\begin{array}{l} \left[1 + (x_1 + x_2 + 1)^2 \times \begin{pmatrix} 19 - 14x_1 + 3x_1^2 \\ -14x_2 + 6x_1x_2 + 3x_2^2 \end{pmatrix} \right] \times \\ \left[30 + (2x_1 - 3x_2)^2 \times \begin{pmatrix} 18 - 32x_1 + 12x_1^2 \\ +48x_2 - 36x_1x_2 + 27x_2^2 \end{pmatrix} \right] \end{array} \right]$$

$$\text{Çözüm Uzayı} : x_i \in [-2, 2]$$

$$\text{Global Optimum} : f(x) = 3$$

$$\text{Optimum Çözüm} : x_1 = 1 \quad x_2 = -1$$

Fonksiyonun yapısı Şekil Ek-5.1'de, amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi ise Şekil Ek-5.2'de verilmiştir.

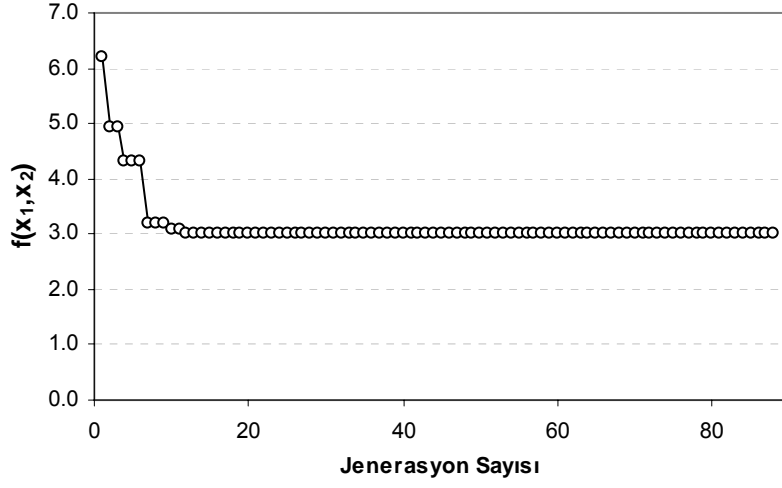


Şekil Ek-5.1 Goldstein-Price'in test fonksiyonu

88 jenerasyon sonucunda bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

$$\text{Fonksiyon Değeri} : f(x) = 3.00000$$

$$\text{Çözüm} : x_1 = -0.00003 \quad x_2 = -1.00000$$



Şekil Ek-5.2 Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi

Yukarıdaki sonuçlardan görüleceği gibi, geliştirilen optimizasyon modeli ile global optimuma yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Ek-6 Schwefel'in 7. Test Fonksiyonu

Schwefel'in 7. test fonksiyonunun (Schwefel 1981) yapısı, çözüm uzayı ve minimum noktası aşağıda verilmiştir.

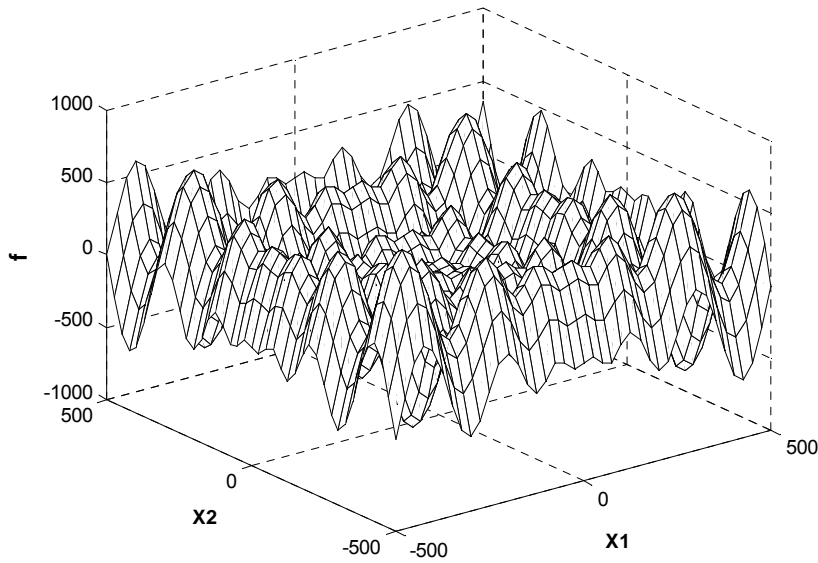
$$\text{Amaç Fonksiyonu} : f(x) = \min \left[\sum_{i=1}^n -x_i \cdot \sin(\sqrt{|x_i|}) \right]$$

$$\text{Çözüm Uzayı} : x_i \in [-500, 500]$$

$$\text{Global Optimum} : f(x) = -n \cdot 418.98292$$

$$\text{Optimum Çözüm} : x_i = 420.96872 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Değişken sayısının $n = 2$ kabul edilmesi durumunda fonksiyonun yapısı Şekil Ek-6.1'de, amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi ise Şekil Ek-6.2'de verilmiştir.

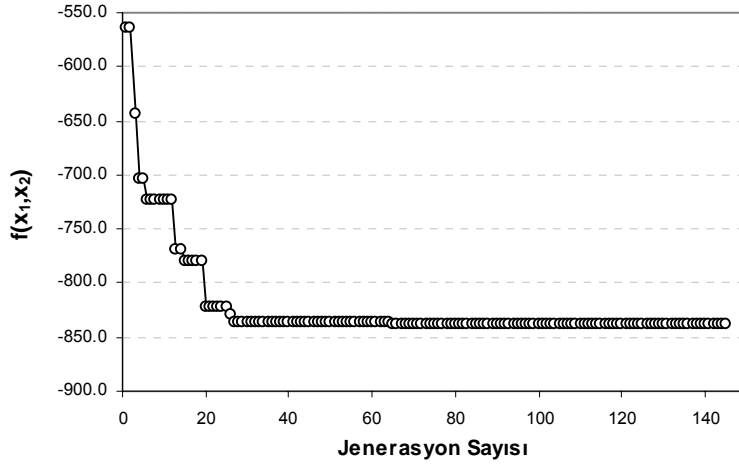


Şekil Ek-6.1 Schwefel'in 7. test fonksiyonu

$n = 2$ için 145. jenerasyon sonucunda bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

$$\text{Fonksiyon Değeri} : f(x) = -837.86144$$

$$\text{Çözüm} : x_1 = 420.89828 \quad x_2 = 421.87518$$



Şekil Ek-6.2 Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi

Görüleceği gibi, bu uygulama için de elde edilen sonuçlar global optimuma yakındır.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Tamer AYVAZ, 4 Mart 1980 yılında Ankara'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini sırasıyla Erzincan ve Safranbolu'da, lise öğrenimini ise İzmir'de tamamladı. 2001 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2004 yılında Anadolu Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Geoteknik alanında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2002 yılından bu yana Pamukkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Hidrolik Ana Bilim dalında araştırma görevlisi ve 2004 yılından bu yana aynı ana bilim dalında doktora öğrencisi olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.