

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YERALTISUYU KİRLETİCİ KAYNAK YERLERİNİN VE BOŞALIM
GEÇMİŞLERİNİN DİFERANSİYEL GELİŞİM ALGORİTMASI
KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Gürhan GÜRARSLAN**

Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği

Programı : Hidrolik

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Halil KARAHAN

EYLÜL 2011

DOKTORA TEZ ONAY FORMU

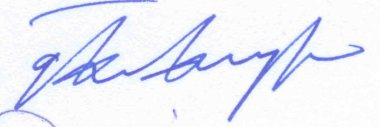
Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırılmasının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etki ve akademik kurallara özenle riayet

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 051621001 nolu öğrencisi Gürhan Gürarslan tarafından hazırlanan “YERALTISUYU KİRLLETİCİ KAYNAK YERLERİNİN VE BOŞALIM GEÇMİŞLERİNİN DİFERANSİYEL GELİŞİM ALGORİTMASI KULLANILARAK BELİRLENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

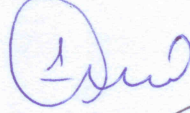
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Halil KARAHAN (PAÜ)
(Jüri Başkanı)



Jüri Üyesi : Prof. Dr. Gökmen TAYFUR (İYTE)



Jüri Üyesi : Prof. Dr. M. Erol Keskin (SDÜ)



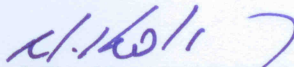
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Orhan GÜNDÜZ (DEÜ)



Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. A. Cem KOÇ (PAÜ)



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19.10.2011 tarih ve ...2.8/9..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Nuri KOLŞUZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışmada bilinmeyen yeraltı suyu kirlilik kaynağı yer ve boşalan geçmişlerini belirlemesi amacıyla etkin bir S/O modeli geliştirilmiştir. Sembolasyon modelinde yeraltı suyu akışı ve kirlenici taşınımını temsil eden kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için MODFLOW ve MT3DMS paket programları, akış alanı modelinde ise diferansiyel gelişim algoritması kullanılmıştır.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde katkıda bulunan başta tez danışmanım Prof. Dr. Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

Özellikle büyük emeği olan danışmanım Şehinaz Gürarşlan'ı rahmetle anar ve şükranla sunarım. Doğulara gelirken maddi ve manevi eşitlik katkıda olan annem, babam ve kardeşlerime minnettarım. Ayrıca tez çalışması boyunca gösterdiği özveri ve sabırından dolayı eşim N. Gürarşlan'a, kızlarım Deniz Gürarşlan ve Zeren Gürarşlan'a teşekkür ederim.

İmza

Öğrenci Adı Soyadı : Gürhan GÜRARŞLAN

Eylül 2011

Gürhan GÜRARŞLAN

İngilizce Yük. Müh.

ÖNSÖZ

Bu çalışmada bilinmeyen yeraltısuyu kirlilik kaynağı yer ve boşalım geçmişlerinin belirlenmesi amacıyla etkin bir S/O modeli geliştirilmiştir. Simülasyon modelinde, yeraltısuyu akımı ve kirlenici taşınımını temsil eden kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için MODFLOW ve MT3DMS paket programları, optimizasyon modelinde ise diferansiyel gelişim algoritması kullanılmıştır.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde katkıda bulunan başta tez danışmanım Prof. Dr. Halil Karahan'a, tezde kullanılan simülasyon kodlarının hazırlanmasında emeği geçen Doç. Dr. M. Tamer Ayvaz'a, tezin her aşamasında yaptıkları yönlendirme ve tavsiyelerinden faydalandığım Prof. Dr. Gökmen Tayfur'a ve Yrd. Doç. Dr. Orhan Gündüz'e teşekkür ederim. Bugünlere gelmemde katkısı olan isimlerini tek tek sayamadığım tüm hocalarıma teşekkür ederim. Ayrıca eğitim yaşamım boyunca üzerimde büyük emeği olan babaannem Şehriban Gürarlan'ı rahmetle anar ve şükranlarımı sunarım. Bugünlere gelmemde maddi ve manevi açıdan katkısı olan annem, babam ve kardeşlerime minnettarım. Ayrıca tez çalışması boyunca gösterdiği özveri ve sabırdan dolayı eşim Nilüfer Gürarlan'a, kendilerine zaman ayırmakta zorlandığım kızlarım Deniz Gürarlan ve Zeren Gürarlan'a teşekkür ederim.

Eylül 2011

Gürhan GÜRARSLAN

İnşaat Yük. Müh.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Tezin Organizasyonu.....	3
2. LİTERATÜR ÖZETİ	5
3. SİMÜLASYON MODELİ	12
3.1 Yeraltısuyu Akımı Denklemi	12
3.2 Yeraltısuyu Kirletici Taşınımı Denklemi	13
3.3 Yeraltısuyu Kirletici Madde Taşınımı Denklemine Sayısal Çözümü.....	16
4. OPTİMİZASYON MODELİ	22
4.1 Diferansiyel Gelişim Algoritması	24
4.1.1 Başlangıç Toplumunun Oluşturulması.....	25
4.1.2 Mutasyon.....	25
4.1.3 Çaprazlama.....	26
4.1.4 Seçim.....	27
4.1.5 Durdurma Kriteri.....	27
4.2 Optimizasyon Modelinin Testi	28
4.2.1 Rosenbrock Fonksiyonu.....	28
4.2.2 Rastrigin Fonksiyonu	29
4.2.3 Schwefel Fonksiyonu	31
4.2.4 Griewank Fonksiyonu	32
4.2.5 Michalewicz Fonksiyonu	34
4.2.6 Kısıtlı Optimizasyon Problemi I	36
4.2.7 Kısıtlı Optimizasyon Problemi II.....	39
4.2.8 Kısıtlı Optimizasyon Problemi III.....	41
4.2.9 Kısıtlı Optimizasyon Problemi IV	44
4.2.10 Kısıtlı Optimizasyon Problemi V.....	46
5. PROBLEMİN FORMÜLASYONU	49
5.1 Simülasyon Modeli	49
5.2 Optimizasyon Modeli	49
5.3 Optimum Kaynak ve Aktif Stres Periyotlarının Belirlenmesi	50
5.4 Gözlem Verilerinin Ölçüm Hatası İçermesi Durumu.....	51
5.5 Performans Değerlendirme Kriterleri.....	52
5.6 Diferansiyel Gelişim Algoritmasının Parametreleri.....	53
6. SAYISAL UYGULAMALAR	54
6.1 Sayısal Uygulama 1	56
6.2 Sayısal Uygulama 2.....	64
7. SONUÇLAR	70
8. KAYNAKLAR	72

KISALTMALAR

S/O	: Simulation/optimization
DGA	: Diferansiyel gelişim algoritması
KDD	: Kısmi diferansiyel denklem
EA	: Evrimsel algoritma
KDG	: Kültürel diferansiyel gelişim algoritması
SITB	: Süzme ısı tavlama benzetimi
GA	: Genetik algoritma
NM-PSO	: Nelder-Mead parçacık sürü optimizasyon algoritması
BEA	: Biçimdeş eşleme algoritması
SSA	: Stokastik sıralama algoritması
EP	: Evrimsel programlama
MPSO	: Melez parçacık sürü optimizasyonu algoritması
NH	: Normalize edilmiş hata
YOTH	: Yüzde ortalama tahmin hatası
SS	: Standart sapma

TABLO LİSTESİ

Tablolar

4.1: Kısıtlı optimizasyon problemi I için DGA ve çeşitli çözüm algoritmaların performansının karşılaştırılması.....	38
4.2: Kısıtlı optimizasyon problemi II için DGA ve çeşitli çözüm algoritmaların performansının karşılaştırılması.....	41
4.3: Kısıtlı optimizasyon problemi III için DGA ve çeşitli çözüm algoritmaların performansının karşılaştırılması.....	43
4.4: Kısıtlı optimizasyon problemi IV için DGA ve çeşitli çözüm algoritmaların performansının karşılaştırılması.....	45
4.5: Kısıtlı optimizasyon problemi V için DGA ve çeşitli çözüm algoritmaların performansının karşılaştırılması.....	47
6.1: Çözüm parametreleri.....	57
6.2: Her aktif stres periyotu için kaynak akılarının gerçek değerleri.....	57
6.3: Duyarlılık analizinde 125 farklı çözüm için elde edilen SSE değerleri.....	58
6.4: Farklı gürültü seviyeleri için YSA, GA, AAT ve DGA ile elde edilen NH değerlerinin karşılaştırılması.....	62
6.5: Kaynak akılarının gerçek değerleri ile $\alpha = 0.10$ (orta ölçekli gürültü seviyesi) için tahmin edilen kaynak akılarının karşılaştırılması.....	63
6.6: Çözüm parametreleri.....	65
6.7: Kaynak yerlerinin ve her aktif stres periyotunda kaynak akılarının gerçek değerleri.....	65
6.8: Her çözüm adayı için elde edilen SSE değerleri.....	66
6.9: Kaynak yerlerinin ve her aktif stres periyotunda kaynak akılarının hesaplanan değerleri.....	66
6.10: Farklı gürültü seviyeleri için elde edilen NH ve SSE değerleri.....	68
6.11: Farklı gürültü seviyeleri için kaynak akılarının ve yerlerinin gerçek ve tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılması.....	69

ŞEKİL LİSTESİ

Şekiller

3.1: Bir akifer sisteminin blok-merkezli ağlara bölünmüş şekli (McDonald ve Harbaugh, 1984).....	16
3.2: Blok-merkezli ve düğüm merkezli ağ yapıları (McDonald ve Harbaugh, 1984).....	17
4.1: Rosenbrock fonksiyonu ($n=2$).	29
4.2: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.	29
4.3: Rastrigin fonksiyonu ($n=2$).	30
4.4: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.	31
4.5: Schwefel fonksiyonu ($n=2$).	32
4.6: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.	32
4.7: Griewangk fonksiyonu ($n=2$).	33
4.8: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.	34
4.9: Michalewicz fonksiyonu ($n=2$).	35
4.10: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.	35
4.11: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.	37
4.12: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.	40
4.13: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.	43
4.14: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.	45
4.15: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.	47
6.1: Akifer Modeli 1 (Singh ve Diğ., 2004).	54
6.2: Akifer Modeli 2.....	55
6.3: $NP = 20$, $MF = 0.8$ ve $CR = 0.8$ için elde edilen yakınsama grafiği.	62
6.4: $NP = 20$, $MF = 0.8$ ve $CR = 0.8$ için gerçek ve hesaplanan kaynak akılarının karşılaştırılması.	63
6.5: En iyi çözüm için elde edilen yakınsama grafiği.	67
6.6: En iyi çözüm için gerçek ve hesaplanan kaynak akıları ve yerlerinin karşılaştırılması.	67

SEMBOL LİSTESİ

h	Hidrolik yük
q_s	Akiferin birim hacmi başına düşen kaynak/yitik debisi
K_{ij}	Hidrolik iletkenlik tensörünün bileşenleri
C	Çözünmüş madde konsantrasyonu
v_i	Sızma hızı
θ	Akiferin efektif porozite değeri
C_s	Kaynak/yitik akımındaki çözünmüş madde konsantrasyonu
D_{ij}	Hidrodinamik dispersiyon tensörünün bileşenleri
α_L	Boyuna dispersivite katsayısı
α_T	Enine dispersivite katsayısı
α_{TH}	Yatay enine dispersivite katsayısı
α_{TV}	Düşey enine dispersivite katsayısı
D^*	Moleküler difüzyon katsayısı
$ V $	hız vektörünün büyüklüğü
q_i	Darcy akısı
N_g	Toplam konsantrasyon gözlem kuyusu sayısı
N_k	Toplam kirletici kaynak sayısı
N_{sp}	Toplam konsantrasyon stres periyotu sayısı
$C_{i,j}^h$	i . konsantrasyon gözlem kuyusunda j . stres periyotunda hesaplanan konsantrasyon

$C_{i,j}^g$	i . konsantrasyon gözlem kuyusunda j . stres periyotunda gözlenen konsantrasyon
\mathbf{q}	Kaynak akısı vektörü
\mathbf{C}	Simülasyon modelinden elde edilen konsantrasyon vektörü
\mathbf{h}	Simülasyon modeli ile elde edilen hidrolik yük vektörü
MF	Mutasyon faktörü
CR	Çaprazlama oranı
NP	Populasyon sayısı
$W_{i,j}$	i . konsantrasyon gözlem kuyusunda j . stres periyotunda kullanılan ağırlık katsayısı
$SSE_{k,s}$	Kaynak sayısı k aktif stres periyodu sayısı s olan bir kirletici kaynak belirlenmesi probleminin çözümünde hesaplanan ve gözlenen konsantrasyonların farklarının karelerinin ağırlıklı toplamını
\mathbf{X}_{\min}	Kaynak yerleri ile ilgili karar değişkeninin alt sınırı (\mathbf{X} için)
\mathbf{X}_{\max}	Kaynak yerleri ile ilgili karar değişkeninin üst sınırı (\mathbf{X} için)
\mathbf{Y}_{\min}	Kaynak yerleri ile ilgili karar değişkeninin alt sınırı (\mathbf{Y} için)
\mathbf{Y}_{\max}	Kaynak yerleri ile ilgili karar değişkeninin üst sınırı (\mathbf{Y} için)
\mathbf{q}_{\min}	Kaynak akıları ile ilgili karar değişkenlerinin alt ve üst sınırları
\mathbf{q}_{\max}	Kaynak akıları ile ilgili karar değişkenlerinin alt ve üst sınırları
η	Yeterince büyük sabit bir değer
Ω^*	Kaynak sayısı k aktif stres periyodu sayısı s olan bir kirletici kaynak belirlenmesi probleminin optimum çözümü
$\Omega_{k,s}$	Kaynak sayısı k aktif stres periyodu sayısı s olan bir kirletici kaynak belirlenmesi probleminin bir çözümü
k_{\max}	Göz önüne alınacak en büyük kaynak sayısı
s_{\max}	Göz önüne alınacak en büyük aktif stres periyodu sayısı

- C^* Hatalı gözlem konsantrasyonu değeri
- ε Ortalaması 0 ve standart sapması 1 olan normal dağılıma uyan bir hata terimi
- α Değeri 0 ile 1 arasında değişen ondalıklı bir sayı
- N_k Potansiyel kaynak yerlerinin sayısı
- N_{sp} Toplam stres periyodu sayısı

ÖZET

YERALTISUYU KİRLETİCİ KAYNAK YERLERİNİN VE BOŞALIM GEÇMİŞLERİNİN DİFERANSİYEL GELİŞİM ALGORİTMASI KULLANILARAK BELİRLENMESİ

Bu tez çalışmasında bilinmeyen kirlenici kaynak yerlerini, sayılarını, aktif stres periyotlarını ve boşalım geçmişlerini etkin bir şekilde belirleyen bir Simülasyon/Optimizasyon (S/O) modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde simülasyon işlemleri MODFLOW ve MT3DMS paket programları ile, optimizasyon işlemleri ise diferansiyel gelişim algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen S/O modelinin performansı, iki adet hipotetik akifer modeli üzerinde gerçek ve hatalı gözlem verileri kullanılarak test edilmiştir. Birinci modelde, kaynakların yerleri ve sayılarının bilindiği varsayılarak potansiyel kaynakların boşalım geçmişleri elde edilmiştir. İkinci modelde ise kaynaklarla ilgili herhangi bir bilgi olmadığı varsayılarak potansiyel kaynakların yerleri, sayıları, aktif stres periyotları ve boşalım geçmişleri birlikte belirlenmiştir. Geliştirilen modelde literatürde verilen sonuçlardan daha iyi çözümler elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kirlenici kaynağı belirlenmesi, boşalım geçmişi, MODFLOW, MT3DMS, simülasyon/optimizasyon, diferansiyel gelişim algoritması.

SUMMARY

IDENTIFICATION OF GROUNDWATER CONTAMINANT SOURCE LOCATIONS AND RELEASE HISTORIES BY USING DIFFERENTIAL EVOLUTION ALGORITHM

In this thesis, an efficient simulation/optimization (S/O) model is developed for unknown contaminant source locations, numbers, active stress periods and release histories. In the proposed method, the simulation process is carried out by MODFLOW and MT3DMS packages and the optimization process is carried out by differential evolution algorithm. The performance of the proposed S/O model is tested by two synthetic aquifer model with the true and the noisy observation data. In the first model, the release histories of the potential sources are obtained by assuming the source locations and numbers are known. In the second model; locations, numbers, active stress periods and release histories of the potential sources are determined by assuming there is no information about the source characteristics. The obtained results from the proposed model are better than the results given in literature.

Keywords: Contaminant source identification, release history, MODFLOW, MT3DMS, simulation/optimization, differential evolution algorithm.

1. GİRİŞ

Yeraltısuyu kirletici madde kaynağının belirlenmesi ve pompalama-arıtma (pump-and-treat) yöntemiyle yeraltısuyu kirletici madde iyileştirilmesinin optimal tasarımı, yeraltısuyu kaynaklarının yönetimi ve korunmasında en önemli iki konudur. Kirlenmiş yeraltısuyu kaynaklarının iyileştirilmesinde karşılaşılan ilk adım kirletici madde kaynaklarının yerini belirlemek ve mevcut gözlem değerlerinden faydalanarak yeraltısuyu kirletici madde kaynaklarının boşalım geçmişi belirlenmektedir. Bu çalışmaların bulgularına dayalı olarak, iyileştirme sistemlerinin tasarımı ve yeraltında kirletici madde bulutunun yayılımının yeniden tasarımı sağlanabilir. Kirletici madde kaynağı belirlenmesi problemi, yeraltısuyu kirliliğinin izole edilmesinin ve temizlenmesinin en önemli aşamalarından biri olarak göz önüne alınmaktadır (Hwang ve diğ., 1984). Yeraltısuyu kirletici madde kaynağı belirlenmesi problemi, yeraltısuyu akımı ve kirletici madde taşınımı proseslerini birlikte dikkate alan ters (invers) problemdir. Matematiksel olarak ifade edildiğinde, kirletici madde kaynağı belirlenmesi problemi kötü tanımlanmış (ill-posed) bir problemdir (Skaggs ve diğ. 1994). Konumsal ve/veya zamansal verilerden faydalanarak yeraltısuyu kirletici madde bulutunun boşalım geçişinin iyileştirilmesi yeraltısuyu hidrolojisinde oldukça iddialı bir problemdir (Skaggs ve diğ. 1994, Woodbury ve Ulrych, 1996).

Yeraltısuyu kirlenmesinin iyileştirilmesi karmaşık, zaman alıcı ve güç bir problemdir (Pye ve diğ. 1983, Knox ve diğ. 1986, Mackay ve Cherry 1989, Haley ve diğ. 1991). İyileştirme teknikleri içerisinde pompalama-arıtma stratejisinin, çözünen fazdaki yeraltısuyu kirletici madde bulutunun gideriminde en etkili ve en başarılı metotlardan biri olduğu kanıtlanmıştır. Pompalama-arıtma sistemleri kirlenmiş yeraltısuyunun hidrolik olarak kontrol altına alınması ve daha sonra iyileştirebilmesi için bir takım kuyuların kurulmasını ve işletilmesini gerektirir. Sistemin tasarımında, kaç tane kuyu açacağımızı, kuyuların nerelere yerleştirilmesi gerektiği ve her kuyu için ne kadar deşarj debisinin gerektiği belirlenmek zorundadır. Bu amaç için yeraltısuyu simülasyon modelleriyle birleştirilmiş optimizasyon metotları, düşük maliyetli ve

yüksek performanslı pompalama-arıtma tekniğine dayalı iyileştirme sistemlerinin tasarımı için değerli bir araçtır (Guan, 1998).

1.1 Tezin Amacı

Son yıllarda gelişmekte olan ülkelerde, hızlı nüfus artışı, artan sanayileşme ve atıksuların doğrudan ya da yeteri kadar arıtılmadan alıcı ortamlara verilmesi sonucu yüzeysel ve yeraltısuyu kaynakları hızla kirlenmektedir. Yeraltısuyu kirliliği özellikle endüstriyel bölgelerde zehirli atıkların gizli bir şekilde depolanmasından; atık depolama konteynerleri, kanalizasyon boruları ve yeraltı depolama tanklarından meydana gelen sızıntılar ile tarımsal faaliyetler sonucu oluşan kirleticilerden kaynaklanır.

Yeraltısuyu kirliliğinin etkili bir şekilde kontrolü ve azaltılması, kirletici kaynaklarının güvenilir bir şekilde belirlenmesini gerektirir. Kirlilikten etkilenen bölgede hangi kirletici kaynağın ne oranda etkili olduğunu bilmek için bilinmeyen kirletici kaynakların yerlerinin, sayılarının ve boşalım geçmişlerinin birlikte belirlenmesi gereklidir. Farklı zaman dilimlerinde aktif olan çok sayıda kirletici kaynaktan bir kirlilik bulutu meydana gelir. Akiferdeki eşzamanlı konsantrasyon ölçüm verileri kullanılarak o zaman dilimine ait durum tanımlanabilir. Ancak, kirliliğin önlenmesi veya azaltılması için her bir kaynağın problem üzerindeki payının ve alınacak önlemlerin önceliğinin belirlenmesi gerekir. Tek bir kirletici kaynak durumunda kaynağın konum ve kirlilik yükünün belirlenmesi göreceli olarak daha kolay çözülebilen bir problem olmasına karşılık, birden fazla kaynağın bulunması, bunların farklı dönemlerde aktif olmaları ve yüklerinin zamanla değişken olması durumunda problemin çözümü oldukça zorlaşmaktadır. Bunlara ek olarak, hidrojeolojik parametrelerin de bilinmemesi durumunda problem daha karmaşık hale gelmektedir.

Son otuz yıldan beri su mühendisleri yeraltısuyu kaynaklarının yönetimi ve yeraltısuyu kalitesinin kontrolü için modellerden faydalanmaktadır. Yeraltısuyu akımı ve kirlilik taşınımı denklemlerinin sayısal çözümünü yapan bir simülasyon modeli ile bir optimizasyon tekniğinin birleşiminden oluşan bu modeller, yeraltısuyu yönetim araçları olarak giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır. Bu modeller, ilk olarak hidrolik kontrol, su politikası ve su temini için geliştirilmiştir (Gorelick 1983, Willis ve Yeh 1987). Bir akiferin simülasyon modeli; akifer parametrelerinin

önceden bilinmesi koşuluyla, yeraltısuyu akımını ve kirletici taşınımını temsil eden diferansiyel denklemlerin, birtakım sınır ve başlangıç koşulları altında bazı sayısal çözüm teknikleriyle (sonlu farklar, sonlu elemanlar, sınır elemanları v.b.) hidrolik yük ve kirlilik konsantrasyon değerlerinin elde edilmesinden oluşmaktadır. Optimizasyon modeli ise; simülasyon modelinden elde edilen değerlerin, belli bir amaç fonksiyonu ve çeşitli kısıtlar altında iteratif olarak iyileştirilerek küresel yada küresel en iyiye yakın çözümlerin elde edilmesinden meydana gelmektedir. Bu iki modelin birleşimi, literatürde kısaca S/O modeli olarak adlandırılmaktadır.

Bu çalışmada bilinmeyen yeraltısuyu kirlilik kaynaklarının, yerleri, sayıları, aktif stres periyotu sayıları ve boşalım geçmişlerinin belirlenmesi amacıyla etkin bir S/O modeli geliştirilmiştir. Simülasyon modelinde, yeraltısuyu akımı ve kirletici taşınımını temsil eden kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için MODFLOW (McDonald ve Harbough, 1988) ve MT3DMS (Zheng ve Wang, 1999) paket programları, optimizasyon modelinde ise diferansiyel gelişim algoritması (DGA) kullanılmıştır. Geliştirilen S/O modelinde kullanılan tüm kodlar Visual Basic ve MATLAB programı ile yazılmıştır.

1.2 Tezin Organizasyonu

Bu tez çalışması beş ana bölümden oluşacak şekilde organize edilmiştir. Birinci bölümde tezin amacı ve konuyla ilgili ayrıntılı literatür özeti verilmiştir. İkinci bölümde çalışma konusu ile ilgili detaylı bir literatür özeti sunulmuştur. Üçüncü bölümde simülasyon modelini oluşturan yeraltısuyu ortamında akım ve kirletici taşınımını denklemleri tanıtıldıktan sonra optimizasyon modelinde kullanılan diferansiyel gelişim algoritmasının temel adımları ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Dördüncü bölümde problemin çözümü için gerekli olan optimizasyon modelinin oluşturulması anlatıldıktan sonra optimum kaynak sayısının, yerlerinin ve aktif stres periyotlarının belirlenmesi için önerilen sistematik bir çözüm yaklaşımı açıklanmıştır. Ayrıca gözlem verilerinin ölçüm hatası içermesi durumunda kullanılacak olan performans değerlendirme kriterleri verilmiştir. Beşinci bölümde ilk olarak literatürde verilen düzgün geometriye sahip hipotetik bir akifer modeli, daha sonra karmaşık geometriye sahip bir akifer modeli ölçüm hatası olmaması ve ölçüm hatası olması durumları için ayrı ayrı çözülmüş ve model sonuçları detaylı olarak

irdelenmiştir. Altıncı bölümde ise bu çalışma sonucu elde edilen bulgular verilmektedir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Yeraltısuyu ortamındaki kirletici kaynaklarının belirlenmesine yönelik olarak literatürde pek çok çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu çözüm yöntemleri genel olarak optimizasyona dayalı ve optimizasyona dayalı olmayan yaklaşımlar olarak iki ana grup altında incelenebilir. Optimizasyona dayalı olmayan yaklaşımlar üç grup altında toplanabilir: geoistatistik gibi olasılık tekniklerine dayalı yaklaşımlar, analitik çözümlere ya da nonlinear regresyona dayalı yaklaşımlar ve yönetici denklemlerin zamanda geriye doğru sayısal olarak çözen doğrudan deterministik yaklaşımlardır. Bu çözüm yaklaşımları ve konu ile ilgili literatür bilgisi Atmadja ve Bagtzoglou (2001), Michalak ve Kitanidis (2004), Bagtzoglou ve Atmadja (2005) tarafından yapılan çalışmalarda detaylı olarak verilmiştir.

