

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**AKİFER PARAMETRELERİNİN VE PARAMETRE
YAPILARININ SİMÜLASYON-OPTİMİZASYON
MODELLERİ İLE BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİRAC BUĞSE TOZAK GÖDEOĞLU

DENİZLİ, OCAK, 2025

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**AKİFER PARAMETRELERİNİN VE PARAMETRE
YAPILARININ SİMÜLASYON-OPTİMİZASYON
MODELLERİ İLE BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MİRAC BUĞSE TOZAK GÖDEOĞLU

DENİZLİ, OCAK, 2025

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.

MİRAC BUĞSE TOZAK GÖDEOĞLU

ÖZET

AKİFER PARAMETRELERİNİN VE PARAMETRE YAPILARININ SİMÜLASYON-OPTİMİZASYON MODELLERİ İLE BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MİRAC BUĞSE TOZAK GÖDEOĞLU

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. MUSTAFA TAMER AYVAZ)

DENİZLİ, OCAK, 2025

Bu çalışmada, akifer hidrojeolojik parametrelerinin ve parametre yapılarının eş zamanlı olarak belirlenebilmesi için bütünlük bir simülasyon-optimizasyon yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşımın simülasyon kısmında, yeraltı suyu akış sürecinin sayısal benzeşimi MODFLOW modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu modelde, hidrojeolojik parametrelere ait parametre yapıları, akım bölgesinin genel formdaki Voronoi Diyagramı (VD) kullanılarak sonlu sayıda zonlara bölünmesi yoluyla elde edilmiştir. Geliştirilen MODFLOW ve VD tabanlı simülasyon modeli ardından Karınca Aslanı Optimizasyonu (ALO) yaklaşımının kullanıldığı bir optimizasyon modeline entegre edilmiştir. ALO, doğada karınca aslanlarının avlanma stratejilerini sayısal olarak modelleyen popülasyon tabanlı bir optimizasyon tekniğidir. Literatürde, ALO'nun farklı problemlerin çözümüne uyarlandığı pek çok uygulama bulunmaktadır. Bununla birlikte, bu çalışmalarda genellikle ALO'nun karmaşık veya büyük ölçekli problemler için yüksek sayıda iterasyon gerektirdiği ve yerel optimum çözümlere takılma olasılığının yüksek olduğu belirtilmektedir. Bu sınırlamaları aşmak amacıyla bu çalışma kapsamında ALO üzerinde iki önemli iyileştirme yapılarak Karıştırılmış Karınca Aslanı Optimizasyonu (SHALO) yaklaşımı geliştirilmiştir. Önerilen SHALO yaklaşımının uygulanabilirliği, literatürde yer alan dört kısıtsız ve dört kısıtlı optimizasyon test fonksiyonu üzerinde test edilmiştir. Optimizasyon modelinin bu testlerden geçirilmesinin ardından, önerilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımının performansı literatürde verilen hipotetik bir akifer modeli üzerinde değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme, ilgili problemin aynı koşullar altında orijinal ALO, öz-uyarlamalı ALO (saALO) ve SHALO yaklaşımları kullanılarak çözülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, önerilen yaklaşımın sonuçları, literatürde aynı problemin Armoni Araştırma (HS) ve hibrit Genetik Algoritma (GA) tabanlı çözüm yaklaşımlarıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar önerilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımının ALO, saALO, HS ve hibrit GA yaklaşımlarına göre farklı değerlendirme ölçütleri açısından daha iyi sonuçlar üretebildiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Yeraltısu, Parametre Yapısı Belirleme, Simülasyon-Optimizasyon, Voronoi Diyagramı, Karınca Aslanı Optimizasyon Tekniği

ABSTRACT

DETERMINATION OF AQUIFER PARAMETERS AND PARAMETER STRUCTURES BY USING SIMULATION-OPTIMIZATION MODELS

MSC THESIS
MİRAC BUĞSE TOZAK GÖDEOĞLU

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
CIVIL ENGINEERING DIVISION

(SUPERVISOR: PROF. DR. MUSTAFA TAMER AYVAZ)

DENİZLİ, JANUARY, 2025

In this study, an integrated simulation-optimization approach is proposed to simultaneously determine aquifer hydrogeological parameters and their parameter structures. In the simulation part of the proposed approach, the numerical simulation of groundwater flow processes is performed using the MODFLOW model. Within this model, the hydrogeological parameter structures are defined by partitioning the flow domain into a finite number of zones using the general form of the Voronoi Diagram (VD). The developed MODFLOW and VD-based simulation model is subsequently integrated into an optimization model utilizing the Ant Lion Optimization (ALO) approach. ALO is a population-based optimization technique that numerically simulates the hunting strategies of antlions in nature. While ALO has been widely applied to solve various problems in the literature, it has been reported that the method often requires a high number of iterations for complex or large-scale problems and tends to converge to local optimum solutions. To overcome these limitations, two significant improvements were made to ALO in this study, resulting in the development of the Shuffled Ant Lion Optimization (SHALO) approach. The applicability of the proposed SHALO approach was tested on four unconstrained and four constrained optimization test functions in the literature. After validating the optimization model, the performance of the proposed simulation-optimization approach was evaluated using a hypothetical aquifer model given in the literature. This evaluation involved solving the problem under identical conditions using the original ALO, self-adaptive ALO (saALO), and SHALO approaches. Additionally, the results of the proposed approach were compared with those obtained using Harmony Search (HS) and hybrid Genetic Algorithm (GA)-based solution approaches. The results demonstrate that the proposed simulation-optimization approach outperforms ALO, saALO, HS, and hybrid GA approaches in terms of various evaluation metrics.

Keywords: Groundwater, Parameter Structure Identification, Simulation-Optimization, Voronoi Diagram, Ant Lion Optimization Approach

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOLLER LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR LİSTESİ.....	xiii
ÖNSÖZ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç ve Kapsam.....	1
1.2 Tezin Organizasyonu	5
2. AKİFER HİDROJEOLÖJİK PARAMETRELERİNİN VE PARAMETRE YAPILARININ BELİRLENMESİ	7
2.1 Voronoi Diyagramı (VD)	7
2.2 Optimum Hidrolik İletkenlik Zon Yapılarının Belirlenmesi.....	11
3. ENTEGRE SİMÜLASYON–OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI.....	14
3.1 Simülasyon Modeli.....	14
3.2 Optimizasyon Modeli	16
3.2.1 Karınca Aslanı Optimizasyon Yaklaşımı (ALO).....	17
3.2.2 Karıştırılmış Karınca Aslanı Optimizasyon (SHuffled Ant Lion Optimization, SHALO) Yaklaşımı	22
3.2.1 Diğer İyileştirilmiş ALO Yaklaşımlarıyla Karşılaştırma.....	28
3.2.2 SHALO Yaklaşımının Performansının Değerlendirilmesi	28
3.3 Problem Formülasyonu	31
4. SAYISAL UYGULAMA.....	34
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	48
6. KAYNAKLAR.....	52
7. EKLER	59
EK A: SHALO Yaklaşımının Kısıtsız Test Fonksiyonları için Performans Analizi	59
A.1. Michalewicz’in Test Fonksiyonu.....	59

A2.	Rastrigin'in Test Fonksiyonu.....	62
A.3.	Trefethen'in Test Fonksiyonu.....	64
A.4.	De Villiers–Glasser 1 Fonksiyonu	67
EK B: SHALO Yaklaşımının Kısıtlı Test Fonksiyonları için Performans Analizi		71
B.1.	Floudas ve Pardalos Test Fonksiyonu	72
B.2.	Rastrigin'in Kısıtlı Test Fonksiyonu.....	76
B.3.	Basınçlı Tank Tasarım Problemi	79
B.4.	Trapez açık kanal tasarım problemi.....	82
8.	ÖZGEÇMİŞ	87

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1: Bir çözüm bölgesinin VD aracılığıyla zonlara ayrılması.....	8
Şekil 2: Farklı p değerleri için hesaplanan uzaklıklar (Shahid ve ark. (2009)'dan uyarlanmıştır).	10
Şekil 3: Farklı p değerleri için elde edilmiş parametre zon yapıları	11
Şekil 4: MODFLOW kapsamında kullanılan 3-boyutlu grid yapısı (Harbaugh 2000).....	15
Şekil 5: Koni şeklindeki çukurda avını bekleyen karınca aslanı.....	17
Şekil 6: Hesaplanan I değerlerinin iterasyon sayısı ile değişimi: ALO (siyah), SHALO (kırmızı: $\lambda = 0$; mavi: $\lambda = 1$).....	24
Şekil 7: Karıştırma işlemi sırasında gözlemlenen iki durum	25
Şekil 8: ALO ve SHALO yaklaşımları kapsamında hesaplanan rastgele yürüyüşlerin eğilim ve istatistiklerinin (a): 10'ncü; (b): 100'ncü ve (c): 800'ncü iterasyonlar için karşılaştırılması.	27
Şekil 9: Her bir test problemi için hesaplanan SR değerlerinin λ 'ya göre değişimi	30
Şekil 10: Önerilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımına ait akış şeması.....	33
Şekil 11: Sayısal uygulama kapsamında dikkate alınan hipotetik akifer modeli.	34
Şekil 12: Akifer modelinin gerçek hidrolik iletkenlik alanı.....	35
Şekil 13: Her bir farklı λ değeri için ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırması: (a): Ω_1 ; (b): Ω_2 ; (c): Ω_3 ; (d): Ω_4 ; (e): Ω_5 (Bu grafikler 10 farklı çekirdek değeri için elde edilen yakınsama grafiklerinin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır).	37
Şekil 14: Farklı λ değerleri dikkate alınarak yapılan 10 çözüm için elde edilen kutu (Box-Whisker) grafikleri (a): Ω_1 ; (b): Ω_2 ; (c): Ω_3 ; (d): Ω_4 ; (e): Ω_5	38
Şekil 15: Farklı optimizasyon yaklaşımları için elde edilen parametre yapılarının karşılaştırılması (siyah noktalar zon merkezlerini temsil etmektedir).	41
Şekil 16: Her bir zon yapısı için belirlenen hidrolik iletkenlik değerleri ile gerçek hidrolik iletkenlik değerleri arasında hesaplanan rölatif hata değerlerinin karşılaştırılması (Siyah çizgiler zon kesişim bölgelerini göstermektedir).....	43
Şekil A. 1: Michalewicz'in test fonksiyonu.....	59
Şekil A. 2: Michalewicz'in test fonksiyonunda farklı λ değerleri için SR (%) değerlerinin değişimi.....	60
Şekil A. 3: Michalewicz test fonksiyonu için elde edilen ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması	61
Şekil A. 4: Rastrigin'in test fonksiyonu.....	62

Şekil A. 5: Rastrigin'in test fonksiyonunda farklı λ değerleri için SR (%) değerlerinin değişimi.....	63
Şekil A. 6: Michalewicz test fonksiyonu için elde edilen ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması.	64
Şekil A. 7: Trefethen'in test fonksiyonu.	65
Şekil A. 8: Trefethen'in test fonksiyonunda farklı λ değerleri için SR (%) değerlerinin değişimi.....	66
Şekil A. 9: Trefethen test fonksiyonu için elde edilen ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması.	67
Şekil A. 10: De Villiers–Glasser 1 test fonksiyonunda farklı λ değerleri için SR (%) değerlerinin değişimi.	68
Şekil A. 11: De Villiers–Glasser 1 test fonksiyonu için elde edilen ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması.	69
Şekil B. 1: Floudas ve Pardalos test fonksiyonunda farklı λ değerleri için SR (%) değerlerinin değişimi.....	73
Şekil B. 2: Floudas ve Pardalos test fonksiyonu için elde edilen ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması.	74
Şekil B. 3: Rastrigin'in kısıtlı test fonksiyonunun $d = 2$ için grafiksel gösterimi (siyah elmaslar küresel optimum çözümün yerlerini temsil etmektedir).	77
Şekil B. 4: Rastrigin'in kısıtlı test fonksiyonunda farklı λ değerleri için SR (%) değerlerinin değişimi.....	77
Şekil B. 5: Rastrigin'in kısıtlı test fonksiyonu için elde edilen ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması.	78
Şekil B. 6: Basınçlı tank tasarım probleminin şematik görünümü.....	79
Şekil B. 7: Basınçlı tank tasarım probleminde farklı λ değerleri için SR (%) değerlerinin değişimi.....	81
Şekil B. 8: Basınçlı tank tasarım problemi için elde edilen ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması.	82
Şekil B. 9: Trapez açık kanal tasarım probleminin şematik görünümü.	83
Şekil B. 10: Trapez açık kanal tasarım probleminde farklı λ değerleri için SR (%) değerlerinin değişimi.....	85
Şekil B. 11: Trapez açık kanal tasarım problemi için elde edilen ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması.	86

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1: Her bir problem için elde edilen <i>SR</i> değerinin diğer yaklaşımlarla karşılaştırılması	31
Tablo 2: Farklı optimizasyon yaklaşımları için elde edilen en iyi <i>RE</i> değerlerinin karşılaştırılması.	40
Tablo 3: Farklı yaklaşımları için belirlenen Minkowski katsayılarının (<i>p</i>) karşılaştırılması.	45
Tablo 4: Farklı yaklaşımlar için hesaplanan <i>PU</i> değerlerinin karşılaştırılması ($\times 104$).	45
Tablo 5: Farklı yaklaşımları için hesaplanan <i>SD</i> değerlerinin karşılaştırılması	47
Tablo A. 1: Farklı yaklaşımlar için Michalewicz test fonksiyonunun sonuçlarının değerlendirilmesi.	60
Tablo A. 2: En iyi çözümler için Michalewicz'in test fonksiyonuna ait nihai karar değişkenleri ve fonksiyon değerleri.	61
Tablo A. 3: Farklı yaklaşımlar için Rastrigin test fonksiyonunun sonuçlarının değerlendirilmesi.	63
Tablo A. 4: En iyi çözümler için Rastrigin'in test fonksiyonuna ait nihai karar değişkenleri ve fonksiyon değerleri.	64
Tablo A. 5: Farklı yaklaşımlar için Trefethen test fonksiyonunun sonuçlarının değerlendirilmesi.	66
Tablo A. 6: En iyi çözümler için Trefethen test fonksiyonuna ait nihai karar değişkenleri ve fonksiyon değerleri.	67
Tablo A. 7: Farklı yaklaşımlar için De Villiers–Glasser 1 test fonksiyonunun sonuçlarının değerlendirilmesi.	69
Tablo A. 8: En iyi çözümler için De Villiers–Glasser 1 test fonksiyonuna ait nihai karar değişkenleri ve fonksiyon değerleri.	70
Tablo B. 1: Farklı yaklaşımlar için Floudas ve Pardalos test fonksiyonunun sonuçlarının değerlendirilmesi.	74
Tablo B. 2: En iyi çözümler için Floudas ve Pardalos test fonksiyonuna ait nihai karar değişkenleri, amaç ve kısıt fonksiyonu değerleri.	75
Tablo B. 3: Farklı yaklaşımlar için Rastrigin'in kısıtlı test fonksiyonunun sonuçlarının değerlendirilmesi.	78
Tablo B. 4: En iyi çözümler için Floudas ve Pardalos test fonksiyonuna ait nihai karar değişkenleri, amaç ve kısıt fonksiyonu değerleri.	79
Tablo B. 5: Farklı yaklaşımlar için basınçlı tank tasarım probleminin sonuçlarının değerlendirilmesi.	81
Tablo B. 6: En iyi çözümler için basınçlı tank tasarım problemine ait nihai karar değişkenleri, amaç ve kısıt fonksiyonu değerleri.	82

Tablo B. 7: Farklı yaklaşımlar için trapez açık kanal tasarım probleminin sonuçlarının değerlendirilmesi.	85
Tablo B. 8: En iyi çözümler için trapez açık kanal tasarım problemine ait nihai karar değişkenleri, amaç ve kısıt fonksiyonu değerleri.....	86

SEMBOLLER LİSTESİ

Ω	: Sonlu sayıda alt zonlara bölünecek çözüm bölgesi
n_z	: Voronoi zonlarının sayısı
(\hat{x}_j, \hat{y}_j)	: j nolu bölgenin merkez noktasının koordinatı
$\mathcal{V}(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$: (\hat{x}_k, \hat{y}_k) merkez noktası koordinatına sahip k nolu Voronoi zonu
(x_i, y_i)	: Ω 'daki i nolu veri noktasının koordinatı
$d_2^{i,k}$: i nolu veri noktası ile k nolu Voronoi zonunun merkez noktası arasındaki Öklid uzaklığı
$d_p^{i,j}$: i nolu veri noktası ile j nolu bölgenin merkez noktası arasındaki Minkowski uzaklığı
p	: Uzaklık mertebesini ayarlamak için kullanılan Minkowski katsayısı
n_z^*	: Optimum zon sayısı
RE	: Artık hata
PU	: Parametre belirsizliği
SD	: Yapısal değişim
n_m	: Akifer sistemindeki gözlem kuyularının sayısı
n_t	: Gözlem zaman adımlarının sayısı
$h_m(\Omega_k, t)$: m nolu gözlem kuyusunda ve t nolu zaman adımında Ω_k parametre yapısı için hesaplanan hidrolik yük değeri
$\tilde{h}_m(t)$: m nolu gözlem kuyusunda ve t nolu zaman adımında ölçülen hidrolik yük değeri
T	: Transpoz operatörü
$G_k \in \mathbb{R}^{n_d \times k}$: i nolu veri noktası ile j nolu zonun merkez noktası arasındaki ağırlıklar temsil eden parametre yapısı ağırlık matrisi
J	: Hesaplanan hidrolik yük değerlerinin her bir zon için belirlenen iletim kapasitesi değerlerine göre kısmi türevlerini içeren Jacobian matrisi
Cov_k	: k nolu parametre yapısı için hesaplanan Kovaryans matrisi
η	: Gözlem hatası
x, y ve z	: Kartezyen koordinatlar
K_{xx}	: x yönü boyunca hidrolik iletkenlik değeri
K_{yy}	: y yönü boyunca hidrolik iletkenlik değeri
K_{zz}	: z yönü boyunca hidrolik iletkenlik değeri
W	: Kaynak/yitik terimi
S_s	: Akifer ortamının özgül depolama katsayısı
t	: Zaman
i	: Satır numarası

j	: Sütun numarası
k	: Katman numarası
\mathcal{T}	: Maksimum iterasyon sayısı
x^t	: Karıncaların popülasyon matrisi
\tilde{x}^t	: Karınca aslanlarının popülasyon matrisi
n	: Popülasyondaki karıncaların veya karınca aslanlarının (aday çözümler) sayısı
d	: Optimizasyon problemde dikkate alınan karar değişkenlerinin sayısı
x_{ij}^t	: x^t matrisinin i nolu aday çözüm j nolu karar değişkeni ve t nolu iterasyondaki eleman değeri
\tilde{x}_{ij}^t	: \tilde{x}^t matrisinin i nolu aday çözüm j nolu karar değişkeni ve t nolu iterasyondaki eleman değeri
$x_{\min,j}^{t=0}$: Optimizasyonun başlangıç aşamasında j nolu karar değişkeninin alt sınır değeri
$x_{\max,j}^{t=0}$: Optimizasyonun başlangıç aşamasında j nolu karar değişkeninin üst sınır değeri
$\text{Rand}(0,1)$: 0 ile 1 aralığında üniform dağılıma göre üretilmiş rastgele sayı
\mathcal{F}^t	: Karıncaların t nolu iterasyondaki uygunluk vektörü
$\tilde{\mathcal{F}}^t$: Karınca aslanlarının t nolu iterasyondaki uygunluk vektörü
$\tilde{x}_{ij,RW}^t$: Rulet tekeri yaklaşımıyla t nolu iterasyonda seçilmiş i nolu karınca aslanının pozisyonu
\mathcal{X}_j	: j nolu karar değişkeni için rastgele yürüyüş vektörü
\mathcal{X}_j^t	: \mathcal{X}_j vektörünün t nolu elemanı
$r(t)$: Stokastik tabanlı bir fonksiyon
$\mathcal{C}(\circ)$: Verilen girdinin kümülatif olarak toplamını hesaplayan bir fonksiyon
\tilde{I}	: Önerilen üstel ağırlıklı fonksiyon
I_k^{\min}	: k nolu bölge için dikkate alınan minimum I değeri
I_k^{\max}	: k nolu bölge için dikkate alınan maksimum I değeri
t_k^{\min}	: k nolu bölge için minimum t değeri
t_k^{\max}	: k nolu bölge için maksimum t değeri
\mathcal{L}_k	: k nolu bölge için hesaplanan logaritmik bir fonksiyon
$ \circ $: Mutlak değer
λ	: \tilde{I} değerine eklenen rastgele pertürbasyonların büyüklüğünü kontrol eden parametre değeri
$\sum SS$: Başarılı çözümlerin sayısı
SR	: Başarı oranı
TS	: Yapılan toplam çözüm sayısı
$f(x)$: Optimizasyon modeli tarafından belirlenen amaç fonksiyonu değeri
$f(x^*)$: Global optimum fonksiyon değeri

ε	: Eşik veya tolerans değeri
\hat{K}	: Belirlenecek hidrolik iletkenlik değerleri
$h(x, y, z, t)$: Akifer sisteminin herhangi bir konumu (x, y, z) ve zaman (t) için hesaplanan hidrolik yük değeri
$\Omega_{n_z}^*$: Gerçek hidrolik iletkenlik parametre yapısını en iyi temsil eden optimum zon yapısı
d	: Değişken sayısı
m	: Eşitsizlik kısıtlarının sayısı
$g_i(x)$: i nolu eşitsizlik kısıtı
n	: Eşitlik kısıtlarının sayısı
$h_j(x)$: j nolu eşitlik kısıtı
$f'(x)$: Kısıtsız hale dönüştürülmüş amaç fonksiyonu
P_i^g	: Eşitsizlik kısıtları için tanımlanmış ceza fonksiyonu
P_j^h	: Eşitlik kısıtları için tanımlanmış ceza fonksiyonu
α_i	: Eşitsizlik kısıtlarının amaç fonksiyonuna entegre edilmesi aşamasında kullanılan ceza parametresi
β_j	: Eşitlik kısıtlarının amaç fonksiyonuna entegre edilmesi aşamasında kullanılan ceza parametresi
$H(y)$: Heaviside fonksiyonu
\mathcal{K}_k	: Her arama yönü için global optimum sayısını kontrol eden bir parametre
T_s	: Cidar kalınlığı
T_h	: Başlık kalınlığı
R	: İç çap
L	: Silindirik bölüm uzunluğu
T_t	: Kesit üst genişliği
T_w	: Akış kesitinin üst genişliği
f	: Hava payı
n_1	: Sol yüz için Manning yüzey pürüzlülük katsayısı
n_2	: Sağ yüz için Manning yüzey pürüzlülük katsayısı
n_3	: Kanal yatağı için Manning yüzey pürüzlülük katsayısı
c_1	: Kanalın birim uzunluğu ve birim enkesit alanı için kazı maliyeti
c_2	: Birim uzunluk için kanalın sol şev (hava payı dahil) perdahlama maliyeti
c_3	: Birim uzunluk için kanalın sağ şev (hava payı dahil) perdahlama maliyeti
c_4	: Birim uzunluk için kanal tabanı için perdahlama maliyeti
A_t	: Kanalın toplam enkesit alanı
P_1	: Kanalın sol şev (hava payı dahil) uzunluğu
P_2	: Kanalın sağ şev (hava payı dahil) uzunluğu
P_3	: Kanal tabanının (hava payı dahil) uzunluğu

Q	:	Kanaldaki akımın debisi
S_0	:	Kanal taban eğimi
A_w	:	Islak enkesit alanı
P_w	:	Islak çevre
n_e	:	Eşdeğer Manning yüzey pürüzlülük katsayısı

KISALTMALAR LİSTESİ

GA	:	Genetik Algoritma
DE	:	Diferansiyel Evrim Algoritması
PSO	:	Parçacık Sürü Optimizasyon Tekniği
ACO	:	Karınca Kolonisi Optimizasyon Tekniği
CS	:	Guguk Kuşu Arama Optimizasyon Tekniği
ALO	:	Karınca Aslanı Optimizasyon Tekniği
VD	:	Voronoi Diyagramı
SHALO	:	Karıştırılmış Karınca Aslanı Optimizasyon Tekniği
saALO	:	Öz-Uyarlamalı ALO
HS	:	Armoni Araştırma Optimizasyon Tekniği
USGS	:	Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar Kurumu
RW	:	Rulet Tekerı

ÖNSÖZ

Bu tezde akifer parametrelerinin ve parametre yapılarının belirlenmesi amacıyla bir simülasyon-optimizasyon yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu çalışmanın tamamlanmasında bana her konuda destek olan danışmanım Prof. Dr. Mustafa Tamer AYVAZ'a çok teşekkür ederim.