Yeraltısuyu problemlerinin S/O modelleri ile çözümünde simülasyon modelleri ile optimizasyon modelleri tepki matrisi yaklaşımı ve yerleşik yaklaşım adı verilen iki yöntem kullanılarak entegre edilmektedir. Tepki matrisi yaklaşımında, harici bir simülasyon modeli kullanılarak verilen birim değişimler için modelin verdiği tepki ölçülmekte ve bu tepkiler süperpozisyon prensibi yardımıyla optimizasyon modeline entegre edilmektedir. Bu çözüm yaklaşımında, optimizasyon modelinin her bir hesap adımında simülasyon modeli yerine optimizasyon modeli içine entegre edilen sistem tepkileri kullanıldığı için çözüme ulaşmak için gerekli bilgi-işlem süresi oldukça makul seviyelerde olmaktadır. Buna karşın, sistemdeki birim değişimlerin sabit bir noktadan verilmesi gerektiği için kaynak yerlerinin bilinmeyen olduğu durumlarda bu yaklaşım ile çözüme ulaşmak mümkün olmamaktadır. Ayrıca, bu yaklaşım doğrusal süperpozisyon prensibine dayandığı için ancak sistem tepkilerinin doğrusal olması durumunda kullanılabilir (Das ve Datta, 2001). Diğer yandan, yerleşik yaklaşımında ise simülasyon modeli bir kısıt olarak optimizasyon modeline dahil edilmekte ve ilgili kısıtın sağlanması gerektiği için her bir hesap adımında simülasyon modeli çalıştırılmaktadır. Bu yaklaşım tepki matrisi yaklaşımı ile karşılaştırıldığında sistem ile ilgili daha detaylı bilgi vermekte ve farklı kaynak yerleri için de çalıştırılabilmektedir. Ancak, optimizasyon modelinin her bir hesap

adımında simülasyon modelinin çalışması gerektiğinden dolayı özellikle büyük akifer sistemleri için bu yaklaşımın kullanılması uzun bilgi-işlem süreleri gerektirebilmektedir (Das ve Datta, 2001).

Son yıllarda, S/O modelleri ile bilinmeyen yeraltı suyu kirletici kaynaklarının belirlenmesi amacıyla hem tepki matrisi hem de yerleşik yaklaşım kullanılarak pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan ilki Gorelick ve diğ. (1983) tarafından yapılmıştır. İlgili çalışmada, kirletici kaynak belirleme problemi en küçük kareler yöntemi ve doğrusal programlama teknikleri kullanılarak geliştirilen iki sentetik akifer modeli üzerinde çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen çözüm modelinin gözlem verilerinin eksiksiz olması durumu için etkili sonuçlar verdiğini göstermiştir. Wagner (1992), yeraltı suyu akımı ve kirletici madde taşınımı olayına ait kısmi diferansiyel denklemlerin çözümünü doğrusal olmayan maksimum olabilirlik modeli ile tepki matrisi yaklaşımını kullanarak entegre etmiştir. Geliştirilen model kullanılarak, bilinmeyen kirletici kaynak karakteristikleri ile birlikte akifer parametrelerinin de eş zamanlı olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Analiz sonuçları, kirletici kaynak karakteristikleri ve akifer parametrelerinin ayrı ayrı belirlenmesinde geliştirilen modelin son derece etkin sonuçlar verdiğini, buna karşın, her iki bilinmeyen de eş zamanlı belirlenmesinde model performansının düştüğünü göstermiştir.

Mahar ve Datta (1997), kirletici kaynak belirleme ile optimum gözlem ağı tasarımı problemlerini kapsayan doğrusal olmayan bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Geliştirilen modelde, ilk olarak eldeki mevcut gözlem verileri için kirletici kaynak belirleme problemi çözülmekte ve ikinci aşamada bulunan sonuçlar değerlendirilerek optimum gözlem ağı tasarımı yapılmaktadır. Optimum gözlem ağı tasarlandıktan sonra ise son aşamada kirletici kaynaklar daha hassas bir şekilde belirlenebilmektedir. Mahar ve Datta (2000) zamana bağlı yeraltı suyu akımı ve kirletici madde taşınımı süreçlerini dikkate alarak kirletici kaynakların belirlenebildiği doğrusal olmayan bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Geliştirilen çözüm modelinin performansı, gözlem verilerinin ölçüm hataları içermesi durumu ve eksik gözlem verilerinin bulunması durumları için ayrı ayrı test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen optimizasyon modelinin zamana bağlı yeraltı suyu akımı durumu için etkili sonuçlar verdiğini göstermiştir. Mahar ve Datta (2001) ise doğrusal olmayan bir optimizasyon modeli kullanarak kirletici kaynak geçmişlerinin

ve akifer parametrelerinin eş zamanlı belirlenebildiği bir çözüm yaklaşımı geliştirmiştir. Geliştirilen çözüm yaklaşımının performansı, gözlem verilerinin sayısı, tekli ve çoklu kirletici kaynak sayıları ve gözlem verilerinin ölçüm hataları içermesi durumları için ayrı ayrı test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen çözüm yaklaşımı ile akifer parametrelerinin de bilinmemesi durumunda bile etkili sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir.

Yukarıda özetlenen çalışmalardan görüleceği gibi, doğrusal ve doğrusal olmayan optimizasyon teknikleri kirletici kaynak belirleme problemlerinin çözümünde etkin olarak kullanılmıştır. Ancak, bu tip optimizasyon tekniklerinde elde edilen çözümün kalitesi büyük oranda başlangıç çözümlerine bağlıdır (Ayvaz, 2009). Bu durum genellikle, yeraltı suyu modellemesi ile ilgili olarak çözülen optimizasyon problemlerinin çözüm uzaylarının konveks olmayan bir yapıda olmasından kaynaklanmaktadır (McKinney ve Lin, 1994). Ayrıca, bu tip optimizasyon tekniklerinde genellikle kullanılan amaç fonksiyonunun karar değişkenlerine göre kısmi türevi alınarak arama yönü belirlenmekte ve bu durum da lokal optimum çözümlerin elde edilmesine neden olabilmektedir (Sun, 1994; Fogel ve diğ., 1996; Sun ve diğ., 2006b; Ayvaz, 2009). Bu nedenle, yeraltı suyu modellemesi ile ilgili optimizasyon problemlerinin çözümünde, herhangi bir türevin alınmasına ve özel bir başlangıç çözümüne gerek duymayan sezgisel optimizasyon algoritmalarının kullanılması yaygınlık kazanmıştır (Ayvaz, 2009).

Literatürde, yeraltı suyu kirletici kaynak problemlerinin sezgisel optimizasyon algoritmaları ile çözümünün yapıldığı pek çok çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Aral ve Guan (1996), bir akifer sistemindeki kirletici kaynak karakteristiklerini belirleyebilmek için genetik algoritma (GA) tabanlı bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Geliştirilen GA tabanlı optimizasyon modelinde, kaynak yerleri, kirlilik yükleri ve boşalım süreleri optimizasyon modelinde eş zamanlı olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, GA tabanlı optimizasyon modeli sonuçlarının aynı problemin doğrusal ve doğrusal olmayan programlama teknikleri ile çözümü sonucu elde edilen sonuçlarla iyi uyum içinde olduğunu göstermiştir. Aral ve diğ. (2001) ise kademeli genetik algoritma (KGA) adı verilen bir optimizasyon modeli geliştirerek sentetik bir akifer modeli üzerinde kirletici kaynak karakteristiklerini belirlemiştir. Geliştirilen KGA modelinde, standart bir GA optimizasyon modeli

yeraltı suyu simülasyon modeli ile birleştirilmiş ve tanımlanan bir alt bölge içerisinde kaynak yerleri ve boşalım geçmişleri karar değişkeni olarak tanımlanarak ilgili optimizasyon problemi çözülmüştür. KGA çözüm modelinin en büyük avantajı gereksiz simülasyon işlemlerine gerek kalmaksızın ilgili doğrusal olmayan optimizasyon problemini kuadratik tipteki bir optimizasyon problemine dönüştürerek çözüm yapmasıdır.

Mahinthakumar ve Sayeed (2005) kirletici kaynak belirleme problemini çözmek için GA ve lokal optimizasyon tekniklerini birleştirerek hibrid yapıda bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Geliştirilen hibrid modelde, bir kirletici kaynağın yeri ve başlangıçtaki kaynak konsantrasyonu GA ile optimize edilmekte ve ardından elde edilen sonuçlar lokal optimizasyon teknikleri ile daha hassas olarak belirlenmektedir. Geliştirilen hibrid modelin performansı farklı lokal optimizasyon teknikleri için iki ve üç boyutlu akifer modelleri üzerinde test edilmiş ve elde edilen sonuçlar hibrid çözüm modelinin ilgili problemin tek başına GA veya lokal optimizasyon teknikleri ile çözümünden daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Singh ve Datta (2006) GA tabanlı bir optimizasyon modeli ile bir akiferdeki kirletici kaynak karakteristiklerini belirlemiştir. Geliştirilen GA tabanlı optimizasyon modelinde, yeraltısuyu akımı ve kirletici madde taşınımı olaylarına ait kısmi diferansiyel denklem sistemlerinin çözümü GA tabanlı optimizasyon modeli ile yerleşik yaklaşım kullanılarak birleştirilmiştir. Singh ve Datta (2006) geliştirdikleri çözüm yaklaşımının performansını 2 sentetik akifer modeli üzerinde, tekli ve çoklu kaynak yerlerinin ve boşalım geçmişlerinin bilinmemesi durumları, gözlem verilerinde eksiklikler bulunması ve gözlem verilerinin farklı büyüklüklerde ölçüm hataları içermesi durumları için ayrı ayrı test etmişlerdir. Buna karşın, geliştirilen bu çözüm yaklaşımı yerleşik yaklaşımla optimizasyona modeline bağlandığı ve kaynak yerleri boşalım geçmişleri ile eşzamanlı belirlenmediğinden, kirletici kaynak sayısının fazla olması durumunda çözüme ulaşmak için gerekli bilgi-işlem süresi fazla olmaktadır.

Rao (2006), üç boyutlu akifer sistemlerinde kirletici kaynak belirleme problemlerini makul bilgi-işlem süreleri ile çözmek amacıyla yapay sinir ağları (YSA) ve tavlama benzetimi (TB) optimizasyon algoritmasını entegre eden bir çözüm modeli geliştirmiştir. Geliştirilen bu çözüm modelinde YSA, yeraltısuyu ortamındaki kirletici madde taşınımı olayını canlandıran yapay bir simülatör olarak çalıştırılmış

ve yerleşik yaklaşımla TB tabanlı optimizasyon modeline entegre edilmiştir. Bu sayede, bir akifer sistemindeki kirlenici kaynağın yeri ve kaynak konsantrasyonu makul sürelerde belirlenebilmiştir. Ancak, geliştirilen çözüm yaklaşımı anlık kirlenici madde enjeksiyonu (instantaneous pulse) için etkin sonuçlar vermekte ve farklı zaman dilimlerindeki boşalım geçmişlerinin belirlenmesinde yetersiz kalmaktadır.

Yeh ve diğ. (2007), akifer sistemlerinde kirlenici kaynak yerleri, boşalım geçmişleri ve boşalım sürelerini belirleyebilmek için TB ve tabu araştırması (TA) optimizasyon tekniklerini 3 boyutlu yeraltı suyu ve kirlenici madde taşınımı denklemlerini çözen MODFLOW (McDonald ve Harbough, 1988) tabanlı bir simülasyon modeli ile entegre ederek hibrid bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Geliştirilen optimizasyon modelinde, kaynak yerleri TA, boşalım geçmişleri ve süreleri ise TB optimizasyon tekniği belirlenmektedir. Geliştirilen çözüm modelinin performansı iki sentetik akifer modeli üzerinde homojen/homojen olmayan akifer parametreleri, kararlı/karasız yeraltı suyu akımı ve gözlem değerlerinin hata içermesi durumları için ayrı ayrı test edilmiştir. İlgili çalışmada ayrıca kaynak karakteristiklerinin optimum şekilde belirlenebilmesi için gerekli gözlem kuyularının sayısının belirlenebildiği bir analiz de yapılmıştır.

Mirghani ve diğ. (2009) kirlenici kaynak karakteristiklerini belirlemek amacıyla hibrid paralel evrimsel hesaplama dayanan bir çözüm yaklaşımı geliştirmiştir. İlgili çalışma sonuçları büyük akifer sistemleri ve/veya simülasyon süreleri için paralel hesaplama teknikleri ile kirlenici kaynak karakteristiklerinin makul süreler içinde belirlenebildiğini göstermiştir.

Ayvaz (2010) ise bilinmeyen yeraltı suyu kirlilik kaynağının belirlenmesi probleminin çözümü için armoni araştırma tekniği (AAT) optimizasyon algoritmasına dayalı bir S/O modeli önermiştir. Bu modelde yeraltı suyu akımı ve kirlenici taşınımının simülasyonu için MODFLOW ve MT3DMS paket programları kullanılmıştır. Önerilen modelde kirlenici kaynakların boşalım geçmişleri ve yerleri karar değişkenleri olarak ele alınmış ve optimizasyon modeli ile belirlenmiştir. Ayrıca kirlenici kaynakların optimum sayısını belirlemek için bir çözüm tekniği önerilmiştir. Önerilen modelin performansı, basit ve karmaşık akifer geometrileri, farklı ölçüm hatası koşulları ve farklı AA çözüm parametreleri için iki hipotetik örnek üzerinde değerlendirilmiştir.

Yukarıda verilen çalışmalardan görüleceği gibi yeraltı suyu ortamındaki kirletici kaynak belirleme problemlerinin çözümünde sezgisel optimizasyon algoritmaları yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak, yapılan çalışmaların çoğunda ilgili problem bilinen kaynak sayıları için çözülmüştür. Başka bir deyişle, tüm çözüm yaklaşımlarında kirletici kaynak sayılarının baştan bilindiği kabul edilmiştir. Ancak, pratikte kirletici kaynakların yerleri ve boşalım geçmişleri gibi sayıları da çoğu zaman bilinmemektedir. Bu nedenle, kirletici kaynak sayılarının da doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, hem sezgisel hem de sezgisel olmayan optimizasyon algoritmaları kullanılarak kirletici kaynak belirleme problemleri büyük başarı ile çözümlenmesine karşılık bu optimizasyon algoritmalarının çoğu karmaşık matematiksel işlemler gerektirmekte ve bu nedenle gerçek problemlere uyarlanması zor olabilmektedir.

Yeraltısu 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 türeve dayalı algoritmaların kullanılması bir takım güçlüklerle yol açmaktadır. Türeve dayalı optimizasyon algoritmaları hızlı yakınsama özelliklerine sahip olmalarına karşın, verilen başlangıç değerlerine son derece bağımlıdır. 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 ve diğ. 2006). Bu nedenle, yeraltısu 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 küresel ya da küresel en iyiye yakın sonuçları elde edebilmesidir (Ayvaz, 2008). Bunlardan bazıları Genetik Algoritma, Isıl İşlem Algoritması, Parçacık Sürü Algoritması, Armoni Araştırma Algoritması, Karınca Kolonisi Algoritması, Yapay Arı Kolonisi Algoritması ve Diferansiyel Gelişim Algoritmasıdır.

Genetik Algoritma (GA), literatürde en yaygın kullanılan sezgisel optimizasyon algoritmalarından biridir (Holland 1975, Goldberg 1989, Michalewicz 1994). Çok sayıda GA sürümü geliştirilmesine karşın halen çözüm hızı açısından oldukça yavaş

bir algoritmadır. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için Storn ve Price (1997) gelişime dayalı bir algoritma olan diferansiyel gelişim algoritmasını (DGA) geliştirmiştir (Karaboğa 2004). DGA günümüze dek birçok mühendislik problemine başarıyla uygulanmıştır (Babu ve diğ. 2005, Coelho ve Mariani 2007, Reddy ve Kumar 2007, Varadarajan ve Swarup 2008, Khademi ve diğ. 2009, Wang ve diğ. 2009, Coelho 2009, Suribabu 2010, Vasan ve Simonovic 2010).

3. SİMÜLASYON MODELİ

Bir sistemin simülasyonu yada simülasyon modeli, bu sistemi temsil edebilecek bir model oluşturma işlemidir. Bir akifer sisteminde kirlenici madde taşınımının modeli, kirlenici taşınımını temsil eden KDD'nin birtakım başlangıç ve sınır koşullarına bağlı olarak sayısal çözümü ile elde edilir. Ancak, ilgili KDD'nin çözülebilmesi için, yeraltısuyu sistemine ait hız dağılımının bilinmesi gereklidir. Bu nedenle kirlenici madde taşınımı olayına ait KDD'nin çözümünden önce yeraltısuyu akımına ait KDD'nin çözülmesi gereklidir.

3.1 Yeraltısuyu Akımı Denklemi

Üç boyutlu bir akifer sistemi için yeraltı suyu hareketini temsil eden KDD Denklem 3.1'de verilmektedir (Zheng ve Bennett, 2002):

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} h \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + q_s \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'de, x_i kartezyen koordinatları, h , hidrolik yükü, q_s akiferin birim hacmi başına düşen kaynak/yitik debisini, K_{ij} hidrolik iletkenlik tensörünün bileşenlerini ve S depolama katsayısını göstermektedir.

Pratikte kullanılan birçok akım modelinde (MODFLOW vb.), hidrolik iletkenlik tensörünün asal bileşenlerinin (K_{xx}, K_{yy}, K_{zz}) koordinat eksenleriyle çakıştığı kabulü yapılmaktadır. Doğal olarak, hidrolik iletkenlik tensörünün çapraz terimleri ($K_{xy}, K_{yx}, K_{xz}, K_{zx}, K_{yz}, K_{zy}$) sıfır olmaktadır. Bu durumda, anizotrop ve doymuş ortamda kararsız yeraltısuyu akım denklemi Denklem 3.2'de verildiği gibi sadeleşmektedir.

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} h \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q_s \quad (3.2)$$

İzotrop ortamda, kararsız ve kararlı yeraltısuyu akımı denklemleri sırasıyla Denklem 3.3-4'de verilmektedir.

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = K_{xx} h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_{yy} h \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_{zz} h \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + q_s \quad (3.3)$$

$$K_{xx} h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_{yy} h \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_{zz} h \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + q_s = 0 \quad (3.4)$$

Eğer ortam homojen ise ($K_{xx} = K_{yy} = K_{zz} = K$) yeraltısuyu akımı denklemi Denklem 3.5'de verilen Poisson denklemine dönüşür. Özel olarak, kaynak/yitik teriminin bir katkısı yoksa yeraltısuyu akımı denklemi Denklem 3.6'da verilen Boussinesq denklemine dönüşür.

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h^2}{\partial z^2} + \frac{q_s}{2K} = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h^2}{\partial z^2} = 0 \quad (3.6)$$

3.2 Yeraltısuyu Kirlenici Taşınımı Denklemi

Yeraltısuyu ortamında bozunmayan karakterdeki bir kirlenici maddenin taşınımı için verilen KDD aşağıdaki gibidir (Zheng ve Bennett, 2002):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (V_i C) + \frac{q_s C_s}{\theta} \quad (3.7)$$

Burada; C çözülmüş madde konsantrasyonunu, V_i sızma hızını, θ akiferin efektif porozite değerini, C_s kaynak/yitik akımındaki çözülmüş madde konsantrasyonunu ve D_{ij} hidrodinamik dispersiyon tensörünün bileşenlerini göstermektedir. Anizotrop bir ortamda hidrodinamik dispersiyon katsayıları (Burnett ve Frind, 1987) Denklem 3.8'de verilmektedir.

$$D_{xx} = \alpha_L \frac{V_x^2}{|V|} + \alpha_{TH} \frac{V_y^2}{|V|} + \alpha_{TV} \frac{V_z^2}{|V|} + D^* \quad (3.8.1)$$

$$D_{yy} = \alpha_L \frac{V_y^2}{|V|} + \alpha_{TH} \frac{V_x^2}{|V|} + \alpha_{TV} \frac{V_z^2}{|V|} + D^* \quad (3.8.2)$$

$$D_{zz} = \alpha_L \frac{V_z^2}{|V|} + \alpha_{TH} \frac{V_x^2}{|V|} + \alpha_{TV} \frac{V_y^2}{|V|} + D^* \quad (3.8.3)$$

$$D_{xy} = D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_{TH}) \frac{V_x V_y}{|V|} \quad (3.8.4)$$

$$D_{xz} = D_{zx} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{V_x V_z}{|V|} \quad (3.8.5)$$

$$D_{yz} = D_{zy} = (\alpha_L - \alpha_{TV}) \frac{V_y V_z}{|V|} \quad (3.8.6)$$

Burada; D^* moleküler difüzyon katsayısını, $|V| = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$ hız vektörünün büyüklüğünü, α_L boyuna dispersivite katsayısını, α_{TH} yatay enine dispersivite katsayısını, α_{TV} düşey enine dispersivite katsayısını göstermektedir. Bu dispersivite katsayılarının doğrultudan bağımsız olduğunu belirtmekte yarar vardır. İzotrop bir ortamda dispersivite katsayıları arasında $\alpha_{TH} = \alpha_{TV} = \alpha_T$ eşitliği vardır. Burada, α_T enine dispersivite katsayısını göstermektedir.

Denklem 3.7’de verilen kirletici madde taşınımı süreci ile Denklem 3.1’de verilen yeraltısuyu akımı süreci Darcy yasası ile ilişkilendirilmektedir:

$$V_i = \frac{q_i}{\theta} = -\frac{K_{ii}}{\theta} \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (3.9)$$

Burada q_i Darcy akısı olarak adlandırılmaktadır. Denklem 3.9’dan görüleceği gibi, bir akifer sisteminde kirletici madde taşınım denkleminin çözülebilmesi için hidrolik yük gradyanının, hidrolik iletkenlik dağılımının ve zemin ortamının efektif porozitesinin bilinmesi gereklidir.