Aynı zamanda tez jürimde yer alan sayın hocalarım Prof. Dr. Gürhan GÜRARSLAN ve Prof. Dr. Alper Elçi'ye teşekkür ederim. Yüksek lisans sürecim boyunca bana yardımcı olan çalışma arkadaşım Pınar Gökçe DURGUT'a teşekkür ederim.

Her zaman hayallerimin peşinden gitmem için beni destekleyen ve cesaretlendiren eşim Egemen GÖDEOĞLU'na, annem Neşe TOZAK'a, babam Hüseyin TOZAK'a teşekkür ediyorum. Özellikle tüm olumsuz koşullara rağmen kanseri yenip tezini tamamlayan kendimi tebrik ediyorum.

1. GİRİŞ

1.1 Amaç ve Kapsam

Yeraltı suyu, evsel ve/veya endüstriyel su ihtiyaçları göz önüne alındığında, dünya genelindeki en önemli tatlı su kaynaklarından biridir. Günümüzde yeraltı suyu sistemlerindeki kullanılabilir su miktarı, bilinçsiz ve plansız kullanımlar nedeniyle önemli ölçüde azalmaktadır. Bu kapsamda, yeraltı suyu sistemlerini gelecekte etkin bir şekilde kullanabilmek için sürdürülebilir yönetim stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu stratejilerin geliştirilmesinde matematiksel tabanlı simülasyon modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modeller, akifer ortamındaki yeraltı suyu akış sürecini temsil eden kısmi diferansiyel denklemlerin verilen başlangıç ve sınır koşulları altında çözülmesine dayanmaktadır. Bu çözümün yapılabilmesi için akifer sistemi üzerinde tanımlı bazı hidrojeolojik parametrelerin (hidrolik iletkenlik, iletim kapasitesi, özgül depolama katsayısı vb.) alansal dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, akiferlerin heterojen yapıya sahip sistemler olması ve hidrojeolojik parametrelerin alansal dağılımlarının genellikle bilinmemesidir. Bu nedenle, sınırlı sayıda hidrolik yük gözlem değeri ile akifer hidrojeolojik parametrelerinin alansal dağılımlarını belirlemek çözülmesi gereken önemli ve zorlu bir mühendislik problemidir (Tozak ve diğ. 2024). Bu tarz parametre kestirimi ters (inverse) modelleme yaklaşımı olarak adlandırılmaktadır (Ayvaz 2007).

Literatürde, ters modelleme yaklaşımları kullanılarak akifer hidrojeolojik parametre yapılarını belirlemek için yapılmış çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, hidrojeolojik parametrelerin alansal dağılımı, genel olarak iki ana yaklaşımla temsil edilmektedir: interpolasyon ve zonlama (Yeh 1986). İnterpolasyon yaklaşımında, genellikle, pompaj testleri ile belirlenen noktasal parametre değerleri akım alanı üzerinde interpolasyon teknikleri ile sürekli alanlara dönüştürülür. Bu çözüm yaklaşımı pratikte birçok problemi çözmek için etkili olsa da noktasal gözlemler gerçek parametre dağılımını tam olarak temsil edemediğinde belirsizlik içeren parametre dağılımları elde edilebilmektedir (Tung ve Chou 2004, Yeh 1986). Buna karşılık zonlama yaklaşımında, yeraltı suyu akım alanı hidrojeolojik parametre

değerlerinin yaklaşık olarak homojen olduğu sonlu sayıda alt bölgeye ayrılmaktadır. Bu yaklaşım da birçok yeraltı suyu modelleme problemi için etkin bir çözüm olabileceği de parametre zonlarının sayısı, şekli ve içerdiği parametre değerlerinin belirlenmesi zor olabilmektedir. Bu nedenle, akifer hidrojeolojik parametrelerinin ve bunlara karşılık gelen parametre yapılarının sistematik bir çözüm yaklaşımı ile belirlenmesi yeraltı suyu modelleme çalışmaları için kritik bir süreçtir.

Literatürde, ters modelleme yaklaşımlarıyla akifer hidrojeolojik parametre yapılarını belirlemek için kullanılan yaklaşımlardan biri simülasyon-optimizasyon yaklaşımlarıdır. Bu yaklaşımlar, bağımsız matematiksel simülasyon modelleri ile optimizasyon modellerinin karşılıklı entegrasyonuna dayanır. Bu entegrasyon sürecinde simülasyon modelinin ana amacı optimizasyon modeli tarafından belirlenen parametre yapısını kullanarak yeraltı suyu akış sürecinin sayısal benzeşimini yapmaktır. Simülasyon modeli girdi olarak akifer hidrojeolojik parametre yapısını alarak gözlem noktalarındaki hidrolik yük değerlerini çıktı olarak veren bir transfer fonksiyonu görevini üstlenmektedir. Optimizasyon modelinin amacı ise, gözlem noktalarında hesaplanan ve ölçülen hidrolik yük değerleri arasındaki hata değerini minimize ederek akifer parametre yapısını belirlemektir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, ters yeraltı suyu parametre yapısı belirleme problemlerinin matematiksel çözüm uzayının genellikle doğrusal olmayan, dışbükey olmayan ve ayrık çözüm uzaylarına sahip olduğudur (Willis ve Yeh 1987). Bu nedenle, akifer hidrojeolojik parametre yapısı belirleme problemlerinin optimum çözümü deterministik optimizasyon yaklaşımları ile elde edilemeyebilir (Sun 1994, Tsai 2002, Yeh 1986). Son yıllarda, bu tür problemlerin çözümü için sezgisel optimizasyon yaklaşımlarının kullanımı artmıştır.

Sezgisel optimizasyon yaklaşımları, doğada karşılaşılan süreçlerin basit matematiksel ifadelerle temsil edilmesine dayanan tekniklerdir. Bu yaklaşımlar genellikle stokastik tabanlı olup birden fazla aday çözümün ilgili süreçlerin taklit edilerek iyileştirilmesine dayanır. Literatürde farklı doğal süreçleri taklit eden pek çok sezgisel optimizasyon yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlara örnek olarak; Darwin'in evrim teorisine dayanan genetik algoritma (GA) (Holland 1975) ve diferansiyel evrim algoritması (DE) (Storn ve Price 1997), kuş ve balık sürülerinin bireysel ve sosyal davranışlarından esinlenen parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) (Kennedy ve Eberhart 1995), karıncaların yem arama süreçlerini taklit eden karınca

kolonisi optimizasyonu (ACO) (Dorigo ve diğ. 2006), guguk kuşu yavrularının büyüme süreçlerini taklit eden guguk kuşu arama (CS) (Yang ve Deb 2009) algoritmaları sayılabilir. Bu sezgisel yaklaşımlar aday çözümleri evrim sürecinden geçirerek global optimuma ulaşmak için herhangi bir özel başlangıç çözümüne ihtiyaç duymadan çalışır (Abualigah 2020, Abualigah ve diğ. 2021, Boussaïd ve diğ. 2013, Mirjalili 2015). Ayrıca, bu yaklaşımlar ile ayrık yapıda ve konveks olmayan matematiksel çözüm uzaylarına sahip problemler kolaylıkla çözülebilmektedir. Bu nedenle, sezgisel optimizasyon yaklaşımları akifer hidrojeolojik parametre yapısı belirleme problemlerini deterministik yaklaşımlara kıyasla daha doğru çözüme potansiyeline sahiptir.

Karınca Aslanı Optimizasyonu (Ant Lion Optimization, ALO), karınca aslanlarının dahi avlanma stratejilerini taklit eden popülasyona dayalı bir sezgisel optimizasyon yaklaşımıdır. Doğada karınca aslanları kumda koni şeklinde bir delik kazar ve bu koninin tabanında saklanırlar. Bir karınca deliğe girdiğinde karınca aslanları kum parçacıkları fırlatarak karıncaları deliğin dibine doğru düşürüp yakalamaya çalışırlar. Bu avlanma stratejisinin matematiksel benzeşimi ilk kez Mirjalili (2015) tarafından ifade edilmiş olup özellik seçimi (Emary ve diğ. 2016, Emary ve Zawbaa 2019, M. Wang ve diğ. 2019, Zawbaa ve diğ. 2016), veri kümeleme (Chen ve diğ. 2020, Majhi ve Biswal 2018, Yogarajan ve Revathi 2018), makine öğrenmesi (Banadkooki ve diğ. 2020, Kose 2018, Singh ve diğ. 2020, Yamany ve diğ. 2016) ve mühendislik tabanlı optimizasyon problemlerinin (Ali ve diğ. 2017, 2016, Chandrasekaran ve diğ. 2021, Dubey ve diğ. 2016, Mahendru ve Mehta 2015, Samui ve diğ. 2022, Saxena ve Kothari 2016) çözümünde aktif olarak kullanılmıştır. Literatürde pek çok farklı problemin çözümünde kullanılmış olsa da, ALO ile bir optimizasyon probleminin çözümü genellikle yüksek iterasyon sayıları gerektirebilmekte ve çözüm aşamasında lokal optimum çözümlere takılma ve/veya erken yakınsama gibi problemlerle karşılaşılabilir. Bu olumsuzlukların aşılması amacıyla ALO'nun iyileştirilmiş pek çok versiyonu geliştirilmiştir (Guo ve diğ. 2020, Kilic ve diğ. 2020, Kılıç ve Yüzgeç 2019, Li ve diğ. 2022, 2019, Singh ve Singh 2021, Tian ve diğ. 2018, Wang ve diğ. 2019, Wu ve diğ. 2017, Yue ve Zhang 2021). Literatürde ALO ve belirtilen iyileştirilmiş versiyonlar kullanılarak pek çok mühendislik optimizasyon problemi çözülmüş olsa da yeraltı suyu sistemlerinde ters modelleme yaklaşımı kullanılarak hidrojeolojik parametre yapılarının belirlenmesiyle

ilgili bilinen bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu tez çalışması standart ALO yaklaşımını geliştirmeyi ve bu geliştirilmiş versiyonun ters parametre yapısı belirleme problemlerinde uygulanabilirliğini araştırmayı amaçlamaktadır.

Yeraltı suyu sistemleri için parametre zon yapısı belirleme problemi, veri hataları, birden fazla çözümün varlığı ve yeterli saha verisinin bulunmaması gibi nedenlerle stabil olmayan sonuçlar doğurabilen kötü koşullu (ill-posed) bir ters problemdir (Tsai 2002, Ayvaz 2007). Bu nedenle, parametre zon yapısı belirleme probleminin çözümü bilinen parametre zon yapıları için akifer parametrelerinin belirlenmesi sorununa kıyasla çok daha zordur. Mevcut literatür yeraltı suyu sistemleri için ters parametre yapısı tanımlama problemlerini çözmeye yönelik bazı çalışmaları içermektedir (Ayvaz 2007, Ayvaz ve diğ. 2007, Ayvaz ve Elci 2012, Eppstein ve Dougherty 1996, Majdalani ve Ackerer 2011, Mayer ve Huang 1999, Sun 1994, Sun ve diğ. 1983, Sun ve Yeh 1985, Tsai ve diğ. 2003^b, 2003^a, Tsai ve Yeh 2004, Tung ve diğ. 2003, Tung ve Chou 2004, Tung ve Tan 2005, Yeh 2015, 1986). Bu çalışmalarda akifer hidrojeolojik parametre yapısı belirleme problemleri Voronoi Diyagramı (VD) tabanlı zonlama yaklaşımlarının simülasyon-optimizasyon modellerine entegre edilmesi suretiyle çözülmüştür. VD tabanlı zonlama yaklaşımında verilen bir akım alanının sonlu sayıda alt bölgeye ayrılması işleminin ilk adımı her bir zonun merkez noktası ile dikkate alınan veri noktası arasındaki Öklid uzaklıklarının hesaplanmasıdır. Bu işlem sonrasında en küçük Öklid uzaklığı hangi zona aitse ilgili veri noktası o zona atanır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, Öklid uzaklığının aslında Minkowski uzaklık ölçütünün özel bir versiyonu olduğudur (Shahid ve diğ. 2009). Literatürde veri setlerinin ve bölgelerin kümelenmesinde kullanılan ve Minkowski uzaklık ölçütünün farklı türevleri olan başka ölçütler de bulunmaktadır (örneğin, Manhattan uzaklığı, Öklid uzaklığı, Chebyshev uzaklığı vb.) (Battula ve Ambati 2018, Elen ve Avuçlu 2021, Nayak ve diğ. 2022, Shahid ve diğ. 2009). Ancak, yeraltı suyu sistemlerinin hidrojeolojik parametre yapılarını belirlemek için Minkowski uzaklık ölçütünün farklı versiyonlarının uygulanabilirliğini araştıran herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışma ters parametre yapısı belirleme problemlerini çözmek için farklı mesafe ölçütlerinin uygulanabilirliğini incelemeyi amaçlamaktadır.

Bu çalışmanın amacı yeraltı suyu sistemleri için ters parametre yapısı belirleme problemlerini çözmek amacıyla bir simülasyon-optimizasyon yaklaşımı önermektir.

Literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak heterojen ve izotropik bir akifer sisteminin hidrolik iletkenlik parametre yapısı Minkowski uzaklığına dayanan VD zonlama yaklaşımının genel formu kullanılarak oluşturulmuştur. Yeraltı suyu akış sürecinin benzeşimi ilgili akifer sisteminin MODFLOW ortamında modellenmesiyle elde edilmiştir. Geliştirilen MODFLOW tabanlı simülasyon modeli ardından Durgut ve diğ. (2024) tarafından yakın zamanda önerilen Karıştırılmış Karınca Aslanı Optimizasyon yaklaşımının (Shuffled Ant Lion Optimization, SHALO) kullanıldığı bir optimizasyon modeline entegre edilmiştir. SHALO yaklaşımının ana amacı, optimizasyon sürecinde Minkowski uzaklığını dikkate alacak şekilde akifer hidrolik iletkenlik zon yapılarını ve her bir zon içindeki homojen hidrolik iletkenlik değerlerini belirlemektir. Bu işlem kapsamında ilgili problem öncelikle bir hidrolik iletkenlik zonu dikkate alınarak çözülmüş ardından zon sayısı birer arttırılmak suretiyle farklı alternatif çözümler değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar arasında gerçek hidrolik iletkenlik alanını en iyi temsil eden zon yapısı üç farklı değerlendirme kriteri dikkate alınarak belirlenmiştir. Ayrıca, SHALO yaklaşımının performansı farklı üniform rastgele sayı dağılımları için değerlendirilmiş ve bu kapsamda detaylı bir istatistiksel analiz yapılmıştır. Önerilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımının uygulanabilirliği literatürde verilen hipotetik bir akifer modeli çözülerek değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımının ALO, saALO, HS ve hibrit GA gibi optimizasyon yaklaşımlarına kıyasla daha iyi sonuçlar ürettiğini göstermiştir.

1.2 Tezin Organizasyonu

Bu tez çalışması toplam 7 bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1 kapsamında tez konusu ile alakalı genel bilgiler verilmiş, çalışmanın amaç ve kapsamından bahsedilmiş ve literatürde yapılmış olan çalışmalar değerlendirilmiştir. Bölüm 2’de akifer hidrojeolojik parametre yapılarının belirlenmesi, Voronoi Diyagramı ve optimum hidrolik iletkenlik zon yapılarının belirlenmesi hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 3 kapsamında geliştirilen simülasyon optimizasyon yaklaşımı hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 4’te önerilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımının uygulanabilirliği literatürde yer alan hipotetik bir basınçlı akifer modeli üzerinde test edilmiştir. Bölüm 5 kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve önerilerde bulunulmuştur. Bölüm 6’da bu tezde kullanılan kaynaklar verilmiştir. Son olarak Ek-

A ve B kapsamında önerilen optimizasyon yaklaşımının uygulanabilirliği 4 kısıtlı ve 4 kısıtsız optimizasyon test fonksiyonu üzerinde değerlendirilmiştir.

2. AKİFER HİDROJEOLÖJİK PARAMETRELERİNİN VE PARAMETRE YAPILARININ BELİRLENMESİ

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, bu çalışmada akifer hidrojeolojik parametre yapısı belirleme probleminin çözümü önerilen simülasyon-optimizasyon modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu modelde akifer akım alanı Voronoi Diyagramı (VD) zonlama yaklaşımının genel formu kullanılarak sonlu sayıda homojen hidrolik iletkenlik zonuna bölünmüştür. Süreç, problemin bir zondan başlayarak ardışık olarak farklı zon sayıları için çözülmesi ve elde edilen sonuçlar arasından optimum zon yapısının artık hata (*RE*), parametre belirsizliği (*PU*) ve yapısal değişim (*SD*) ölçütleri kullanılarak belirlenmesi şeklinde ilerlemiştir. Aşağıdaki bölümlerde, öncelikle VD yaklaşımının genel formu sunulmuş, ardından *RE*, *PU* ve *SD* ölçütlerinin nasıl hesaplanacağı detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

2.1 Voronoi Diyagramı (VD)

VD, Voronoi (1908) tarafından önerilen bir patern sınıflandırma yaklaşımıdır. VD, hidrolojik çalışmalarda, noktasal yağış zaman serilerinin bir havza üzerindeki alansal ortalama yağış değerlerine dönüştürülmesinde (Thiessen poligon yaklaşımı) yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada VD, bir akifer sistemi için sürekli yapıdaki hidrolik iletkenlik alanını sonlu sayıda homojen hidrolik iletkenlik zonuna bölmek amacıyla kullanılmıştır. Bu bağlamda, VD yaklaşımının matematiksel yapısı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

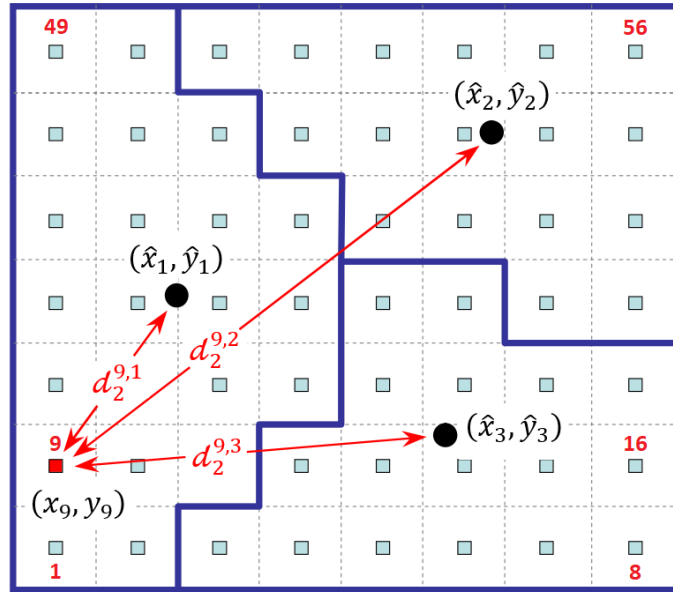
Ω , sonlu sayıda alt zonlara bölünecek çözüm bölgesini; n_z , Voronoi zonlarının sayısını; (\hat{x}_j, \hat{y}_j) , j nolu bölgenin merkez noktasının koordinatını ($j = 1, 2, 3, \dots, k, \dots, n_z$); $\mathcal{V}(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$, (\hat{x}_k, \hat{y}_k) merkez noktası koordinatına sahip k nolu Voronoi zonunu; n_d , alt bölgelere ayrılacak veri noktalarının sayısını; (x_i, y_i) , Ω 'daki i nolu veri noktasının koordinatını ($i = 1, 2, 3, \dots, n_d$) göstermek üzere (x_i, y_i) veri noktası aşağıdaki koşul sağlandığında bir Voronoi zonuna ($\mathcal{V}(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$) atanmaktadır:

$$(x_i, y_i) \in \mathcal{V}(\hat{x}_k, \hat{y}_k) \text{ eğer } d_2^{i,k} < d_2^{i,j} \text{ } (\forall j \neq k) \quad (1)$$

$$d_2^{i,k} = \{(x_i - \hat{x}_k)^2 + (y_i - \hat{y}_k)^2\}^{1/2} \quad (2)$$

$$d_2^{i,j} = \{(x_i - \hat{x}_j)^2 + (y_i - \hat{y}_j)^2\}^{1/2} \quad (3)$$

burada $d_2^{i,k}$, i nolu veri noktası ile k nolu Voronoi zonunun merkez noktası arasındaki Öklid uzaklığıdır. Yukarıda verilen matematiksel eşitliklere göre, bir veri noktası ile herhangi bir zonun merkez noktası arasındaki Öklid uzaklığı diğer merkez noktalarından daha kısa olduğunda, o veri noktası ilgili zona ait kabul edilir. Bu sonuç Şekil 1’de verilen ve $8 \times 7 = 56$ grid noktasından oluşan dikdörtgen bir çözüm bölgesi üzerinde gösterilmiştir. Görüleceği gibi, çözüm bölgesi üzerinde 3 adet Voronoi zonu bulunmakta olup gösterilen siyah noktalar her bir zonun merkez noktalarını temsil etmektedir. Yukarıda verilen formülasyona göre Şekil 1’deki her bir grid noktası hesaplanan Öklid uzaklığına bağlı olarak bir zona atanmaktadır. Örneğin, Şekil 1’deki 9 nolu nokta, (x_9, y_9) ile (\hat{x}_1, \hat{y}_1) arasında hesaplanan Öklid uzaklığı ($d_2^{9,1}$) diğerlerine kıyasla daha küçük olduğundan 1 nolu zona atanmıştır.



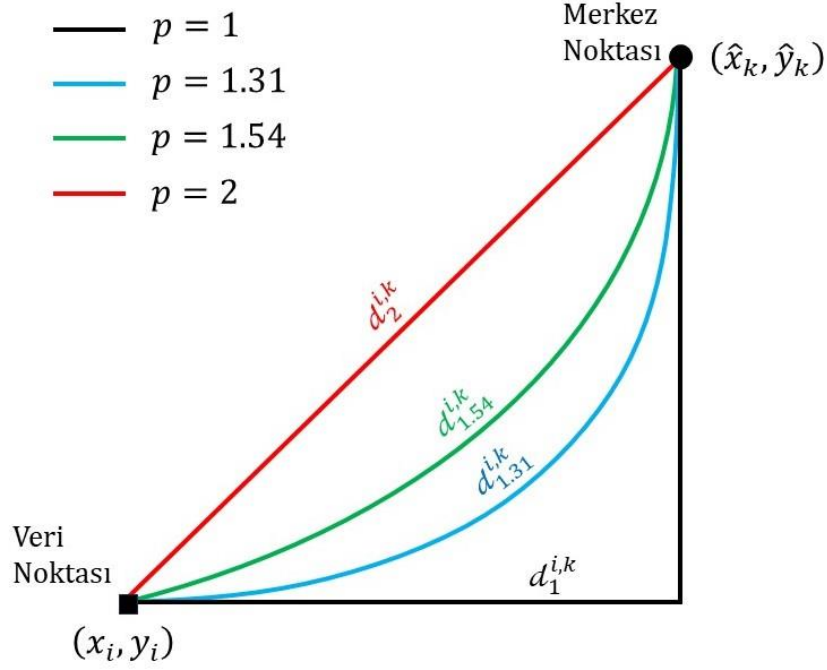
Şekil 1: Bir çözüm bölgesinin VD aracılığıyla zonlara ayrılması.