Hidrodinamik dispersiyon tensörünün asal bileşenlerinin (D_{xx}, D_{yy}, D_{zz}) koordinat eksenleriyle çakıştığı kabul edilirse, hidrodinamik dispersiyon tensörünün çapraz terimleri ($D_{xy}, D_{yx}, D_{xz}, D_{zx}, D_{yz}, D_{zy}$) sıfır değerini almaktadır. Bu durumda yeraltısuyu kirletici taşınımı denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (V_x C) \\ & - \frac{\partial}{\partial y} (V_y C) - \frac{\partial}{\partial z} (V_z C) + \frac{q_s C_s}{\theta} \end{aligned} \quad (3.10)$$

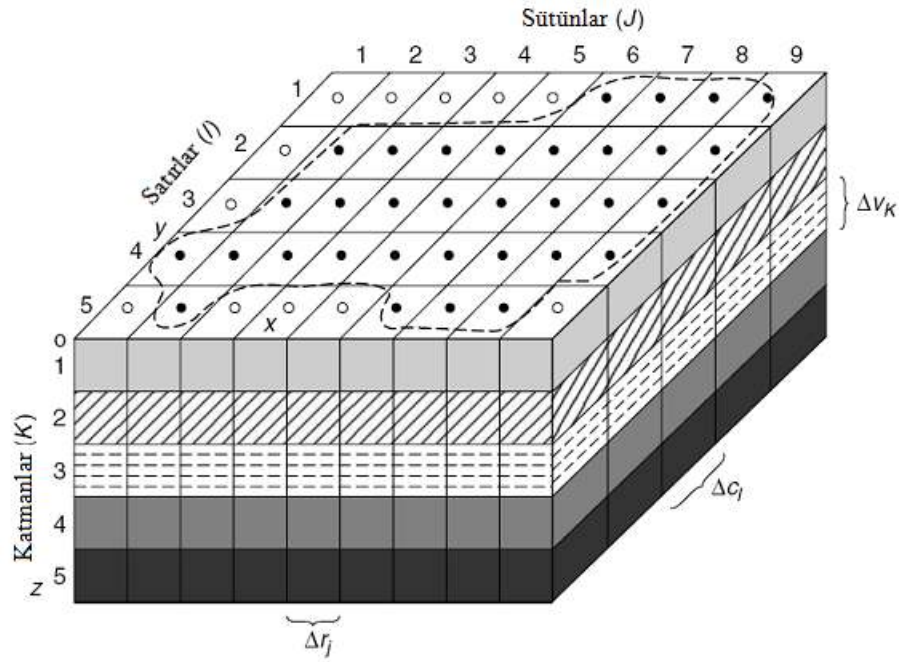
Homojen ve izotrop bir ortamda üç boyutlu yeraltısuyu kirletici madde taşınımı denklemi Denklem 3.11’de verilmektedir. Buna ek olarak kaynak/yitik teriminin olmadığı varsayılırsa taşınım denklemi Denklem 3.12’de verilen en sade forma dönüşür.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{xx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_{yy} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_{zz} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} - V_y \frac{\partial C}{\partial y} - V_z \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{q_s C_s}{\theta} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{xx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_{yy} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_{zz} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} - V_y \frac{\partial C}{\partial y} - V_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (3.12)$$

3.3 Yeraltısuyu Kirletici Madde Taşınımı Denkleminin Sayısal Çözümü

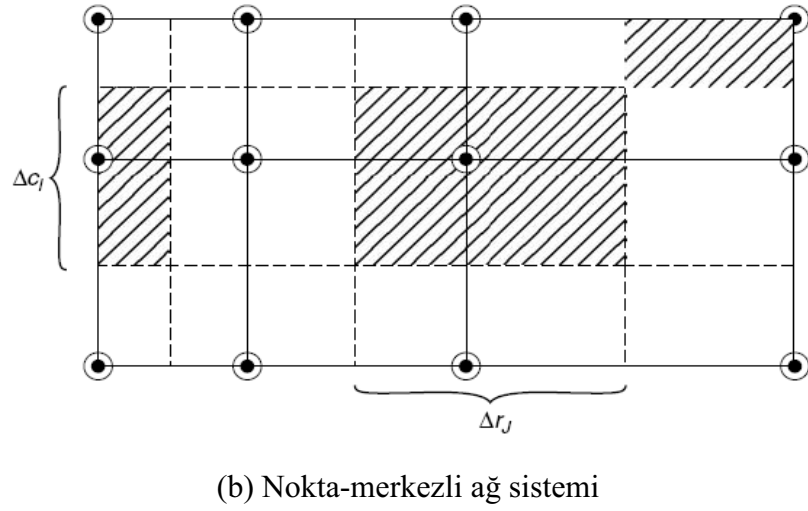
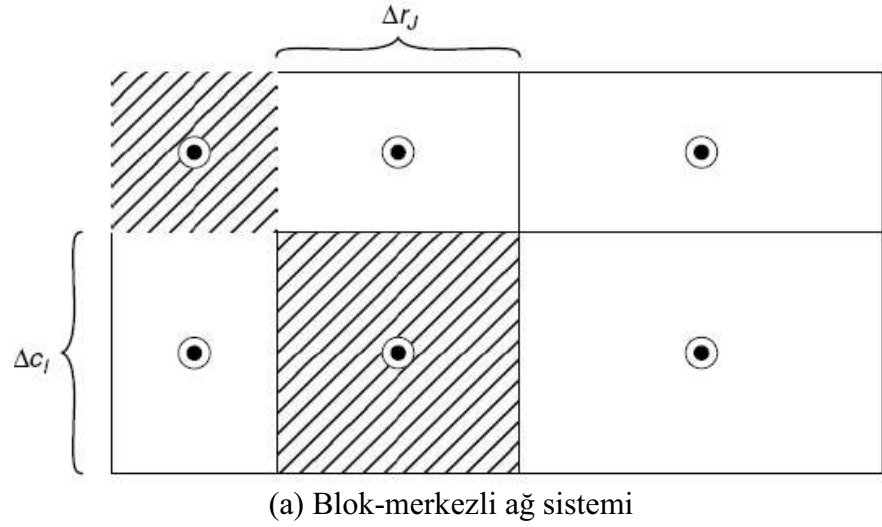
Bu tez çalışması kapsamında, yeraltısuyu akım denklemi MODFLOW paket programı (McDonald and Harbaugh, 1988) ile çözülerek hidrolik yük dağılımı belirlenecek ve buna bağlı olarak sızıntı hızları hesaplanacaktır. Yeraltısuyu kirletici madde taşınımı olayına ait KDD'nin çözümü ise MT3DMS paket programı (Zheng ve Wang, 1999) kullanılarak yapılacaktır. Şekil 3.1'de hipotetik bir akifer sisteminin sonlu farklar modeli gösterilmektedir.



Açıklama

- Akifer sınırı
- o Aktif hücre
- Δr_j Satır doğrultusu boyunca hücre boyutu (J : sütun numarası)
- Δc_l Sütun doğrultusu boyunca hücre boyutu (I : satır numarası)
- Δv_k Düşey doğrultusu boyunca hücre boyutu (K : katman numarası)

Şekil 3.1: Bir akifer sisteminin blok-merkezli ağlara bölünmüş şekli (McDonald ve Harbaugh, 1984).



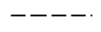
Açıklama



Düğümler



Ağ çizgisi



Nokta merkezli formülasyon hücre sınırları



Seçilen düğüm ile ilgili hücreler

Şekil 3.2: Blok-merkezli ve düğüm merkezli ağ yapıları (McDonald ve Harbaugh, 1984).

Denklem 3.7'de verilen yeraltısuyu kirletici madde taşınımı olayına ait KDD'in iki boyutlu formunu gözönüne alalım.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} \right) \\ & - \frac{\partial}{\partial x} (V_x C) - \frac{\partial}{\partial y} (V_y C) + \frac{q_s C_s}{\theta} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Sonlu farklar metodunda, düğüm noktalarının yerleri ile ilgili olarak iki farklı yaklaşım sözkonusudur. Bunlar Şekil 3.2’de verilen blok-merkezli ve nokta-merkezli formülasyonlardır. Bu denklemin blok-merkezli düzenli ağ sistemi kullanılarak sonlu farklar metodu ile çözümü aşağıda adım adım anlatılmaktadır (Zheng ve Bennett, 2002).

Blok-merkezli düzenli bir ağ sistemi için Denklem 3.13’ün sağındaki ilk terimin (i, j) hücresindeki değeri, sonlu farklar metodu ile aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i,j} \approx \frac{1}{\Delta x} \frac{D_{xx(i,j+1/2)}(C_{i,j+1} - C_{i,j}) - D_{xx(i,j-1/2)}(C_{i,j} - C_{i,j-1})}{\Delta x} \quad (3.14)$$

Denklem 3.13’ün sağındaki ikinci terimin (i, j) hücresindeki değeri, benzer şekilde aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right)_{i,j} & \approx \frac{1}{\Delta x} \frac{D_{xy(i,j+1/2)}(C_{i+1,j+1/2} - C_{i-1,j+1/2}) - D_{xy(i,j-1/2)}(C_{i+1,j-1/2} - C_{i-1,j-1/2})}{2\Delta y} \\ & = \frac{1}{4\Delta x \Delta y} \left[\begin{aligned} & D_{xy(i,j+1/2)}(C_{i+1,j+1} + C_{i+1,j} - C_{i-1,j+1} - C_{i-1,j}) \\ & - D_{xy(i,j-1/2)}(C_{i+1,j} + C_{i+1,j-1} - C_{i-1,j} - C_{i-1,j-1}) \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (3.15)$$

Ara noktadaki konsantrasyonların hesabında komşu iki noktadaki konsantrasyonların aritmetik ortalaması kullanılmaktadır.

$$C_{i+1,j+1/2} = \frac{C_{i+1,j+1} + C_{i+1,j}}{2} \quad (3.16)$$

Denklem 3.13'ün sağındaki üçüncü terimin (i, j) hücresindeki değeri, aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right)_{i,j} \approx \frac{1}{\Delta y} \frac{D_{yy(i+1/2,j)}(C_{i+1,j} - C_{i,j}) - D_{yy(i-1/2,j)}(C_{i,j} - C_{i-1,j})}{\Delta y} \quad (3.17)$$

Denklem 3.13'ün sağındaki dördüncü terimin (i, j) hücresindeki değeri, benzer şekilde aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{i,j} &\approx \frac{1}{\Delta y} \frac{D_{yx(i+1/2,j)}(C_{i+1/2,j+1} - C_{i+1/2,j-1}) - D_{yx(i-1/2,j)}(C_{i-1/2,j+1} - C_{i-1/2,j-1})}{2\Delta x} \\ &= \frac{1}{4\Delta y \Delta x} \left[D_{yx(i+1/2,j)}(C_{i+1,j+1} + C_{i,j+1} - C_{i+1,j-1} - C_{i,j-1}) \right. \\ &\quad \left. - D_{yx(i-1/2,j)}(C_{i,j+1} + C_{i-1,j+1} - C_{i,j-1} - C_{i-1,j-1}) \right] \end{aligned} \quad (3.18)$$

Yukarıda verilen terimlerin hesaplanması için gerekli olan ara noktadaki dispersiyon katsayılarının hesaplanması gerekmektedir. Örneğin, $D_{xx(i,j+1/2)}$ ve $D_{xy(i,j+1/2)}$ değerleri aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

$$D_{xx(i,j+1/2)} = \frac{\alpha_L V_{x(i,j+1/2)}^2}{V_{i,j+1/2}} + \frac{\alpha_T V_{y(i,j+1/2)}^2}{V_{i,j+1/2}} + D^* \quad (3.19)$$

$$D_{xy(i,j+1/2)} = \frac{(\alpha_L - \alpha_T) V_{x(i,j+1/2)} V_{y(i,j+1/2)}}{V_{i,j+1/2}} \quad (3.20)$$

$D_{xx(i,j+1/2)}$ ve $D_{xy(i,j+1/2)}$ değerlerinin hesaplanabilmesi için ara noktadaki hız teriminin ve bu hız terimlerinin bileşenlerinin hesaplanmasına ihtiyaç vardır. Bu hız terimleri akım modelinden yararlanılarak aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

$$V_{x(i,j+1/2)} = \frac{q_{x(i,j+1/2)}}{\theta} \quad (3.21)$$

$$V_{y(i,j+1/2)} = \frac{0.5}{\theta} \left(\frac{q_{y(i-1/2,j)} + q_{y(i+1/2,j)}}{2} + \frac{q_{y(i-1/2,j+1)} + q_{y(i+1/2,j+1)}}{2} \right) \quad (3.22)$$

$$V_{i,j+1/2} = \sqrt{V_{x(i,j+1/2)}^2 + V_{y(i,j+1/2)}^2} \quad (3.23)$$

Denklem 3.13'ün sağındaki beşinci terimin (i, j) hücresindeki değeri, aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} (V_x C)_{i,j} \approx \frac{1}{\Delta x} \left\{ \begin{array}{l} V_{x(i,j+1/2)} \left[(1-\beta)C_{i,j} + \beta C_{i,j+1} \right] \\ -V_{x(i,j-1/2)} \left[(1-\beta)C_{i,j-1} + \beta C_{i,j} \right] \end{array} \right\} \quad (3.24)$$

Denklem 3.13'ün sağındaki altıncı terimin (i, j) hücresindeki değeri, benzer şekilde aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\frac{\partial}{\partial y} (V_y C)_{i,j} \approx \frac{1}{\Delta y} \left\{ \begin{array}{l} V_{y(i+1/2,j)} \left[(1-\beta)C_{i,j} + \beta C_{i+1,j} \right] \\ -V_{y(i-1/2,j)} \left[(1-\beta)C_{i-1,j} + \beta C_{i,j} \right] \end{array} \right\} \quad (3.25)$$

Denklem 3.13'ün solundaki terimin (i, j) hücresindeki değeri, aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_{i,j} \approx \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^n}{\Delta t} \quad (3.26)$$

Zaman boyunca implisit Euler yada Crank-Nicolson şeması kullanıldığını varsayalım. (i, j) noktasının yeni zaman adımındaki konsantrasyon değerini $(C_{i,j}^{n+1})$ bulmak için (i, j) noktasının ve komşularının hem eski zaman adımındaki konsantrasyon değerleri hemde yeni zaman adımındaki konsantrasyon değerleri kullanılmalıdır. Bunun için aşağıda verilen cebrik denklem sisteminin iteratif yada direkt bir metotla çözümü yapılmalıdır.

$$\begin{aligned} a_{i,j} C_{i-1,j-1}^{n+1} + b_{i,j} C_{i-1,j}^{n+1} + c_{i,j} C_{i-1,j+1}^{n+1} + d_{i,j} C_{i,j-1}^{n+1} + e_{i,j} C_{i,j}^{n+1} + g_{i,j} C_{i,j+1}^{n+1} \\ + h_{i,j} C_{i+1,j-1}^{n+1} + o_{i,j} C_{i+1,j}^{n+1} + p_{i,j} C_{i+1,j+1}^{n+1} = f_{i,j} \end{aligned} \quad (3.27)$$

4. OPTİMİZASYON MODELİ

Belirli sınırlamaları sağlayacak şekilde, bilinmeyen parametre değerlerinin bulunmasını içeren herhangi bir problem optimizasyon problemi olarak adlandırılabilir (Karaboğa, 2004). Arama uzayında en iyi noktaya doğru olan her hareket optimizasyon sürecinin bir parçasıdır. En iyi çözümün bilinmediği problemler için, var olan çözümlerden daha iyi olan bir çözüm elde edilmeye çalışılır (Aksoy, 2007). En genel halde nonlinear optimizasyon problemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\min f(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in X \quad (4.1.a)$$

$$g_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (4.1.b)$$

$$h_i(\mathbf{x}) = 0, i = m + 1, 2, 3, \dots, l \quad (4.1.c)$$

Burada f , $g_i(\mathbf{x})$ ve $h_i(\mathbf{x})$ R^n uzayında tanımlanmış fonksiyonlar, X R^n 'nin bir alt kümesi ve \mathbf{x} ise n bileşenli bir vektördür (x_1, \dots, x_n) . Bu problem $g_i(\mathbf{x})$ ve $h_i(\mathbf{x})$ kısıtlarını sağlayan ve aynı zamanda f fonksiyonunu minimize eden \mathbf{x} değişkenlerinin değerleri için çözümlidir.

f fonksiyonu genellikle amaç fonksiyonu olarak adlandırılmaktadır. Bu fonksiyon, en küçük yapılacaksa maliyet fonksiyonu, en büyük yapılacaksa fayda fonksiyonu olarak adlandırılabilir. Her $g_i(\mathbf{x})$ fonksiyonu eşitsizlik kısıtı ve $h_i(\mathbf{x})$ fonksiyonu ise eşitlik kısıtı olarak adlandırılır. X kümesi karar değişkenlerinin alt ve üst sınırlarını içeren bir kümedir. Tüm kısıtları sağlayan $\mathbf{x} \in X$ vektörü problemin bir uygun çözümü (feasible solution) olarak adlandırılır. Bu şekilde olan tüm çözümlerin oluşturduğu bölge, araştırma yapılabilecek uygun çözüm bölgesini (feasible region)

oluşturur. Optimum (en iyi) çözüm, en küçük yapılacak problem durumunda uygun bölgede en küçük amaç fonksiyonuna sahip çözüm iken, en büyük yapılacak problem durumunda ise en büyük amaç fonksiyonuna sahip çözümdür. Optimizasyon işlemi sonucunda her uygun \mathbf{x} vektörü için $f(\mathbf{x}^*) \leq f(\mathbf{x})$ koşulunu sağlayacak bir uygun \mathbf{x}^* çözüm vektörü bulunuyorsa, bu çözüm vektörü optimal çözüm olarak adlandırılır. Birden fazla optimum çözüm varsa, bu çözümler alternatif optimal çözümler olarak adlandırılır. Eğer eşitsizlik kısıtları $g_i(\mathbf{x}) \geq 0$ şeklinde yazılırsa bu problem maksimizasyon problemine dönüşür. Amaç fonksiyonunun ve kısıtların lineer olduğu özel durumda bu problem lineer optimizasyon problemine dönüşür (Bazaraa ve diğ., 2006).

Kısıtlı optimizasyon problemlerinin çözümünde ceza (penalty) fonksiyonu yaklaşımı çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Ceza fonksiyonları genel olarak statik, dinamik ve adaptif ceza fonksiyonları olarak üç ana gruba ayrılabilir. Ceza fonksiyonları hakkında detaylı bilgi Michalewicz (1994)'da bulunabilir. Bu tez çalışmasında statik ceza fonksiyonu yaklaşımı kullanılmıştır. Denklem (4.1)'de verilen problem ceza fonksiyonu yaklaşımı ile çözülmek istenirse amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

$$\min f_p(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + \lambda \sum_{i=1}^m d_i^K \quad (4.2.a)$$

$$d_i = \begin{cases} \delta_i g_i(x) , & i = 1, 2, \dots, m \\ |h_i(x)| , & i = m+1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (4.2.b)$$

$$\delta_i = \begin{cases} 0 , & \text{çözüm uygun bölgede ise} \\ 1 , & \text{çözüm uygun bölgede değilse} \end{cases} \quad (4.2.c)$$

Burada $f_p(\mathbf{x})$ cezalandırılmış amaç fonksiyonu, d_i i kısıtının metrik uzunluğu ve K kullanıcı tanımlı bir sayıdır (genellikle 1 ya da 2 alınır, bu tez çalışmasında $K = 1$ alınmıştır). λ sabiti ise oldukça büyük bir sayıdır (bu tez çalışmasında $\lambda = 1E + 06$ alınmıştır).

Gündelik hayatta karşımıza çıkan birçok problem doğrusal yada doğrusal olmayan optimizasyon problemi olarak modellenebilmektedir. Bu problemlerin çoğu doğrusal olmayan problemlerdir ve bu tür problemlerin çözümü amacıyla birçok teknik geliştirilmiştir (Doğan, 2008). Türeve 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 ve diğ., 2006). Bu nedenle, 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 küresel ya da küresel en iyiye yakın sonuçları elde edebilmesidir. Özellikle toplum tabanlı sezgisel optimizasyon algoritmaları çok noktalı arama prosedürleri sayesinde hızlı bir şekilde sonuç verebilmektedir.

4.1 Diferansiyel Gelişim Algoritması

Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) gerçel değerli fonksiyonların minimizasyonu için geliştirilen toplum tabanlı ve gelişime dayalı bir algoritmadır. Global minimumun bulunmasında oldukça kararlı bir algoritmadır (Storn ve Price, 1997). DGA mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörlerine dayalı olarak çalışır. Daha önce tanımlanmış bir olasılık dağılım fonksiyonuna dayalı olarak çalışan GA'nın tersine diferansiyel gelişim algoritması rastgele seçilmiş vektörlerin farkına dayalı bir mutasyon işlemi kullanır. Diferansiyel gelişim algoritmasında kullanılan basit mutasyon işlemi algoritmanın performansını geliştirmekte, yeni araştırma bölgelerinin araştırılmasını sağlamakta ve onu daha kararlı yapmaktadır. DGA'nın diğer optimizasyon algoritmalarına göre en önemli üstünlükleri; hızlı, basit, kolayca kullanılabilir ve değiştirilebilir, etkili küresel optimizasyon kabiliyeti, kodlamanın gerçel sayılar ile yapılması, hesaplama maliyetinin az olması, türev bilgisi gerektirmemesi ve her türlü problem tipine (tamsayı, ayrık, karmaşık) uygulanabilmesidir (Karaboğa, 2004; Karaboga ve Basturk, 2005).

4.1.1 Başlangıç Toplumunun Oluşturulması

Çözümüne başlamadan önce, tasarım değişkenlerinin alabilecekleri minimum ve maksimum değerleri tanımlanır ve başlangıç toplumu (4.3) eşitliğine göre türetilir (Storn ve Price, 1997; Karaboğa, 2004).

$$XG_{i,j}^0 = L_j + rand(H_j - L_j), i = 1, \dots, NP; j = 1, \dots, ND \quad (4.3)$$

Burada; NP toplumdaki birey sayısını, ND değişken sayısını, XG^0 başlangıç toplumu, L ve H tasarım değişkenlerinin alabileceği alt ve üst sınırlarını göstermektedir. Toplumdaki birey sayısının seçimi incelenen probleme göre değişmektedir. Literatürde $NP = 10 * ND$ alınması tavsiye edilmektedir (Storn ve Price, 1997). Bu tez çalışması kapsamında yapılan denemeler ışığında, NP değerinin sadece değişken sayısına bağlı olmadığı, aynı zamanda problemin çözüm uzayındaki yerel optimum nokta sayısına da bağlı olduğu görülmüştür.

4.1.2 Mutasyon

DGA'da bir sonraki nesli oluşturmaya aday bir deneme vektörü elde etmek için toplum bireyleri mutasyon ve çaprazlama işlemine tabi tutulmaktadır. Mutasyon işlemi için ilk önce bir baz vektörü seçilir. Daha sonra toplum içerisinde rastgele seçilmiş iki vektörün mutasyon faktörü (MF) adı verilen bir ağırlık katsayısıyla çarpımından elde edilen değer ile baz vektörü (mutasyona uğrayacak vektör) toplanarak Denklem (4.4)'de verilen mutasyon vektörü elde edilir.

$$VG_i = XG_{R1,j}^{GEN} + MF \left(XG_{R2,j}^{GEN} - XG_{R3,j}^{GEN} \right), R1 \neq R2 \neq R3 \neq j \quad (4.4)$$

MF pozitif gerçel bir sayıdır ve herhangi bir üst limiti yoktur, fakat birden büyük değerler seçildiğinde nadiren arzu edilen çözümler elde edilir. Bu nedenle MF değerinin $[0, 1]$ aralığında alınması gerekmektedir. Literatürde MF değerinin $[0.5, 1]$ aralığında seçilmesi tavsiye edilmektedir (Storn ve Price, 1997). Mutasyon faktörünün seçimi yakınsamayı doğrudan etkilemektedir. Algoritmanın çalışma

prensibinin temel unsuru çaprazlama ile birlikte mutasyon şemasıdır ve baz vektörlerinin seçimi çaprazlama ile beraber algoritmanın stratejisini belirlemektedir.

DGA içinde, problem tipine göre farklı stratejiler geliştirilmiştir. Bu stratejiler mutasyona uğrayacak vektöre, fark vektörlerinin sayısına ve kullanılan çaprazlama tiplerine bağlıdır. Genel olarak stratejiler $DGA/A/B/C$ şeklinde ifade edilirler. DGA , diferansiyel gelişim algoritmasını, A mutasyona uğrayacak baz vektörünü, B fark vektörlerinin sayısını, C de çaprazlama tipini temsil eder. A 'nın temsil ettiği mutasyon vektörü ya bir önceki neslin en iyi vektörü ya da herhangi bir rastgele seçilen vektördür. B 'nin temsil ettiği fark vektörünün sayısı bir ise birbirinden farklı ve rastgele olarak üç adet vektör seçilir. Herhangi iki vektörün ağırlıklı farkı, üçüncü vektöre eklenir. Eğer fark vektörü sayısı iki ise, mevcut toplumda birbirinden farklı ve rastgele beş adet vektör seçilir. Seçilen dört vektörün herhangi ikişer çiftlerinin farkları alınarak beşinci vektöre eklenir. C 'nin temsil ettiği çaprazlama üstel (exponential) ya da binom formunda (binomial) olabilir (Özçelik, 2007). Price ve Storn'un önerdiği on farklı strateji aşağıda sırasıyla verilmektedir:

- DGA/rand/1/bin
- DGA /best/1/bin
- DGA /rand-to-best/1/bin
- DGA /rand/2/bin
- DGA /best/2/bin
- DGA /best/1/exp
- DGA /rand/1/exp
- DGA /rand-to-best/1/exp
- DGA /best/2/exp
- DGA /rand/2/exp

Bu çalışmada Denklem (2.3)'de verilen "DGA /rand/1/bin" stratejisi kullanılmıştır. Bu strateji aynı zamanda klasik DGA için kullanılan mutasyon şemasıdır.

4.1.3 Çaprazlama

Klasik DGA algoritmasında sıklıkla kullanılan çaprazlama işlemi binom formunda çaprazlamadır. Bu çaprazlama işleminde, mutasyon sonucu elde edilen VG_i mutasyon vektörü ile önceki nesilden elde edilen $XG_{i,j}$ arasında Denklem (4.5)'e

göre çaprazlama işlemi gerçekleştirilerek UG_i deneme vektörü elde edilir. Deneme vektörü CR olasılığı ile mutasyon vektöründen, $(1 - CR)$ olasılığı ile $XG_{i,j}$ den seçilir.

$$UG_i = \begin{cases} VG_i, & \text{rand}[0,1] \leq CR \vee j = jrand \\ XG_{i,j}^{GEN}, & \text{aksi durumda} \end{cases} \quad (4.5)$$

CR $[0, 1]$ aralığında gerçel bir sayıdır. Literatürde CR değerinin $[0.5, 1]$ aralığında alınması tavsiye edilmektedir (Storn ve Price, 1997). Çaprazlamada amaç belirlenen oranda parametrenin mutasyon vektöründen alınmasıdır. Buradaki $j = jrand$ koşulu, en az bir tane parametrenin mutasyon vektöründen alınmasını garanti etmek amacıyla konulmuştur. Rastgele seçilen $jrand$ noktasındaki parametre CR 'ye bakılmaksızın UG_i 'den seçilir.