Yukarıda verilen örnekten anlaşılacağı üzere bir bölgenin klasik VD yaklaşımıyla alt zonlara bölünmesi Öklid uzaklığına dayalı bir değerlendirme kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu süreçte veri noktaları ile merkez noktalar arasındaki uzaklığın zonlama aşamasında ana kriter olarak kullanılmaktadır. Bununla

birlikte, farklı uzaklık metriklerinin de değerlendirmeye dahil edilmesi zonlama işleminin daha etkili ve esnek hale gelmesi için kritik bir adımdır. Klasik VD yaklaşımında kullanılan temel ölçüt olan Öklid uzaklığı genelleştirilmiş bir mesafe metriği olan Minkowski uzaklığının özel bir durumudur. Bu bağlamda bir veri noktası ile bir zonun merkez noktası arasında hesaplanan Minkowski uzaklık metriği matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

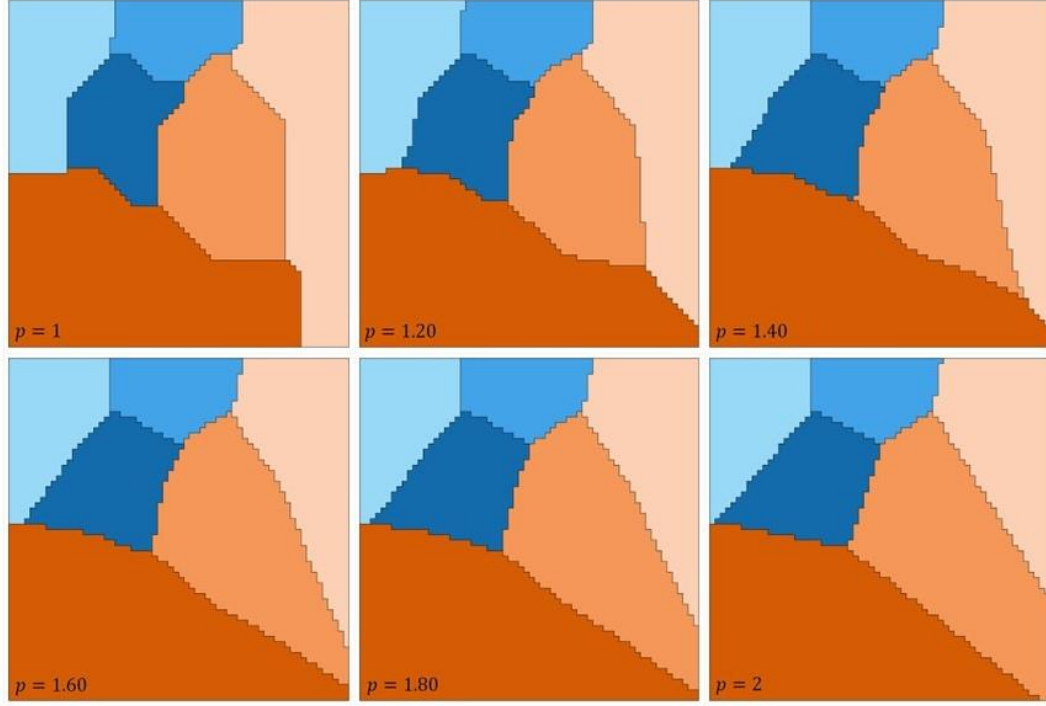
$$d_p^{i,j} = \{|x_i - \hat{x}_j|^p + |y_i - \hat{y}_j|^p\}^{1/p} \quad (4)$$

burada $d_p^{i,j}$, i nolu veri noktası ile j nolu zonun merkez noktası arasındaki Minkowski uzaklığı ve p , uzaklık mertebesini ayarlamak için kullanılan Minkowski katsayısını göstermektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus Minkowski uzaklığının $p \geq 1$ için metrik sonuçlar verdiği (Rodrigues 2018). p değerinin 1 ve 2 alınması ile Denklem (4)'de verilen ölçüt sırasıyla Manhattan ve Öklid uzaklıklarına dönüşmektedir. Benzer şekilde, p değeri pozitif sonsuza ulaştığında Minkowski uzaklığı Chebyshev uzaklığına karşılık gelmektedir (Rodrigues 2018). Örnek olarak, $1 \leq p \leq 2$ aralığında dikkate alınan farklı p değerleri için hesaplanan uzaklıklar Şekil 2'de verilmiştir. Görülebileceği gibi, veri noktası ile merkez nokta arasında hesaplanan uzaklıklar farklı p değerleri için değişkenlik göstermektedir. Öyle ki, $p = 1$ (Manhattan) için hesaplanan uzaklık maksimum iken $p = 2$ (Öklid) için hesaplanan uzaklık minimum olmaktadır. Aradaki değerler için p değeri 1'den 2'ye arttıkça hesaplanan uzaklığın azaldığı görülmektedir.



Şekil 2: Farklı p değerleri için hesaplanan uzaklıklar (Shahid ve ark. (2009)'dan uyarlanmıştır).

Akiferler heterojen jeolojik formasyonlar olup hidrojeolojik parametre yapılarının klasik VD yaklaşımıyla belirlenmesi güç olabilmektedir. Bu kapsamda, gerçek parametre alanlarının daha etkin bir şekilde temsil edilecek şekilde zonlara bölünmesi önemli bir süreçtir. Bu nedenle bu çalışmada VD zonlama yaklaşımı kapsamında farklı p değerleri dikkate alınacak şekilde Minkowski uzaklığı kullanılmıştır. Bu kapsamda örnek olarak farklı p değerleri dikkate alınarak 6 zona bölünmüş bir çözüm bölgesi Şekil 3'te verilmiştir. Görüldüğü üzere, elde edilen parametre zon yapılarının genel eğilimleri birbirine benzer olsa da, şekillerinde belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Bu sonuç, hidrojeolojik parametrelerin gerçek yapısını daha iyi temsil edebilmek için zonlama işleminin genelleştirilmiş bir yaklaşım olan Minkowski uzaklığı ile yapılmasının önemini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, hidrolik iletkenlik parametre yapısını daha etkili şekilde belirleyebilmek amacıyla bu çalışmada VD zonlama yaklaşımının genel formu kullanılmıştır.



Şekil 3: Farklı p değerleri için elde edilmiş parametre zon yapıları

2.2 Optimum Hidrolik İletkenlik Zon Yapılarının Belirlenmesi

Yeraltı suyu sistemlerinde parametre yapılarını belirlemenin en zorlu aşamalarından biri gerçek hidrolik iletkenlik alanını doğru bir şekilde temsil edebilecek en iyi zon sayısını tespit etmektir. Bu adım, geliştirilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımının ancak önceden tanımlanan bir zon sayısı için çalışabilmesinden dolayı büyük bir öneme sahiptir. Diğer bir deyişle, zon sayısı da bu süreçte bilinmeyen bir değişken olup optimizasyon sürecinin başında belirlenmesi gerekmektedir. Bu zorluğun üstesinden gelmek amacıyla optimum zon sayısını belirlemek için aşağıda verilen çözüm prosedürü kullanılmıştır:

$$\Omega_1 \rightarrow \Omega_2 \rightarrow \Omega_3 \rightarrow \dots \Omega_k \dots \rightarrow \Omega_{n_z} \quad (5)$$

$$n_z^* = f(RE, PU, SD) \quad (6)$$

burada n_z^* optimum zon sayısıdır. Denklem (5)'den görülebileceği gibi, ters parametre yapı tanımlama süreci en düşük zon sayısı ile başlamakta ve önceden belirlenmiş maksimum zon sayısına (n_z) ulaşana kadar zon sayıları birer birer artırılarak verilen

RE , PU ve SD kriterleri dikkate alınacak şekilde belirlenmektedir. Bu kriterlerden RE , dikkate alınan hidrolik iletkenlik zon yapısı için akifer sisteminin göstereceği hidrolik tepkinin belirlenmesi amacıyla kullanılmakta olup aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$RE_k = \sum_{m=1}^{n_m} \sum_{t=1}^{n_t} \left(h_m(\Omega_k, t) - \tilde{h}_m(t) \right)^2 \quad (7)$$

burada RE_k , Ω_k nolu parametre yapısı için hesaplanan RE değerini; n_m , akifer sistemindeki gözlem kuyularının sayısını; n_t , gözlem zaman adımlarının sayısını; $h_m(\Omega_k, t)$, m nolu gözlem kuyusunda ve t nolu zaman adımında Ω_k parametre yapısı için hesaplanan hidrolik yük değerini ve $\tilde{h}_m(t)$, m nolu gözlem kuyusunda ve t nolu zaman adımında ölçülen hidrolik yük değerini göstermektedir.

Denklem (7)'den görüleceği gibi, RE kriteri, ölçülen ve simülasyon modeli tarafından hesaplanan hidrolik yük değerleri arasındaki hataların karelerinin toplamını göstermektedir. Teorik olarak ters parametre yapısı belirleme probleminin geliştirilen yaklaşım kullanılarak çözümü aşamasında zon sayısının artması hesaplanan RE değerinde azalmaya neden olmaktadır. Bir başka deyişle, $n_z \rightarrow \infty$ durumu $RE \rightarrow 0$ şeklinde bir sonuç elde edilmesine neden olmaktadır. Ancak, pratikte bu şekilde bir sonucun elde edilmesi ilgili problemin matematiksel çözüm uzayının daha karmaşık hale gelmesinden dolayı mümkün olmamaktadır. Bununla birlikte, zon sayısının aşırı artması optimizasyon modeli tarafından belirlenecek değişkenlerin de sayısının aşırı artmasına (overparameterization) neden olacağından dolayı elde edilecek parametre yapısında büyük belirsizliklerin oluşmasına neden olmaktadır (Tsai ve diğ. 2003^a, Ayvaz 2007). Bu nedenle, ters parametre yapısı belirleme problemlerinin çözümünde optimum zon sayısının belirlenmesi aşamasında (n_z^*) sadece RE değerine göre değerlendirme yapılması yeterli olmamakta ve belirlenen parametrelerdeki belirsizliklerin de (PU) ilave bir ölçüt olarak dikkate alınması gerekmektedir. Tsai ve diğ. (2003), n_d adet hesap noktasından oluşan bir akifer sistemi için ters parametre yapısı belirleme probleminin çözümü aşamasında ortaya çıkacak PU değerini hesaplamak amacıyla aşağıda verilen düzenlenmiş kovaryans matrisini önermiştir:

$$Cov_k = G_k \left[\frac{[J^T J]^{-1}}{n_m n_t - k} \sum_{m=1}^{n_m} \sum_{t=1}^{n_t} (h_m(\Omega_k, t) - \tilde{h}_m(t))^2 \right] G_k^T \quad (8)$$

burada T transpoz operatörünü; $G_k \in \mathbb{R}^{n_d \times k}$, i nolu veri noktası ile j nolu zonun merkez noktası arasındaki ağırlıkları temsil eden parametre yapısı ağırlık matrisini ($j = 1, 2, 3, \dots, k, \dots, n_z$); J , hesaplanan hidrolik yük değerlerinin her bir zon için belirlenen hidrolik iletkenlik değerlerine göre hesaplanan kısmi türevlerini içeren Jacobian matrisini göstermektedir. Belirlenen hidrolik iletkenlik zon yapısı için PU değeri, Cov_k matrisinin izi (trace) veya normu hesaplanarak bulunabilmektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri Denklem (5) kapsamında çözüm yapılırken belirlenen her bir zon yapısı için PU değerinin hesaplanması gerektiğidir. Ardışık çözümler sırasında, PU değerinde ani bir artış gözlemlenmesi durumunda (bu, parametrelerdeki belirsizliğin arttığı durumu ifade etmektedir), problemin çözümü mevcut zon yapısında durdurulmalı ve bir önceki zon yapısı optimum parametre yapısı olarak kabul edilmelidir (Tsai ve diğ. 2003^a, Ayvaz 2007).

Optimum hidrolik iletkenlik parametre yapısını belirlemek amacıyla kullanılacak son kriter akifer sisteminin ardışık olarak belirlenen zon yapıları için göstereceği hidrolik tepkilerin değerlendirildiği yapısal değişim (SD) ölçütüdür. Bu amaçla, geliştirilen yaklaşım kapsamında elde edilen Ω_k ve Ω_{k-1} parametre zon yapıları dikkate alınarak hesaplanan SD_k ölçütü aşağıdaki gibidir (Tsai ve diğ. 2003^a):

$$SD_k = \left(\frac{1}{n_m n_t} \sum_{m=1}^{n_m} \sum_{t=1}^{n_t} (h_m(\Omega_k, t) - h_m(\Omega_{k-1}, t))^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

Denklem (9)'a göre belirlenmiş ardışık iki parametre zon yapısı için hidrolik açıdan hesaplanan yapısal değişim değeri önceden tanımlanmış bir değişim kriterinden daha küçük ise başka bir parametre yapısının belirlenmesine gerek kalmamaktadır (Tsai ve diğ. 2003^a). Bu tanıma bağlı olarak, $SD_k < 2\eta$ olduğunda (burada η hidrolik yükler için yapılan gözlem hatalarını temsil etmektedir), Ω_{k-1} en iyi parametre yapısı olarak seçilebilir.

3. ENTEGRE SİMÜLASYON–OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI

Bu çalışma kapsamında geliştirilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımı, birbirinden bağımsız çalışan simülasyon ve optimizasyon modellerinin karşılıklı entegrasyonuna dayanmaktadır. Bu sistemde simülasyon modeli, akifer sisteminin hidrolojik davranışlarını temsil etmek için matematiksel bir model kullanarak belirlenen parametre yapılarının sistem üzerindeki etkilerini değerlendirmektedir. Optimizasyon modeli ise, kullanılan amaç fonksiyonu minimize etmek amacıyla belirli kısıtlar altında en iyi parametre yapısını aramaktadır. Aşağıdaki bölümlerde, simülasyon modelinin temel işlevi ve optimizasyon modelinin yapılandırılması detaylı şekilde ele alınmıştır. Bu süreçte, simülasyon modelinin çıktılarının optimizasyon modeline nasıl entegre edildiği, bu iki sistemin birbiriyle nasıl etkileşim halinde çalıştığı ve çözüm sürecinin nasıl yönlendirildiği açıklanmıştır.

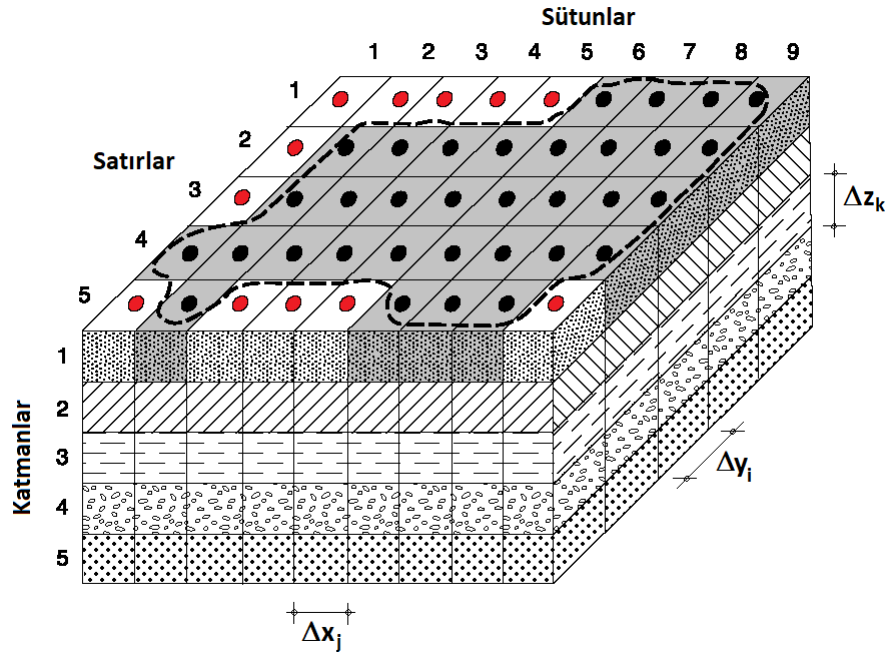
3.1 Simülasyon Modeli

Bu çalışmada kullanılan simülasyon modelinin temel amacı, basınçlı bir akifer sisteminde yeraltı suyu akış sürecini hidrolik açıdan doğru bir şekilde modellemektir. Bu süreç, yeraltı suyunun hareketini temsil eden kısmi diferansiyel denklemin verilen başlangıç ve sınır koşulları dikkate alınarak çözülmesini gerektirir. Kararsız (transient) akım koşullarında, basınçlı, heterojen ve anizotropik özelliklere sahip bir akifer sistemindeki yeraltı suyu akışı aşağıdaki kısmi diferansiyel denklem ile ifade edilebilir (Bear 2007):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \mp W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (10)$$

burada x , y ve z kartezyen koordinatları; K_{xx} , K_{yy} ve K_{zz} , x , y ve z yönleri boyunca hidrolik iletkenlik değerlerini; h , hidrolik yükü; W , kaynak/yitik terimini; S_s , akifer ortamının özgül depolama katsayısını; t ise zamanı temsil etmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan analizlerin tümünde hidrolik iletkenlik değerlerinin izotropik olduğu kabul edilmiştir ($K_{xx} = K_{yy} = K_{zz} = K$). Literatürde Denklem (10)'u çözmek için çeşitli analitik ve sayısal yöntemler geliştirilmiştir. Analitik yöntemlerin

uygulanabilmesi için akiferin homojen parametrelere sahip olması, çözüm bölgesinin düzgün geometrilere sahip olması ve kararlı akım koşullarının sağlanması gibi ideal koşullar gereklidir. Ancak, bu tür ideal koşullar yeraltı suyu sistemlerinde nadiren sağlanabildiğinden analitik yöntemlerin uygulama alanı oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, yeraltı suyu akış problemlerini çözmek için genellikle sonlu farklar, sonlu elemanlar ve sınır elemanları gibi sayısal çözüm yöntemlerinin kullanılması tercih edilmektedir. Bu sayısal yöntemler, heterojen, anizotropik ve kararsız akım durumlarına sahip akiferlerin gerçekçi bir şekilde modellenmesine olanak tanır. Bu çalışmada, Denklem (10)'un doğrudan sayısal çözümünü gerçekleştirmek yerine bu işlevi yerine getirmek amacıyla modüler, üç boyutlu bir sonlu fark akış modeli olan MODFLOW kullanılmıştır. MODFLOW, Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar Kurumu (USGS) tarafından geliştirilmiş olup yeraltı suyu akış sistemlerinin benzeşimini yapmak için yaygın olarak kullanılan güçlü bir hesaplama aracıdır. Bu model, farklı akifer özelliklerini ve sınır koşullarını kolayca tanımlayabilme yeteneği sayesinde yeraltı suyu akış sürecini etkili bir şekilde modelleyebilmektedir. Bu modelleme işleminin yapılabilmesi için akış bölgesi hidrojeolojik parametrelerin ve kaynak/yitik değerlerinin homojen olduğu sonlu sayıda grid bloklarına bölünür. Oluşturulan blokların üç boyutlu hali Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4: MODFLOW kapsamında kullanılan 3-boyutlu grid yapısı (Harbaugh 2000).

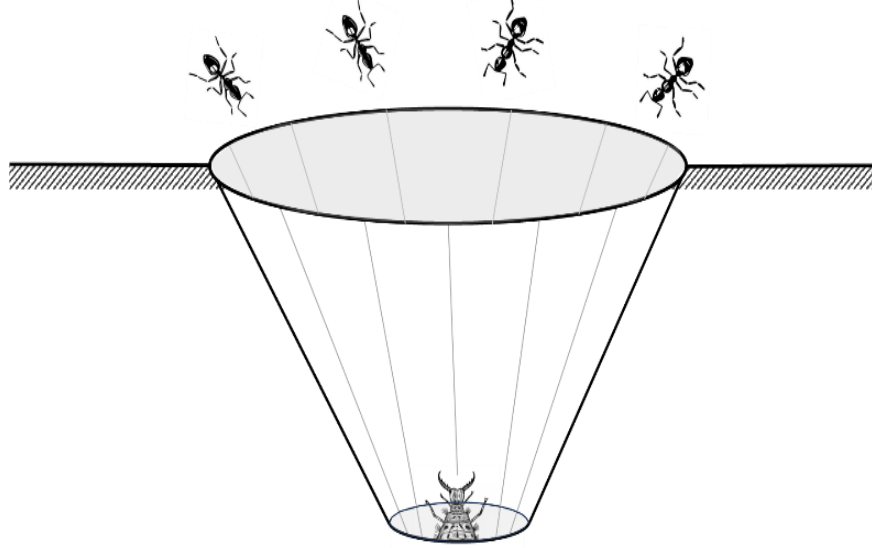
Şekil 4'ten de anlaşılacağı üzere, modelin temelini oluşturan grid yapısı, boyutları $\Delta x_j \times \Delta y_i \times \Delta z_k$ olan bloklardan meydana gelmektedir (burada, i, j ve k sırasıyla satır, sütun ve katman numaralarını ifade etmektedir). Grid yapısındaki kesikli çizgiler akış bölgesini tanımlarken, bu bölge içindeki her bir blok aktif sonlu fark hücrelerini ifade etmektedir. Yeraltı suyu akış sürecinin hidrolik olarak modellenebilmesi için Denklem (10)'un sonlu fark yöntemine dayalı cebirsel formu aktif hücrelerin (siyah daireler) her birine uygulanmalıdır. Bu işlemin ardından tüm aktif noktalar için elde edilen doğrusal cebirsel denklem sistemi MODFLOW'un yerleşik matris çözümleri tarafından çözülmektedir. Modeldeki tüm satır, sütun ve katmanları dikkate alınarak yapılan bu çözüm problemin boyutuna bağlı olarak bilgi işlem yükünü artırabilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, bilgi işlem süresini makul bir seviyede tutmak amacıyla parametre yapısı belirleme problemi iki boyutlu bir sistem çerçevesinde ele alınmıştır. Bu çerçevede, düşey yönde akifer geometrisi ve özelliklerinde önemli bir değişiklik olmadığı varsayılmış ve sadece bir düşey katman kullanılmıştır. İki boyutlu MODFLOW modelinin kurulmasının ardından, bu model, belirlenen hidrolik iletkenlik parametre yapılarına bağlı olarak akiferin hidrolik tepkisini belirlemek amacıyla bir optimizasyon modeline entegre edilmiştir. Bu entegrasyon kapsamında optimizasyon modelinin her bir hesap döngüsünde belirlenen hidrolik iletkenlik zon yapısı için hidrolik yük değerleri MODFLOW yardımıyla hesaplanmaktadır. MODFLOW tarafından elde edilen bu hidrolik yük değerleri ardından amaç fonksiyonunun hesaplanmasında kullanılmaktadır.

3.2 Optimizasyon Modeli

Bu çalışma kapsamında kullanılan optimizasyon modelinin amacı, akifer sisteminin akış bölgesindeki hidrolik iletkenlik zon yapısını ve her bir zon içindeki homojen hidrolik iletkenlik değerlerini belirlemektir. Daha önce de belirtildiği gibi bu problemin matematiksel çözüm uzayı, ayrık ve oldukça karmaşık bir yapıdadır. Bu nedenle deterministik tabanlı optimizasyon yöntemleriyle optimum sonuca ulaşmak mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, söz konusu problem ALO'nun geliştirilmiş versiyonu olan SHALO yaklaşımı kullanılarak çözülmüştür. Aşağıdaki bölümlerde, ALO ve SHALO'nun matematiksel tanımları yapılmış ve SHALO yaklaşımının performansı farklı test fonksiyonları kullanılarak test edilmiştir.

3.2.1 Karınca Aslanı Optimizasyon Yaklaşımı (ALO)

ALO, ilk olarak Mirjalili (2015) tarafından doğadaki karınca aslanlarının avlanma stratejilerine dayalı olarak geliştirilmiş bir popülasyon tabanlı sezgisel optimizasyon yöntemidir. Karınca aslanları hem larva hem de yetişkin aşamalarında etçil olan Neuroptera (ağ kanatlı böcekler) ailesine ait canlılardır. Larva dönemlerinde karınca aslanları koni şeklinde kum çukurları kazarak bu çukurların dibine gizlenirler ve av olarak özellikle karıncaları yakalarlar (Şekil 5). Avın çukura girdiğini fark ettiklerinde, karınca aslanları avın çukurun dibine kayması için ona kum parçacıkları atmaya başlar. Avını yakaladıktan sonra çukuru onarır ve bir sonraki av için hazırlar. Bu davranışa bağlı olarak, ALO ile bir optimizasyon probleminin çözümü matematiksel olarak aşağıdaki şekilde formüle edilmektedir:



Şekil 5: Koni şeklindeki çukurda avını bekleyen karınca aslanı.