4.1.4 Seçim

Seçim operatörü ile mevcut nesildeki bireyler ve üretilen yeni vektörler değerlendirilerek yeni nesildeki bireyler oluşturulur. Vektörlerin yeni nesilde yer alma olasılıkları uygunluk değerlerine bağlıdır. DGA'da birebir karşılaştırma yapıldığından basit bir seçim operatörünün kullanımı yeterli olmaktadır. Karşılaştırılan vektörlerden uygunluk değerleri daha iyi olan vektörler yeni neslin bireyleri olarak atanmaktadır.

$$XG_{i,j}^{GEN+1} = \begin{cases} UG_i, & f(UG_i) < f(XG_{i,j}^{GEN}) \\ XG_{i,j}^{GEN}, & \text{aksi durumda} \end{cases} \quad (4.6)$$

4.1.5 Durdurma Kriteri

DGA ile optimizasyon işlemi, istenilen bir durdurma kriteri gerçekleşinceye kadar devam eder. Bu çalışmada, test fonksiyonlarının çözümünde toplumdaki bireylerin uygunluk değerlerinin standart sapmasının belli bir tolerans değerinden ($\varepsilon = 1E - 10$) küçük olması (Ali ve Törn, 2004), sayısal uygulamalarda ise maksimum simülasyon sayısı durdurma kriteri olarak seçilmiştir.

4.2 Optimizasyon Modelinin Testi

Bu bölümde DGA'nın performansı, 5 adet kısıtlı ve 5 adet kısıtsız optimizasyon problemi üzerinde test edilmiştir. Ayrıca DGA'nın performansı çeşitli sezgisel optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Çözülen tüm kısıtlı ve kısıtsız optimizasyon problemlerinde popülasyon sayısı 100, mutasyon faktörü 0.5 ve çaprazlama oranı 0.8 alınmıştır.

4.2.1 Rosenbrock Fonksiyonu

De Jong'un 2. fonksiyonu ya da muz fonksiyonu olarak da bilinen Rosenbrock fonksiyonu klasik bir test problemidir. Global optimum uzun, dar, parabolik şekilli düz bir vadi içerisindedir. Bu vadiye ulaşmak kolay olmasına rağmen bu vadi içerisindeki global optimuma yaklaşmak oldukça zordur. Bu nedenle Rosenbrock fonksiyonu optimizasyon algoritmalarının performansını test etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Fonksiyonun tanımı ve optimal çözümü aşağıda verilmektedir:

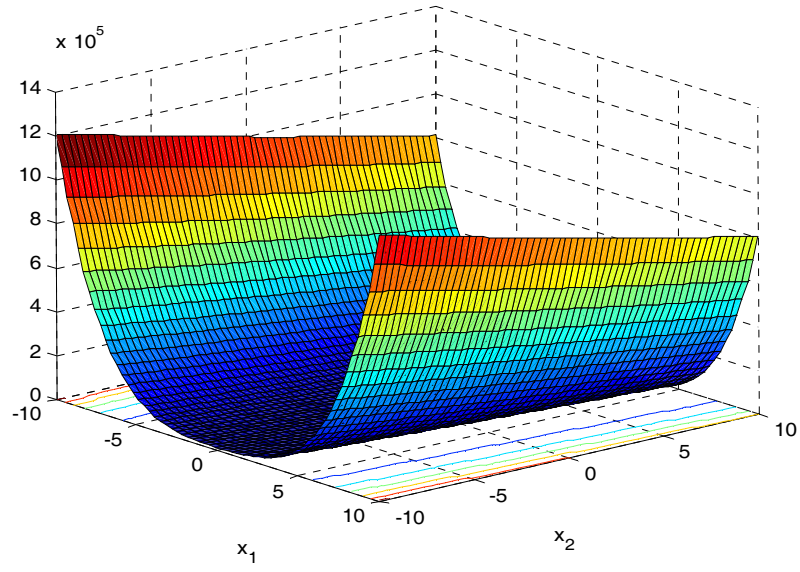
$$f(x) = \min \sum_{i=1}^{n-1} (100(x_i^2 - x_{i+1})^2 + (1 - x_i)^2), n = 2 \quad (4.7.a)$$

$$-5 \leq x_i \leq 10, i = 1, 2, \dots, n \quad (4.7.b)$$

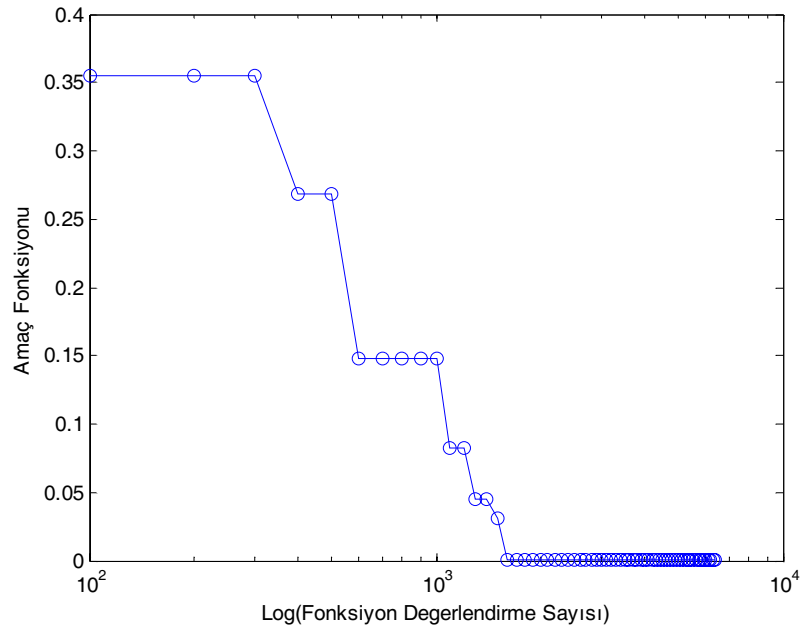
$$\mathbf{x} = [1, \dots, 1], f(\mathbf{x}) = 0 \quad (4.7.c)$$

Rosenbrock fonksiyonunun grafiği ($n=2$) Şekil 4.1'de, amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişiminin yarı logaritmik grafiği ise Şekil 4.2'de verilmiştir. Şekil 4.2'den görüldüğü üzere Rosenbrock fonksiyonunun DGA ile optimizasyonu sonucu elde edilen sonuçların global optimuma yakınsadığı gözükmektedir. 6400 fonksiyon değerlendirme sayısı sonucunda bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

$$\mathbf{x}^* = (0.9999997177, 0.9999994354), f(\mathbf{x}^*) = 7.9669E - 14$$



Şekil 4.1: Rosenbrock fonksiyonu ($n=2$).



Şekil 4.2: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.

4.2.2 Rastrigin Fonksiyonu

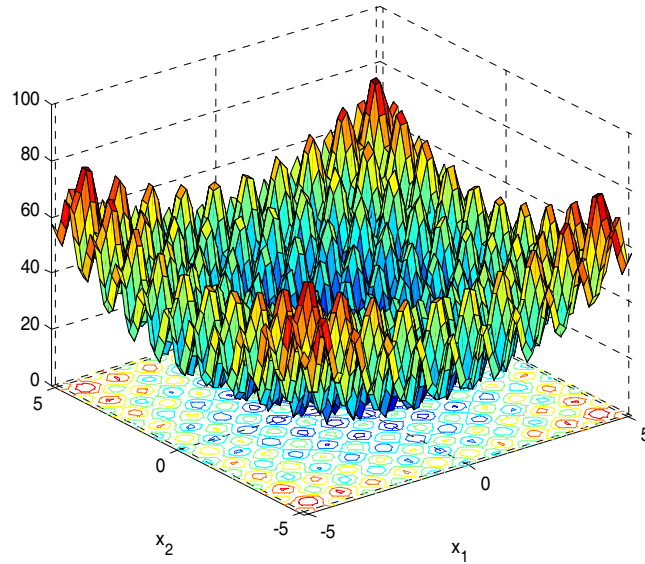
Rastrigin fonksiyonu sık yerel minimum üretmek amacıyla bir kosinüs modülünün eklendiği De Jong fonksiyonuna dayanmaktadır. Bu nedenle çok sayıda minimuma

(multi-modal) sahiptir. Bununla birlikte, minumumların yerleri düzenli bir şekilde dağılmıştır. Fonksiyonun tanımı ve optimal çözümü aşağıda verilmektedir:

$$f(x) = \min \left[10n + \sum_{i=1}^n x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) \right], n = 2 \quad (4.8.a)$$

$$-5.12 \leq x_i \leq 5.12, i = 1, 2, \dots, n \quad (4.8.b)$$

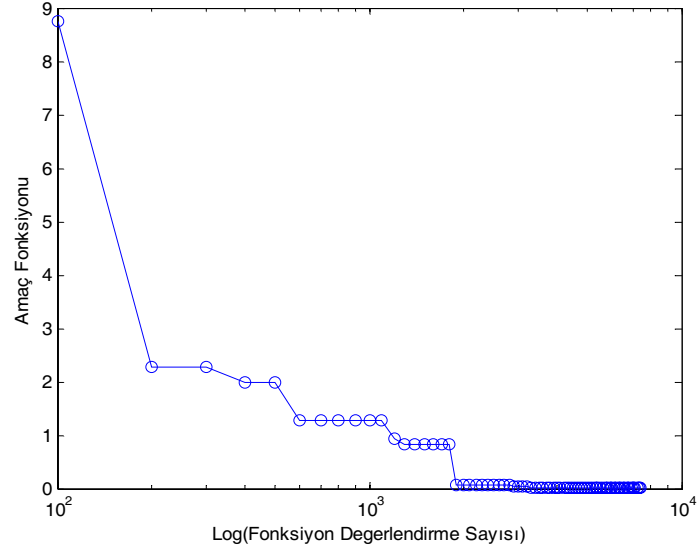
$$\mathbf{x} = (0, \dots, 0), f(\mathbf{x}) = 0 \quad (4.8.c)$$



Şekil 4.3: Rastrigin fonksiyonu ($n=2$).

Rastrigin fonksiyonunun grafiği ($n=2$) Şekil 4.3'de, amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişiminin yarı logaritmik grafiği ise Şekil 4.4'de verilmiştir. Şekil 4.4'den görüldüğü üzere Rastrigin fonksiyonunun DGA ile optimizasyonu sonucu elde edilen sonuçların global optimuma yakınsadığı gözükmemektedir. 7400 fonksiyon değerlendirme sayısı sonucunda bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

$$\mathbf{x}^* = (0.4409E-7, 0.4639E-7), f(\mathbf{x}^*) = 8.10024E-13$$



Şekil 4.4: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.

4.2.3 Schwefel Fonksiyonu

Schwefel fonksiyonu, global minimumun bir sonraki en iyi yerel minimumuna geometrik olarak uzak olmasından dolayı aldatıcı bir özelliği vardır. Bu nedenle, araştırma algoritmaları yanlış arama yönünde yakınsama zorluğu çekerler. Fonksiyonun tanımı ve optimal çözümü aşağıda verilmektedir:

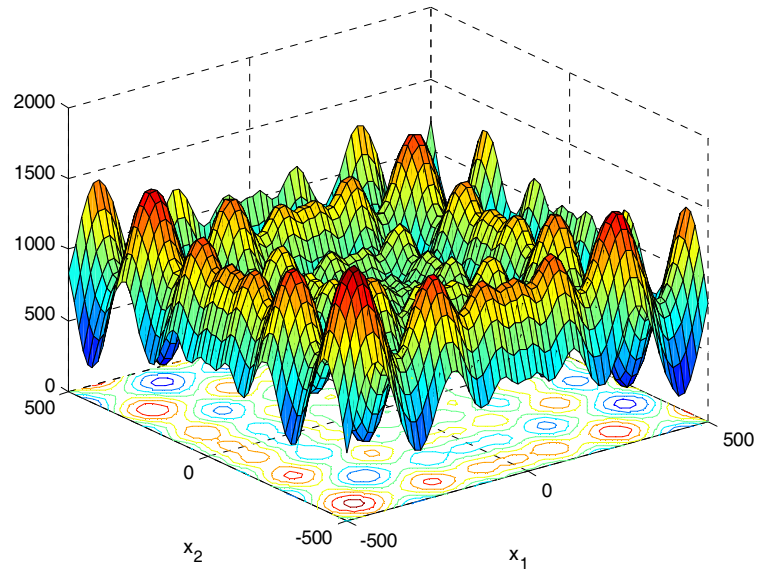
$$f(x) = \min \left[418.9829n - \sum_{i=1}^n x_i \sin(\sqrt{|x_i|}) \right], n = 2 \quad (4.9.a)$$

$$-500 \leq x_i \leq 500, i = 1, 2, \dots, n \quad (4.9.b)$$

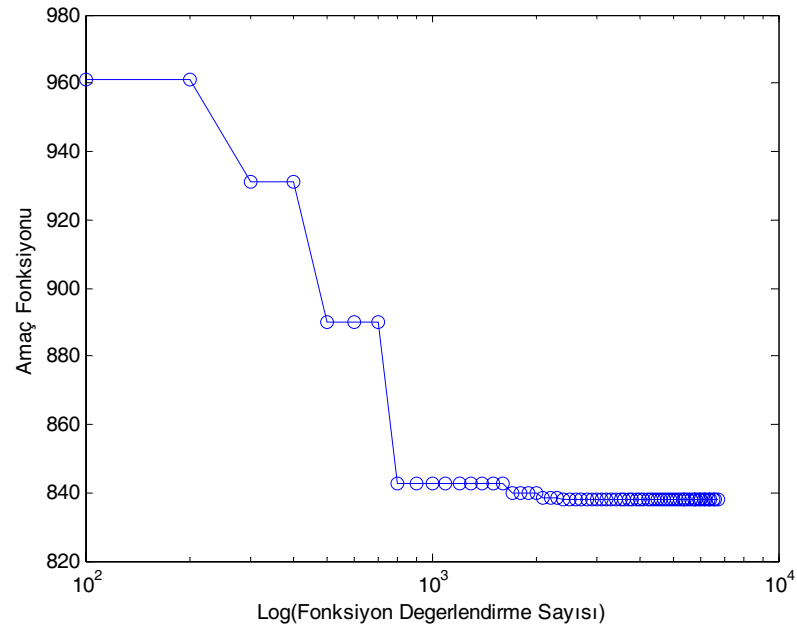
$$\mathbf{x} = (420.9687, \dots, 420.9687), f(\mathbf{x}) = 418.9829n \quad (4.9.c)$$

Schwefel fonksiyonunun grafiği ($n=2$) Şekil 2.5'de, amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişiminin yarı logaritmik grafiği ise Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.6'dan görüldüğü üzere Schwefel fonksiyonunun DGA ile optimizasyonu sonucu elde edilen sonuçların global optimuma yakınsadığı gözükmemektedir. 6700 fonksiyon değerlendirme sayısı sonucunda bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

$$\mathbf{x}^* = (420.9687466378, 420.9687497377), f(\mathbf{x}^*) = 837.9658254551$$



Şekil 4.5: Schwefel fonksiyonu ($n=2$).



Şekil 4.6: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.

4.2.4 Griewank Fonksiyonu

Griewank fonksiyonu Rastrigin fonksiyonuna benzer bir yapıdadır. Düzenli olarak dağılmış çok sayıda yerel minimuma sahiptir. Fonksiyonun tanımı ve optimal çözümü aşağıda verilmektedir:

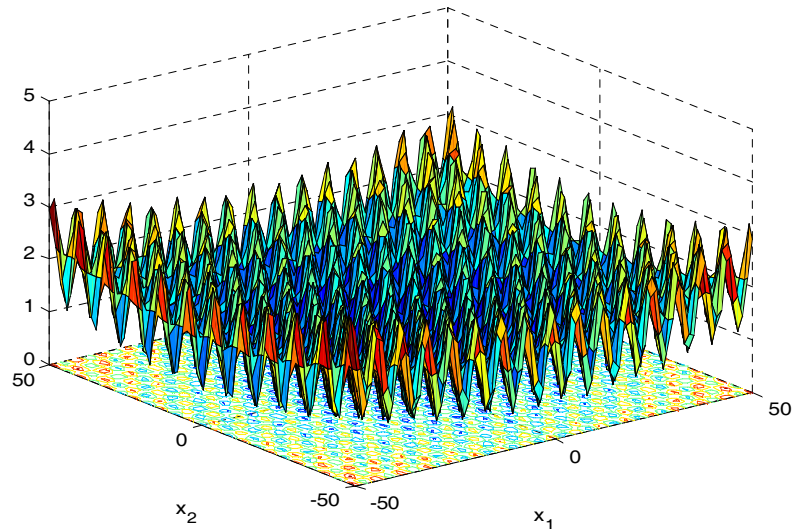
$$f(x) = \min \left[\sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1 \right], n = 2 \quad (2.10.a)$$

$$-600 \leq x_i \leq 600, i = 1, 2, \dots, n \quad (2.10.b)$$

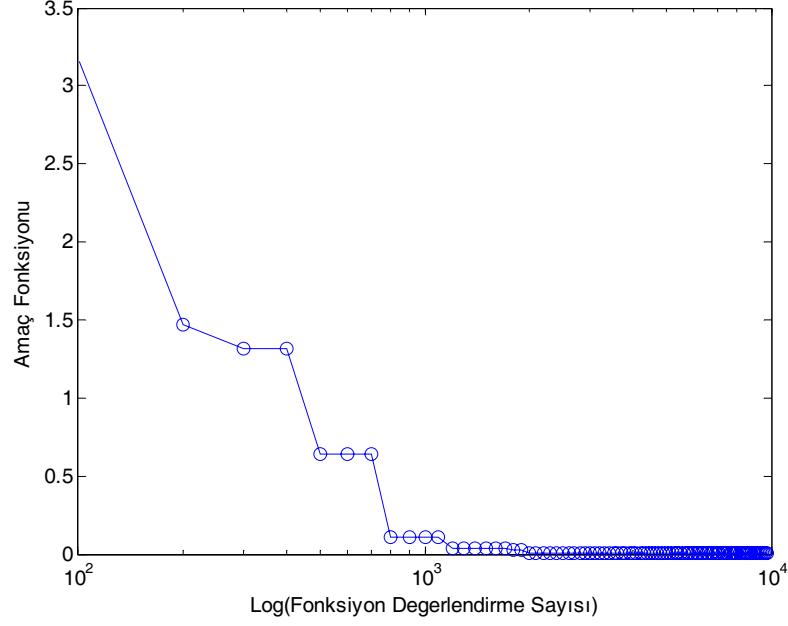
$$\mathbf{x} = (0, \dots, 0), f(\mathbf{x}) = 0 \quad (2.10.c)$$

Griewank fonksiyonunun grafiği ($n=2$) Şekil 4.7’de, amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişiminin yarı logaritmik grafiği ise Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekil 4.8’den görüldüğü üzere Griewank fonksiyonunun DGA ile optimizasyonu sonucu elde edilen sonuçların global optimuma yakınsadığı gözükmemektedir. 9700 fonksiyon değerlendirme sayısı sonucunda bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

$$\mathbf{x}^* = (0.0000001630, 0.0000009275), f(x^*) = 2.2859E - 13$$



Şekil 4.7: Griewank fonksiyonu ($n=2$).



Şekil 4.8: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.

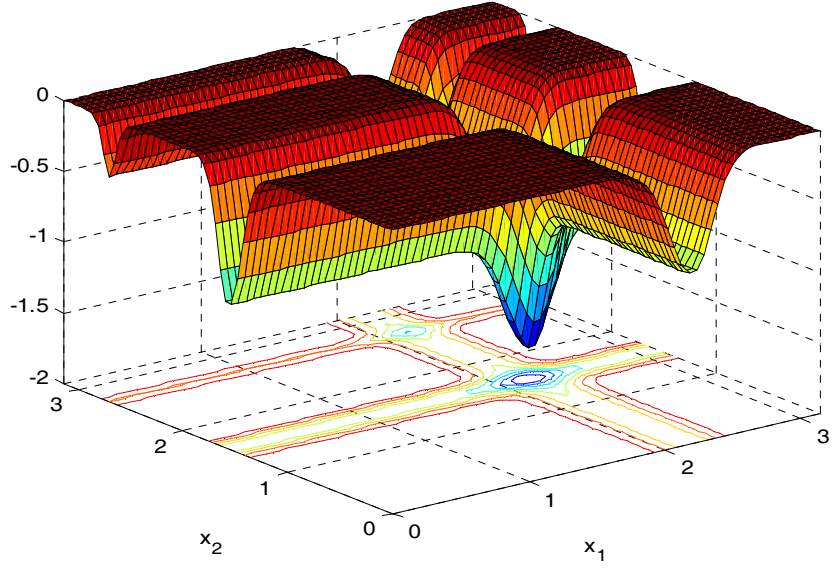
4.2.5 Michalewicz Fonksiyonu

Michalewicz fonksiyonu $n!$ sayıda yerel minimuma sahip çok doruklu (multi-modal) bir test fonksiyonudur. Fonksiyondaki m parametresi vadilerin ya da kenarların dikliğini tanımlamaktadır ve bu m değerleri büyüdükçe global minimuma ulaşılması zorlaşmaktadır. Fonksiyon, çok büyük m değerleri için samanlıkta bir iğne gibi davranır (çözüm uzayındaki dar tepelerin dışındaki fonksiyon değerleri global minimum hakkında çok az bilgi verirler). Fonksiyonun tanımı ve optimal çözümü aşağıda verilmektedir:

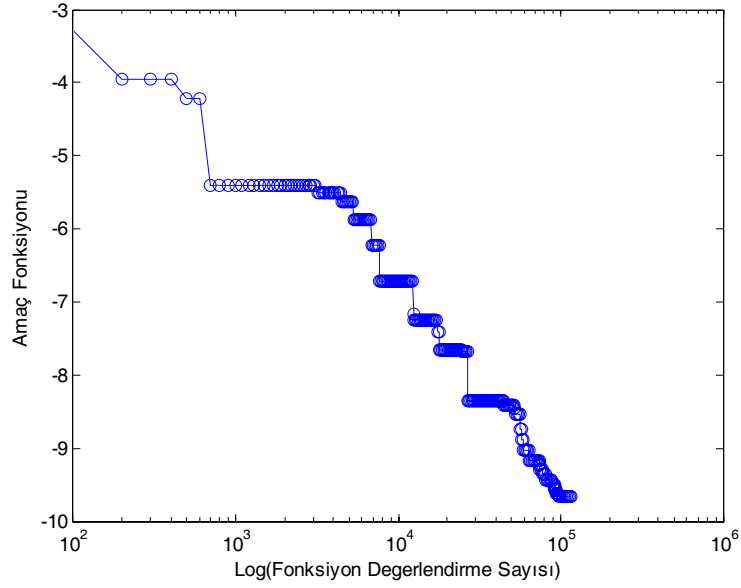
$$f(x) = \min \left[-\sum_{i=1}^n \sin(x_i) \left(\sin\left(\frac{ix_i^2}{\pi}\right) \right)^{2m} \right], m = 10, n = 10 \quad (4.11.a)$$

$$-600 \leq x_i \leq 600, i = 1, 2, \dots, n \quad (4.11.b)$$

$$f(x) = -9.66015 \quad (4.11.c)$$



Şekil 4.9: Michalewicz fonksiyonu ($n=2$).



Şekil 4.10: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.

Michalewicz fonksiyonunun grafiği ($n=2$) Şekil 4.9'da, amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişiminin yarı logaritmik grafiği ise Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekil 4.10'dan görüldüğü üzere Michalewicz fonksiyonunun DGA ile optimizasyonu sonucu elde edilen sonuçların global optimuma yakınsadığı gözükmemektedir. 9700 fonksiyon değerlendirme sayısı sonucunda bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

$$\mathbf{x}^* = \begin{pmatrix} 2.2029051286, 1.5707962770, 1.2849922753, 1.9230587410, 1.7204697745, \\ 1.5707961468, 1.4544139706, 1.7560865209, 1.6557173266, 1.5707962205 \end{pmatrix}$$

$$f(\mathbf{x}^*) = -9.6601517156.$$

4.2.6 Kısıtlı Optimizasyon Problemi I

13 adet karar değişkeni ve 9 adet eşitsizlik kısıtını içeren ilk kısıtlı minimizasyon problemi ve optimal çözümü aşağıda verilmektedir:

$$\text{Min } f(x) = \left[5 \sum_{i=1}^4 x_i - 5 \sum_{i=1}^4 x_i^2 - \sum_{i=5}^{13} x_i \right] \quad (4.12.a)$$

$$g_1(\mathbf{x}) = 2x_1 + 2x_2 + x_{10} + x_{11} - 10 \leq 0 \quad (4.12.b)$$

$$g_2(\mathbf{x}) = 2x_1 + 2x_3 + x_{10} + x_{12} - 10 \leq 0 \quad (4.12.c)$$

$$g_3(\mathbf{x}) = 2x_2 + 2x_3 + x_{11} + x_{12} - 10 \leq 0 \quad (4.12.d)$$

$$g_4(\mathbf{x}) = -8x_1 + x_{10} \leq 0 \quad (4.12.e)$$

$$g_5(\mathbf{x}) = -8x_2 + x_{11} \leq 0 \quad (4.12.f)$$

$$g_6(\mathbf{x}) = -8x_3 + x_{12} \leq 0 \quad (4.12.g)$$

$$g_7(\mathbf{x}) = -2x_4 - x_5 + x_{10} \leq 0 \quad (4.12.h)$$

$$g_8(\mathbf{x}) = -2x_6 - x_7 + x_{11} \leq 0 \quad (4.12.i)$$

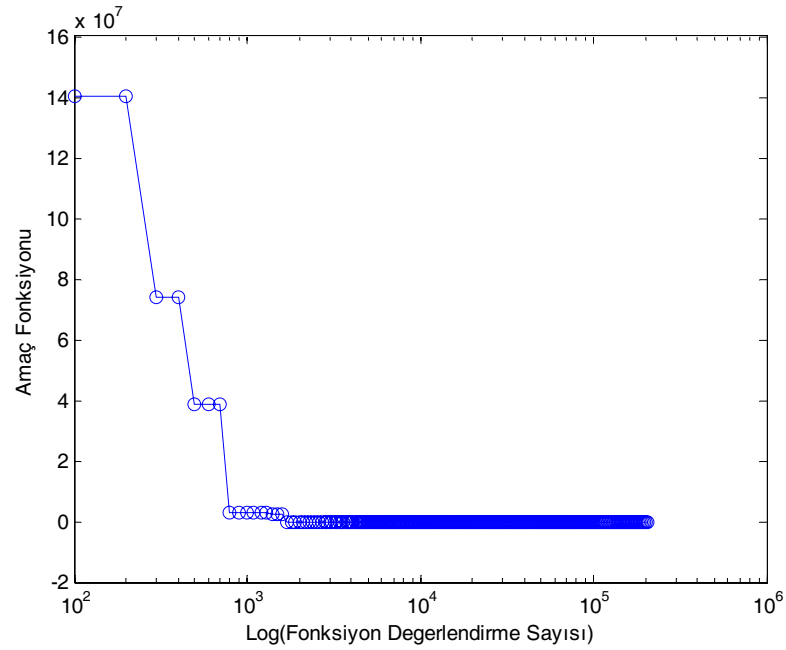
$$g_9(\mathbf{x}) = -2x_8 - x_9 + x_{12} \leq 0 \quad (4.12.k)$$

$$0 \leq x_i \leq 1, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 9 \quad (4.12.l)$$

$$0 \leq x_i \leq 100, \quad i = 10, 11, 12 \quad (4.12.m)$$

$$0 \leq x_i \leq 1, \quad i = 13 \quad (4.12.n)$$

$$\mathbf{x} = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3, 3, 3, 1), \quad f(\mathbf{x}) = -15 \quad (4.12.o)$$



Şekil 4.11: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.

Bu problem daha önceden Evrimsel Algoritma (EA) (Runarsson ve Yao, 2005), Kültürel Diferansiyel Gelişim Algoritması (KDG) (Becerra ve Coello, 2006), Süzme Isı Tavlama Benzetimi Algoritması (SITB) (Hedar ve Fukushima, 2006), Genetik Algoritma (GA) (Chootinan ve Chen, 2006), ve Melez Nelder Mead Parçacık Sürü Algoritması (NM-PSO) (Zahara ve Hu, 2008) ile çözülmüştür.

Şekil 4.11’de amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişiminin yarı logaritmik grafiği verilmektedir. Şekil 4.11’den görüldüğü üzere bu problemin DGA ile optimizasyonu sonucu elde edilen sonuçların global optimuma yakınsadığı gözükmemektedir.

Tablo 4.1: Kısıtlı optimizasyon problemi I için DGA ve çeşitli çözüm algoritmaların performansının karşılaştırılması.

Algoritma	Amaç fonksiyonunun en iyi değeri	Amaç fonksiyonunun ortalama değeri	Amaç fonksiyonunun en kötü değeri	Standart Sapma	Fonksiyon hesaplama sayısı
EA	-15.000000	-15.000000	-15.000000	0	122000
KDG	-15.000000	-14.999996	-14.999993	0.000002	100100
SITB	-14.999105	-14.993316	-14.979977	0.004813	205748
GA	-15.000000	-15.000000	-15.000000	0	95512
NM-PSO	-15.000000	-15.000000	-15.000000	0	41959
DGA	-15.000000	-15.000000	-15.000000	1.72E-11	204500

Tablo 4.1’de çeşitli çözüm algoritmaları ile elde edilen çözümler ve DGA ile elde edilen çözümler, amaç fonksiyonunun aldığı en iyi değer, amaç fonksiyonunun aldığı ortalama değer, amaç fonksiyonunun aldığı en kötü değer ve amaç fonksiyonunun aldığı değerlerin standart sapması açısından karşılaştırılmaktadır. DGA ile elde edilen çözümlerde herhangi bir yuvarlama yapılmamasına ve durdurma kriterinin ise oldukça küçük bir değer seçilmesine rağmen oldukça hassas sonuçlar elde edilmiştir. Üstelik tüm bu çözümler 204500 fonksiyon değerlendirme sayısı sonucunda bulunmuştur. Diğer algoritmalarla kıyaslandığında bu sayının oldukça makul bir sayı

olduğu söylenebilir. Ayrıca durdurma kriteri daha büyük bir değer seçilerek bu sayı oldukça düşürülebilir. En kötü çözümler ise SITB tarafından üretilmiştir.

4.2.7 Kısıtlı Optimizasyon Problemi II

2 adet karar değişkeni ve 2 adet eşitsizlik kısıtını içeren minimizasyon problemi ve optimal çözümlü aşağıda verilmektedir:

$$\text{Min } f(x) = \left[(x_1 - 10)^3 + (x_2 - 20)^3 \right] \quad (4.13.a)$$

$$g_1(\mathbf{x}) = -(x_1 - 5)^2 - (x_2 - 5)^2 + 100 \leq 0 \quad (4.13.b)$$

$$g_2(\mathbf{x}) = (x_1 - 6)^2 + (x_2 - 5)^2 - 82.81 \leq 0 \quad (4.13.c)$$

$$13 \leq x_1 \leq 100 \quad (4.13.d)$$

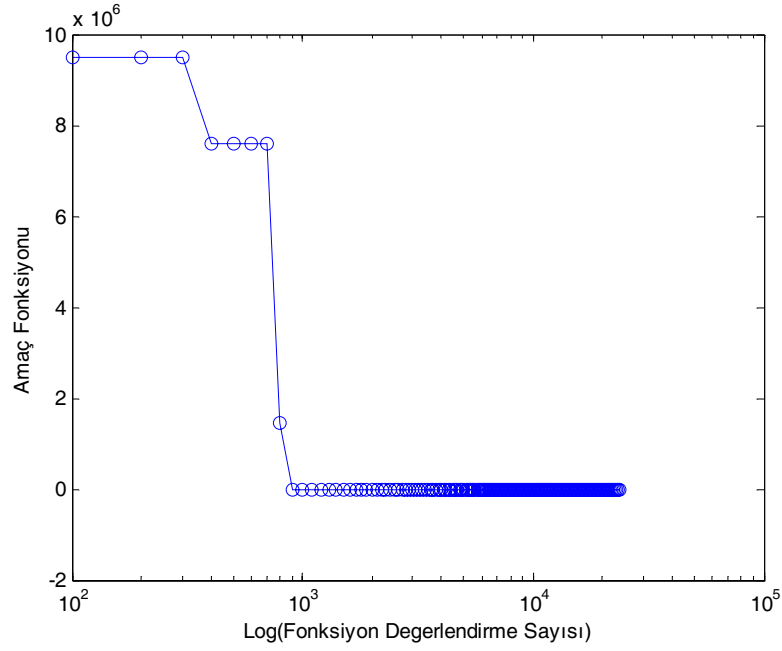
$$0 \leq x_2 \leq 100 \quad (4.13.e)$$

$$\mathbf{x} = (14.095, 0.84296), \quad f(\mathbf{x}) = -6961.81388 \quad (4.13.f)$$

Bu problem daha önceden EA (Runarsson ve Yao, 2005), KDG (Becerra ve Coello, 2006), SITB (Hedar ve Fukushima, 2006), GA (Chootinan ve Chen, 2006) ve NM-PSO algoritması (Zahara ve Hu, 2008) ile çözülmüştür.

Şekil 4.12’de amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişiminin yarı logaritmik grafiği verilmektedir. Şekil 4.12’den görüldüğü üzere bu problemin DGA ile optimizasyonu sonucu elde edilen sonuçların global optimuma yakınsadığı gözükmektedir. Tablo 4.2’de çeşitli çözüm algoritmaları ile elde edilen çözümler ve

DGA ile elde edilen çözümler, amaç fonksiyonunun aldığı en iyi değer, amaç fonksiyonunun aldığı ortalama değer, amaç fonksiyonunun aldığı en kötü değer ve amaç fonksiyonunun aldığı değerlerin standart sapması açısından karşılaştırılmaktadır. DGA ile elde edilen sonuçların diğer algoritmalarından elde edilen sonuçlardan daha iyi olduğu Tablo 4.2'den görülmektedir. Diğer algoritmaların standart sapma değerleri 0 olarak verilmiştir. Bulunan sonuçlar global optimuma yakın sonuçlar olmasından dolayı standart sapmanın mutlak sıfır elde edilmesi olanaksızdır. Bu değerlerin yuvarlanarak verildiği düşünülmektedir. Üstelik tüm bu çözümler 23800 fonksiyon değerlendirme sayısı sonucunda bulunmuştur. Diğer algoritmalarla kıyaslandığında bu sayının oldukça makul bir sayı olduğu söylenebilir. Ayrıca durdurma kriteri daha büyük bir değer seçilerek bu sayı daha da düşürülebilir.



Şekil 4.12: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.

Tablo 4.2: Kısıtlı optimizasyon problemi II için DGA ve çeşitli çözüm algoritmaların performansının karşılaştırılması.

Algoritma	Amaç fonksiyonun en iyi değeri	Amaç fonksiyonun ortalama değeri	Amaç fonksiyonun en kötü değeri	Standart Sapma	Fonksiyon hesaplama sayısı
EA	-6961.8139	-6961.8139	-6961.8139	0	56000
KDG	-6961.8139	-6961.8139	-6961.8139	0	100100
SITB	-6961.8139	-6961.8139	-6961.8139	0	44538
GA	-6961.8139	-6961.8139	-6961.8139	0	13577
NM-PSO	-6961.8240	-6961.8240	-6961.8240	0	9856
DGA	-6961.81388	-6961.81388	-6961.81388	1.96E-11	23800

4.2.8 Kısıtlı Optimizasyon Problemi III

5 adet karar değişkeni ve 6 adet eşitsizlik kısıtını içeren minimizasyon problemi ve optimal çözümü aşağıda sırasıyla verilmektedir.

$$\min f(x) = [5.3578547x_3^2 + 0.8356891x_1x_5 + 37.293239x_1 + 40792.141] \quad (4.14.a)$$

$$g_1(\mathbf{x}) = 85.334407 + 0.0056858x_2x_5 + 0.0006262x_1x_4 - 0.0022053x_3x_5 - 92 \leq 0 \quad (4.14.b)$$

$$g_2(\mathbf{x}) = -85.334407 - 0.0056858x_2x_5 - 0.0006262x_1x_4 + 0.0022053x_3x_5 \leq 0 \quad (4.14.c)$$

$$g_3(\mathbf{x}) = 80.51249 + 0.0071317x_2x_5 + 0.0029955x_1x_2 + 0.0021813x_3^2 - 110 \leq 0 \quad (4.14.d)$$

$$g_4(\mathbf{x}) = -80.51249 - 0.0071317x_2x_5 - 0.0029955x_1x_2 - 0.0021813x_3^2 + 90 \leq 0 \quad (4.14.e)$$

$$g_5(\mathbf{x}) = 9.300961 + 0.0047026x_3x_5 + 0.0012547x_1x_3 + 0.0019085x_3x_4 - 25 \leq 0 \quad (4.14.f)$$

$$g_6(\mathbf{x}) = -9.300961 - 0.0047026x_3x_5 - 0.0012547x_1x_3 - 0.0019085x_3x_4 + 20 \leq 0 \quad (4.14.g)$$

$$78 \leq x_1 \leq 102, \quad 33 \leq x_2 \leq 45, \quad 27 \leq x_i \leq 45, \quad i = 3, 4, 5 \quad (4.14.h)$$

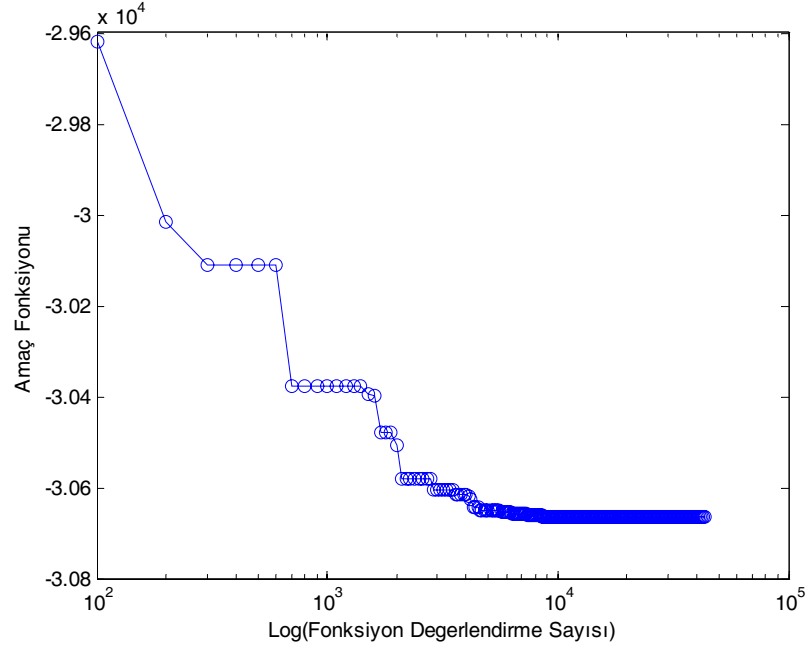
$$\mathbf{x} = (78, 33, 29.995256025682, 45, 36.775812905788), \quad f(\mathbf{x}) = -30665.539 \quad (4.14.i)$$

Bu problem daha önceden Biçimdeş Eşleme Algoritması (BEA) (Koziel ve Michalewicz, 1999), Stokastik Sıralama Algoritması (SSA) (Runarsson ve Yao, 2000), Evrimsel Programlama (EP) (Coello ve Becerra, 2004), Melez Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması (MPSO) (He ve Wang, 2007) ve Nelder Mead Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması (NM-PSO) (Zahara ve Kao, 2009) ile çözülmüştür.

Şekil 4.13'de amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişiminin yarı logaritmik grafiği verilmektedir. Şekil 4.13'den görüldüğü üzere bu problemin DGA ile optimizasyonu sonucu elde edilen sonuçların global optimuma yakınsadığı gözükmektedir.

Tablo 4.3'de çeşitli çözüm algoritmaları ile elde edilen çözümler ve DGA ile elde edilen çözümler, amaç fonksiyonunun aldığı en iyi değer, amaç fonksiyonunun aldığı ortalama değer, amaç fonksiyonunun aldığı en kötü değer ve amaç fonksiyonunun aldığı değerlerin standart sapması açısından karşılaştırılmaktadır. Bu problemde de en iyi çözümler DGA ile elde edilmiştir. Ayrıca BEA ve EP ile elde edilen çözümlerin global çözüme yakınsamadığı gözükmektedir. Üstelik bu çözümler 43300 fonksiyon değerlendirme sayısı sonucunda bulunmuştur. Diğer algoritmalarla

kıyaslandığında bu sayının oldukça makul bir sayı olduğu söylenebilir. Ayrıca durdurma kriteri daha büyük bir değer seçilerek bu sayı oldukça düşürülebilir.



Şekil 4.13: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.

Tablo 4.3: Kısıtlı optimizasyon problemi III için DGA ve çeşitli çözüm algoritmalarının performansının karşılaştırılması

Algoritma	Amaç fonksiyonunun en iyi değeri	Amaç fonksiyonunun ortalama değeri	Amaç fonksiyonunun en kötü değeri	Standart Sapma	Fonksiyon hesaplama sayısı
BEA	-30664.500	-30665.300	-30645.900	N/A	1400000
SSA	-30665.539	-30665.539	-30665.539	0.0000200	350000
EP	-30665.500	-30662.500	-30662.200	9.3000000	50020
MPSO	-30665.539	-30665.539	-30665.539	0.0000017	81000
NM-PSO	-30665.539	-30665.539	-30665.539	0.0000140	19568
DGA	-30665.539	-30665.539	-30665.539	4.71E-11	43300

4.2.9 Kısıtlı Optimizasyon Problemi IV

2 adet karar değişkeni ve 2 adet eşitsizlik kısıtını içeren maksimizasyon problemi ve optimal çözümü aşağıda sırasıyla verilmektedir.

$$\max f(x) = \left[\frac{\sin^3(2\pi x_1) \sin(2\pi x_2)}{x_1^3(x_1 + x_2)} \right] \quad (4.15.a)$$

$$g_1(\mathbf{x}) = x_1^2 - x_2 + 1 \leq 0 \quad (4.15.b)$$

$$g_2(\mathbf{x}) = 1 - x_1 + (x_2 - 4)^2 \leq 0 \quad (4.15.c)$$

$$0 \leq x_1 \leq 10, 0 \leq x_2 \leq 10 \quad (4.15.d)$$

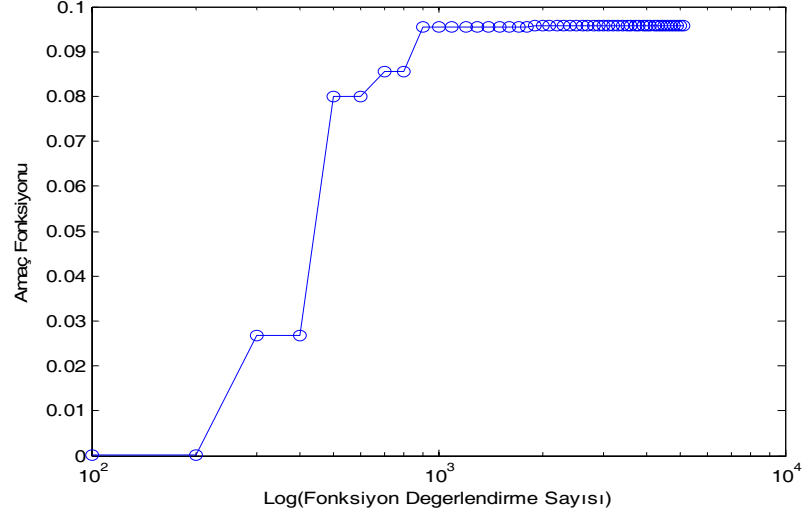
$$\mathbf{x} = (1.2279713, 4.2453733), f(\mathbf{x}) = 0.095825 \quad (4.15.e)$$

Bu problem daha önceden BEA (Koziel ve Michalewicz, 1999), SSA (Runarsson ve Yao, 2000), EP (Coello ve Becerra, 2004), MPSO (He ve Wang, 2007) ve NM-PSO algoritması (Zahara ve Kao, 2009) ile çözülmüştür.

Şekil 4.14'de amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişiminin yarı logaritmik grafiği verilmektedir. Şekil 4.14'den görüldüğü üzere bu problemin DGA ile optimizasyonu sonucu elde edilen sonuçların global optimuma yakınsadığı gözükmemektedir.

Tablo 4.4'de çeşitli çözüm algoritmaları ile elde edilen çözümler ve DGA ile elde edilen çözümler, amaç fonksiyonunun aldığı en iyi değer, amaç fonksiyonunun aldığı ortalama değer, amaç fonksiyonunun aldığı en kötü değer ve amaç fonksiyonunun aldığı değerlerin standart sapması açısından karşılaştırılmaktadır. Bu problemde en iyi çözümü SSA ve en kötü çözümü BEA vermiştir. DGA ile elde edilen çözümler

SSA algoritması ile elde edilen sonuçlara oldukça yakın olmasına rağmen, SSA 350000 DGA ise sadece 5100 fonksiyon değerlendirme sayısı sonucunda bu çözümleri elde etmiştir. Ayrıca durdurma kriteri daha büyük bir değer seçilerek bu sayı oldukça düşürülebilir.



Şekil 4.14: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.

Tablo 4.4: Kısıtlı optimizasyon problemi IV için DGA ve çeşitli çözüm algoritmaların performansının karşılaştırılması.

Algoritma	En iyi değer	Ortalama değer	En kötü değeri	Standart Sapma	Fonksiyon hesaplama sayısı
BEA	0.095825	0.089157	0.029144	N/A	140000
SSA	0.095825	0.095825	0.095825	2.6E-17	350000
EP	0.095825	0.095825	0.095825	0	50020
MPSO	0.095825	0.095825	0.095825	1.2E-10	81000
NM-PSO	0.095825	0.095825	0.095825	3.5E-08	2103
DGA	0.095825	0.095825	0.095825	9.89E-011	5100

4.2.10 Kısıtlı Optimizasyon Problemi V

3 adet karar değişkeni ve 1 adet eşitsizlik kısıtını içeren maksimizasyon problemi ve optimal çözümü aşağıda sırasıyla verilmektedir.

$$\text{Max } f(x) = \left[\frac{100 - (x_1 - 5)^2 - (x_2 - 5)^2 - (x_3 - 5)^2}{100} \right] \quad (4.16.a)$$

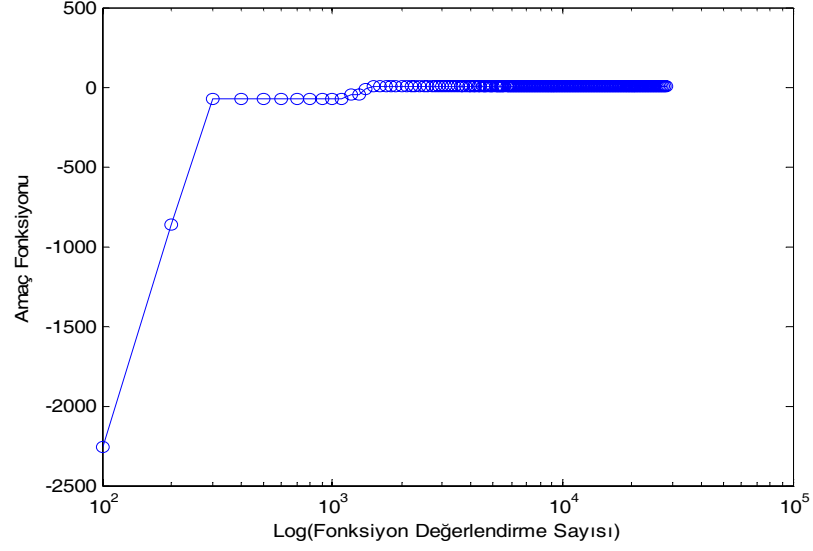
$$g(\mathbf{x}) = (x_1 - p)^2 + (x_2 - q)^2 + (x_3 - r)^2 - 0.0625 \leq 0 \quad (4.16.b)$$

$$0 \leq x_i \leq 10 \quad i = 1, 2, 3 \quad \text{ve} \quad p, q, r = 1, 2, \dots, 9 \quad (4.16.c)$$

$$\mathbf{x} = (5, 5, 5), \quad f(\mathbf{x}) = 1 \quad (4.16.d)$$

Bu problemde araştırma uzayının uygun çözüm bölgesi 9^3 ayrık küreden oluşmaktadır. Yukarıda verilen eşitsizliği sağlayan p, q, r değerlerinin varlığı durumunda (x_1, x_2, x_3) noktası bir uygun çözüm noktası olabilme şansına sahiptir (Zahara ve Kao, 2009).

Bu problem daha önceden BEA (Koziel ve Michalewicz, 1999), SSA (Runarsson ve Yao, 2000), EP (Coello ve Becerra, 2004), MPSO (He ve Wang, 2007) ve NM-PSO (Zahara ve Kao, 2009) algoritmaları ile çözölmüştür. şekil 4.15'de amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişiminin yarı logaritmik grafiği verilmektedir. şekil 4.15'den göröldüğü üzere bu problemin DGA ile optimizasyonu sonucu elde edilen sonuçların global optimuma yakınsadığı gözökmektedir.



Şekil 4.15: Amaç fonksiyonunun fonksiyon değerlendirme sayısı ile değişimi.

Tablo 4.5: Kısıtlı optimizasyon problemi V için DGA ve çeşitli çözüm algoritmalarının performansının karşılaştırılması.

Algoritma	Amaç fonksiyonunun en iyi değeri	Amaç fonksiyonunun ortalama değeri	Amaç fonksiyonunun en kötü değeri	Standart Sapma	Fonksiyon hesaplama sayısı
BEA	0.999999	0.999135	0.991950	N/A	1400000
SSA	1.000000	1.000000	1.000000	0	350000
EP	1.000000	0.996375	0.996375	9.7E-03	50020
MPSO	1.000000	1.000000	1.000000	1.6E-15	81000
NM-PSO	1.000000	1.000000	1.000000	0	923
DGA	1.000000	1.000000	1.000000	1.23E-11	28100

Tablo 4.5’de çeşitli çözüm algoritmaları ile elde edilen çözümler ve DGA ile elde edilen çözümler, amaç fonksiyonunun aldığı en iyi değer, amaç fonksiyonunun aldığı ortalama değer, amaç fonksiyonunun aldığı en kötü değer ve amaç fonksiyonunun aldığı değerlerin standart sapması açısından karşılaştırılmaktadır. Bu problemde en iyi çözümü MPSO, NM-PSO ve DGA vermiştir. Buna karşın en kötü çözümü BEA vermiştir. Fonksiyon değerlendirme sayısı açısından DGA, MPSO’ya göre daha avantajlı, NM-PSO’ya göre daha dezavantajlı konumdadır. NM-PSO içerisinde yerel

bir araştırma algoritması (Nelder-Mead Simplex) kullanıldığı için fonksiyon değerlendirme sayısının daha düşük olması normal bir sonuçtur. Aynı yöntem DGA ile birleştirildiğinde çok daha iyi sonuçların elde edilebileceği açıktır.