\mathcal{T} , maksimum iterasyon sayısını ($t = 1, 2, 3, \dots, \mathcal{T}$); x^t ve \tilde{x}^t , sırasıyla karıncaların ve karınca aslanlarının popülasyon matrislerini; n , popülasyondaki karıncaların veya karınca aslanlarının (aday çözümler) sayısını; d , optimizasyon problemde dikkate alınan karar değişkenlerinin sayısını; x_{ij}^t ve \tilde{x}_{ij}^t , x^t ve \tilde{x}^t matrislerinin i nolu aday çözüm j nolu karar değişkeni ve t nolu iterasyondaki ($i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, d; t = 1, 2, 3, \dots, \mathcal{T}$) eleman değerlerini göstermek üzere t nolu iterasyon için karınca ve karınca aslanlarına ait popülasyon matrisleri aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$x^t = \begin{bmatrix} x_{11}^t & x_{12}^t & \dots & x_{1d}^t \\ x_{21}^t & x_{22}^t & \dots & x_{2d}^t \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1}^t & x_{n2}^t & \dots & x_{nd}^t \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\tilde{x}^t = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11}^t & \tilde{x}_{12}^t & \dots & \tilde{x}_{1d}^t \\ \tilde{x}_{21}^t & \tilde{x}_{22}^t & \dots & \tilde{x}_{2d}^t \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{n1}^t & \tilde{x}_{n2}^t & \dots & \tilde{x}_{nd}^t \end{bmatrix} \quad (12)$$

Denklem (11) ve (12)'de verilen x^t ve \tilde{x}^t matrislerinin elemanları optimizasyon başlangıcında ($t = 0$) karar değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri arasında aşağıdaki eşitlik kullanılarak rastgele olarak hesaplanmaktadır:

$$x_{ij}^{t=0} = x_{\min,j}^{t=0} + \text{rand}(0,1) \cdot (x_{\max,j}^{t=0} - x_{\min,j}^{t=0}) \quad (13)$$

burada $x_{\min,j}^{t=0}$ ve $x_{\max,j}^{t=0}$, optimizasyonun başlangıç aşamasında j nolu karar değişkeninin alt ve üst sınır değerlerini; $\text{rand}(0,1)$ ise 0 ile 1 aralığında üniform dağılıma göre üretilmiş rastgele sayıyı göstermektedir. $x^{t=0}$ ve $\tilde{x}^{t=0}$ matrislerinin elemanları Denklem (13) kullanılarak rastgele üretildikten sonra, bu karar değişkeni değerleri için uygunluk değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\mathcal{F}^t = \begin{bmatrix} f([x_{11}^t & x_{12}^t & \dots & x_{1d}^t]) \\ f([x_{21}^t & x_{22}^t & \dots & x_{2d}^t]) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f([x_{n1}^t & x_{n2}^t & \dots & x_{nd}^t]) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\tilde{\mathcal{F}}^t = \begin{bmatrix} f([\tilde{x}_{11}^t & \tilde{x}_{12}^t & \dots & \tilde{x}_{1d}^t]) \\ f([\tilde{x}_{21}^t & \tilde{x}_{22}^t & \dots & \tilde{x}_{2d}^t]) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f([\tilde{x}_{n1}^t & \tilde{x}_{n2}^t & \dots & \tilde{x}_{nd}^t]) \end{bmatrix} \quad (15)$$

burada \mathcal{F}^t ve $\tilde{\mathcal{F}}^t$, sırasıyla karıncaların ve karınca aslanlarının t nolu iterasyondaki uygunluk vektörünü temsil etmektedir. Karıncaların ve karınca aslanlarının uygunluk vektörleri hesaplandıktan sonra karınca aslanlarının avlanma davranışını taklit etmek

için GA optimizasyon tekniğine benzer şekilde bir rulet tekeri (RW) yaklaşımı uygulanır. Bu adım karınca aslanlarının uygunluk değerlerine bağlı olarak seçilmesi nedeniyle önemlidir. Rulet tekeri yaklaşımı, cüsse olarak daha güçlü olan karınca aslanlarının yuvaya giren karıncaları yakalama şansının arttığını belirten bir yaklaşımı içerir (Mirjalili 2015). Rulet tekeri yaklaşımı ile karınca aslanları seçildikten sonra, ALO’da karıncaların çukurun dibine kayma davranışı matematiksel olarak modellenir. Bu amaçla, karar değişkenlerinin alt ve üst sınır değerlerinin adaptif olarak daraltıldığı bir sınır daraltma prosedürü uygulanır. Bu prosedür, her bir iterasyonda çözüm uzayının daha dar bir aralığa çekilmesini ve böylece daha hedefe yönelik bir arama yapılmasını sağlar. ALO kapsamında kullanılan sınır daraltma prosedürü aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir:

$$x_{\min,j}^t = \frac{x_{\min,j}^t}{I} \quad (16)$$

$$x_{\max,j}^t = \frac{x_{\max,j}^t}{I} \quad (17)$$

$$I = 10^\omega \frac{t}{\mathcal{T}} \quad (18)$$

Denklem (16) ve (17)’den görüleceği gibi, karıncaların arama uzayı minimum ve maksimum sınır değerlerinin Denklem (18)’de verilen I parametresine bölünmesiyle daraltılmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri Denklem (18) kapsamında verilen I parametresinin değerinin t/\mathcal{T} oranı ve ω parametre değerine bağlı olarak dinamik hesaplandığıdır. ω parametresinin değeri ise arama sürecinin hassasiyetini ayarlamak amacıyla aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$\omega = \begin{cases} 1 & \text{eğer } 0 < t \leq 0.10\mathcal{T} \\ 2 & \text{eğer } 0.10\mathcal{T} < t \leq 0.50\mathcal{T} \\ 3 & \text{eğer } 0.50\mathcal{T} < t \leq 0.75\mathcal{T} \\ 4 & \text{eğer } 0.75\mathcal{T} < t \leq 0.90\mathcal{T} \\ 5 & \text{eğer } 0.90\mathcal{T} < t \leq 0.95\mathcal{T} \\ 6 & \text{eğer } 0.95\mathcal{T} < t \leq \mathcal{T} \end{cases} \quad (19)$$

Bu aşamanın ardından, karıncaların hazırlanan koni şeklindeki çukur içerisine düşme sürecinin benzeşimini yapabilmek amacıyla karıncaların matematiksel çözüm uzaylarının alt ve üst sınır değerleri karınca aslanlarının pozisyonları kullanılarak aşağıdaki şekilde güncellenmektedir:

$$x_{j,\min}^t = \begin{cases} \tilde{x}_{ij,RW}^t + x_{j,\min}^t & \text{eğer } \text{rand}(0,1) < 0.5 \\ \tilde{x}_{ij,RW}^t - x_{j,\min}^t & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (20)$$

$$x_{j,\max}^t = \begin{cases} \tilde{x}_{ij,RW}^t + x_{j,\max}^t & \text{eğer } \text{rand}(0,1) \geq 0.5 \\ \tilde{x}_{ij,RW}^t - x_{j,\max}^t & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (21)$$

burada $\tilde{x}_{ij,RW}^t$, RW yaklaşımıyla t nolu iterasyonda seçilmiş i nolu karınca aslanının pozisyonunu temsil etmektedir. Bu işlemin ardından, karıncaların yem bulmak için gerçekleştirmiş oldukları rastgele yürüyüş sürecinin matematiksel benzeşimi aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmektedir:

$$x_j = [0, x_j^1, x_j^2, \dots, x_j^t, \dots, x_j^J] \quad (22)$$

$$x_j^t = \mathcal{C}(2r(t) - 1) \quad (23)$$

$$r(t) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } \text{rand}(0,1) > 0.5 \\ 0 & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (24)$$

burada x_j , j nolu karar değişkeni için ($j = 1, 2, 3, \dots, d$) rastgele yürüyüş vektörünü; x_j^t , x_j vektörünün t nolu elemanını; $r(t)$, stokastik tabanlı bir fonksiyonu; $\mathcal{C}(\circ)$, verilen girdinin kümülatif olarak toplamını hesaplayan bir fonksiyonu göstermektedir. Bu aşamanın ardından, rastgele yürüyüş vektörünün elemanları karar değişkenlerinin Denklem (20) ve (21) kapsamında güncellenen alt ve üst sınır değerleri arasına denk gelecek şekilde aşağıda verilen min–maks denklemi kullanılarak normalize edilmektedir:

$$x_j^t = x_{j,\min}^t + \frac{(x_j^t - a_j) \cdot (x_{j,\max}^t - x_{j,\min}^t)}{b_j - a_j} \quad (25)$$

burada $a_j = \min(\mathcal{X}_j)$ ve $b_j = \max(\mathcal{X}_j)$ değerlerine karşılık gelmektedir. Bir optimizasyon probleminin çözümü sırasında popülasyondaki en iyi uygunluk değerine sahip (elit) çözümün korunması arama sürecinde elde edilen hafızanın saklanabilmesini sağladığından önemli bir adımdır. Bu nedenle optimizasyon işleminin her bir hesap döngüsünde en iyi çözümün saklanması gerekmektedir. ALO kapsamında bu en iyi çözüm, RW ile elde edilen en iyi çözümle Denklem (25) kullanılarak elde edilen çözümlerin en iyisinin aritmetik ortalaması alınarak aşağıdaki şekilde elde edilmektedir:

$$x_{ij}^t = \frac{\mathcal{R}a_j^t + \mathcal{R}e_j^t}{2} \quad (26)$$

burada $\mathcal{R}a_j^t$ ve $\mathcal{R}e_j^t$, sırasıyla t nolu iterasyonda j nolu karar değişkeni için RW ve Denklem (25) sonucu elde edilen elit çözümler için hesaplanan rastgele yürüyüşleri temsil etmektedir. Bu aşamanın ardından, karıncaların tuzağa düşmesiyle birlikte karınca aslanı yeni bir av için tuzağı hazırlamak üzere pozisyonunu güncellemektedir. Bu işlem Mirjalili (2015) tarafından verilen ALO'nun kaynak koduna göre aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmektedir (Durgut ve diğ. 2024):

- i. Yeni hesaplanan karınca pozisyonları için uygunluk vektörünü belirle.
- ii. Karıncaların uygunluk vektörünü, karınca aslanlarının uygunluk vektörünün altına ekleyerek birleştirilmiş bir uygunluk vektörü oluştur (ikili uygunluk vektörü).
- iii. Karıncaların pozisyon matrisini, karınca aslanlarının pozisyon matrisinin altına ekleyerek birleştirilmiş bir pozisyon matrisi oluştur (ikili pozisyon matrisi).
- iv. İkili uygunluk vektörünü küçükten büyüğe sırala ve bu sıralamaya karşılık gelen indeks değerlerini belirle.
- v. İkili pozisyon matrisini, sıralama işlemi sonucu elde edilen indeks değerlerine göre yeniden düzenle.

vi. Sıralanmış ikili uygunluk vektörünün ve pozisyon matrisinin ilk yarısını alarak karınca aslanlarının yeni pozisyon ve uygunluk değerlerini belirle.

Yukarıda verilen işlem adımları, orijinal ALO kapsamında verilen durma koşulu (maksimum iterasyon sayısı) sağlanıncaya kadar tekrar edilir.

3.2.2 Karıştırılmış Karınca Aslanı Optimizasyon (SHuffled Ant Lion Optimization, SHALO) Yaklaşımı

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi ALO yaklaşımı, doğadaki etkileyici bir avlanma sürecine dayanması ve basit bir yapıya sahip olması nedeniyle pek çok farklı optimizasyon probleminin çözümünde kullanılmıştır. Ancak, literatürde yapılan çalışmalar, ALO'nun özellikle karınca aslanı etrafındaki rastgele yürüyüş sürecine yönelik bazı kritik eksiklikleri ortaya koymaktadır. Bu eksiklikler, ilgili yaklaşım kapsamında elde edilecek çözümlerin kalitesi üzerinde oldukça etkili olduğundan ALO'nun pek çok araştırmacı tarafından iyileştirilmiş versiyonları geliştirilmiştir (Chaitanya ve diğ. 2021, Chen ve diğ. 2022, Dinkar ve Deep 2017, El Bakrawy ve diğ. 2022, Guo ve diğ. 2020, Kilic ve diğ. 2020, Kılıç ve Yüzgeç 2019, Liu ve diğ. 2020, Rajan ve diğ. 2017, Singh ve Singh 2021, Toz 2019, Wu ve diğ. 2017, Yan ve diğ. 2023, Yang ve diğ. 2019, Yao ve Wang 2017, Yao ve diğ. 2021). Bu kapsamda önerilmiş bir diğer iyileştirilmiş ALO versiyonu da Karıştırılmış Karınca Aslanı Optimizasyon yaklaşımıdır (SHALO) (Durgut ve diğ. 2024). Diğer iyileştirilmiş ALO versiyonlarında olduğu gibi SHALO kapsamında da karınca aslanlarının etrafındaki rastgele yürüyüş sürecinin iyileştirilmesi amaçlanmakta olup bu bağlamda iki önemli değişiklik yapılmıştır.

İlk değişiklik orijinal ALO kapsamında dikkate alınan sınır daraltma prosedürünün geliştirilmesiyle ilgilidir. ALO kapsamında dikkate alınan orijinal prosedür kapsamında karar değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri sırasıyla Denklem (16) ve (17) kullanılarak daraltılmaktadır. Daraltma sürecinde ise I parametresinin değeri etkili olup bu parametrenin değeri t/T oranı ve ω parametre değerine bağlı olarak dinamik bir şekilde hesaplanmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri, ω parametre değerinin belirli iterasyon noktalarında ani bir şekilde artırılmasıyla I parametresinin değerinin de anlık olarak arttırıldığıdır. Bu şekilde

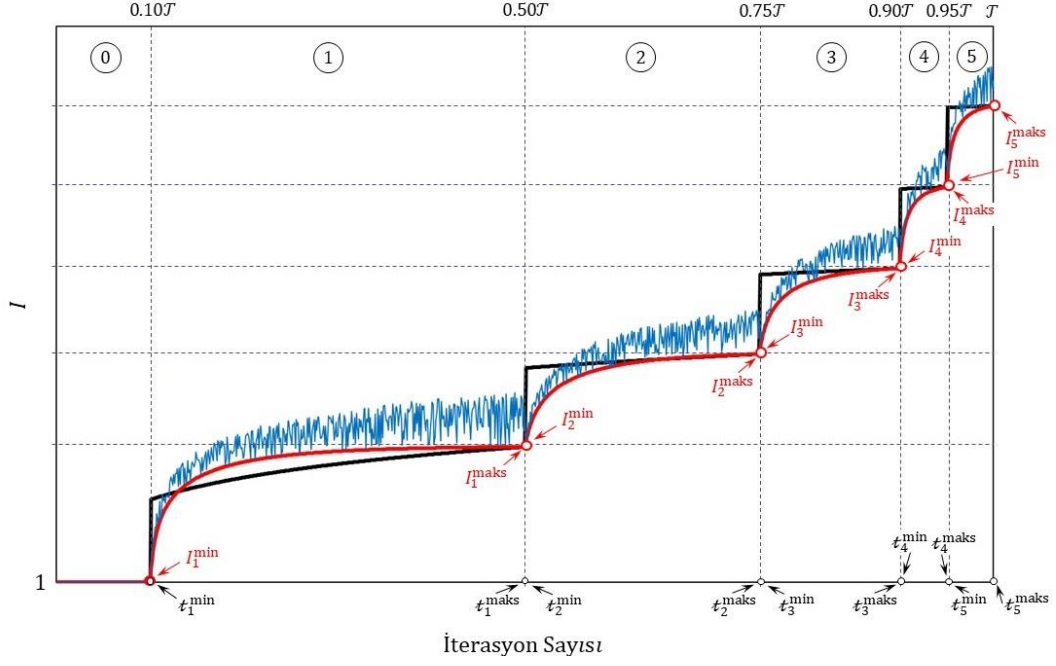
dikkate alınan bir hesaplama yaklaşımı rastgele yürüyüş sürecinde etkin olarak kullanılsa da I parametresinin değerinin süreksizliğine neden olacak şekilde anlık olarak artması rastgele yürüyüş sürecindeki tüm alternatif çözümlerin araştırılmasını engelleyebilmektedir (Toz 2019). Bu amaçla, orijinal ALO'da Denklem (18) kapsamında verilen sınır daraltma prosedürü yerine aşağıdaki sürekli yapıdaki üstel ağırlıklı fonksiyon önerilmiştir:

$$I = \begin{cases} 1 & \text{eğer } k = 0 \\ \tilde{I} & \text{eğer } k = 1, 2, 3, 4, 5 \end{cases} \quad (27)$$

$$\tilde{I} = (I_k^{\min} + I_k^{\max}) - I_k^{\max} \cdot \left\{ e^{[\mathcal{L}_k \cdot (\mathcal{t} - \mathcal{t}_k^{\min})]} + \lambda \cdot \text{rand}(0,1) \cdot |\mathcal{L}_k| \cdot (\mathcal{t} - \mathcal{t}_k^{\min}) \right\} \quad (28)$$

$$\mathcal{L}_k = \frac{\ln\left(\frac{I_k^{\min}}{I_k^{\max}}\right)}{\mathcal{t}_k^{\max} - \mathcal{t}_k^{\min}} \quad (29)$$

burada \tilde{I} önerilen üstel ağırlıklı fonksiyonunu; I_k^{\min} ve I_k^{\max} , Şekil 6'da verilen k nolu bölge için dikkate alınan minimum ve maksimum I değerlerini; \mathcal{t}_k^{\min} ve \mathcal{t}_k^{\max} , Şekil 6'da verilen k nolu bölge için minimum ve maksimum \mathcal{t} değerlerini; \mathcal{L}_k , değeri Şekil 6'da verilen k nolu bölge için Denklem (29)'a göre hesaplanan logaritmik bir fonksiyonu; $|\cdot|$, mutlak değeri ve λ , \tilde{I} değerine eklenen rastgele pertürbasyonların büyüklüğünü kontrol eden parametre değerini göstermektedir. Kullanılan değişkenler ve önerilen üstel ağırlıklı fonksiyonun iterasyon alanı üzerindeki değişimi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6: Hesaplanan I değerlerinin iterasyon sayısı ile değişimi: ALO (siyah), SHALO (kırmızı: $\lambda = 0$; mavi: $\lambda = 1$).

Şekil 6'dan görüleceği gibi optimizasyon sürecinde dikkate alınan iterasyon alanı 6 alt bölgeye bölünmüştür ($k = 0, 1, 2, \dots, 5$). İterasyon alanı için her bir bölgenin alt ve üst sınır değerleri sırasıyla t_k^{\min} ve t_k^{\max} olarak sunulmuştur. Benzer şekilde, her bir bölge için alt ve üst I sınır değerleri sırasıyla I_k^{\min} ve I_k^{\max} olarak sunulmuştur. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri, orijinal ALO yaklaşımında (siyah çizgi) hesaplanan I değerinin 1'inci bölgeden başlamak üzere her bir bölgenin başlangıcında anlık olarak, ara noktalarda ise t/T oranına bağlı şekilde doğrusal olarak artmakta olduğudur. Buna karşın, bu çalışma kapsamında önerilen \tilde{I} değeri orijinal ALO'da olduğu gibi iterasyon alanının belli noktalarında anlık artış göstermemekte, bunun yerine sürekli yapıda üstel bir şekilde artış göstermektedir (kırmızı çizgi). Bu değişiklik optimizasyon sürecinde dikkate alınan rastgele arama sürecinin performansını iyileştirmektedir. Bununla birlikte, önerilen üstel fonksiyon kapsamında hesaplanan \tilde{I} değerlerine rastgele pertürbasyonlar da eklenmiş (mavi çizgi) ve optimizasyon sürecinden lokal optimum çözümlerden kaçma imkânı artırılmıştır. Bu noktada önerilen yaklaşımın performansının farklı rastgele pertürbasyonlar için değerlendirilmesi global optimum sonuçlara etkin bir şekilde ulaşabilmek için gerekli bir adım olmaktadır.

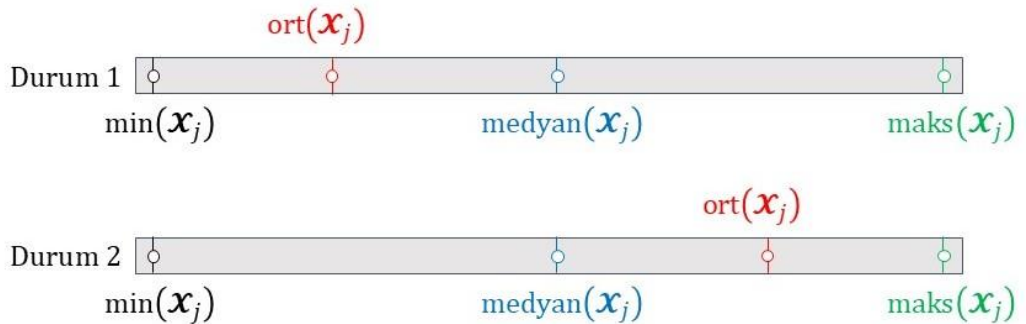
SHALO kapsamında gerçekleştirilen ikinci değişiklik orijinal ALO'da Denklem (25)'de verilen min-maks denklemi kullanılarak yapılan normalizasyon işleminin değiştirilmesiyle ilgilidir. Daha önce belirtildiği gibi, oluşturulan rastgele yürüyüş vektörü karıncaların konumunu güncellemek için doğrudan kullanılamamaktadır. Bu nedenle, ilgili vektör içindeki değerler çözüm uzayının sınırlarını tanımlayan minimum ve maksimum sınır değerler dikkate alınarak normalize edilmektedir. SHALO kapsamında ilgili süreç aşağıdaki şekilde değiştirilmiştir:

$$x_j^t = x_{j,\min}^t + \frac{(x_j^t - \tilde{a}_j) \cdot (x_{j,\max}^t - x_{j,\min}^t)}{\tilde{b}_j - \tilde{a}_j} \quad (30)$$

$$\tilde{a}_j = \text{ort}(x_j) - \min(x_j) \quad (31)$$

$$\tilde{b}_j = \text{maks}(x_j) - \text{ort}(x_j) \quad (32)$$

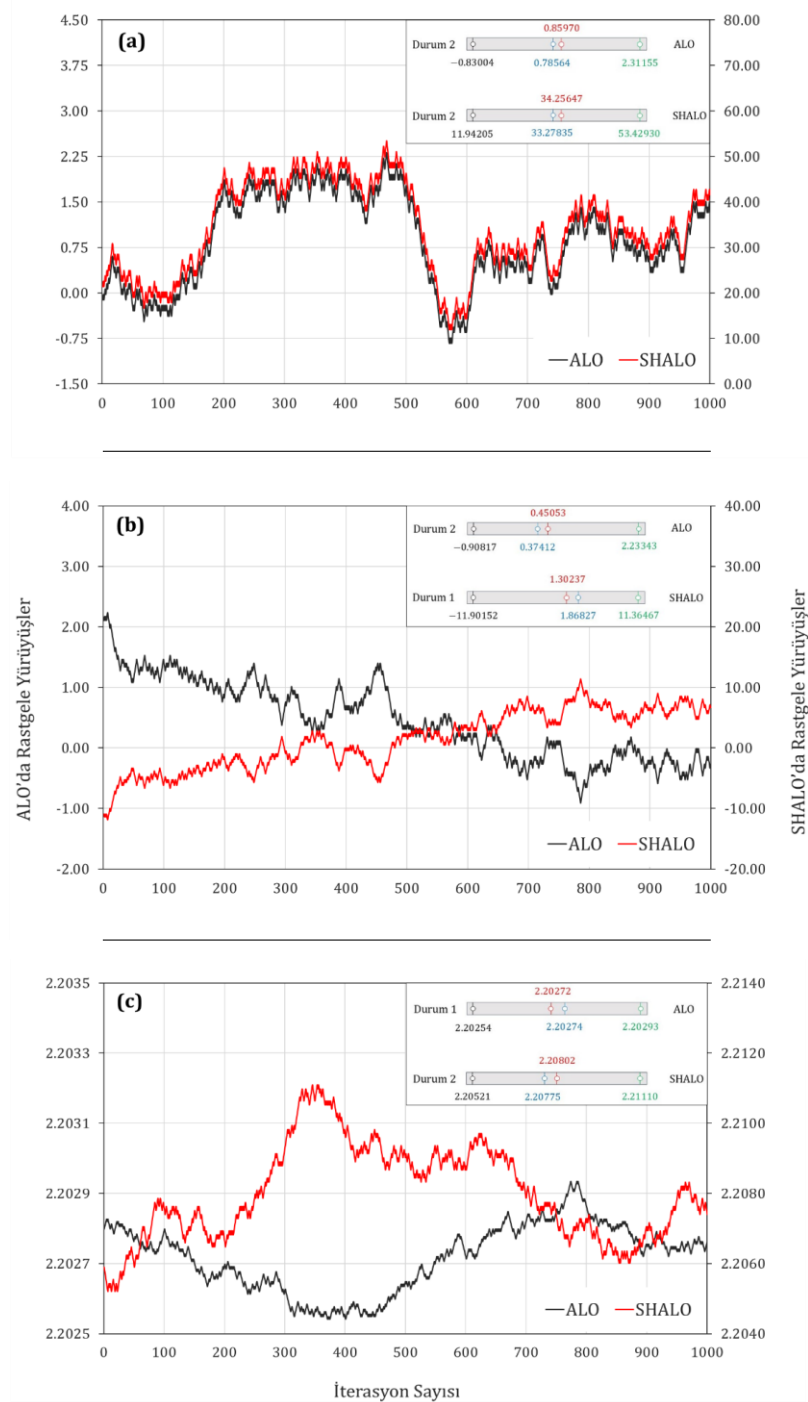
burada $\text{ort}(x_j)$, j nolu değişken için rastgele yürüyüş vektörünün aritmetik ortalamasını temsil etmektedir. Denklem (30)'dan görüleceği gibi, Denklem (25) kapsamında kullanılan a_j ve b_j değerleri Denklem (31) ve (32)'de verilen \tilde{a}_j ve \tilde{b}_j ile değiştirilmiştir. Yapılan bu değişiklik ile optimizasyon sürecinde rastgele yürüyüş vektörünün çeşitliliği yapılan ölçeklendirme ve karıştırma işlemi ile önemli oranda arttırılmaktadır. Bu aşamada ilgili içerik karıştırma işlemi ile ilgili olarak Şekil 7'de verilen iki durum ortaya çıkmaktadır.



Şekil 7: Karıştırma işlemi sırasında gözlemlenen iki durum

Şekil 7'den görüleceği gibi $ort(X_j)$ değerlerinin medyan(X_j)'den küçük ve büyük olduğu durumlar sırasıyla Durum 1 ve 2 olarak adlandırılmıştır. Her ne kadar orijinal ALO'da Durum 1 ve 2'nin ne olduğunun bir önemi olmasa da SHALO yaklaşımında dikkate alınan karıştırma sürecinin işleyişini anlamak açısından bu iki durum büyük önem taşımaktadır. Bu konuyu netleştirmek adına, hem ALO hem de SHALO yaklaşımları için 10'uncu, 100'üncü ve 800'üncü iterasyonlarda hesaplanan rastgele yürüyüşlerin eğilim ve istatistikleri Şekil 8(a)-(c)'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu karşılaştırma, özellikle SHALO'nun geliştirilmiş rastgele yürüyüş mekanizmasının etkilerini değerlendirerek her iki yaklaşımın rastgele yürüyüş süreçlerindeki farklılıkları daha iyi açıklamayı amaçlamaktadır. Rastgele sayıların etkisini ortadan kaldırmak ve her iki yöntemin performansını eşit koşullarda incelemek amacıyla ALO ve SHALO kapsamında aynı rastgele sayı çekirdek değerleri kullanılmıştır. Bu yöntem, rastgeleliğin sonuçlar üzerindeki etkisini en aza indirerek her iki algoritmanın davranış farklarını daha doğru analiz etmeye olanak sağlamıştır. Şekil 8(a)'dan görüldüğü üzere, her ne kadar hesaplanan rastgele yürüyüşler genel olarak benzer eğilimler gösterse de SHALO için elde edilen değerler ALO'ya kıyasla belirgin şekilde daha büyüktür. Hem ALO hem de SHALO yaklaşımlarında hesaplanan ortalama rastgele yürüyüş değerlerinin medyan değerlerden büyük olması her iki yaklaşımın da Durum 2 olarak sınıflandırılmasına yol açmaktadır. Bu bağlamda, Denklem (30)'un etkisi orijinal ALO ile elde edilen rastgele yürüyüşlerin ölçeklendirilerek büyütülmesi şeklinde kendini göstermektedir. Diğer yandan, Şekil 8(b)'de gösterilen rastgele yürüyüşler incelendiğinde SHALO için hesaplanan rastgele yürüyüş değerlerinin ALO ile elde edilenlere kıyasla daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, SHALO kapsamında elde edilen değerlerin ALO'ya kıyasla baş aşağı simetrik bir şekilde ters değerlere sahip olduğu dikkat çekmektedir. Bu simetri, SHALO'nun rastgele yürüyüş mekanizmasında yapılan modifikasyonların bir sonucu olarak öne çıkmaktadır ve bu durum SHALO'nun Durum 1, ALO'nun ise Durum 2 olarak sınıflandırılmasının bir sonucudur. Bu değişiklikler, SHALO'nun rastgele yürüyüş vektörünün sadece ölçeklendirilmesiyle sınırlı kalmadığını, aynı zamanda vektör içeriğinin karıştırılarak yeniden düzenlendiğini göstermektedir. Son olarak, Şekil 8(c) kapsamında da Şekil 7'de verilmiş olan durumların farklı olmasından dolayı SHALO'daki rastgele yürüyüşler ALO'da verilenlere kıyasla baş aşağı simetrik bir şekilde ters değerlere sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, Şekil 8(a) ile (c) arasındaki karşılaştırmada,

iterasyon sayısındaki artış ile rastgele yürüyüş değerlerinin büyüklük açısından azaldığı sonucuna ulaşılmaktadır. SHALO'daki yapılan bu değişikliklerle rastgele yürüyüş vektörünün çeşitliliği özellikle erken iterasyonlarda önemli derecede artmaktadır. Bu durum, SHALO'nun geliştirilmiş rastgele yürüyüş mekanizmasının etkisini ve çözüm sürecinin başlarındaki çeşitliliği daha iyi yansıttığını göstermektedir.



Şekil 8: ALO ve SHALO yaklaşımları kapsamında hesaplanan rastgele yürüyüşlerin eğilim ve istatistiklerinin (a): 10'uncü; (b): 100'üncü ve (c): 800'üncü iterasyonlar için karşılaştırılması.

3.2.1 Diğer İyileştirilmiş ALO Yaklaşımlarıyla Karşılaştırma

Literatürde, ALO yaklaşımının çözüm doğruluğunu iyileştirmek amacıyla geliştirilmiş birçok değiştirilmiş versiyon bulunmaktadır. Bu versiyonların büyük bir kısmı, orijinal ALO'nun karınca aslanı etrafındaki rastgele yürüyüş sürecini iyileştirmeyi hedeflemektedir. Geliştirilen SHALO yaklaşımı da bu sürecin iyileştirilmesine odaklanmaktadır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında ALO ve SHALO'nun performansları ilgili problemlerin aynı başlangıç popülasyonları, aynı optimizasyon parametre değerleri ve aynı rastgele sayı çekirdekleri için çözülmesi suretiyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, elde edilen tüm sonuçlar, ilgili problemlerin aynı koşullar altında öz-uyarlamalı ALO (saALO) (Liu ve diğ. 2020) yaklaşımıyla çözülmesi sonucu elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. saALO yaklaşımında, Denklem (18)'de verilen I terimi aşağıdaki şekilde düzenlenerek ilgili sınır daraltma prosedürü iyileştirilmiştir:

$$\text{saALO:} \quad I = 10^\omega \frac{t}{T} \left(0.5 + \sin \left(\frac{\pi \cdot t}{2T} \right) \cdot \text{rand}(0,1) \right) \quad (33)$$

Denklem (33)'den görüleceği gibi, saALO yaklaşımı ile önerilen sınır daraltma prosedürü Denklem (18) ile benzer matematiksel ifadeye sahip olduğu görülebilir (I değeri t/T oranı ve ω parametresine bağlı olarak doğrusal ve dinamik olarak değişim göstermektedir). Denklem (18)'den farklı olarak, saALO yaklaşımında hesaplanan I değerlerine trigonometrik olarak değişen rastgele pertürbasyonlar eklenmektedir.

3.2.2 SHALO Yaklaşımının Performansının Değerlendirilmesi

Önerilen SHALO yaklaşımının performansı, 4 kısıtsız (Michalewicz, Rastrigin, Trefethen, De Villiers – Glasser 1) ve 4 kısıtlı (Floudas ve Pardalos, Kısıtlı Rastrigin, Basınçlı Tank Tasarım Problemi, Trapez Kanal Tasarım Problemi) optimizasyon test problemini çözülerek değerlendirilmiştir. Performans karşılaştırmak amacıyla ilgili problemler aynı zamanda orijinal ALO, saALO, GA ve PSO yaklaşımları kullanılarak da çözülmüştür. Tüm yaklaşımlar için popülasyon sayısı 50, maksimum iterasyon (jenerasyon) sayısı ise 1000 olarak belirlenmiştir. Kesin bir

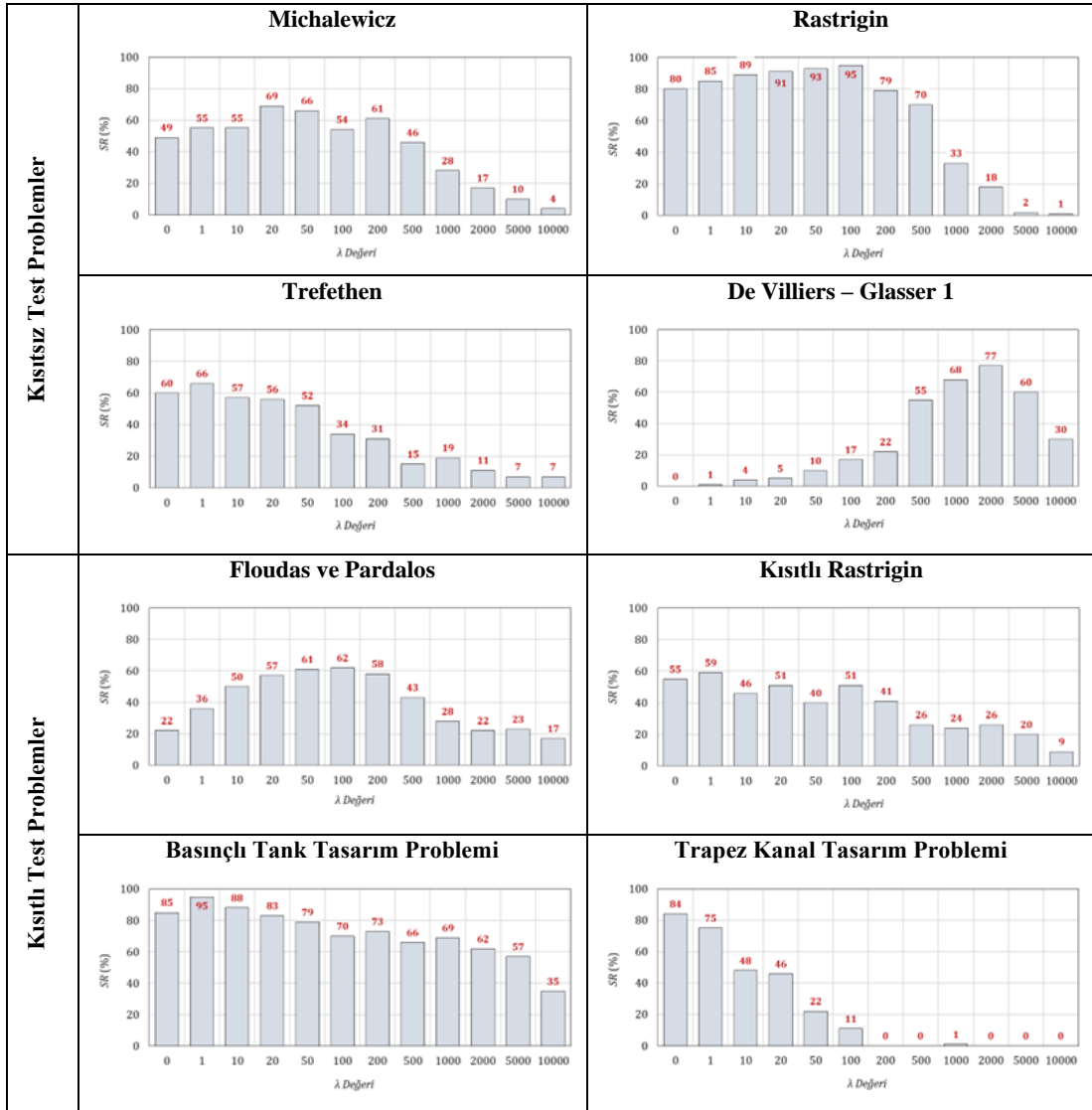
karşılaştırma yapabilmek ve model sonuçlarını istatistiksel olarak değerlendirebilmek amacıyla 100 farklı rastgele sayı çekirdek değerini içeren bir veri seti oluşturulmuş ve her bir yaklaşım bu veri setindeki çekirdek değerleri kullanılarak çalıştırılmıştır. İstatistiksel değerlendirme sürecinde yaygın olarak kullanılan ölçütler (minimum, maksimum, ortalama, medyan ve standart sapma) dikkate alınmış, ayrıca Başarı Oranı (Success Rate, SR) olarak tanımlanan ve Denklem (34)'de verilen bir ölçüt de kullanılmıştır (Poole ve Allen 2019).

$$SR (\%) = \frac{\sum SS}{TS} \cdot 100 \quad (34)$$

$$SS = \begin{cases} \begin{cases} 1 & \text{eğer } |f(x) - f(x^*)| \leq \varepsilon \\ 0 & \text{aksi takdirde} \end{cases} & \text{eğer } f(x^*) = 0 \\ \begin{cases} 1 & \text{eğer } \frac{|f(x) - f(x^*)|}{|f(x^*)|} \leq \varepsilon \\ 0 & \text{aksi takdirde} \end{cases} & \text{eğer } f(x^*) \neq 0 \end{cases} \quad (35)$$

burada $\sum SS$, yapılan 100 çözüm içinden başarılı olan çözüm sayısını; TS , yapılan toplam çözüm sayısını (100); $f(x)$, ilgili test fonksiyonu için optimizasyon modeli tarafından belirlenen amaç fonksiyonu değerini; $f(x^*)$, ilgili test fonksiyonu için global optimum fonksiyon değerini; ε , eşik veya tolerans değerini temsil etmektedir. Denklem (35)'den görüleceği gibi, hesaplanan mutlak veya göreceli hata değeri ε 'dan küçük veya eşitse ilgili çözüm başarılı çözüm ($SS = 1$) olarak sınıflandırılmaktadır. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, önerilen SHALO yaklaşımının performansını farklı büyüklüklerdeki rastgele pertürbasyonlar için değerlendirilmesinin gerekli olduğudur. Bu doğrultuda, Denklem (27)-(29) kapsamında tanımlanan sınır daraltma prosedürünün uygulanabilirliğini analiz etmek amacıyla her bir optimizasyon test problemi 12 farklı λ değeri kullanılarak incelenmiştir ($\lambda \in [0, 1, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000]$). İlgili test problemleri her bir λ değeri için üretilen 100 farklı rastgele çekirdek değeri kullanılarak çözülmüştür. Bu aşamadan sonra, ilgili test problemlerinin farklı λ değerleri göz önünde bulundurularak yapılan çözümlerine ilişkin SR değerlerinin karşılaştırması Şekil 9'da sunulmuştur. Ayrıca, en iyi λ değeri için elde edilen SR sonuçları, aynı test problemlerinin benzer koşullarda ALO, saALO, GA ve PSO

yaklaşımları kullanılarak çözülmesiyle elde edilen SR değerleri ile Tablo 1’de karşılaştırılmıştır. Görüleceği gibi, önerilen SHALO yaklaşımı hem kısıtsız hem de kısıtlı optimizasyon test problemleri için diğer yaklaşımlardan daha yüksek bir başarı oranı göstermiştir. Bu aşamada kullanılan test fonksiyonlarının matematiksel yapısı, yapılan çözümlerin istatistik değerlendirmesi ve diğer yaklaşımlarla performans anlamında karşılaştırılması Ek A ve B’de sunulmuştur.



Şekil 9: Her bir test problemi için hesaplanan SR değerlerinin λ 'ya göre değişimi

Tablo 1: Her bir problem için elde edilen *SR* değerinin diğer yaklaşımlarla karşılaştırılması

Problem	Tip	ALO	saALO	GA	PSO	SHALO
Michalewicz	Kısıtsız	3	4	48	32	69
Rastrigin		0	1	46	36	95
Trefethen		47	56	36	63	66
De Villiers – Glasser 1		0	0	0	60	77
Floudas ve Pardalos	Kısıtlı	0	0	8	10	62
Kısıtlı Rastrigin		30	37	43	58	59
Basıncılı Tank Tasarım Problemi		84	88	36	84	95
Trapez Kanal Tasarım Problemi		13	13	4	46	84

3.3 Problem Formülasyonu

Yeraltı suyu hidrolik iletkenlik parametresi zon yapısını tanımlama problemi, matematiksel olarak bir optimizasyon problemi şeklinde formüle edilebilmektedir. Bu problemde, başlangıç aşamasında hidrolik iletkenlik zon yapısı rastgele oluşturulmakta ve her bir zona rastgele hidrolik iletkenlik değerleri atanmaktadır. Bu adımın ardından, önerilen SHALO yaklaşımı devreye girerek akiferdeki gözlem kuyularında MODFLOW tabanlı simülasyon modeli ile hesaplanan hidrolik yük değerleri ile ölçülen değerler arasındaki hatayı minimize edecek şekilde hidrolik iletkenlik zon yapısı ile her bir zon içindeki homojen hidrolik iletkenlik değerlerini belirlemektedir. Matematiksel olarak bu problem aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\min RE_k = \sum_{m=1}^{n_m} \sum_{t=1}^{n_t} (h_m(\Omega_k, t) - \tilde{h}_m(t))^2 \quad (36)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\hat{K} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\hat{K} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\hat{K} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (37)$$

$$\hat{K} \in \{ \hat{K}_1, \hat{K}_2, \hat{K}_3, \dots, \hat{K}_k, \dots, \hat{K}_{n_z} \} ; j = 1, 2, 3, \dots, k, \dots, n_z \quad (38)$$

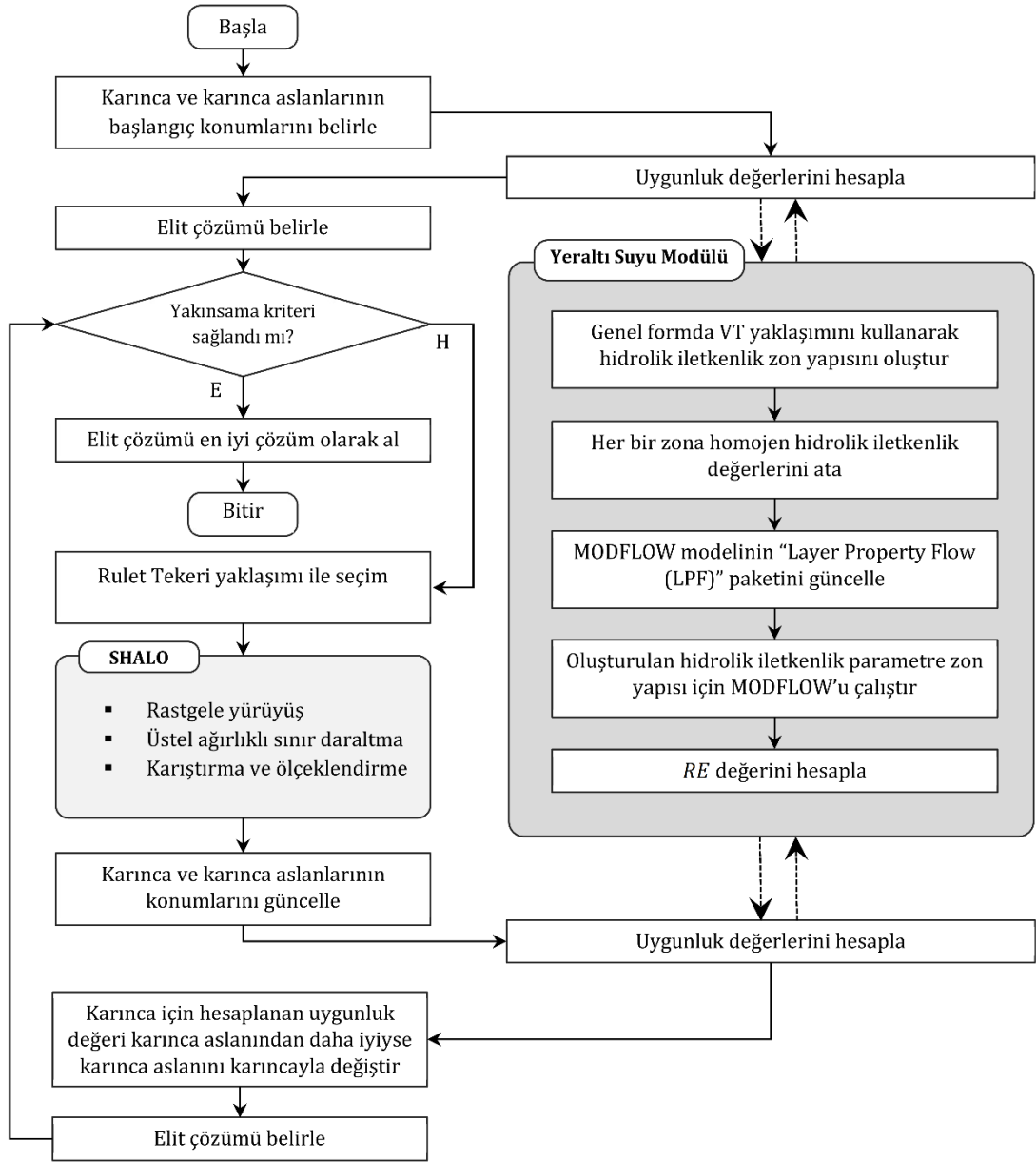
$$\hat{K} = K_k \text{ if } d_p^{i,k} < d_p^{i,j} (\forall j \neq k) ; i = 1, 2, 3, \dots, n_d \quad (39)$$

$$h_m(\Omega_k, t) \in h(x, y, z, t) \quad (40)$$

$$\Omega_1 \rightarrow \Omega_2 \rightarrow \Omega_3 \rightarrow \dots \Omega_{n_z^*} \dots \rightarrow \Omega_{n_z} \quad (41)$$

$$\Omega_{n_z^*} = f(RE, PU, SD) \quad (42)$$

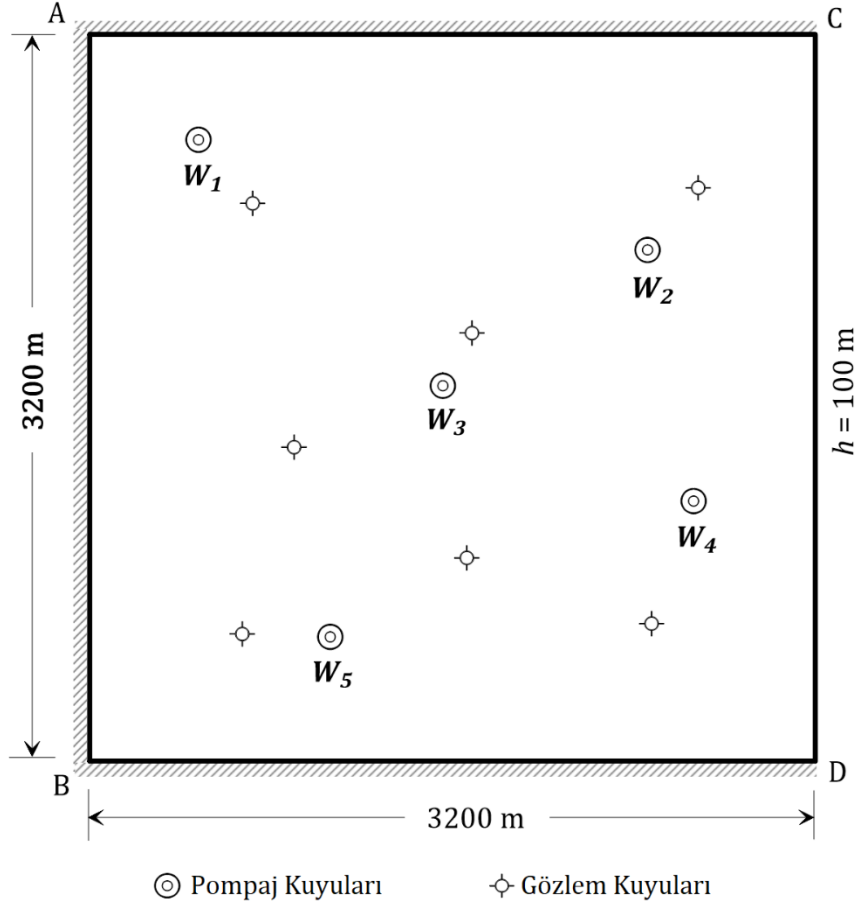
burada \widehat{K} , belirlenecek hidrolik iletkenlik değerlerini; $h(x, y, z, t)$, Denklem (37)'nin MODFLOW kullanılarak özölmesi ile akifer sisteminin herhangi bir konumu (x, y, z) ve zamanı (t) için hesaplanan hidrolik yük değerini; Ω_{n_z} ise gerçek hidrolik iletkenlik parametre yapısını en iyi temsil eden optimum zon yapısını göstermektedir. Yukarıda verilen optimizasyon formölasyonundan görölebileceği gibi, yeraltı suyu parametre zon yapısı belirleme problemi Denklem (41) kapsamında verilen ardışık çözüm prosedürüne göre özölmekte ve optimum parametre sayısı RE , PU ve SD ölçütleri değerlendirilerek belirlenmektedir. Optimizasyon modelinin karar değişkenleri; her zonu temsil eden merkez noktaların koordinatları (\hat{x}_j, \hat{y}_j) , her bir zonun içediği homojen hidrolik iletkenlik değerleri (\widehat{K}_j) ($j = 1, 2, 3, \dots, n_z$) ve Minkowski katsayısı (p) olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, SHALO yaklaşımı kapsamında dikkate alınan karar değişkenlerinin sayısı $3n_z + 1$ 'dir. Önerilen simölasyon-optimizasyon yaklaşımına ait akış şeması Şekil 10'da verilmiştir. Göröldüęü üzere, önerilen MODFLOW tabanlı yeraltı suyu modölü, oluşturulan her bir hidrolik iletkenlik zon yapısı için alıştırılmakta ve hesaplanan RE değeri SHALO tabanlı optimizasyon modeline iletilmektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, verilen akış şemasının yalnızca belirli bir zon sayısı için geçerli olduğudur. Bu nedenle, önerilen simölasyon-optimizasyon yaklaşımı Denklem (41) doğrultusunda farklı zon sayıları için ayrı ayrı çalıştırılmalıdır. Her bir ardışık çözüm sonucunda elde edilen veriler değerlendirilmeli ve optimum parametre zon yapısı Denklem (42) esas alınarak belirlenmelidir.