5. PROBLEMİN FORMÜLASYONU

5.1 Simülasyon Modeli

İki boyutlu serbest yüzeyli bir akiferde kirlenici madde taşınımı problemi Denklem 5.1'de verilen kısmi differansiyel denklemlerin çözümüne dayalı olarak modellenenmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ii} h \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + q_s = 0 \quad i = 1, 2 \quad (5.1.a)$$

$$V_i = -\frac{K_{ii}}{\theta} \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad i = 1, 2 \quad (5.1.b)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (V_i C) + \frac{q_s C_s}{\theta} \quad i, j = 1, 2 \quad (5.1.c)$$

5.2 Optimizasyon Modeli

Kirlenici kaynak belirlenmesi modelinin amacı; bilinmeyen yeraltı suyu kirlenici kaynak, sayılarının, yerlerinin, akılarının ve aktif stres periyotlarının belirlenmesidir. Kirlenici kaynak karakteristiklerinin belirlenmesi için gerekli olan amaç fonksiyonu Denklem 5.2'de verilmektedir. Bu amaç fonksiyonu, hesap ve gözlem konsantrasyonları arasındaki farkın karesinin toplamı minimum olması istenen bir fonksiyondur. Bu amaç fonksiyonu, hesap ve gözlem konsantrasyonları arasındaki farkın karesinin ağırlıklı toplamını minimum yapacak şekilde bir fonksiyon olarak tanımlanmaktadır.

$$\min SSE_{k,s} = \sum_{j=1}^{N_{sp}} \sum_{i=1}^{N_g} (C_{i,j}^h - C_{i,j}^g)^2 W_{i,j} \quad (5.2.a)$$

$$\mathbf{C}, \mathbf{h}, \mathbf{q} \geq 0 \quad (5.2.b)$$

$$k = 1, 2, \dots, N_k, \quad s = 1, 2, \dots, N_{sp}, \quad (5.2.c)$$

Burada; N_g : toplam konsantrasyon gözlem kuyusu sayısı, N_k : toplam kirletici kaynak sayısı, N_{sp} : toplam konsantrasyon stres periyotu sayısı, $C_{i,j}^h$: i . konsantrasyon gözlem kuyusunda j . stres periyotunda hesaplanan konsantrasyon, $C_{i,j}^g$: i . konsantrasyon gözlem kuyusunda j . stres periyotunda gözlenen konsantrasyon, \mathbf{q} : Kaynak akısı vektörü, \mathbf{C} : simülasyon modelinden elde edilen konsantrasyon vektörü, \mathbf{h} : simülasyon modeli ile elde edilen hidrolik yük vektörü, $W_{i,j}$: i . konsantrasyon gözlem kuyusunda j . stres periyotunda kullanılan ağırlık katsayısı, $SSE_{k,s}$: kaynak sayısı k aktif stres periyotu sayısı s olan bir kirletici kaynak belirlenmesi probleminin çözümünde hesaplanan ve gözlenen konsantrasyonların farklarının karelerinin ağırlıklı toplamını göstermektedir. Karar değişkenlerinin alt ve üst sınırları $\mathbf{Y}_{\min} \leq \mathbf{Y} \leq \mathbf{Y}_{\max}$, $\mathbf{X}_{\min} \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}_{\max}$ ve $\mathbf{q}_{\min} \leq \mathbf{q} \leq \mathbf{q}_{\max}$ olarak alınmıştır.

Düşük gözlem konsantrasyon değerlerinin modelde baskın olmaması için amaç fonksiyonu içerisinde kullanılan ağırlık katsayısı, Denklem 5.3'de verildiği gibi hesaplanmaktadır. Burada, η kullanıcı tanımlı yeteri kadar büyük sabit bir değerdir. (Mahar ve Datta, 2001; Singh ve Datta, 2006). Bu tez çalışması kapsamında bu değer 100 ppm olarak alınmıştır.

$$W_{i,j} = \frac{1}{(C_{i,j}^g + \eta)^2} \quad (5.3)$$

5.3 Optimum Kaynak ve Aktif Stres Periyotlarının Belirlenmesi

Kirletici kaynak karakteristiklerinin belirlenmesi problemi Denklem 5.2'de verilen optimizasyon modeli ile çözülebilir. Fakat, bu modelin çözümü için bilinmeyen kirletici kaynakların sayısı, yerleri ve aktif stres periyotu sayısı önceden bilinmelidir. Bu nedenle optimum kaynak sayısı, yerleri ve aktif stres periyotu sayısını belirlemek oldukça zor ve önemli bir problemdir. Bu çalışmada, optimum kaynak sayısı, yerleri

ve aktif stres periyodu sayısını belirlemek için önerilen kapalı bir çözüm metodolojisi aşağıda verilmektedir.

$$\begin{array}{ccccccc}
 \Omega_{1,1} & \rightarrow & \Omega_{1,2} & \rightarrow \cdots \rightarrow & \Omega_{1,s_{\max}} & & \\
 \downarrow & & \downarrow & & \vdots & \downarrow & \\
 \vdots & & \vdots & & \Omega_{k,s} & \vdots & (5.4) \\
 \downarrow & & \downarrow & & \vdots & \downarrow & \\
 \Omega_{k_{\max},1} & \rightarrow & \Omega_{k_{\max},2} & \rightarrow \cdots \rightarrow & \Omega_{k_{\max},s_{\max}} & &
 \end{array}$$

$$\Omega^* = \Omega_{k,s} \text{ eğer } \begin{cases} SSE_{k,s} < SSE_{k+1,s} \wedge \Omega_{k,s} \in \Omega_{k+1,s} \\ SSE_{k,s} < SSE_{k,s+1} \wedge \Omega_{k,s} \in \Omega_{k,s+1} \end{cases} \quad (5.5)$$

Burada, Ω^* : kaynak sayısı k aktif stres periyodu sayısı s olan bir kirletici kaynak belirlenmesi probleminin optimum çözümünü, $\Omega_{k,s}$: kaynak sayısı k aktif stres periyodu sayısı s olan bir kirletici kaynak belirlenmesi probleminin çözümünü, k_{\max} : göz önüne alınacak en büyük kaynak sayısını, s_{\max} : göz önüne alınacak en büyük aktif stres periyodu sayısını temsil etmektedir. Denklem 5.4'den görüldüğü gibi, kirlilik kaynağı belirleme işlemi en küçük kaynak ve aktif stres periyodu sayısı ile başlamaktadır. En iyi kaynak ve aktif stres periyodu sayısı bulunana kadar bu işlemler sistematik olarak devam etmektedir. Denklem 5.5'de verilen şartları sağlayan çözüm optimal çözüm olarak seçilmektedir.

5.4 Gözlem Verilerinin Ölçüm Hatası İçermesi Durumu

Gözlem kuyularında yapılan konsantrasyon ölçümleri bir miktar hata içerebilmektedir. Bu ölçüm hataları modelin performansını büyük oranda etkilediği ve çözümün duyarlılığını azalttığı bilinmektedir. Bu amaçla, simülasyon sonucu elde edilen konsantrasyon değerlerine, arazi yada laboratuvar koşullarında yapılan ölçüm hatalarını temsil eden normal dağılıma uygun hata terimleri eklenir (Singh ve Datta, 2006). Bu şekilde elde edilen hatalı gözlem değerleri kullanılarak modelin güvenilirliği ve performansı test edilir. Ölçüm hataları eklenmiş gözlem verileri aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır (Mahar ve Datta, 2001).

$$C^* = C + \varepsilon.\alpha.C \quad (5.6)$$

Burada, C^* hatalı gözlem konsantrasyonu değerini, ε ortalaması 0 ve standart sapması 1 olan normal dağılıma uyan hata terimlerini, α ise değeri 0 ile 1 arasında değişen ondalıklı bir sayıyı ($0 < \alpha < 1$) göstermektedir ve gürültü seviyesi olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada, ε matrisini üretmek için MATLAB (2009) kullanılmıştır. Singh ve Datta (2006), $\alpha < 0.10$ olması durumunu düşük gürültü seviyesi, $0.10 < \alpha < 0.15$ olması durumunu orta gürültü seviyesi ve $\alpha > 0.15$ olması durumunu ise yüksek gürültü seviyesi olarak tanımlanmıştır. Singh ve Diğ. (2004) ve Singh ve Datta (2006) tarafından verilen model sonuçlarıyla geliştirilen modelin sonuçlarını karşılaştırabilmek amacıyla birbirinden farklı 10 adet hatalı gözlem verisi setiyle çalışılmıştır. Her gözlem verisi seti, farklı ε matrisleri kullanılarak Denklem 5.6'dan türetilmiştir. Model sonuçlarının değerlendirilmesinde ortalama değerler kullanılmıştır.

5.5 Performans Değerlendirme Kriterleri

Geliştirilen kirlilik kaynağı belirlenmesi modelinin performansının değerlendirilmesi için normalize edilmiş hata (NH), yüzde ortalama tahmin hatası (YOTH) ve standart sapma (SS) gibi üç farklı hata değerlendirme kriteri kullanılmıştır. Normalize edilmiş hata değeri (Mahar ve Datta, 2001) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$NH = \frac{\sum_{j=1}^{N_{sp}} \sum_{i=1}^{N_k} |\bar{q}_{i,j} - q_{i,j}|}{\sum_{j=1}^{N_{sp}} \sum_{i=1}^{N_k} q_{i,j}} \times 100, \quad i = 1, 2, \dots, N_k, \quad j = 1, 2, \dots, N_{sp} \quad (5.7)$$

Burada, N_k : potansiyel kaynak yerlerinin sayısı, N_{sp} : toplam stres periyodu sayısı, $\bar{q}_{i,j}$: i . kaynağın j . stres periyotunda tahmin edilen ortalama kaynak akısı, $q_{i,j}$: i . kaynağın j . stres periyotunda gerçek kaynak akısıdır. Denklem 5.7'den görüldüğü gibi 10 farklı çözümün ortalaması gerçek çözüme yakınsayınca NH değeri sıfıra

gitmektedir. Her kaynak için 10 farklı çözümden elde edilen yüzde ortalama tahmin hatası (Mahar ve Datta, 2001) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$YOTH = \frac{|\bar{q}_i - q_i|}{q_i} \times 100, \quad i = 1, 2, \dots, N_k \quad (5.8)$$

Her stres periyodu için 10 farklı çözümden elde edilen standart sapma (Mahar, 1995) değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$SS = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^{N_p} (\tilde{q}_{i,p} - \bar{q}_i)^2}{N_p - 1}}, \quad i = 1, 2, \dots, N_k \quad (5.9)$$

Burada, N_p : yapılan çözüm sayısı (bu çalışma için 10 alınmıştır), $\tilde{q}_{i,p}$: i . kaynağın p . çözümünde tahmin edilen kaynak akısıdır.

5.6 Diferansiyel Gelişim Algoritmasının Parametreleri

Çözülen her iki sayısal uygulamada popülasyon sayısı (NP) 20, mutasyon faktörü (MF) 0.8 ve çaprazlama oranı (CR) 0.8 alınmıştır. Bu değerler duyarlılık analizi sonucu elde edilen değerlerdir. Duyarlılık analizi ile ilgili ayrıntılar ilerleyen bölümde verilecektir.

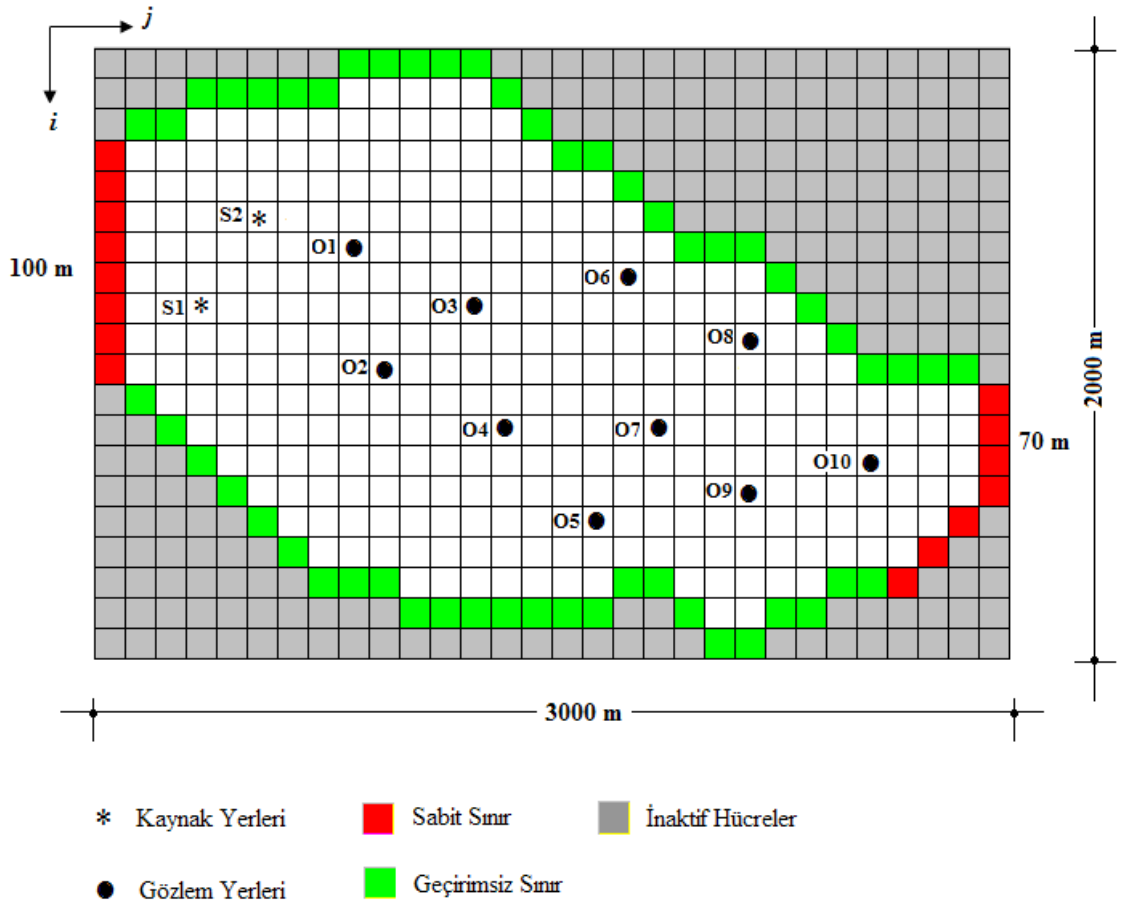
6. SAYISAL UYGULAMALAR

Geliştirilen S/O modelinin performansı, iki adet hipotetik akifer modeli üzerinde gerçek ve hatalı gözlem verileri kullanılarak test edilmiştir. Birinci modelde, kaynakların yerleri, sayıları ve aktif stres periyotları bilindiği varsayılarak potansiyel kaynakların boşalım geçmişleri elde edilmiştir. İkinci modelde ise kaynaklarla ilgili herhangi bir bilgi olmadığı varsayılarak potansiyel kaynakların yerleri, sayıları, aktif stres periyotları ve boşalım geçmişleri belirlenmiştir.



Şekil 6.1: Akifer Modeli 1 (Singh ve Diğ., 2004).

Her iki akifer modelinde, noktasal kaynaklardan bırakılan kirleticilerin bozunmayan karakterde olduğu, kirletici maddenin türünün bilindiği, akifer parametrelerinin önceden bilindiği ve akifer parametrelerinin herhangi bir belirsizlik içermediği kabul edilmiştir. Ayrıca, probleme ait tüm sınır ve başlangıç koşullarının önceden bilindiği varsayılmıştır. Bu çalışmada kullanılan akifer modelleri sırasıyla Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de verilmektedir.



Şekil 6.2: Akifer Modeli 2.

Geliştirilen S/O modelinin performansı, her iki akifer modeli üzerinde gerçek ve hatalı gözlem verileri kullanılarak test edilmiştir. Konsantrasyon ölçüm değerleri, akifer modellerinin MODFLOW ve MT3DMS ile sayısal çözümünden elde edilmiştir. Hatalı gözlem konsantrasyon değerleri, normal dağılıma uygun olarak rastgele üretilmiş hata terimlerinin sayısal çözüm sonucu elde edilen ölçüm konsantrasyon değerlerine eklenmesi sonucu elde edilmiştir.

Her iki uygulamada kullanılacak olan en uygun DGA parametrelerinin belirlenmesi amacıyla Şekil 6.1’de verilen akifer modeli farklı parametre kombinasyonları için birer kez çözümlenerek bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Belirlenen bu DGA parametreleri ile her iki sayısal uygulama literatürde verilen sonuçlarla karşılaştırma yapmak amacıyla 10’ar kez çözülmüş ve elde edilen sonuçlar çeşitli performans değerlendirme kriterlerine göre karşılaştırılmıştır.

6.1 Sayısal Uygulama 1

Bu uygulamada, kaynakların yerleri, sayıları ve aktif stres periyot sayıları bilindiği kabul edilerek kaynak akıları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu uygulama daha önce yapay sinir ağları (YSA) (Singh ve Diğ., 2004), genetik algoritma (GA) (Singh ve Datta, 2006) ve armoni araştırması tekniği (AAT) (Ayvaz, 2010) ile çözülmüştür. Bu uygulamada ele alınan akifer sisteminin şematik gösterimi Şekil 6.1'de verilmektedir. Şekil 6.1'den görüldüğü gibi, akifer modeli sağ ve sol yanda lineer olarak değişen Dirichlet sınır koşullarına (sabit yük), diğer yanlarda ise Neumann sınır koşullarına (geçirimsiz sınır) sahiptir. Akiferde 1 tanesi pasif olmak üzere 3 adet kirlilik kaynağı (S1-S3) ve 6 adet gözlem kuyusu (O1-O6) bulunmaktadır. Bu akifer modeli için toplam simülasyon süresi 5 yıldır ve bu simülasyon süresi her biri 3 ay uzunluğunda olan toplam 20 adet stres periyotuna bölünmüştür. Bu akifer modelinde tüm kaynakların ilk 4 stres periyotunda aktif oldukları bilinmektedir. Gerekli çözüm parametreleri ve her aktif stres periyotu için kaynak akılarının gerçek değerleri sırasıyla Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de listelenmiştir. Bu problem için karar değişkeni sayısı 12'dir (3 kaynak×4 aktif stres periyotu) ve amacımız bu 12 karar değişkenini ayarlayarak gözlem kuyularında ölçülen ve tahmin edilen konsantrasyon değerleri arasındaki farkların karelerinin toplamını en küçük yapmaktır. Optimizasyon modelinde 120 gözlem konsantrasyon değeri (6 gözlem kuyusu×20 stres periyotu) kullanılmıştır. Kaynak akılarının sınır değerleri $q_{\min} = 0$ ve $q_{\max} = 100$ g/s olarak alınmıştır. Maksimum simülasyon sayısı ise 40000 olarak seçilmiştir.

Optimizasyon modelinde kullanılacak parametrelerin en uygun seçimi için bu akifer modeli üzerinde bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Yapılan analizde, popülasyon sayısı ($NP = 10, 20, 30, 40, 50$), mutasyon faktörü ($MF = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$) ve çaprazlama oranı ($CR = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$) için beş farklı değer kullanılmıştır. Geliştirilen S/O modeli ile Şekil 6.1'de verilen akifer modeli 125 ($5 \times 5 \times 5$) farklı kombinasyon için çözülmüştür. 125 farklı çözüm içerisinde en iyi SSE ($1.20957876785656E-06$) değerine sahip çözüm $NP = 20$, $MF = 0.8$ ve $CR = 0.8$ için, en kötü SSE (3.69701609669109) değerine sahip çözüm ise $NP = 10$, $MF = 0.9$ ve $CR = 0.5$ için elde edilmiştir. En iyi çözüm için elde edilen yakınsama grafiği Şekil 6.3'de, gerçek ve hesaplanan kaynak akılarının karşılaştırılması ise Şekil 6.4'de verilmektedir. Şekil 6.3'den ve Şekil 6.4'den görüldüğü gibi 1000

jenerasyon sonunda çözüm stabil hale gelmiş ve optimum çözüm elde edilmiştir. Duyarlılık analizinde 125 farklı çözümden elde edilen SSE değerleri Tablo 6.3’de sunulmuştur. Ayrıca, 125 farklı çözümden elde edilen tüm analiz sonuçları tez ekinde sunulan CD içerisinde ayrıntılı olarak verilmiştir. Tez kapsamında ele alınan tüm sayısal uygulamalarda $NP = 20$, $MF = 0.8$ ve $CR = 0.8$ değeri kullanılmasının uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

Tablo 6.1: Çözüm parametreleri

Parametreler	Değerler
x yönünde hidrolik iletim katsayısı, K_{xx} (m/s)	0.0002
y yönünde hidrolik iletim katsayısı, K_{yy} (m/s)	0.0002
Efektif porozite, θ	0.25
Boyuna dispersivite katsayısı, α_L (m)	40
Enine dispersivite katsayısı, α_T (m)	9.6
Akiferin doymun kalınlığı, b (m)	30.5
x yönünde grid aralığı, Δx (m)	100
y yönünde grid aralığı, Δy (m)	100
Stres periyotları uzunluğu, Δt (ay)	3
Birim alan için hacimsel akı, W (m/s)	1.00E-9
Başlangıç konsantrasyonu (ppm)	100

Tablo 6.2: Her aktif stres periyodu için kaynak akılarının gerçek değerleri

Kirlenici kaynakları	Her aktif stres periyotunda kaynak akıları (g/s)			
	SP1	SP2	SP3	SP4
S1	47.0	15.0	37.0	0.0
S2	0.0	0.0	0.0	0.0
S3	30.0	58.8	0.0	35.0

Tablo 6.3: Duyarlılık analizinde 125 farklı çözüm için elde edilen SSE değerleri.

Çözüm	NP	MF	CR	SSE
1	10	0.5	0.5	1.65E-03
2	10	0.5	0.6	4.18E-02
3	10	0.5	0.7	1.23E-06
4	10	0.5	0.8	1.23E-06
5	10	0.5	0.9	1.23E-06
6	10	0.6	0.5	9.83E-02
7	10	0.6	0.6	2.57E-02
8	10	0.6	0.7	1.05E-03
9	10	0.6	0.8	2.47E-02
10	10	0.6	0.9	1.23E-06
11	10	0.7	0.5	3.07E-01
12	10	0.7	0.6	8.54E-04
13	10	0.7	0.7	1.69E-06
14	10	0.7	0.8	9.10E-01
15	10	0.7	0.9	1.23E-06
16	10	0.8	0.5	3.62E-01
17	10	0.8	0.6	1.71E-01
18	10	0.8	0.7	1.05E-03
19	10	0.8	0.8	1.21E-06
20	10	0.8	0.9	8.98E-01
21	10	0.9	0.5	3.69E+00
22	10	0.9	0.6	4.24E-01
23	10	0.9	0.7	9.44E-02
24	10	0.9	0.8	3.78E-01
25	10	0.9	0.9	3.36E+00
26	20	0.5	0.5	1.23E-06
27	20	0.5	0.6	1.23E-06
28	20	0.5	0.7	1.25E-06
29	20	0.5	0.8	1.27E-06
30	20	0.5	0.9	3.68E-06
31	20	0.6	0.5	1.23E-06
32	20	0.6	0.6	1.23E-06
33	20	0.6	0.7	1.23E-06
34	20	0.6	0.8	1.25E-06
35	20	0.6	0.9	1.55E-06
36	20	0.7	0.5	1.23E-06
37	20	0.7	0.6	1.23E-06
38	20	0.7	0.7	1.25E-06
39	20	0.7	0.8	1.21E-06

Tablo 6.3: Duyarlılık analizinde 125 farklı çözüm için elde edilen SSE değerleri (devam).

Çözüm	NP	MF	CR	SSE
40	20	0.7	0.9	1.23E-06
41	20	0.8	0.5	1.25E-06
42	20	0.8	0.6	1.23E-06
43	20	0.8	0.7	1.23E-06
44	20	0.8	0.8	1.21E-06
45	20	0.8	0.9	1.23E-06
46	20	0.9	0.5	4.27E-02
47	20	0.9	0.6	1.05E-03
48	20	0.9	0.7	8.21E-02
49	20	0.9	0.8	1.23E-06
50	20	0.9	0.9	1.23E-06
51	30	0.5	0.5	1.74E-05
52	30	0.5	0.6	1.40E-06
53	30	0.5	0.7	1.41E-06
54	30	0.5	0.8	6.51E-06
55	30	0.5	0.9	7.04E-05
56	30	0.6	0.5	1.23E-06
57	30	0.6	0.6	1.25E-06
58	30	0.6	0.7	1.29E-06
59	30	0.6	0.8	2.21E-06
60	30	0.6	0.9	4.51E-05
61	30	0.7	0.5	1.23E-06
62	30	0.7	0.6	1.23E-06
63	30	0.7	0.7	1.25E-06
64	30	0.7	0.8	1.43E-06
65	30	0.7	0.9	5.40E-06
66	30	0.8	0.5	1.23E-06
67	30	0.8	0.6	1.22E-06
68	30	0.8	0.7	1.23E-06
69	30	0.8	0.8	1.25E-06
70	30	0.8	0.9	1.29E-06
71	30	0.9	0.5	1.58E-06
72	30	0.9	0.6	1.22E-06
73	30	0.9	0.7	1.25E-06
74	30	0.9	0.8	1.23E-06
75	30	0.9	0.9	1.27E-06
76	40	0.5	0.5	1.39E-06
77	40	0.5	0.6	3.35E-06

Tablo 6.3: Duyarlılık analizinde 125 farklı çözüm için elde edilen SSE değerleri (devam).