Şekil 10: Önerilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımına ait akış şeması.

4. SAYISAL UYGULAMA

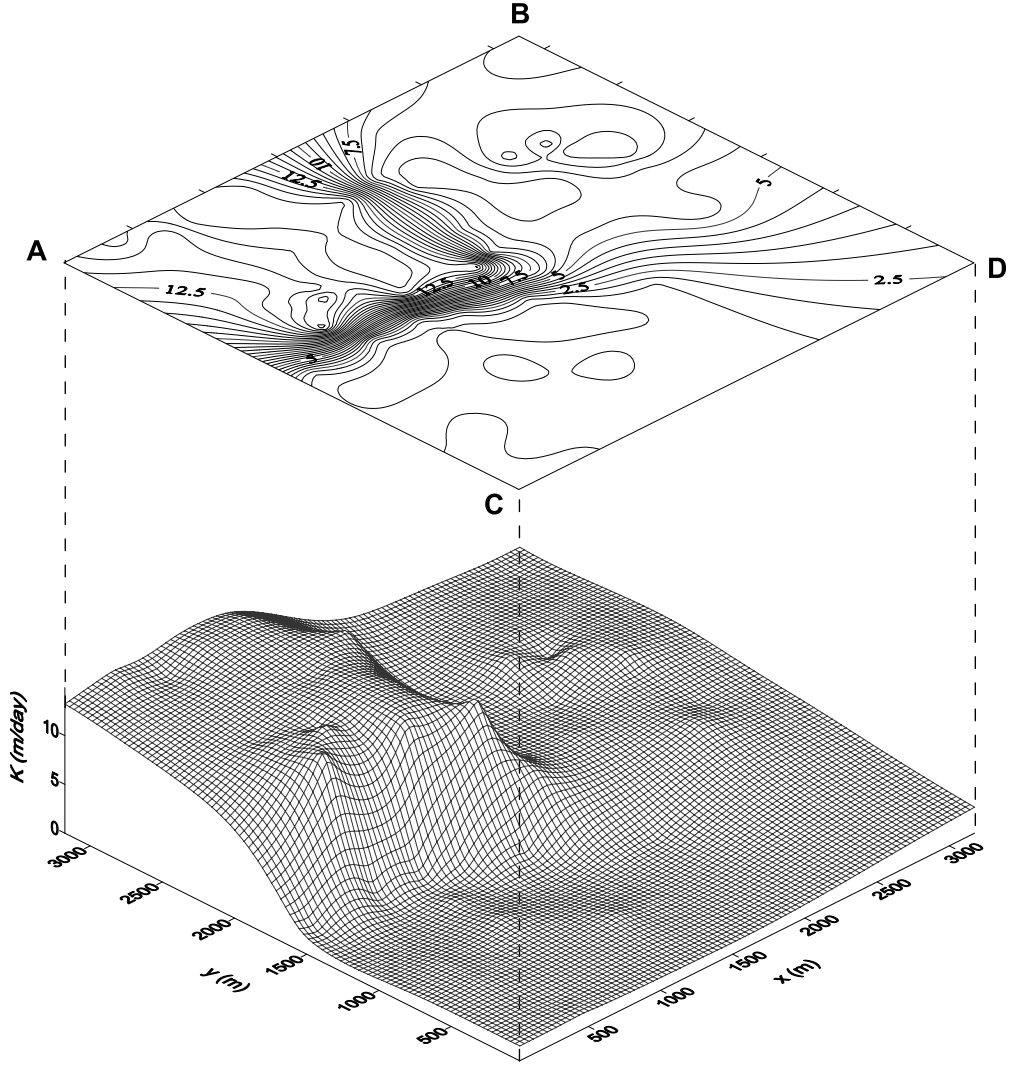
Önerilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımının uygulanabilirliği, literatürde yer alan hipotetik bir basınçlı akifer modeli üzerinde test edilmiştir (Tsai 2002, Tsai ve diğ. 2003^a, Ayvaz 2007). Dikkate alınan bu akifer modelinin geometrisi, sınır koşulları ve pompaj ile gözlem kuyularının konumları Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11: Sayısal uygulama kapsamında dikkate alınan hipotetik akifer modeli.

Şekil 11’den görüleceği üzere, akifer sisteminin sınır koşulları CD kenarı boyunca 100 m sabit hidrolik yük, diğer kenarlar boyunca ise geçirimsiz sınır koşulu olarak kabul edilmiştir. Akifer üzerinde toplam 5 adet pompaj kuyusu bulunmaktadır. Bu kuyuların debileri sırasıyla $W_{1-4} = 4000 \text{ m}^3/\text{gün}$ ve $W_5 = 2000 \text{ m}^3/\text{gün}$ olarak alınmıştır. Modelde, yeraltı suyu akış sürecinin benzeşimi 10 günlük bir süre için yapılmıştır ve bu süre boyunca tüm pompaj kuyularının aynı debi ile aktif bir şekilde çalıştıkları varsayılmıştır. Akifer üzerinde, her günün sonunda hidrolik yük değerlerinin kayıt altına alındığı 7 adet gözlem kuyusu mevcuttur. Zamanla değişen akım durumu dikkate

alındığından, akifer sisteminin özgül depolama katsayısının 5×10^{-6} (m^{-1}) olarak kabul edilmiştir. Akiferin kalınlığının her yerde sabit 40 m olduğu kabul edilmiştir. Bu akifer sistemi için gerçek hidrolik iletkenlik değerlerinin alan bazında değişimi Şekil 12’de sunulmuştur.



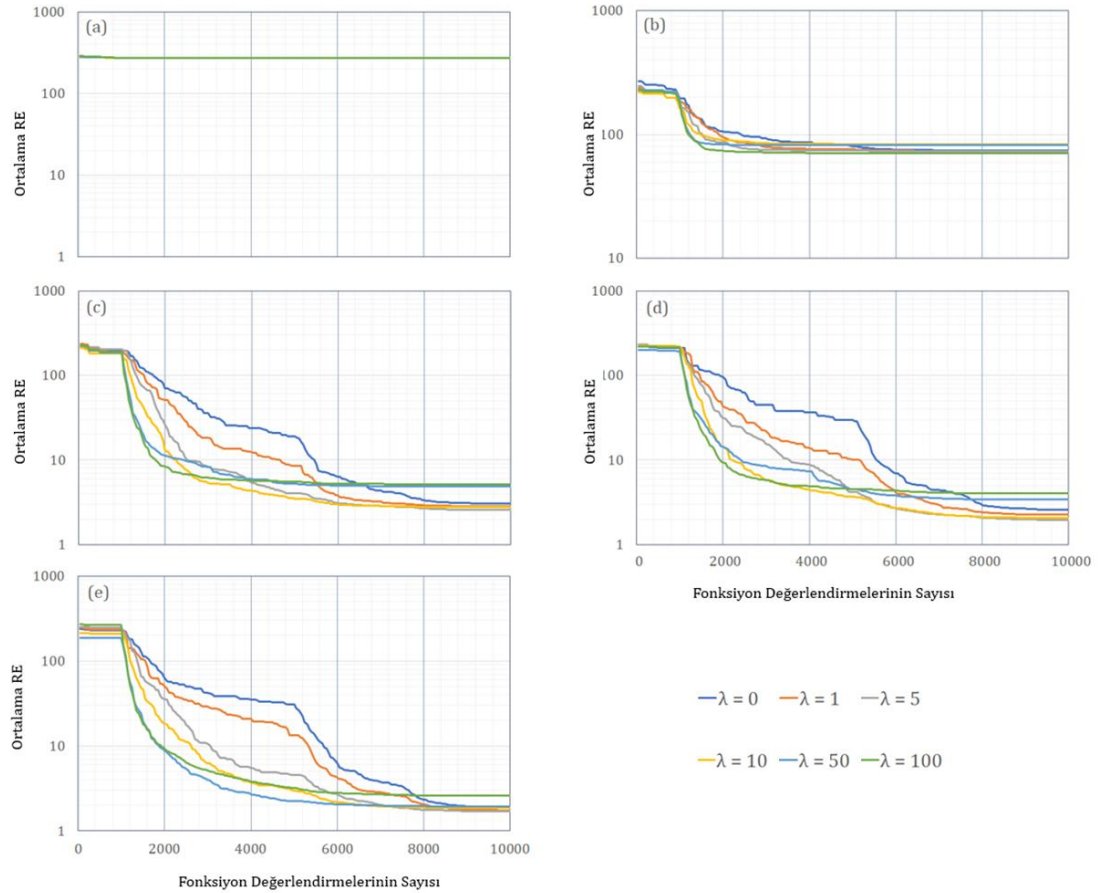
Şekil 12: Akifer modelinin gerçek hidrolik iletkenlik alanı.

Şekil 12’den görüleceği gibi, akifer hidrolik iletkenlik parametrelerinin dağılımı sürekli ve değişken bir yapı göstermektedir. Bu dağılım için belirlenen minimum ve maksimum hidrolik iletkenlik değerleri sırasıyla 0.66 ve 14.92 m/gün olarak verilmiştir. Önerilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımının amacı toplam 70 hidrolik yük gözlem değerini (7 gözlem kuyusunda 10 gün boyunca ölçülen değerler) dikkate alarak Şekil 12’de verilen hidrolik iletkenlik parametre alanını en iyi şekilde temsil eden zon yapısını belirlemektir. Bu aşamada sahada karşılaşılabilecek ölçüm hatalarının

benzeşimini yapabilmek amacıyla tüm hidrolik yük gözlemlerinin Gauss dağılımına uygun hata terimleri eklenerek model performansı değerlendirilmiştir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta söz konusu akifer sistemi için yeraltı suyu akış sürecinin MODFLOW kullanılarak modellenmiş olduğudur. Bu amaçla akifer sistemine ait çözüm bölgesi, 100 m × 100 m boyutlarında sonlu fark grid bloklarına bölünmüştür. MODFLOW modelinin çalıştırılması öncesinde tüm noktasal ve alansal kaynak/yitiklerin tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada ele alınan hipotetik akifer modeli yalnızca pompaj kuyularını içermekte olduğundan, MODFLOW kapsamında yalnızca kuyu paketi (well package) aktif hale getirilmiştir. Geliştirilen MODFLOW tabanlı simülasyon modeli hidrolik iletkenlik zon yapısının oluşturulması için VD zonlama yaklaşımının genel formunu kullanmaktadır. Bu bağlamda, optimizasyon modeli tarafından oluşturulan parametre yapısı MODFLOW'un "Layer Property Flow (LPF)" paketine entegre edilmiştir. Ardından, simülasyon modeli ters parametre yapısı belirleme problemlerini çözmek amacıyla SHALO tabanlı optimizasyon modeli ile entegre edilmiştir.

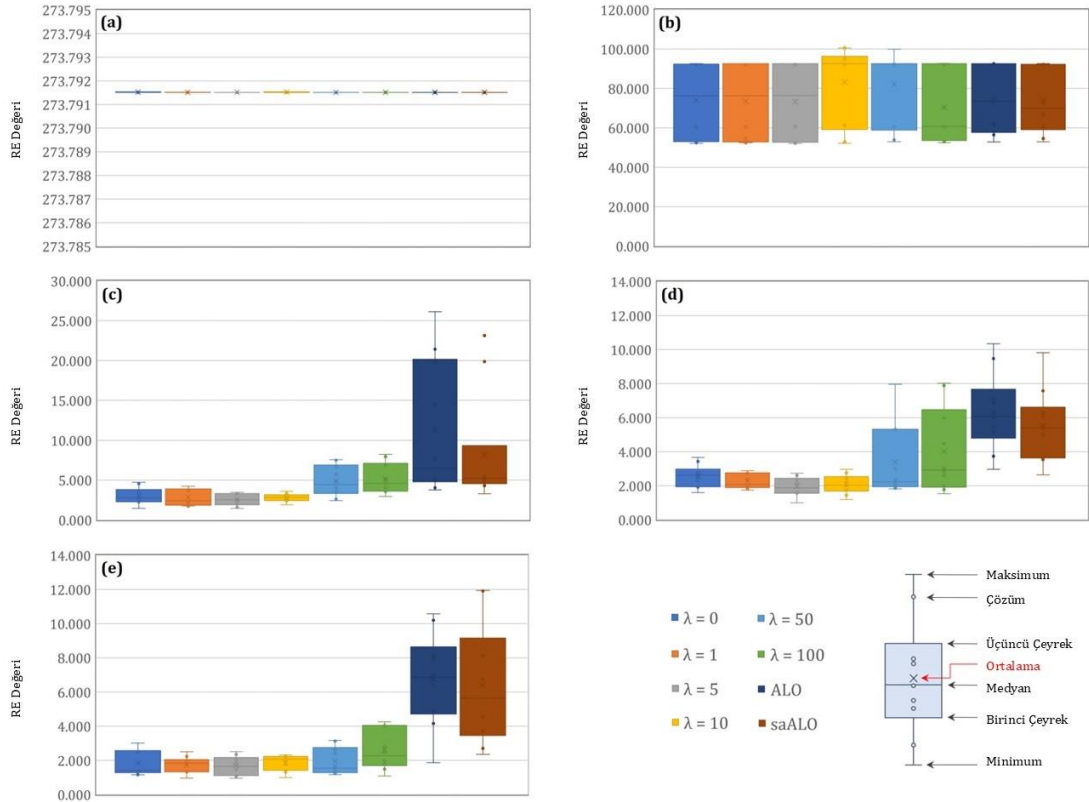
Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, önerilen SHALO yaklaşımı kapsamında orijinal ALO yaklaşımının sınır daraltma prosedürünü iyileştirmek için yeni bir üstel ağırlıklı fonksiyonu (Denklem (28)) önerilmiştir. Bu fonksiyonda, global arama sürecini iyileştirmek amacıyla üstel olarak hesaplanan \tilde{I} değerlerine rastgele değerler eklenmiştir (Şekil 5). Bu rastgele pertürbasyonların büyüklükleri ise λ parametresi kullanılarak ayarlanmaktadır. λ parametresinin çözüm üzerinde etkili bir rolü olduğu göz önüne alınarak model performansını değerlendirmek amacıyla altı farklı λ değeri için çözümler gerçekleştirilmiştir: $\lambda \in [0, 1, 5, 10, 50, 100]$. Ayrıca, rastgele sayıların çözüm üzerindeki etkisini ortadan kaldırmak amacıyla her bir λ değeri için 10 farklı rastgele çekirdek değeri dikkate alınarak çözümler gerçekleştirilmiştir. En iyi λ değerinin belirlenmesinin ardından elde edilen sonuçlar aynı koşullar altında ALO ve saALO yöntemleri ile elde edilen çözümlerle karşılaştırılmıştır. Öte yandan, Ayvaz (2007) ve Tsai ve diğ. (2003^a) tarafından sırasıyla HS ve hibrit GA tabanlı optimizasyon yaklaşımları kullanılarak aynı problemlerin çözülmüş olması nedeniyle bu yöntemlerle elde edilen sonuçlar da değerlendirme kapsamında dikkate alınmıştır. Optimizasyon aşamasında ilgili problem $n = 50$ karınca aslanı ve $\mathcal{T} = 200$ iterasyon sayısı dikkate alınarak çözülmüştür. Bu parametreler, MODFLOW tabanlı simülasyon modelinin 10,000 farklı parametre yapısı için çalıştırılmasına karşılık gelmektedir.

Ayvaz (2007) ve Tsai ve diğ. (2003^a) ile karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmek için optimum hidrolik iletkenlik parametre zon yapısının belirlenmesinde $0.50 \leq \hat{K} \leq 15$ m/gün aralığında parametre sınırları dikkate alınmıştır. Her bir oluşturulan zonun merkez noktalarının alt ve üst sınır değerleri, sonlu fark sütun ve satır indeks değerleri açısından $1 \leq \hat{x}_j, \hat{y}_j \leq 32$ ($j = 1, 2, 3, \dots, n_z$) aralığında seçilmiştir. Benzer şekilde, Minkowski katsayıları için arama $1 \leq p \leq 2$ aralığında gerçekleştirilmiş olup burada 1 değeri Manhattan uzaklığını, 2 değeri ise Öklid uzaklığını temsil etmektedir. Bu tanımlar doğrultusunda geliştirilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımı, her bir farklı λ değeri dikkate alınarak 10 kez çalıştırılmıştır. $\Omega_1 - \Omega_5$ parametre yapıları için yapılan çözümler sonucunda elde edilen ortalama yakınsama grafikleri Şekil 13'te sunulmuştur.



Şekil 13: Her bir farklı λ değeri için ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırması: (a): Ω_1 ; (b): Ω_2 ; (c): Ω_3 ; (d): Ω_4 ; (e): Ω_5 (Bu grafikler 10 farklı çekirdek değeri için elde edilen yakınsama grafiklerinin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır).

Şekil 13'ten görüleceği gibi, zon sayısının 1'den 5'e doğru artması, her bir farklı λ değeri için hesaplanan ortalama RE değerinin azalmasıyla sonuçlanmaktadır. Bu durum beklenen bir sonuçtur ve eklenen ek zonlar sayesinde hidrolik iletkenlik parametre alanının heterojenliğinin daha iyi bir şekilde temsil edilmesiyle açıklanabilir. Teorik olarak, zon sayısı sonsuza yaklaştıkça hesaplanan RE değerinin sifıra yaklaşması beklenir. Ancak, bu durum matematiksel çözüm uzayının boyutuna bağlı olarak PU değerindeki artış nedeniyle gözlenmeyebilir (Tsai ve diğ. 2003^a). SHALO yaklaşımının farklı λ değerleri ve parametre zon yapıları için çalıştırılması sonrasında en iyi λ değeri, elde edilen sonuçların istatistiksel olarak değerlendirilmesiyle belirlenmiştir. Bu değerlendirme kapsamında hazırlanan kutu grafikleri (Box-Whisker) Şekil 14'te sunulmuştur.



Şekil 14: Farklı λ değerleri dikkate alınarak yapılan 10 çözüm için elde edilen kutu (Box-Whisker) grafikleri (a): Ω_1 ; (b): Ω_2 ; (c): Ω_3 ; (d): Ω_4 ; (e): Ω_5 .

Şekil 14'ten görüldüğü üzere, Ω_1 çözümü için farklı rastgele sayı çekirdek değerleri kullanılarak yapılan 10 ayrı çözümde her bir λ değeri için yaklaşık olarak aynı RE sonucuna ulaşılmıştır. Bu beklenen bir durumdur ve akifer sisteminin gerçek parametre alanının yalnızca tek bir hidrolik iletkenlik zonu ile temsil edilmesinden

kaynaklanmaktadır. Ω_1 'e bir zon daha eklenerek oluşturulan Ω_2 çözümünde, 10 farklı çözüm için hesaplanan RE değerlerinde beklendiği üzere bir iyileşme gözlemlenmiştir. Ω_2 çözümü incelendiğinde $\lambda = 0, 1, 5$ ve 100 için benzer sonuçlar elde edilirken $\lambda = 10$ ve $\lambda = 50$ için hafif farklılıkların olduğu dikkat çekmektedir. Ω_3 çözümünde akifer hidrolik iletkenlik dağılımının heterojenliği bir ek zonun daha dahil edilmesiyle daha iyi temsil edilmiştir. Bunun sonucunda Ω_2 çözümüne kıyasla hesaplanan RE değerlerinde önemli iyileşmeler elde edilmiştir. Bu çözüm için $\lambda = 5$ ve $\lambda = 10$ değerlerinin RE sonuçları açısından iyi bir performans gösterdiği görülmüştür. Benzer eğilimler Ω_4 ve Ω_5 çözümleri için de gözlemlenmiştir. İlave bir zonun sisteme dahil edilmesi önceki zon yapısına göre çözüm doğruluğunu artırmıştır. Ancak, bu iyileştirmeler Ω_2 veya Ω_3 kapsamında elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında çok belirgin değildir. Ayrıntılı değerlendirmeler sonucunda tüm parametre zon yapıları için $\lambda = 5$ değeri minimum, maksimum, ortalama ve medyan RE değerleri bakımından en iyi performansı göstermiştir. Bu nedenle, önerilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımının nihai değerlendirmesi her bir parametre zon yapısı için $\lambda = 5$ kullanılarak elde edilen en iyi sonuçlar temel alınarak gerçekleştirilmiştir.

Önerilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımının performansı aynı problemin standart ALO ve geliştirilmiş versiyonu olan saALO ile aynı koşullar altında çözülerek değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme kapsamında aynı rastgele sayı çekirdekleri kullanılarak 10 farklı çözüm gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ortalama yakınsama grafikleri Şekil 13'te kesikli çizgilerle verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere, Ω_1 ve Ω_2 çözümleri için benzer yakınsama eğilimleri gözlenmesine rağmen, $\Omega_3 - \Omega_5$ için SHALO ile elde edilen çözümler son RE değerleri bakımından ALO ve saALO yaklaşımlarına göre daha üstün performans göstermiştir. Bununla beraber, ALO ve saALO kullanılarak gerçekleştirilen 10 farklı çözüme ait detay Şekil 14'te sunulmuştur. Görüleceği gibi, ALO ve saALO kullanılarak Ω_1 ve Ω_2 için SHALO ile benzer eğilimde sonuçlar elde edilirken, $\Omega_3 - \Omega_5$ çözümleri için hem ALO hem de saALO için hesaplanan istatistiklerde önemli sapmalar olduğu dikkat çekmektedir. SHALO ($\lambda = 5$), ALO ve saALO'nun en iyi çözümleri için hesaplanan RE değerleri Tablo 2'de karşılaştırılmıştır.

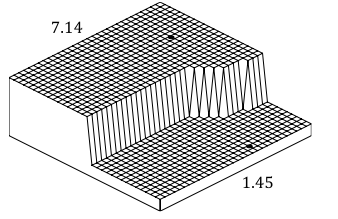
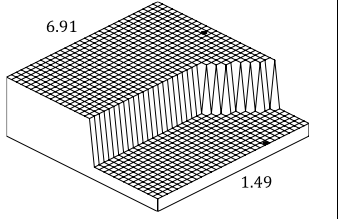
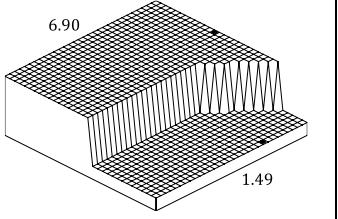
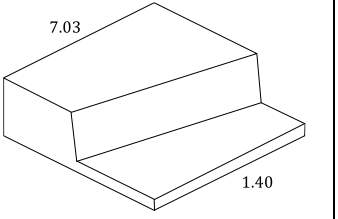
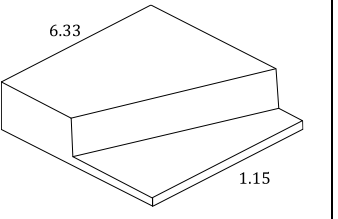
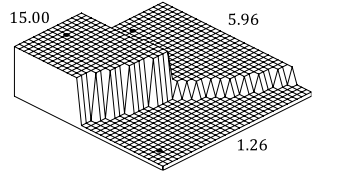
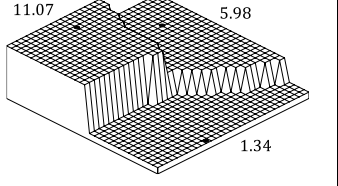
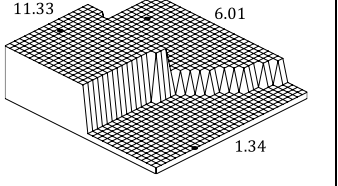
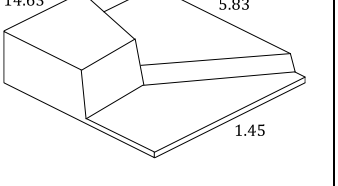
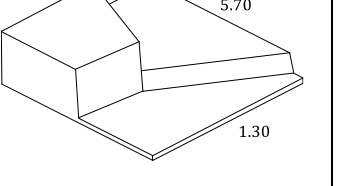
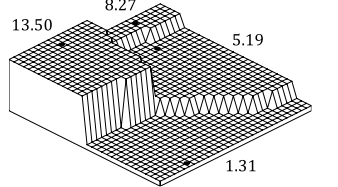
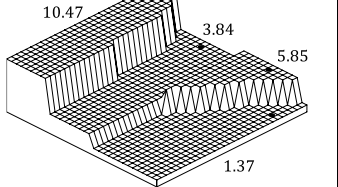
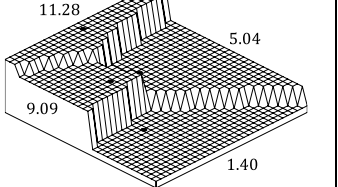
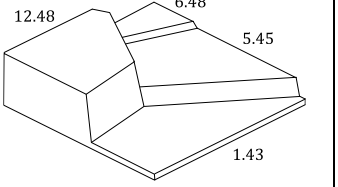
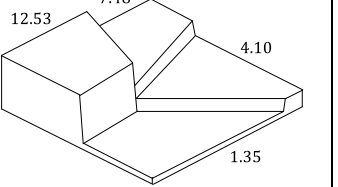
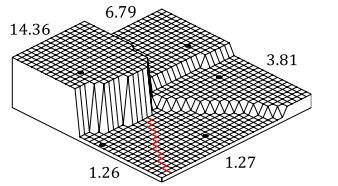
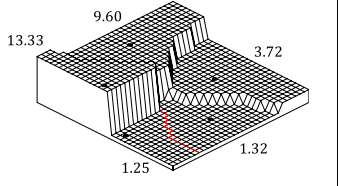
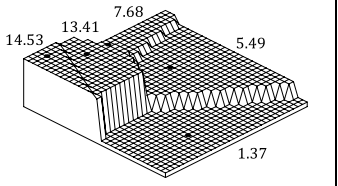
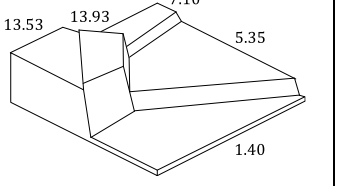
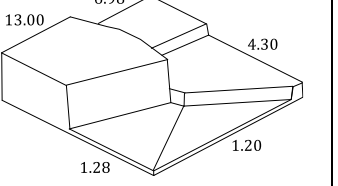
Tablo 2: Farklı optimizasyon yaklaşımları için elde edilen en iyi *RE* değerlerinin karşılaştırılması.

Parametre Yapısı	SHALO	ALO	saALO	HS ¹	Hibrit GA ²
Ω_1	273.79	273.79	273.79	275.95	280.11
Ω_2	52.02	52.85	52.86	60.46	71.60
Ω_3	1.47	3.78	3.30	2.50	3.55
Ω_4	1.00	2.97	2.64	2.33	2.62
Ω_5	0.95	1.86	2.36	2.31	2.61

¹ Ayvaz (2007) Armoni Araştırması (HS) sonuçları

² Tsai ve diğ. (2003^a) tarafından geliştirilen global-lokal Genetik Algoritma (Hibrit GA) sonuçları

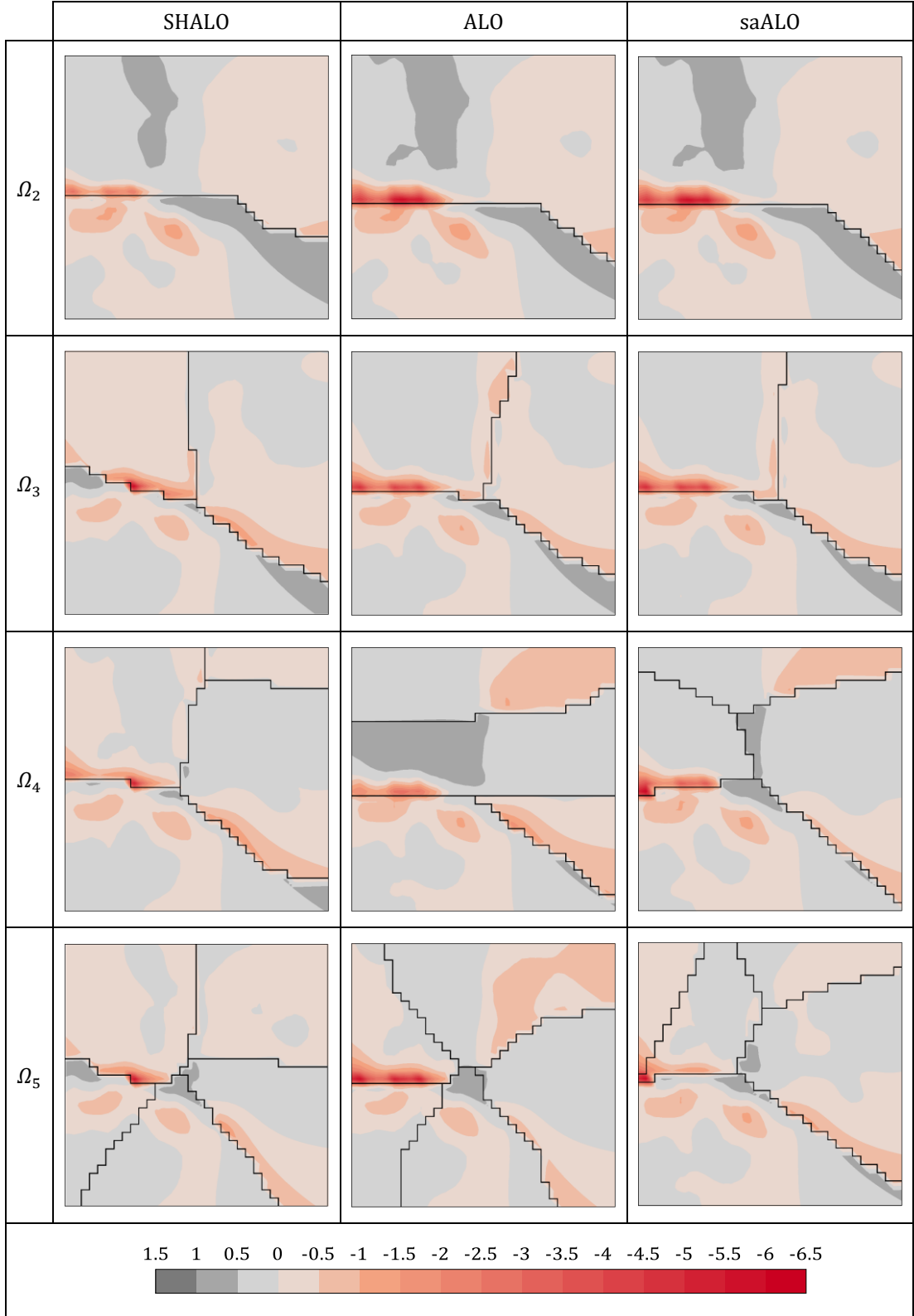
Tablo 2’den görüldüğü üzere, Ω_1 çözümü için SHALO, ALO ve saALO yaklaşımları aynı *RE* değeri olan 273.79’u vermiştir. Bu durum, akifer sisteminin hidrolik iletkenlik alanının yalnızca tek bir zonla temsil edilmesinden kaynaklanmaktadır. Ancak, diğer zon yapıları ($\Omega_2 - \Omega_5$) için SHALO’nun ALO ve saALO’ya kıyasla daha düşük *RE* değerleri sağladığı görülmüştür. Parametre zon sayısının 1’den 2’ye ve ardından 2’den 3’e çıkarılması sonucunda *RE* değerlerinde önemli iyileşmeler elde edilmiştir. Ancak, bu iyileşmeler Ω_3 zon yapısından sonra belirgin şekilde azalmaktadır. Tablo 2’de ayrıca Ayvaz (2007) ile Tsai ve diğ. (2003^a) tarafından aynı problem için elde edilen *RE* değerleri de sunulmuştur. İlgili çalışmalarda aynı problem sırasıyla HS ve hibrit GA tabanlı optimizasyon yaklaşımlarıyla çözülmüş olup bu sonuçların genel olarak önerilen çalışmadaki sonuçlarla uyumlu olduğu gözlenmiştir. Tablo 2’deki sonuçlar incelendiğinde, önerilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımının diğer yöntemlere kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu çözümler kapsamında belirlenen hidrolik iletkenlik parametre yapıları (merkez noktaları ve hidrolik iletkenlik değerleri ile) Şekil 15’te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

	SHALO	ALO	saALO	HS (Ayvaz 2007)	Hibrit GA (Tsai ve diğ. 2003 ^a)
Ω_2					
Ω_3					
Ω_4					
Ω_5					

Şekil 15: Farklı optimizasyon yaklaşımları için elde edilen parametre yapılarının karşılaştırılması (siyah noktalar zon merkezlerini temsil etmektedir).

Şekil 15'ten görülebileceği üzere, Ω_2 yapısı için SHALO, ALO ve saALO yaklaşımlarıyla oldukça benzer zon yapıları elde edilmiştir. Her ne kadar ALO ve saALO ile belirlenen hidrolik iletkenlik değerleri genel olarak birbirine yakın olsa da SHALO ile elde edilen değerlerde hafif değişiklikler gözlenmiştir. Belirlenen zon yapıları HS ve hibrit GA yöntemleri ile karşılaştırıldığında Ω_2 yapısında her iki zonu kesişim bölgelerinde farklılıklar olduğu dikkat çekmektedir. Bu farklılığın temel nedeni SHALO, ALO ve saALO kapsamında Minkowski uzaklığı, HS ve hibrit GA'da ise Öklid uzaklığı ölçütleri kullanılarak zonlama işleminin yapılmasıdır. Ω_3 zon yapısında, SHALO, ALO ve saALO ile belirlenen zon yapılarının HS ve hibrit GA yaklaşımlarındaki zon yapılarıyla benzerlik gösterdiği gözlenmiştir. Ω_4 yapısında ise, SHALO ile belirlenen parametre yapısı HS ile oldukça benzer şekillere sahipken ALO ve saALO ile elde edilen zon yapılarının şekillerinde farklılıklar olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, ALO ve saALO çözümlerinde hesaplanan RE değerlerinin diğer yaklaşımlara kıyasla daha kötü olmasıyla da ilişkilidir. Ω_5 zon yapısında ise SHALO ile belirlenen zon yapısının hibrit GA yaklaşımıyla oldukça iyi bir uyum gösterdiği, saALO yaklaşımı ile belirlenen çözümün ise HS yöntemiyle oldukça benzer olduğu görülmüştür.

SHALO, ALO ve saALO yaklaşımları ile elde edilen hidrolik iletkenlik parametre yapılarının, Şekil 12'de verilen gerçek hidrolik iletkenlik parametre dağılımıyla olan farklılıklarını değerlendirmek amacıyla MODFLOW modelindeki her bir sonlu fark grid bloğu için hesaplanan hidrolik iletkenlik değerleri ile gerçek değerler arasında rölatif hata değerleri hesaplanmıştır. Bu hata değerlerinin alansal dağılımı ise Şekil 16'da görselleştirilmiştir.



Şekil 16: Her bir zon yapısı için belirlenen hidrolik iletkenlik değerleri ile gerçek hidrolik iletkenlik değerleri arasında hesaplanan rölatif hata değerlerinin karşılaştırılması (Siyah çizgiler zon kesişim bölgelerini göstermektedir).

Şekil 16'dan görüldüğü üzere, Ω_2 için geliştirilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımı, akifer bölgesinin kuzeybatısındaki hidrolik iletkenlik değerlerini genellikle gerçek değerlerden düşük olarak hesaplamıştır. Benzer şekilde, akiferin kuzeydoğu bölgesinde belirlenen değerler gerçek hidrolik iletkenlik değerlerinden genellikle daha yüksek çıkmıştır. Bu durum akifer parametre alanının kuzeybatısından kuzeydoğusuna doğru gerçek hidrolik iletkenlik değerlerinin azalmasından kaynaklandığı için beklenen bir sonuçtur. Ω_2 'de bu bölgelerin tek bir hidrolik iletkenlik zonu ile temsil edilmesi bu sonuçların doğal bir davranış olarak değerlendirilmesine yol açmaktadır. Benzer eğilimlerin ALO ve saALO yaklaşımları için de Ω_2 çözümünde gözlenmiştir. Akiferin alt bölümlerine odaklanıldığında özellikle batı tarafındaki zon kesişim bölgelerinde yüksek rölatif hata değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bu hata değerleri, ALO ve saALO yaklaşımlarına kıyasla SHALO'da daha düşüktür. İlave zonların dahil edilmesiyle birlikte SHALO kapsamında elde edilen parametre yapıları için hesaplanan rölatif hata değerlerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Ancak, özellikle yüksek ve düşük hidrolik iletkenlik zonlarının kesişim bölgelerinde (özellikle batı tarafında) hala bazı hata değerlerinin bulunduğu görülmektedir. Bu durum akiferin kuzeybatısından güneybatısına doğru gidildikçe gerçek hidrolik iletkenlik değerlerinin önemli ölçüde değişmesinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, elde edilen parametre zon yapıları karşılaştırıldığında önerilen SHALO yaklaşımının ALO ve saALO yaklaşımlarına kıyasla daha düşük hata dağılımı ile ilgili problemi daha başarılı bir şekilde çözdüğü görülmüştür.

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, bu çalışma kapsamında kullanılan ALO, saALO ve SHALO yaklaşımlarında her bir sonlu fark hesap noktası ile zon merkez noktaları arasındaki mesafe Minkowski uzaklık ölçütü dikkate alınarak hesaplanmıştır. Buna karşın, sonuçların karşılaştırıldığı HS ve hibrit GA yaklaşımları kapsamında aynı işlem Öklid uzaklığı dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Minkowski uzaklık ölçütü ile zonlara ayırma işleminin yapılabilmesi amacıyla ilgili ölçüt kapsamında sunulan p değeri de diğer değişkenlerle (zon merkez noktalarının konumları ile her bir zon içindeki homojen hidrolik iletkenlik değerleri) birlikte bir karar değişkeni olarak kullanılmıştır. Bu bağlamda, farklı yaklaşımlar için belirlenen p değerleri Tablo 3'te karşılaştırılmıştır.

Tablo 3: Farklı yaklaşımları için belirlenen Minkowski katsayılarının (p) karşılaştırılması.

Parametre Yapısı	SHALO	ALO	saALO	HS ¹	Hibrit GA ²
Ω_1	-	-	-	-	-
Ω_2	1.127	1.106	1.049		
Ω_3	1.443	1.506	1.432	2	2
Ω_4	1.223	1.355	1.692		
Ω_5	1.668	1.227	1.835		

¹ Ayvaz (2007) Armoni Araştırması (HS) sonuçları

² Tsai ve diğ. (2003^a) tarafından geliştirilen global-lokal Genetik Algoritma (Hibrit GA) sonuçları

Tablo 3'ten görülebileceği gibi, HS ve hibrit GA yaklaşımları için p değeri sonlu fark hesap noktaları ile zon merkez noktaları arasındaki mesafelerin Öklid uzaklığı kullanılarak hesaplanması nedeniyle 2 olarak alınmıştır. Öte yandan, SHALO'daki farklı parametre yapıları için p değeri (1.127, 1.668) aralığında belirlenmiştir. Benzer şekilde, ALO ve saALO yaklaşımları kapsamında p değerleri sırasıyla (1.106, 1.506) ve (1.049, 1.835) aralıklarında belirlenmiştir. Tablo 2 ve 3'teki sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde hidrolik iletkenlik parametre alanındaki heterojenliğin Minkowski uzaklık ölçütü kullanılarak daha etkili bir şekilde temsil edilebileceği sonucuna varılabilir. Daha önce belirtildiği gibi bu çalışma kapsamında Şekil 12'de verilen gerçek hidrolik iletkenlik parametre alanını en iyi temsil eden optimum parametre zon yapısı RE , PU ve SD ölçütleri (Denklem (42)) verdiği sonuçlar değerlendirilerek belirlenmektedir. Bu ölçütlerden PU , belirlenen parametre değerleri dikkate alınarak hesaplanan kovaryans matrisinin izinin (trace) alınmasıyla hesaplanmaktadır. Bu doğrultuda, Tablo 2'de verilen en iyi çözümler için hesaplanan PU değerleri Tablo 4'te karşılaştırılmıştır.

Tablo 4: Farklı yaklaşımlar için hesaplanan PU değerlerinin karşılaştırılması ($[(\times 10^4)]$).

Parametre Yapısı	SHALO ³	ALO ³	saALO ³	HS ^{1,3}	Hibrit GA ^{2,3}
Ω_1	1.249	1.249	1.249	9.660	5.830
Ω_2	1.772	1.709	1.712	9.230	5.460
Ω_3	5.126	3.066	3.134	3.240	17.460
Ω_4	3.113	0.945	10.980	13.800	18.670
Ω_5	3.160	42.259	283.618	73.420	61.520

¹ Ayvaz (2007) Armoni Araştırması (HS) sonuçları

² Tsai ve diğ. (2003^a) tarafından geliştirilen global-lokal Genetik Algoritma (Hibrit GA) sonuçları

³ Bu değerler, Denklem (8)'de verilen kovaryans matrisinin izi alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 4'ten görüldüğü gibi, her parametre yapısı için SHALO ile hesaplanan *PU* değerleri benzer büyüklüklerde olup bu değerler merteye olarak birbirine yakındır. Ancak, ALO ve saALO ile yapılan çözümlerde zon sayısının 4'ten 5'e çıkarılmasıyla hesaplanan *PU* değerlerinde ani bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum sırasıyla HS ve hibrit GA yaklaşımlarıyla elde edilen sonuçlarda da benzer şekilde görülmüştür. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta hesaplanan *PU* değerlerindeki ani artışın belirlenen parametrelerin güvenilirliğinin azalmasına ve aşırı uyum (overfitting) sorununa yol açabileceğidir (Tsai ve diğ. 2003^a). Bu tür bir durumda parametre yapısı belirleme süreci durdurulmalı ve bir önceki zon yapısı en iyi yapı olarak seçilmelidir. Bu tanıma dayanarak, ALO ve saALO için Ω_4 çözümü en iyi parametre yapısı olarak kabul edilebilir. Benzer şekilde, Tsai ve diğ. (2003^a) ile Ayvaz (2007), Ω_4 çözümünü en iyi parametre yapısı olarak seçmiştir. Hesaplanan *PU* değerlerinde ani bir artış gözlemlenmediği için SHALO kapsamında Ω_4 veya Ω_5 kapsamında belirlenen parametre yapıları Tablo 1'de sunulan *RE* değerleri de dikkate alınarak en iyi parametre yapısı olarak seçilebilir.

Optimum parametre yapısının belirlenmesi sürecinde dikkate alınan son analiz ardışık olarak elde edilen parametre yapıları göz önüne alınarak hesaplanan *SD* ölçütlerine yönelik olarak gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, ardışık parametre yapıları için akifer sisteminin hidrolik tepkisini değerlendirmeye olanak sağladığı için büyük bir önem taşımaktadır. Bu kapsamda, farklı yaklaşımlar ile hesaplanan *SD* değerleri Tablo 5'te karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlardan anlaşılacağı üzere zon sayısının artması her bir yaklaşım için hesaplanan *SD* değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Daha önce de belirtildiği gibi ardışık olarak belirlenen iki parametre yapısı için akifer sisteminin hidrolik tepkileri arasındaki fark önceden tanımlanmış bir kriterden küçükse gerçek parametre alanını temsil etmek için başka bir parametre yapısının belirlenmesi gerekli değildir. Bu bağlamda SHALO için Ω_3 veya Ω_4 yapıları, $\Omega_3 - \Omega_4$ ($0.131 < 2\eta$) ve $\Omega_4 - \Omega_5$ ($0.080 < 2\eta$) arasında hesaplanan *SD* değerlerinin ilgili değişim kriterini ($\eta = 0.100$) sağladığından en iyi zon yapıları olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, Tablo 4'e göre SHALO için aniden artan bir *PU* değerinin bulunmaması bu yapıların parametre belirsizliği koşulunu da sağladığını göstermektedir. ALO için Ω_4 yapısı, $\Omega_4 - \Omega_5$ ($0.177 < 2\eta$) arasında hesaplanan *SD* değeri ve *PU* koşulu dikkate alındığında en uygun zon yapısı olarak seçilebilir. saALO açısından değerlendirildiğinde ise Ω_3 veya Ω_4 yapıları en iyi seçeneklerdir. Bunun

nedeni, $\Omega_3 - \Omega_4$ ($0.181 < 2\eta$) ve $\Omega_4 - \Omega_5$ ($0.099 < 2\eta$) arasındaki çözümler için değişim kriterinin sağlanmış olduğudur. Ayrıca, her iki çözüm için *PU* koşulu da aşırı uyumun (overfitting) önlenmesi aşamasında sağlanmaktadır.

Tablo 5: Farklı yaklaşımları için hesaplanan *SD* değerlerinin karşılaştırılması.

Yapı	SHALO	ALO	saALO	HS ¹	Hibrit GA ²
Ω_1	-	-	-	-	-
Ω_2	1.721	1.730	1.727	0.613	0.460
Ω_3	0.840	0.789	0.767	0.451	0.290
Ω_4	0.131	0.278	0.181	0.107	0.051
Ω_5	0.080	0.177	0.099	0.102	0.050

¹ Ayvaz (2007) Armoni Araştırması (HS) sonuçları

² Tsai ve diğ. (2003^a) tarafından geliştirilen global-lokal Genetik Algoritma (Hibrit GA) sonuçları

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ters modelleme yaklaşımına dayanarak yeraltı suyu parametre yapısı belirleme problemlerini çözmek amacıyla yeni bir simülasyon-optimizasyon yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşımın simülasyon aşamasında akifer sistemine ait hidrolik iletkenlik parametre alanı genel formdaki VD tabanlı zonlama yöntemi kullanılarak sonlu sayıda homojen hidrolik iletkenlik zonuna ayrılmıştır. Bu zon yapısı yeraltı suyu akış sürecini modellemek için kullanılan MODFLOW simülasyon modeline entegre edilmiştir. Geliştirilen simülasyon modeli ardından sezgisel SHALO yaklaşımının kullanıldığı bir optimizasyon modeline entegre edilmiştir. SHALO tabanlı bu optimizasyon modelinin temel hedefi gözlem kuyularında ölçülen hidrolik yük değerleri ile MODFLOW simülasyon modeliyle hesaplanan değerler arasındaki farkı minimize ederek akiferin hidrolik iletkenlik parametre yapılarını doğru bir şekilde belirlemektir. Önerilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımının uygulanabilirliği literatürde verilen hipotetik bir akifer modeli üzerinde farklı koşullar için test edilmiştir. Bununla beraber SHALO yaklaşımının performansı ilgili problemin aynı koşullar altında standart ALO, saALO, HS ve hibrit GA yaklaşımları kullanılarak çözülmesiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular dikkate alınarak aşağıda verilen sonuç ve önerilere ulaşılabilir:

Literatürde sunulan diğer çalışmalardan farklı olarak geliştirilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımında sonlu fark hesap noktaları ile zon merkez noktaları arasındaki mesafeler Minkowski uzaklığı kullanılarak hesaplanmıştır. Bu bağlamda Minkowski katsayısının farklı değerleri sistematik bir şekilde değiştirilerek tüm olası zonlama alternatifleri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu süreçte her bir zonun merkez noktalarının akifer üzerindeki konumları bu zonlar içerisindeki homojen hidrolik iletkenlik değerleri ve Minkowski katsayısı optimizasyon modelinin karar değişkenleri olarak belirlenmiştir. Bu modelleme yaklaşımı gerçek hidrolik iletkenlik alanındaki heterojenliğin daha doğru ve etkili bir şekilde temsil edilmesine olanak tanımaktadır.