Çözüm	NP	MF	CR	SSE
78	40	0.5	0.7	1.07E-05
79	40	0.5	0.8	7.89E-05
80	40	0.5	0.9	2.94E-04
81	40	0.6	0.5	1.38E-06
82	40	0.6	0.6	1.35E-06
83	40	0.6	0.7	3.62E-06
84	40	0.6	0.8	2.87E-05
85	40	0.6	0.9	8.77E-05
86	40	0.7	0.5	1.25E-06
87	40	0.7	0.6	1.25E-06
88	40	0.7	0.7	1.46E-06
89	40	0.7	0.8	5.89E-06
90	40	0.7	0.9	8.26E-05
91	40	0.8	0.5	1.25E-06
92	40	0.8	0.6	1.25E-06
93	40	0.8	0.7	1.28E-06
94	40	0.8	0.8	1.69E-06
95	40	0.8	0.9	1.75E-05
96	40	0.9	0.5	1.23E-06
97	40	0.9	0.6	1.22E-06
98	40	0.9	0.7	1.23E-06
99	40	0.9	0.8	1.29E-06
100	40	0.9	0.9	3.17E-06
101	50	0.5	0.5	4.25E-06
102	50	0.5	0.6	2.93E-05
103	50	0.5	0.7	5.34E-05
104	50	0.5	0.8	3.31E-04
105	50	0.5	0.9	2.94E-03
106	50	0.6	0.5	1.35E-06
107	50	0.6	0.6	2.79E-06
108	50	0.6	0.7	9.01E-06
109	50	0.6	0.8	1.29E-04
110	50	0.6	0.9	6.31E-04
111	50	0.7	0.5	1.25E-06
112	50	0.7	0.6	1.40E-06
113	50	0.7	0.7	1.03E-05
114	50	0.7	0.8	2.06E-05

Tablo 6.3: Duyarlılık analizinde 125 farklı çözüm için elde edilen SSE değerleri (devam).

Çözüm	NP	MF	CR	SSE
115	50	0.7	0.9	1.57E-04
116	50	0.8	0.5	1.23E-06
117	50	0.8	0.6	1.25E-06
118	50	0.8	0.7	1.41E-06
119	50	0.8	0.8	5.99E-06
120	50	0.8	0.9	5.27E-04
121	50	0.9	0.5	1.22E-06
122	50	0.9	0.6	1.25E-06
123	50	0.9	0.7	1.25E-06
124	50	0.9	0.8	1.42E-06
125	50	0.9	0.9	3.55E-06

Daha önceki bölümde belirtildiği gibi, geliştirilen S/O modelinin performansı daima ölçüm hatası koşullarına göre değerlendirilmektedir. Bu oldukça gerçekçi bir yaklaşımdır, çünkü gerek arazi koşullarında gerekse laboratuvar koşullarında bir miktar ölçüm hatası yapılabilmektedir. Bu amaçla, farklı gürültü (noise) seviyeleri için sayısal çözümden elde edilen ölçüm konsantrasyon değerlerine normal dağılıma uygun olarak rastgele üretilmiş hata terimleri eklenmektedir. Değerlendirme sonuçlarının elde edilmesinde, problemin 10 defa çözümünden elde edilen sonuçların ortalama değerleri kullanılmıştır. Farklı gürültü seviyeleri için YSA, GA, AAT ve DGA ile elde edilen normalize hata (NH) değerlerinin karşılaştırılması Tablo 6.4’de verilmektedir. Tablo 6.4’den görüleceği gibi gürültü seviyesi arttıkça NH değeri artmaktadır. Tüm gürültü seviyeleri için DGA ile elde edilen NH değerlerinin YSA, GA ve AAT ile elde edilen NH değerlerinden daha küçük olduğu Tablo 6.4’den açıkça görülmektedir.

Kaynak akılarının gerçek değerleri ile $\alpha = 0.10$ (orta ölçekli gürültü seviyesi) için tahmin edilen kaynak akılarının karşılaştırılması Tablo 6.5’de verilmektedir. Tahmin edilen kaynak akıları 10 farklı çözümün ortalamasından elde edilmiştir. Tablo 6.5’den açıkça görüldüğü gibi tahmin edilen kaynak akıları, gerçek değerlerine oldukça yakındır. Maksimum YOTH ve SS değerleri 5.84 ve 5.49 olarak hesaplanmıştır. Maksimum YOTH ve SS değerleri GA ile 33.71 ve 10.74 olarak elde etmiştir (Singh ve Datta, 2006). Ayvaz (2010) tarafından AAT ile yapılan çalışmada

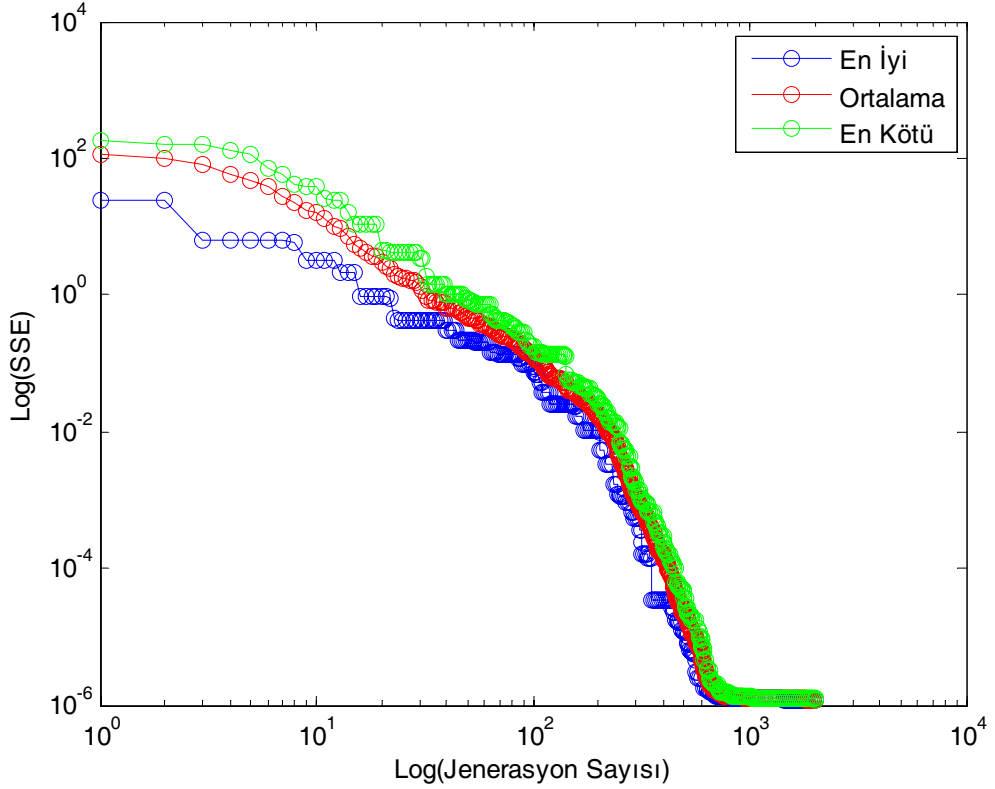
bu değerler 8.98 ve 5.97 olarak verilmiştir. Bu durumda, DGA ile elde edilen sonuçların GA ve AAT ile elde edilen sonuçlardan daha iyi olduğu Tablo 6.4'den açıkça gzkmektedir.

Tablo 6.4: Farklı gürültü seviyeleri için YSA, GA, AAT ve DGA ile elde edilen NH değerlerinin karşılaştırılması.

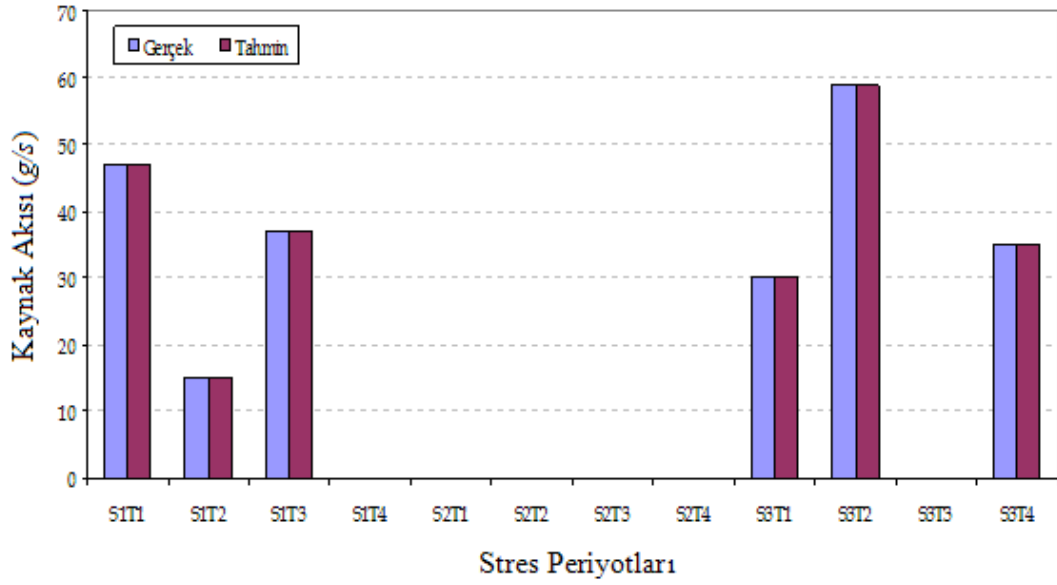
Gürültü Seviyesi (α)	NH (%)			
	YSA (Singh ve diğ., 2004)	GA (Singh ve Datta, 2006)	AAT (Ayvaz, 2010)	DGA
0.00	8.77	5.92	0.09	0.01 ^a
0.05	14.18	14.36	3.71	2.31 ^b
0.10	22.88	17.41	8.93	5.67 ^b
0.15	31.78	19.03	11.23	8.32 ^b
0.20	40.05	23.51	16.60	14.38 ^b

^a Bu değeri hesaplariken bir adet zm yapılmıştır.

^b Bu değeri hesaplariken on adet zm yapılmıştır.



Şekil 6.3: $NP = 20$, $MF = 0.8$ ve $CR = 0.8$ için elde edilen yakınsama grafiği.



Şekil 6.4: $NP = 20$, $MF = 0.8$ ve $CR = 0.8$ için gerçek ve hesaplanan kaynak akılarının karşılaştırılması.

Tablo 6.5: Kaynak akılarının gerçek değerleri ile $\alpha = 0.10$ (orta ölçekli gürültü seviyesi) için tahmin edilen kaynak akılarının karşılaştırılması.

Kaynak	Aktif Stres Periyodu	Gerçek Kaynak Akısı (g/s)	Tahmin Edilen Kaynak Akısı (g/s)		
			Ortalama Değer	YOTH	SS
S1	1	47	45.98	2.17	1.81
	2	15	15.67	4.47	2.53
	3	37	34.84	5.84	2.93
	4	0	0.48	N/A	1.04
S2	1	0	0.95	N/A	2.13
	2	0	0	N/A	0.00
	3	0	0	N/A	0.00
	4	0	0.38	N/A	0.83
S3	1	30	29.12	2.93	2.16
	2	58.8	56.69	3.59	4.93
	3	0	2.92	N/A	5.49
	4	35	33.95	3.01	5.28

6.2 Sayısal Uygulama 2

Bir önceki uygulamada, kaynakların yerleri, sayıları ve aktif stres periyotlarının bilindiği durumda boşalım geçmişleri etkin bir şekilde tahmin edilmişti. Pratikte, kaynakların yerlerinin, sayılarının ve aktif stres periyotlarının bilinmesi mümkün değildir. Bu uygulamada, kaynakların yerlerinin, sayılarının ve aktif olduğu stres periyotu sayılarının bilinmediği kabul edilerek bilinmeyen kirletici kaynaklarının yerleri, sayıları, aktif stres periyotları ve boşalım geçmişleri tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Bu uygulamada ele alınan homojen ve izotrop akifer sisteminin şematik gösterimi Şekil 6.2'de verilmektedir. Şekil 6.2'den görüldüğü gibi, akifer modeli sağ ve sol yanda Dirichlet sınır koşullarına (sabit yük), diğer yanlarda ise Neumann sınır koşullarına (geçirimsiz sınır) sahiptir. Akiferin sol tarafındaki sabit hidrolik yük 100 m, sağ yanındaki sabit hidrolik yük 70 m'dir. Akiferde 2 adet kirlilik kaynağı (S1-S2) ve 10 adet gözlem kuyusu (O1-O10) bulunmaktadır. Bu akifer modeli için toplam simülasyon süresi 10 yıldır ve bu simülasyon süresi her biri 6 ay uzunluğunda olan toplam 20 adet stres periyotuna bölünmüştür. Bu akifer modelinde tüm kaynakların ilk 5 stres periyotunda aktif oldukları kabul edilmiştir. Gerekli çözüm parametreleri Tablo 6.6'de verilmektedir. Kaynak yerlerinin ve her aktif stres periyotunda kaynak akılarının gerçek değerleri Tablo 6.7'da listelenmiştir.

Bu problemde kaynak yerleri, sayıları ve aktif olduğu stres periyotu sayıları bilinmediği için karar değişkeni sayısı her çözüm adayı için değişmektedir. Mesela kaynak sayısının 3 ve aktif stres periyotu sayısının 4 olduğunu kabul edelim. Bu durumda karar değişkeni sayısı 18'dir . Bu karar değişkenlerinden 12 tanesi kaynak akısı (kaynak sayısı×aktif stres periyotu sayısı) ile ilgili ve 6 tanesi ise kaynak yerleri ile ilgilidir (kaynak sayısı×2). Optimizasyon modelinde 200 adet gözlem konsantrasyon değeri (10 gözlem kuyusu× 20 stres periyotu) kullanılmıştır. Karar değişkenlerinin sınır değerleri $q_{\min} = 0$, $q_{\max} = 150$ g/s, $X_{\min} = 1$, $X_{\max} = 20$, $Y_{\min} = 1$ ve $Y_{\max} = 20$ olarak alınmıştır. Maksimum simülasyon sayısı ise 50000 olarak seçilmiştir. Değerlendirme sonuçlarının elde edilmesinde, problemin 10 defa çözümünden elde edilen sonuçların ortalama değerleri kullanılmıştır.

Tablo 6.6: Çözüm parametreleri.

Parametreler	Değerler
x yönünde hidrolik iletim katsayısı, K_{xx} (m/s)	0.0005
y yönünde hidrolik iletim katsayısı, K_{yy} (m/s)	0.0005
Efektif porozite, θ	0.30
Boyuna dispersivite katsayısı, α_L (m)	50
Enine dispersivite katsayısı, α_T (m)	5
Akiferin doymun kalınlığı, b (m)	40
x yönünde grid aralığı, Δx (m)	100
y yönünde grid aralığı, Δy (m)	100
Stres periyotları uzunluğu, Δt (ay)	6
Başlangıç konsantrasyonu (ppm)	0

Tablo 6.7: Kaynak yerlerinin ve her aktif stres periyotunda kaynak akılarının gerçek değerleri.

Kirlenici Kaynağı	Kaynak Yerleri	Her aktif stres periyotunda gerçek kaynak akıları (g/s)				
		SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
S1	(9,4)	30	30	10	40	70
S2	(6,6)	40	55	75	50	30

Bu problemin çözümünde maksimum kaynak sayısı 3 ve maksimum aktif stres periyodu sayısı 7 olarak alınmıştır. Toplam olarak 21 çözüm adayı vardır ve bu çözüm adayları tek tek çözülerek SSE değerleri hesaplanmıştır. Tablo 6.8’de her çözüm adayı için elde edilen SSE değerleri verilmektedir. Tablo 6.8’den görüleceği gibi en iyi SSE değerlerine sahip çözümler 12, 13, 14 ve 19 nolu çözümlerdir. Denklem 5.5’de verilen kriterlere bakıldığında, ölçüm hatası yapılmadığı kabulüyle optimum kaynak sayısı 2 ve optimum aktif stres periyodu sayısı ise 5 olarak (12 nolu çözüm) bulunmuştur. 21 farklı çözüm için elde edilen tüm analiz sonuçları tez ekinde sunulan CD içerisinde ayrıntılı olarak verilmiştir. Tablo 6.9’da kaynak yerlerinin ve her aktif stres periyotunda kaynak akılarının hesaplanan değerleri verilmektedir. Tablo 6.9’dan görüleceği gibi hesaplanan değerler gerçek değerlere oldukça yakındır.

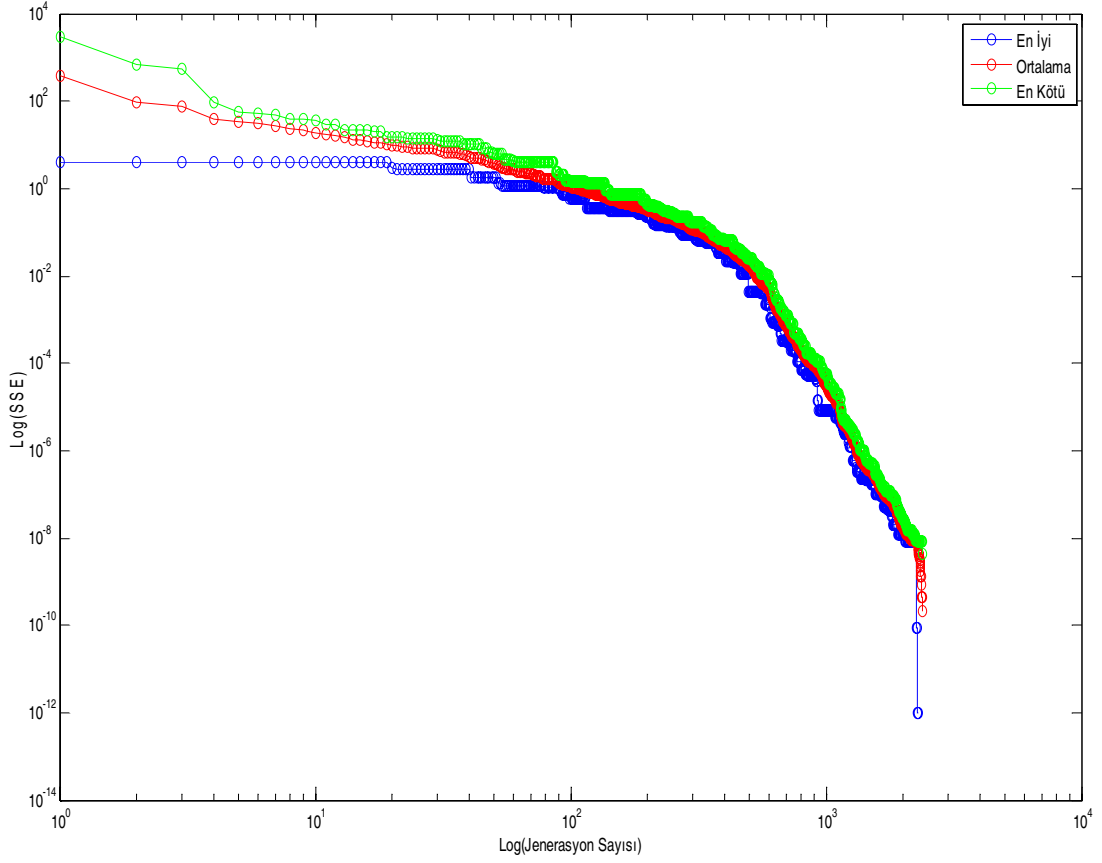
Tablo 6.8: Her çözüm adayı için elde edilen SSE değerleri.

Çözüm	Kaynak Sayısı	Aktif Stres Periyodu Sayısı	SSE
1	1	1	23.91
2	1	2	17.33
3	1	3	13.05
4	1	4	12.76
5	1	5	12.76
6	1	6	12.76
7	1	7	12.76
8	2	1	16.03
9	2	2	8.84
10	2	3	4.00
11	2	4	0.86
12	2	5	1.00E-20
13	2	6	1.34E-07
14	2	7	2.94E-07
15	3	1	15.67
16	3	2	8.13
17	3	3	3.84
18	3	4	0.86
19	3	5	4.18E-08
20	3	6	2.41E-03
21	3	7	2.27E-03

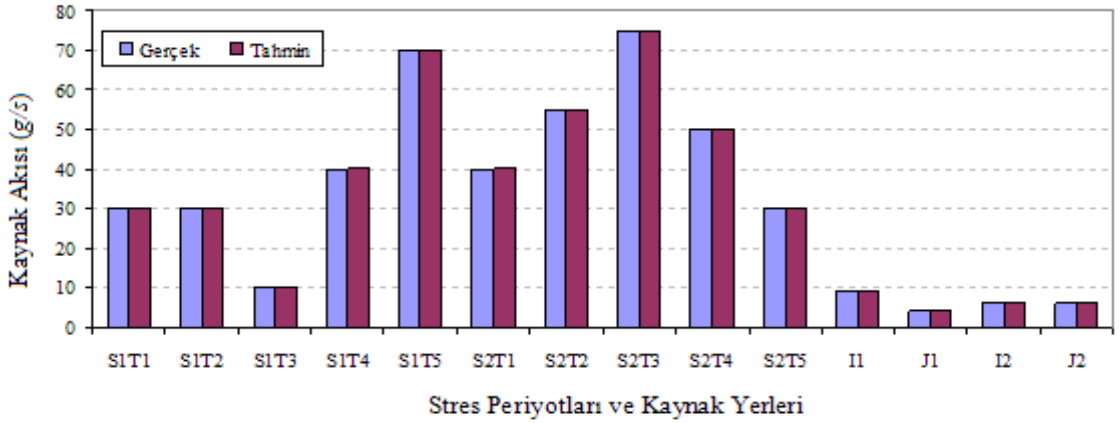
Tablo 6.9: Kaynak yerlerinin ve her aktif stres periyotunda kaynak akılarının hesaplanan değerleri.

Kirlenici Kaynakları	Tahmin Edilen Kaynak Yerleri	Her aktif stres periyotunda tahmin edilen kaynak akıları (g/s)				
		SP1	SP2	SP3	SP4	SP5
S1	(9,4)	30	30.01	9.98	40.01	70
S2	(6,6)	40.01	54.98	75.01	50.02	29.99

En iyi çözüm için elde edilen yakınsama grafiği Şekil 6.5’de, gerçek ve hesaplanan kaynak akıları ve yerlerinin karşılaştırılması ise Şekil 6.6’da verilmektedir. Şekil 6.5’den ve Şekil 6.6’dan görüldüğü gibi 2500 jenerasyon sonunda çözüm stabil hale gelmiş ve optimum çözüm elde edilmiştir.



Şekil 6.5: En iyi çözüm için elde edilen yakınsama grafiği.



Şekil 6.6: En iyi çözüm için gerçek ve hesaplanan kaynak akıları ve yerlerinin karşılaştırılması.

Optimum kaynak sayısı ve aktif stres periyot sayısı belirlendikten sonra, geliştirilen S/O modelinin performansının ölçüm hatası koşullarına göre nasıl değiştiği test edilmiştir. Bu amaçla, farklı gürültü (noise) seviyeleri için sayısal çözümden elde edilen ölçüm konsantrasyon değerlerine normal dağılıma uygun olarak rastgele

üretmiş hata terimleri eklenmiştir. Değerlendirme sonuçlarının elde edilmesinde, problemin 10 defa çözümünden elde edilen sonuçların ortalama değerleri kullanılmıştır. Farklı gürültü seviyeleri için DGA ile elde edilen NH ve SSE değerleri Tablo 6.10’da verilmektedir. Tablo 6.10’dan görüleceği gibi gürültü seviyesi arttıkça NH ve SSE değerleri artmaktadır.

Tablo 6.10: Farklı gürültü seviyeleri için elde edilen NH ve SSE değerleri.

Gürültü Değeri (α)	NH (%)	SSE
0.00	2.56	1.00E-20 ^a
0.05	15.99	0.1606 ^b
0.10	28.83	0.5017 ^b
0.15	32.52	1.6795 ^b
0.20	38.06	1.6953 ^b

^a Bu değeri hesaplarken bir adet çözüm yapılmıştır.

^b Bu değeri hesaplarken on adet çözüm yapılmıştır.

Farklı gürültü seviyeleri için kaynak akılarının ve yerlerinin gerçek ve tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılması Tablo 6.11’de sunulmuştur. Gürültü seviyesindeki artışın kaynak akılarının tahmininde hataların önemli miktarda artmasına neden olduğu; buna karşın kaynak yerlerinin tahmininde ise çok önemli bir hataya neden olmadığı Tablo 6.11’den açıkça gözükmektedir.

Tablo 6.11: Farklı gürültü seviyeleri için kaynak akılarının ve yerlerinin gerçek ve tahmin edilen değerlerinin karşılaştırılması.

Gürültü Seviyesi (α)	Kaynak	Stres Peryodu	Gerçek Kaynak Yerleri	Gerçek Kaynak Akıları	Tahmin Edilen Değerler			
					Ortalama Kaynak Yerleri	Ortalama Kaynak Akıları	YOTH	SS
0.05	S1	1	(9,4)	30	(9,4)	31.26	4.21	5.33
		2		30		26.16	12.81	8.42
		3		10		11.87	18.74	8.49
		4		40		41.65	4.12	6.32
		5		70		66.48	5.02	6.40
	S2	1	(6,6)	40	(6,6)	52.11	30.27	14.64
		2		55		52.89	3.84	8.22
		3		75		73.93	1.42	12.31
		4		50		50.20	0.40	8.30
		5		30		19.51	34.95	10.87
0.10	S1	1	(9,4)	30	(9,4)	32.63	8.76	6.82
		2		30		22.36	25.47	10.10
		3		10		19.87	98.71	15.91
		4		40		35.53	11.18	23.04
		5		70		65.58	6.32	14.06
	S2	1	(6,6)	40	(6,6)	57.43	43.57	23.24
		2		55		51.26	6.80	12.96
		3		75		68.86	8.19	14.07
		4		50		52.58	5.16	13.30
		5		30		18.04	39.88	15.64
0.15	S1	1	(9,4)	30	(9,4)	32.71	9.04	6.60
		2		30		19.16	36.13	8.35
		3		10		20.34	103.43	14.97
		4		40		37.82	5.45	20.87
		5		70		60.72	13.25	12.67
	S2	1	(6,6)	40	(6,5)	65.17	62.93	20.78
		2		55		59.79	8.71	30.01
		3		75		57.98	22.69	26.22
		4		50		51.15	2.30	20.67
		5		30		11.94	60.21	12.02
0.20	S1	1	(9,4)	30	(9,4)	29.58	1.38	4.90
		2		30		27.07	9.77	12.81
		3		10		15.68	56.84	17.39
		4		40		45.99	14.98	23.06
		5		70		58.48	16.45	11.83
	S2	1	(6,6)	40	(6,5)	44.10	10.24	17.39
		2		55		49.59	9.83	29.94
		3		75		56.10	25.21	25.36
		4		50		60.02	20.04	26.61
		5		30		20.11	32.97	21.82

7. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında bilinmeyen kirlenici kaynakların yerlerini, sayılarını, aktif stres periyodu sayısını ve boşalım geçmişlerini etkin bir şekilde belirleyen bir S/O modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde simülasyon işlemleri MODFLOW ve MT3DMS paket programları ile, optimizasyon işlemleri ise diferansiyel gelişim algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Birinci uygulamada, kirlenici kaynakların yerleri, sayıları ve aktif stres periyodu sayıları bilindiği farzedilerek ilgili kaynakların boşalım geçmişleri tahmin edilmiştir. Geliştirilen modelde literatürde verilen sonuçlardan daha iyi çözümler elde edilmiştir. İkinci uygulamada ise karmaşık geometriye sahip, homojen ve izotrop yapıda olan bir akiferde kaynak karakteristikleri hakkında herhangi bir bilgi olmaması durumunda kirlilik kaynaklarının yerleri, sayıları, aktif stres periyodu sayısı ve boşalım geçmişleri sistematik bir şekilde tahmin edilmiştir. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak iki türlü yenilik sözkonusudur. Birincisi, optimizasyon problemlerinin çözümünde etkin ve hızlı çözümler üreten diferansiyel gelişim algoritması bilinmeyen kirlilik kaynağı belirlenmesi problemlerine ilk defa uygulanmıştır. İkincisi, bilinmeyen kirlilik kaynakların aktif oldukları stres periyotlarının sayısının bulunması ilk defa bu tez kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Bu tez kapsamında noktasal kaynaklardan bırakılan kirlenici maddenin bozunmayan karakterde olduğu, kirlenici maddenin türünün bilindiği, akifer parametrelerinin önceden bilindiği, akifer ortamının homojen olduğu ve akifer parametrelerinin herhangi bir belirsizlik içermediği kabul edilmiştir. Ayrıca, probleme ait tüm sınır ve başlangıç koşullarının önceden bilindiği varsayılmıştır. Bu nedenle akifer ortamında alansal ve çizgisel kirlenici kaynakların bulunması, akifer ortamının heterojen olması, akifer parametrelerinin belirsizlik içermesi, birden fazla kirlenici madde türünün olması, kirlenici madde yada maddelerin biyolojik olarak bozunabildiği durumlar için geliştirilen S/O modelinin başarısı test edilmelidir. Gelecek çalışmalarda, geliştirilen S/O modelinin gerçek bir akifer sistemi üzerinde test edilmesi düşünülmektedir.

Ayrıca, gerçek akiferlerde potansiyel kirlilik kaynağı sayısı bu tez kapsamında incelenen hipotetik örneklere oranla oldukça fazladır. Bu nedenle, pratik saha uygulamalarda, kaynak sayısının artışına paralel olarak değişken sayısının önemli miktarda artacağı açıktır. Bu durumda, gerekli bilgi-işlem süresi ve bellek gereksinimi kişisel bilgisayarlar ile karşılanamaz duruma gelecektir. Ayrıca parametrelerdeki belirsizliklerin de dikkate alınması durumunda problemin çözümü daha da güçleştirecektir. Bu nedenle bu tür problemlerin çözümünde süper bilgisayarların kullanılması zorunludur.

8. KAYNAKLAR

- [1] Aksoy, E., Diferansiyel Evrim Algoritması ile Anten Dizilerinde Örüntü Şekillendirme, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
- [2] Ali, M. M., Törn, A., Population Set-Based Global Optimization Algorithms: Some Modifications and Numerical Studies, *Computer & Operations Research*, 31, 1703-1725, 2004.
- [3] Aral, M.M., Guan, J., Genetic Algorithm in Search of Groundwater Pollution Sources, *NATO ASI Series*, 2 (9), 347-369, 1996.
- [4] Aral, M.M., Guan, J., Maslia, M.L., Identification of Contaminant Source Location and Release History in Aquifers, *Journal of Hydrologic Engineering*, 6 (3), 225-234, 2001.
- [5] Atmadja, J., Bagtzoglou, A.C., State of the Art Report on Mathematical Methods for Groundwater Pollution Source Identification, *Environmental Forensics*, 2, 205-214, 2001.
- [6] Ayvaz, M.T., A Linked Simulation–Optimization Model For Solving the Unknown Groundwater Pollution Source Identification Problems, *Journal of Contaminant Hydrology*, 117, 46-59, 2010.
- [7] Ayvaz, M.T., Application of Harmony Search Algorithm to the Solution of Groundwater Management Models, *Advances in Water Resources*, 32 (6), 916-924, 2009.
- [8] Ayvaz, M.T., Heterojen Bir Akiferde Pompaj Kuyu Karakteristiklerinin Genetik Algoritma ile Belirlenmesi Ayvaz, *Doktora Tezi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2008.
- [9] Babu, B.V., Chakole, P.G., Mubeen, J.H.S., Differential Evolution Strategy for Optimal Design of Gas Transmission Network, *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 1 (4), 315-328, 2005.
- [10] Bagtzoglou, A.C., Atmadja, J., Mathematical Methods for Hydrogeologic Inversion: The case of Pollution Source Identification, *Handb Environ Chem*, 5 (3), 65-96, 2005.

- [11] **Bazaraa, M.S., Sherali, H.D., Shetty, C.M.**, *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*, 3rd Edition, John Wiley and Sons, 2006.
- [12] **Becerra, R.L., Coello, C.A.C.**, Cultured differential evolution for constrained optimization, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195, 33-36, 4303-4322, 2006.
- [13] **Burnett, R.D., Frind, E.O.**, An alternating direction Galerkin technique for simulation of ground water contaminant transport in three dimensions, 2. dimensionality effects, *Water Resources Research*, 23, 695-705, 1987.
- [14] **Chootinan, P., Chen, A.**, Constraint Handling in Genetic Algorithms Using a Gradient-Based Repair Method, *Computers and Operations Research*, 33 (8), 2263-2281, 2006.
- [15] **Coelho, L.S., Mariani, V.C.**, Improved Differential Evolution Algorithms for Handling Economic Dispatch Optimization with Generator Constraints, *Energy Conversion and Management*, 48, 1631-1639, 2007.
- [16] **Coelho, L.S.**, Reliability-Redundancy Optimization by Means of a Chaotic Differential Evolution Approach , *Chaos, Solitons and Fractals*, 41, 594-602, 2009.
- [17] **Coello, C.A.C., Becerra, R.L.**, Efficient Evolutionary Optimization Through the Use of a Cultural Algorithm, *Engineering Optimization*, 36 (2), 219-236, 2004.
- [18] **Das, A., Datta, B.**, Application of Optimization Techniques in Groundwater Quantity and Quality Management, *Sadhana*, 26 (4), 293-316, 2001.
- [19] **Doğan, A.**, Diferansiyel Gelişim Algoritması ile Medikal Görüntü Birleştirme, *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2008.
- [20] **Fogel, L.J., Owens, A.J., Walsh, M.J.**, *Artificial Intelligence Through Simulated Evolution*, John Wiley, Chichester, UK, 1996.
- [21] **Goldberg, D. E.**, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading Mass., 1989.
- [22] **Gorelick, S. M.**, A Review of Distributed Parameter Groundwater Management Modeling Methods, *Water Resources Research*, 19(2), 305-319, 1983.
- [23] **Gorelick, S.M., Evans, B., Remson, I.**, Identifying Sources of Groundwater Pollution: An Optimization Approach, *Water Resources Research*, 19(3), 779-790, 1983.
- [24] **Guan, J.**, Applications of Genetic Algorithms in Groundwater Quality Management, *PhD Thesis*, Georgia Institute of Technology, 1998.

- [25] Guan, J., Aral, M.M., Optimal Remediation with Well Locations and Pumping Rates Selected as Continuous Decision Variables, *Journal of Hydrology*, 221 (1-2), 20-42, 1999.
- [26] Haley, J. L., Flanson, B., Enfield, C., Glass, J., Evaluating the Effectiveness of Groundwater Extraction Systems, *Ground Water Monitoring Record Winter*, 119-124, 1991.
- [27] He, Q., Wang, L., A Hybrid Particle Swarm Optimization with a Feasibility Based Rule for Constrained Optimization, *Applied Mathematics and Computation*, 186, 1407-1422, 2007.
- [28] Hedar, A.D., Fukushima, M., Derivative-Free Filter Simulated Annealing Method for Constrained Continuous Global Optimization, *Journal of Global Optimization*, 35(4), 521-549, 2006.
- [29] Holland, J. H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [30] Hwang, J.C., Ayubcha A., Chieh, J.S., Richardson, S., Locating the Groundwater Pollution Sources Using Computer Methods, *Proceedings of Mid-Atlantic Industrial Waste Conference 116th*, Publ by Technomic Publ Co., Lancaster, PA, USA, 534-547, 1984.
- [31] Karaboga, D., Basturk, B., Image Segmentation Using Differential Evolution Algorithm, *Conference of 13th IEEE SIU 2005*, Kayseri, 33-36, 2005.
- [32] Karaboga, D., Okdem, S., A Simple and Global Optimization Algorithm for Engineering Problems: Differential Evolution Algorithm, *Turkish Journal of Electrical Engineering*, 12 (1), 53-60, 2004.
- [33] Karaboğa, D., *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları*, Nobel Yayınevi, İstanbul, 2004.
- [34] Khademi, M.H., Setoodeh, P., Rahimpour, M.R., Jahanmiri, A., Optimization of Methanol Synthesis and Cyclohexane Dehydrogenation in a Thermally Coupled Reactor Using Differential Evolution (DE) Method, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 6930-6934, 2009.
- [35] Knox, R. C, Sabatini, D.A., Transport and Remediation of Surface Contaminants: Introduction, *American Chemical Society*, 1-13, 1992.
- [36] Koziel, S., Michalewicz, Z., Evolutionary Algorithms, Homomorphous Mappings, and Constrained Parameter Optimization, *Evolutionary Computation*, 7, 19-44, 1999.

- [37] Mackay, D. M., Cherry, J. A., Groundwater Contamination: Pump-and-Treat Remediation, *Environmental Science and Technology*, 23(6), 630-636, 1989.
- [38] Mahar, P.S., Datta, B., Identification of Pollution Sources in Transient Groundwater System, *Water Resources Management*, 14 (6), 209-227, 2000.
- [39] Mahar, P.S., Datta, B., Optimal Identification of Groundwater Pollution Sources and Parameter Estimation, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127 (1), 20-29, 2001.
- [40] Mahar, P.S., Datta, B., Optimal Monitoring Network and Ground-Water-Pollution Source Identification, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123 (4), 199-207, 1997.
- [41] Mahar, P.S., Optimal Identification of Groundwater Pollution Sources Using Embedding Technique, *PhD Thesis*, IIT Kanpur, U.P., India, 1995.
- [42] Mahinthakumar, G., Sayeed, M., Hybrid Genetic Algorithm-Local Search Methods for Solving Groundwater Source Identification Inverse Problems, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131 (1), 45-57, 2005.
- [43] MATLAB 7.8.0 (R2009a), Mathworks, Inc.
- [44] McDonald, M.G., Harbough, A.W., A Modular Three-Dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model, *Open File Report 83-875*, U.S. Geological Survey, National Center, Reston, Virginia, 1984.
- [45] McDonald, M.G., Harbough, A.W., A Modular Three-Dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model, *Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geological Survey*, Book 6 (Chapter A1), 1988.
- [46] McKinney, D.C., Lin, M.-D., Genetic Algorithm Solution of Groundwater Management Models, *Water Resources Research*, 30 (6), 1897-1906, 1994.
- [47] Michalak, A.M., Kitanidis, P.K., Estimation of Historical Groundwater Contaminant Distribution Using the Adjoint State Method Applied to Geostatistical Inverse Modeling, *Water Resources Research*, 40, 1-14, 2004.
- [48] Michalewicz, Z., Genetic Algorithms+Data Structure=Evolution Programs, 2nd Edition, Springer-Verlag, New York, 1994.
- [49] Mirghani, B., Tryby, M., Ranjithan, S., Zechman, E.M., Mahinthakumar, G., A Parallel Evolutionary Strategy Based Simulation–Optimization Approach for Solving Groundwater Source Identification Problems, *Advances in Water Resources*, 32 (9), 1373-1385, 2009.

- [50] **Özçelik, Y.**, Farksal Evrim Algoritması Kullanarak Sistem Kimliklendirme, *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2007.
- [51] **Pye, V. I., Patrick, R., Quarles, J.**, Groundwater Contamination in the United States, *Academy of Natural Sciences*, 1983.
- [52] **Rao, S.V.N.**, A Computationally Efficient Technique for Source Identification Problems in Three-Dimensional Aquifer Systems Using Neural Networks and Simulated Annealing, *Environmental Forensics*, 7, 233-240, 2006.
- [53] **Reddy M.J., Kumar D.N.**, Multiobjective Differential Evolution with Application to Reservoir System Optimization, *Journal of Computing in Civil Engineering ASCE*, 21 (2), 136-146, 2007.
- [54] **Runarsson, T. P., Yao, X.**, Stochastic Ranking for Constrained Evolutionary Optimization, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 4 (3), 284-292, 2000.
- [55] **Runarsson, T.P., Yao, X.**, Search Biases in Constrained Evolutionary Optimization, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 35 (2), 233-243, 2005.
- [56] **Singh, R.M., Datta, B.**, Identification of Groundwater Pollution Sources Using GA-Based Linked Simulation Optimization Model, *Journal of Hydrologic Engineering*, 11 (2), 101-109, 2006.
- [57] **Skaggs, T.H., Kabala, Z.J.**, Recovering the Release History of a Groundwater Contaminant, *Water Resources Research*, 30 (1), 71-79, 1994.
- [58] **Storn, R., Price, K.**, Differential Evolution-A Simple and Efficient Heuristic Strategy for Global Optimization over Continuous Spaces, *Journal of Global Optimization*, 11, 341-359, 1997.
- [59] **Sun, A.Y., Painter, S.L., Wittmeyer, G.W.**, A Robust Approach for Iterative Contaminant Source Location and Release History Recovery, *Journal of Contaminant Hydrology*, 88, 181-196, 2006.
- [60] **Sun, N.Z.**, *Inverse Problems in Groundwater Modeling*, Kluwer Academic, Dordrecht, 1994.
- [61] **Suribabu, C.R.**, Differential Evolution Algorithm for Optimal Design of Water Distribution Networks, *Journal of Hydroinformatics*, 12 (1), 66-82, 2010.
- [62] **Varadarajan, M., Swarup, K.S.**, Solving Multi-Objective Optimal Power Flow Using Differential Evolution, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2 (5), 720-730, 2008.

- [63] **Vasan, A., Simonovic, S.P.**, Optimization of Water Distribution Network Design Using Differential Evolution, *Journal of Water Resources Planning and Management ASCE*, 136 (2), 279-287, 2010.
- [64] **Wagner, B.J.**, Simultaneous Parameter Estimation and Contaminant Source Characterization for Coupled Groundwater Flow and Contaminant Transport Modeling, *Journal of Hydrology*, 135, 275-303, 1992.
- [65] **Wang, S., Chiou, J., Liu C.**, Parameters Tuning of Power System Stabilizers Using Improved Ant Direction Hybrid Differential Evolution, *Electrical Power and Energy Systems*, 31, 34-42, 2009.
- [66] **Willis, R.L., Yeh, W.W-G.**, *Groundwater Systems Planning and Management*, Prentice-Hall, 1987.
- [67] **Woodbury, A.D., Ulrych, T.J.**, Minimum Relative Entropy Inversion: Theory and Application to Recovering the Release History of a Groundwater Contaminant, *Water Resources Research*, 32 (9), 2671-2681, 1996.
- [68] **Zahara, E., Hu, C.H.**, Solving Constrained Optimization Problems with Hybrid Particle Swarm Optimization, *Engineering Optimization*, 40 (11), 1031-1049, 2008.
- [69] **Zahara, E., Kao, Y.T.**, Hybrid Nelder-Mead Simplex Search and Particle Swarm Optimization for Constrained Engineering Design Problems, *Expert Systems with Applications*, 36, 3880-3886, 2009.
- [70] **Zheng, C., Bennett, D.B.**, *Applied Contaminant Transport Modelling*, Wiley-Interscience, 2002.
- [71] **Zheng, C., Wang, P.P.**, MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Ground Water Systems: Documentation and User's Guide, *Contract Report SERDP-99-1*, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, 1999.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Gürhan Gürarlan

Doğum Yeri ve Tarihi: İskenderun 1974

Adres: PAÜ Müh. Fak., İnşaat Müh. Böl., Kınıklı, Denizli

Lisans: PAÜ Müh. Fak., İnşaat Müh. Böl., 1998

Yüksek Lisans-1: PAÜ Fen Bil. Ens., İnşaat Müh. A.B.D., 2005

Yüksek Lisans-2: PAÜ Fen Bil. Ens., Çevre Müh. A.B.D (Devam ediyor)

Yayın Listesi:

A. Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanmış Makaleler

- **A1.** Karahan, H., Ayvaz, M.T., **Gürarlan, G.**, Determination of Rainfall-Intensity-Duration-Frequency Relationship by Genetic Algorithm: Case Study of GAP, Teknik Dergi, 19(2), 4393-4407, 2008.
- **A2.** Sari, M., **Gürarlan, G.**, A Sixth-Order Compact Finite Difference Scheme to the Numerical Solutions of Burgers' Equation, Applied Mathematics and Computation, 208, 475-483 , 2009.
- **A3.** Sari, M., **Gürarlan, G.**, Numerical Solutions of the Generalized Burgers-Huxley Equation by a Differential Quadrature Method, Mathematical Problems in Engineering, vol. 2009, 1-11, Article ID 370765, 2009.
- **A4.** Ayvaz, M.T., Kayhan, A. H., Ceylan, H., **Gurarlan, G.**, Hybridizing Harmony Search Algorithm with a Spreadsheet Solver for Solving Continuous Engineering Optimization Problems, Engineering Optimization, 41(12), 1119-1144,

2009.

- **A5. Gürarşlan, G.,** Sari, M., Numerical Solutions of Linear and Nonlinear Diffusion Equations by a Differential Quadrature Method (DQM), International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering (Communications in Numerical Methods in Engineering), 27, 69-77, 2011.
- **A6.** Sari, M., **Gürarşlan, G.,** Dağ, I., A Compact Finite Difference Method for the Solution of the Generalized Burgers-Fisher Equation, Numerical Methods for Partial Differential Equations, 26(1), 125-134 , 2010.
- **A7.** Sari, M., **Gürarşlan, G.,** A Sixth-Order Compact Finite Difference Method for the One-Dimensional Sine-Gordon Equation, International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering (Communications in Numerical Methods in Engineering), 27, 1126-1138, 2011.
- **A8.** Sari, M., **Gürarşlan, G.,** Zeytinoğlu, A., High-Order Finite Difference Schemes for Solving Advection-Diffusion Equation, Mathematical and Computational Applications, 15(3), 449-460, 2010.
- **A9.** Sari, M., **Gürarşlan, G.,** Zeytinoğlu, A., High-Order Finite Difference Schemes for the Solution of the Generalized Burgers-Fisher Equation, International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering (Communications in Numerical Methods in Engineering), 27, 1296-1308, 2011.
- **A10.** Sari, M., **Gürarşlan, G.,** Zeytinoğlu, A., High-Order Finite Difference Schemes for Numerical Solution of the Burgers-Huxley Equation, Numerical Methods for Partial Differential Equations, 27, 1313-1326, 2011.
- **A11.** Kayhan, A. H., Ceylan, H., Ayvaz, M.T., **Gurarşlan, G.,** PSOLVER: A New Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm For Solving Continuous Optimization Problems, Expert Systems with Applications, 37(10), 6798-6808, 2010.
- **A12. Gürarşlan, G.,** Numerical Modelling of Linear and Nonlinear Diffusion Equations by Compact Finite Difference Method, Applied Mathematics and Computation, 216 (8), 2472-2478, 2010.
- **A13.** Sari, M., Gunay, A., **Gürarşlan, G.,** Approximate Solutions of Linear and Nonlinear Diffusion Equations by Using Daftardar-Gejji-Jafari's Method, International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation, 2 (4), 376-386, 2011.

B. Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan Bildiriler

- **B1.** Karahan, H., Ayvaz, M.T., **Gürarşlan, G.,** Aylık Akış Serilerinin Doğrusal Olmayan Optimizasyon Tekniği ile Tahmini, Yedinci Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, Bildiriler CD-ROM, ISBN 975-561-284-X, 11 - 13 Ekim, 2006, İstanbul.
- **B2.** Karahan, H., **Gürarşlan, G.,** Ayvaz, M.T., Yeraltısuyu Modellemesinde İteratif ve Doğrudan Çözüm Algoritmalarının Karşılaştırılması, Yedinci Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, Bildiriler CD-ROM, ISBN 975-561-284-X, 11 - 13 Ekim, 2006, İstanbul.
- **B3. Gürarşlan, G.,** Karahan, H., Düzensiz Sonlu Fark Hesap şeması Kullanılarak

Zamana Bağlı İki Boyutlu Yeraltısuyu Akımının Modellenmesi, Yedinci Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, Bildiriler CD-ROM, ISBN 975-561-284-X, 11 -13 Ekim, 2006, İstanbul.

▪ **B4. Gürarşlan, G.,** Karahan, H., A Parameter Estimation Technique for the Nonlinear Muskingum Flood Routing Model, VI EWRA International Symposium-Water Engineering and Management in a Changing Environment, 2011, Catania, Italy.

C. Ulusal Bilimsel Toplantılarda Sunulan Bildiriler

▪ **C1.** Ayvaz, M.T., Karahan, H., **Gürarşlan, G.,** Su Dağıtım Şebekelerinin Armoni Araştırması Optimizasyon Tekniği ile Optimum Tasarımı, 5. Kentsel Altyapı Ulusal Sempozyumu, 1-2 Kasım 2007, Antakya-Hatay.

▪ **C2.** Ayvaz, M.T., Karahan, H., **Gürarşlan, G.,** Yeraltısuyu Kirletici Kaynak Debisinin Yapay Sinir Ağları ile Belirlenmesi, 3. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, 10-14 Eylül 2007 Gümöldür-İZMİR.

▪ **C3.** Karahan, H., Ayvaz, M.T. and **Gürarşlan, G.,** Yapay Sinir Ağları ile Akifer Parametrelerinin Belirlenmesi, Mühendislik Jeolojisinde Çağdaş Uygulamalar Sempozyumu, 25–27 Mayıs 2006, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

▪ **C4. Gürarşlan, G.,** Karahan, H., Yüksek Mertebeden Bir MacCormack Şeması Kullanılarak Adveksiyon-Difüzyon Denklemine Sayısal Çözümü, 6. Ulusal Hidroloji Kongresi, 22-24 Eylül 2010, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

▪ **C5.** Karahan, H., **Gürarşlan, G.,** Genetik Algoritma Kullanılarak Doğrusal Olmayan Muskingum Taşkın Öteleme Modelinin Parametrelerinin Belirlenmesi, 5. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, 12-16 Eylül 2011, DSİ 14. Bölge Müdürlüğü Orhantepe AR-GE Tesisleri, Orhantepe, İstanbul.