Önerilen SHALO yaklaşımı standart ALO'nun iki temel iyileştirme dikkate alınarak geliştirilmiş bir versiyonudur. İlk iyileştirme sınır daraltma sürecindeki anlık

değişimleri ortadan kaldırmak ve rastgeleliğin çözüm üzerindeki etkisini daha etkili bir şekilde değerlendirmek için üstel bir fonksiyonun kullanılmasını içerir. İkinci iyileştirme ise rastgele yürüyüş vektörünün ölçeklenmesi ve karıştırılması yoluyla standart ALO'ya kıyasla çeşitliliği artırmayı hedeflemektedir. (Bu süreçte, SHALO yaklaşımı özellikle erken iterasyonlarda NaN değişken değerleri üretebilir; bu durum ilgili değişkenlerin tanımlı çözüm uzayında rastgele yeniden üretilmesiyle giderilmektedir.) Bu iki iyileştirme ve değişken Minkowski katsayısının kullanımı çözüm doğruluğunu önemli ölçüde artırmıştır. Sonuç olarak SHALO tabanlı yaklaşım ile HS ve hibrit GA tabanlı çözüm yaklaşımlarına kıyasla daha iyi amaç fonksiyonu değerleri elde edilebilmiştir. Ayrıca, bu sonuçlar daha az iterasyonla elde edilmiştir. Örneğin, SHALO için maksimum amaç fonksiyonu değerlendirme sayısı 10,000 olarak belirlenirken HS ve hibrit GA yaklaşımlarında bu sayı 50,000 olarak kullanılmıştır. Bu bulgular, SHALO'nun genel VD zonlama yaklaşımlarıyla entegrasyonu sayesinde daha kısa bilgi-işlem sürelerinde daha doğru sonuçlar elde edilebileceğini göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında, akifer modeline ait sayısal yeraltı suyu akış sürecinin sayısal benzeşimi MODFLOW modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önceki çalışmalarda aynı problem çözüm alanının 64×64 boyutlarında sonlu fark grid bloklarına ayrılması ile çözülmüştür. Ancak, bu çalışmada SHALO yaklaşımının farklı rastgele pertürbasyonlar ve rastgele çekirdek değerleri için performansı istatistiksel olarak değerlendirildiğinden simülasyon süresini minimumda tutmak amacıyla çözüm alanı 32×32 boyutlarında grid bloklarına ayrılarak ilgili problem çözülmüştür. Simülasyon-Optimizasyon sürecinde dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri SHALO kapsamında amaç fonksiyonu hesabında kullanılan tüm hidrolik yük gözlemlerinin Şekil 12'de verilen gerçek hidrolik iletkenlik alanı kullanılarak MODFLOW'un çalıştırılmasıyla üretilmiş olduğudur. Bu aşamanın ardından belirlenen bu gözlem değerlerine sahadaki ölçüm hatalarını yansıtabilmek amacıyla Gauss dağılımına uygun hata terimleri eklenmiştir. Eklenen hata değerlerinin literatürde kullanılan değerlerden farklı olması nedeniyle özellikle Ω_1 parametre yapısı için elde edilen nihai amaç fonksiyonu değerlerinde literatürde verilenlere göre küçük farklılıklar gözlenmiştir.

Standart ALO yaklaşımı ile bir optimizasyon problemi çözülebilmesi için yalnızca bir çözüm parametresinin (popülasyon sayısı) modele girilmesi gerekmektedir. Bu, daha fazla çözüm parametresine sahip diğer sezgisel optimizasyon yaklaşımlarına kıyasla önemli bir avantajdır. SHALO yaklaşımında ise popülasyon sayısına ek olarak bir parametre daha (λ) modele girilmelidir. Bu parametre sınır daraltma süreci sırasında rastgele pertürbasyonların çözüm üzerindeki etkisini ayarlamak için kullanılmaktadır. Bu rastgele pertürbasyonların büyüklüğü optimizasyon sürecindeki yakınsama davranışını etkileyebileceği için önerilen yaklaşımın performansı farklı λ değerleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar $\lambda = 5$ için belirlenen çözümün diğer alternatiflere kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ancak, bu parametre değeri probleme bağlı olarak değişebileceğinden önerilen yaklaşımın performansının farklı λ değerleri için analiz edilmesi önerilmektedir.

SHALO için en iyi λ değeri belirlendikten sonra, önerilen yaklaşımın performansı aynı problem aynı koşullar altında ALO ve saALO yaklaşımlarıyla çözümlenerek değerlendirilmiştir. Ayrıca, tüm sonuçlar HS ve hibrit GA tabanlı çözüm yaklaşımlarıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Her bir yaklaşım 1'den 5'e kadar farklı zon sayıları ile çalıştırılmış ve elde edilen en iyi sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, SHALO tabanlı yaklaşımın hesaplanan *RE* değerleri bakımından daha etkili sonuçlar üretebildiğini göstermektedir. Bunun yanı sıra SHALO tabanlı yaklaşımda her bir zon yapısı için benzer *PU* değerleri elde edilmiştir. Buna karşın, diğer yaklaşımlarda *PU* değerlerinde ani artışlar gözlemlenmiştir. Bu durum, SHALO'nun daha az belirsizlik içeren parametreler elde ettiğini ve özellikle Ω_4 ve Ω_5 parametre zon yapıları için daha güvenilir parametre yapıları oluşturduğunu ortaya koymuştur.

Parametre yapısı belirleme sürecinin performansını değerlendirmek için belirlenen tüm hidrolik iletkenlik parametre zon yapıları gerçek hidrolik iletkenlik değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma gerçek ve hesaplanan hidrolik iletkenlik değerleri arasındaki rölatif hata değerlerinin hesaplanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçları zon sayısının artmasıyla rölatif hata değerlerinin azaldığını göstermiştir. Bununla birlikte, yüksek ve düşük hidrolik iletkenlik değerlerine sahip zonların kesişim bölgelerinde hata yığılmalarının devam

ettiği gözlenmiştir. Bu tür bölgelerdeki hata değerlerinin akifer sistemi üzerinde ilave gözlem kuyularının yerleştirilmesiyle azaltılabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen yaklaşımın performansı literatürde sunulan hipotetik bir akifer modeli üzerinde test edilmiştir. Modelde yeraltı suyu akış sürecinin MODFLOW ile benzeşiminde akifer parametrelerinde ve sınır koşullarında herhangi bir belirsizlik bulunmadığı varsayılmıştır. Ancak, gerçek modelleme problemlerinde bu parametrelerdeki belirsizliklerin dikkate alınması büyük önem taşımaktadır. Pratikte en sık karşılaşılan kısıtlamalardan biri akifer sisteminin hidrolik davranışını doğru bir şekilde temsil eden gözlem verilerinin eksik olmasıdır. Bu tür eksiklikler belirlenen parametre yapılarında belirsizliklere yol açabilir. Benzer şekilde, noktasal veya alansal kaynak/yitik terimleriyle ilgili temel özelliklerin (örneğin, sayıları, konumları, etkileri ve süreleri) eksik olması durumunda belirlenen parametre zon yapılarında da belirsizlikler oluşabilir. Bu nedenle önerilen yaklaşımın pratik problemlere uygulanması sırasında bu tür kısıtlamaların dikkate alınması önerilmektedir.

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, bu çalışmada yeraltı suyu akış süreci sonlu fark tabanlı bir yeraltı suyu simülasyon modeli olan MODFLOW kullanılarak modellenmiştir. Ancak, önerilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımı genel bir yapıya sahip olduğundan farklı koşullar altında yeraltı suyu akış sürecinin sayısal benzeşimi için farklı sayısal modelleme yaklaşımlarının kullanılması mümkündür. Aynı durum optimizasyon modeli için de geçerlidir; önerilen yaklaşımda SHALO yerine başka bir sezgisel optimizasyon yöntemi tercih edilebilir. Bu esneklik önerilen yaklaşımın belirli bir problem tipine bağımlı olmadığını ve ilgili parametrelerin mekânsal dağılımının zonlama yöntemiyle ifade edilebildiği durumlarda çeşitli parametre yapısı belirleme problemlerinin çözümünde uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

6. KAYNAKLAR

Abualigah, L., “Multi-verse optimizer algorithm: a comprehensive survey of its results, variants, and applications”, *Neural Comput. Appl.*, 32, 12381–12401, doi:10.1007/s00521-020-04839-1, (2020).

Abualigah, L., Shehab, M. and Alshinwan, M., “Ant lion optimizer: a comprehensive survey of its variants and applications”, *Arch Comput Methods Eng.*, 28, 1397–1416, doi:10.1007/s11831-020-09420-6, (2021).

Adorio, E.P. and Dilman, U.P., *MVF-Multivariate Test Function Library In C For Unconstrained Global Optimization Methods*, (2005).

Ali, E.S., Abd Elazim, S.M. and Abdelaziz, A.Y., “Ant Lion Optimization Algorithm for Renewable Distributed Generations”, *Energy*, 116, 445–458, doi:10.1016/J.ENERGY.2016.09.104, (2016).

Ali, E.S., Abd Elazim, S.M. and Abdelaziz, A.Y., “Ant Lion Optimization Algorithm for optimal location and sizing of renewable distributed generations”, *Renew. Energy*, 101, 1311–1324, doi:10.1016/J.RENENE.2016.09.023, (2017).

Ayvaz, M.T., “Simultaneous determination of aquifer parameters and zone structures with fuzzy c-means clustering and meta-heuristic harmony search algorithm”, *Adv. Water Resour.*, 30, 2326–2338, doi: 10.1016/J.ADVWATRES.2007.05.009, (2007).

Ayvaz, M.T. and Elci, A., “Simultaneous estimation of groundwater recharge rates, associated zone structures, and hydraulic conductivity values using fuzzy c-means clustering and harmony search optimisation algorithm: a case study of the Tahtali watershed”, *IAHS-AISH Publication*, 3–11, (2012).

Ayvaz, M.T., Karahan, H. and Aral, M.M., “Aquifer parameter and zone structure estimation using kernel-based fuzzy c-means clustering and genetic algorithm” *J. Hydrol.*, 343, 240–253, doi:10.1016/J.JHYDROL.2007.06.018, (2007).

Banadkooki, F.B., Ehteram, M., Ahmed, A.N., Teo, F.Y., Ebrahimi, M., Fai, C.M., Huang, Y.F. and El-Shafie, A., “Suspended sediment load prediction using artificial neural network and ant lion optimization algorithm”, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 27, 38094–38116, doi:10.1007/S11356-020-09876-W/FIGURES/13, (2020).

Battula, V. and Ambati, S., “Evaluation of Images Using Various Distance Metrics”, *Int. J. Eng. Res. Appl.*, 8, 29–34, (2018).

Bear, J., “*Hydraulics of Groundwater*”, Dover Publications, Inc., Mineola, New York (2007).

Boussaïd, I., Lepagnot, J. and Siarry, P., “A survey on optimization metaheuristics”, *Inf. Sci.*, 237, 82–117, doi:10.1016/J.INS.2013.02.041, (2013).

Chaitanya, S.N.V.S.K., Rao, B.V. and Bakkiyaraj, R.A., “Solution of an Optimal Reactive Power Dispatch problem: An application of Modified Ant Lion Optimizer”, *Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, doi:10.1109/AUPEC52110.2021.9597756, (2021).

Chandrasekaran, G., Karthikeyan, P.R., Kumar, N.S. and Kumarasamy, V., “Test scheduling of System-on-Chip using Dragonfly and Ant Lion optimization algorithms”, *J. Intell. Fuzzy Syst.*, 40, 4905–4917, doi:10.3233/JIFS-201691, (2021).

- Chen, S.-C., Huang, W.-C., Hsueh, M.-H., Pan, C.-Y. and Chang, C.-H., “A Novel Exponential-Weighted Method of the Antlion Optimization Algorithm for Improving the Convergence Rate”, *Processes*, 10, 1413, doi:10.3390/PR10071413, (2022).
- Chen, J., Qi, X., Chen, L., Chen, F. and Cheng, G., “Quantum-inspired ant lion optimized hybrid k-means for cluster analysis and intrusion detection”, *Knowledge-Based Syst.*, 203, 106167, doi:10.1016/J.KNOSYS.2020.106167, (2020).
- Das A., “Optimal channel cross section with composite roughness”, *J. Irrig. Drain Eng.*, 126, 68–72, doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:1(68), (2000).
- de Villiers, N. and Glasser, D., “A continuation method for nonlinear regression”, *SIAM J. Numer. Anal.*, 18, 1139–1154, doi:10.1137/0718079, (1981).
- Dinkar, S.K. and Deep, K., “Opposition based Laplacian Ant Lion Optimizer”, *J. Comput. Sci.*, 23, 71–90, doi:10.1016/J.JOCS.2017.10.007, (2017).
- Dorigo, M., Birattari, M. and Stutzle, T., “Ant colony optimization”, *IEEE Comput. Intell. Mag.*, 1, 28–39, doi:10.1109/MCI.2006.329691, (2006).
- Dubey, H.M., Pandit, M. and Panigrahi, B.K., “Ant lion optimization for short-term wind integrated hydrothermal power generation scheduling”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 83, 158–174, doi:10.1016/J.IJEPES.2016.03.057, (2016).
- Durgut, P.G., Tozak, M.B. and Ayvaz, M.T., “SHuffled Ant Lion Optimization approach with an exponentially weighted random walk strategy”, *Neural Comput. Appl.*, doi: 10.1007/s00521-024-09566-5(0123456789,-volV)(0123456789,-volV), (2024).
- El Bakrawy, L.M., Akif Cifci, M., Kausar, S., Hussain, S., Islam, A., Alatas, B. and Desuky, A.S., “A Modified Ant Lion Optimization Method and Its Application for Instance Reduction Problem in Balanced and Imbalanced Data”, *Axioms*, 11, 95, doi:10.3390/AXIOMS11030095, (2022).
- Elen, A. and Avuçlu, E., “Standardized Variable Distances: A distance-based machine learning method”, *Appl. Soft Comput.*, 98, 106855, doi:10.1016/J.ASOC.2020.106855, (2021).
- Emary, E. And Zawbaa, H.M., “Feature selection via L`evy Antlion optimization”, *Pattern Anal. Appl.*, 22, 857–876, doi:10.1007/S10044-018-0695-2/TABLES/10, (2019).
- Emary, E., Zawbaa, H.M. and Hassanien, A.E., “Binary ant lion approaches for feature Selection”, *Neurocomputing*, 213, 54–65, doi:10.1016/J.NEUCOM.2016.03.101, (2016).
- Eppstein, M.J. and Dougherty, D.E., “Simultaneous Estimation of Transmissivity Values and Zonation”, *Water Resour. Res.*, 32, 3321–3336, doi:10.1029/96WR02283, (1996).
- Floudas C.A. and Pardalos P.M., “A collection of test problems for constrained global optimization algorithms”, Springer, Berlin, (1990).
- Guo, M., Wang, J.-S., Zhu, L., Guo, S.-S. and Xie, W., “Improved Ant Lion Optimizer Based on Spiral Complex Path Searching Patterns”, *IEEE Access* 8, 22094–22126, doi:10.1109/ACCESS.2020.2968943, (2020).
- Harbough, A.W., “Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-WaterFlow Process”, *The U.S. Geol. Surv. Tech. Water Resour. Investig.*, b., 6, 6, 253, (2005).
- Holland, J.H., “Adaptation in Natural and Artificial Systems”, The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.

Jain A., Bhattacharjya R.K. and Sanaga S., “Optimal design of composite channels using genetic algorithm”, *J. Irrig. Drain. Eng.* 130, 286–295, doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:4(286), (2004).

Kannan B.K. and Kramer S.N., “An augmented lagrange multiplier based method for mixed integer discrete continuous optimization and its applications to mechanical design”, *J. Mech. Des.*, 116, 405–411, (1994).

Kaveh A. and Talatahari S., “An improved ant colony optimization for constrained engineering design problems”, *Eng. Comput.*, 27, 155–182, doi:10.1108/02644401011008577/FULL/PDF, (2010).

Kennedy, J. and Eberhart, R., “New optimizer using particle swarm theory”, *Proc. Int. Symp. Micro Mach. Hum. Sci.*, 39–43, doi:10.1109/MHS.1995.494215, (1995).

Kılıç, H. and Yüzgeç, U., “Improved antlion optimization algorithm via tournament selection and its application to parallel machine scheduling”, *Comput. Ind. Eng.*, 132, 166–186, doi:10.1016/J.CIE.2019.04.029, (2019).

Kilic, H., Yuzgec, U. and Karakuzu, C., “A novel improved antlion optimizer algorithm and its comparative performance”, *Neural Comput. Appl.*, 32, 3803–3824, doi:10.1007/S00521-018-3871-9/TABLES/8, (2020).

Kose, U., “An Ant-Lion Optimizer-Trained Artificial Neural Network System for Chaotic Electroencephalogram (EEG) Prediction”, *Appl. Sci.*, 2018, Vol. 8, Page 1613, 8, 1613, doi: 10.3390/APP8091613, (2018).

Li, Z., Cao, Y., Van Dai, L., Yang, X. and Nguyen, T.T., “Finding Solutions for Optimal Reactive Power Dispatch Problem by a Novel Improved Antlion Optimization Algorithm”, *Energi*, 12, 2968, doi:10.3390/EN12152968, (2019).

Li, Q., Li, D., Zhao, K., Wang, L. and Wang, K., “State of health estimation of lithium-ion battery based on improved ant lion optimization and support vector regression”, *J. Energy Storage*, 50, 104215, doi:10.1016/J.EST.2022.104215, (2022).

Liu, J., Huo, Y. and Li, Y., “Preferred strategy based self-adaptive ant lion optimization Algorithm”, *Pattern Recognit. Artif. Intell.*, 33, 121–132, (2020).

Mahendru, N.M. and Mehta, S., “Optimal Load Dispatch Using Ant Lion Optimization”, *Int. J. Eng. Res. Appl.*, 5, 10–19, (2015).

Majdalani, S. and Ackerer, P., “Identification of Groundwater Parameters Using an Adaptive Multiscale Method”, *Groundwater*, 49, 548–559, doi:10.1111/J.1745-6584.2010.00750.X, (2011).

Majhi, S.K. and Biswal, S., “Optimal cluster analysis using hybrid K-Means and Ant Lion Optimizer”, *Karbala Int. J. Mod. Sci.*, 4, 347–360, doi:10.1016/J.KIJOMS.2018.09.001, (2018).

Mayer, A.S. and Huang, C., “Development and application of a coupled-process parameter inversion model based on the maximum likelihood estimation method”, *Adv. Water Resour.*, 22, 841–853, doi:10.1016/S0309-1708(98)00049-9, (1999).

Michalewicz Z., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. SpringerVerlag Berlin, (1992).

Mirjalili, S., “The Ant Lion Optimizer”, *Adv. Eng. Softw.*, 83, 80–98, doi:10.1016/J.ADVENGSOFT.2015.01.010, (2015).

- Nayak, S., Bhat, M., Reddy, N.V.S. and Rao, B.A., “Study of distance metrics on k -nearest neighbor algorithm for star categorization”, *J. Phys. Conf. Ser.*, 2161, 012004, doi:10.1088/1742-6596/2161/1/012004, (2022).
- Poole D.J. and Allen C.B. “Constrained niching using differential evolution”, *Swarm Evol. Comput.*, 44, 74–100, doi:10.1016/J.SWEVO.2018.11.004 (2019).
- Rajan, A., Jeevan, K. and Malakar, T., “Weighted elitism based Ant Lion Optimizer to solve optimum VAr planning problem”, *Appl. Soft Comput.*, 55, 352–370, doi:10.1016/J.ASOC.2017.02.010, (2017).
- Rastrigin L.A., *Systems of Extreme Control*, Nauka, (1974).
- Rodrigues, O., “Combining Minkowski and Chebyshev: New distance proposal and survey of distance metrics using k-nearest neighbours classifier”, *Pattern Recognit. Lett.*, 110, 66–71, doi:10.1016/J.PATREC.2018.03.021, (2018).
- Samui, P., Yesilyurt, S.N., Dalkilic, H.Y., Yaseen, Z.M., Roy, S.S. and Kumar, S., “Comparison of different optimized machine learning algorithms for daily river flow Forecasting”, *Earth Sci. Informatics.*, doi:10.1007/s12145-022-00896-3, (2022).
- Saxena, P. and Kothari, A., “Ant Lion Optimization algorithm to control side lobe level and null depths in linear antenna arrays”, *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, 70, 1339–1349, doi:10.1016/J.AEUE.2016.07.008, (2016).
- Shahid, R., Bertazzon, S., Knudtson, M.L. and Ghali, W.A., “Comparison of distance measures in spatial analytical modeling for health service planning”, *BMC Health Serv. Res.*, 9, 1–14, doi:10.1186/1472-6963-9-200/TABLES/3, (2009).
- Singh, D., Singh, B. and Kaur, M., “Simultaneous feature weighting and parameter determination of Neural Networks using Ant Lion Optimization for the classification of breast cancer”, *Biocybern. Biomed. Eng.*, 40, 337–351, doi:10.1016/J.BBE.2019.12.004, (2020).
- Singh, D. and Singh, B., “Effective and efficient classification of gastrointestinal lesions: combining data preprocessing, feature weighting, and improved ant lion optimization”, *J. Ambient Intell. Humaniz. Comput.*, 12, 8683–8698, doi:10.1007/S12652-020-02629-0/TABLES/8, (2021).
- Storn, R. and Price, K., “Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces”, *J. Glob. Optim.*, 11, 341–359, doi:10.1023/A:1008202821328, (1997).
- Subramanya K., *Flow in open channels* (ISBN:9353166292), McGraw-Hill, India, (2015).
- Sun, N.Z., “Inverse Problems in Groundwater Modeling”, Kluwer Academic, Dordrecht, Boston, (1994).
- Sun, N.Z., Jeng, M. and Yeh, W.W.G., “Model structure identification: the generalized inverse problem” in: *Proceedings of the International Conference on Advances in Groundwater Hydrology*. pp. 130–134, (1983).
- Sun, N.Z. and Yeh, W.W.G., “Identification of Parameter Structure in Groundwater Inverse Problem”, *Water Resour. Res.*, 21, 869–883, doi:10.1029/WR021I006P00869, (1985).
- Tian, T., Liu, C., Guo, Q., Yuan, Y., Li, W. and Yan, Q., “An Improved Ant Lion Optimization Algorithm and Its Application in Hydraulic Turbine Governing System Parameter Identification”, *Energies*, 11, 95, doi:10.3390/EN11010095, (2018).

Toz, M., “An improved form of the ant lion optimization algorithm for image clustering problems”, *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 27, 1445–1460, doi:10.3906/elk-1703-240, (2019).

Tozak, M.B., Durgut, P.G. and Ayvaz, M.T., “Optimum identification of aquifer parameter zone structures using the SHuffled Ant Lion Optimization approach considering general form of the Voronoi tessellation”, *Journal of Hydrology*, 640, 131683, doi:10.1016/j.jhydrol.2024.131683, (2024).

Tsai, F.T.C., “Inverse problem and parameter structure identification ingroundwater modeling”, University of California, Los Angeles, (2002).

Tsai, F.T.C., Sun, N.Z. and Yeh, W.W.G., “A Combinatorial Optimization Scheme for Parameter Structure Identification in Ground Water Modeling”, *Groundwater*, 41, 156–169, doi:10.1111/J.1745-6584.2003.TB02579.X, (2003^a).

Tsai, F.T.C. and Yeh, W.W.G., “Characterization and identification of aquifer heterogeneity with generalized parameterization and Bayesian estimation”, *Water Resour. Res.*, 40, 10102, doi:10.1029/2003WR002893, (2004).

Tsai, F.T.C. and Yeh, W.W.G., “Characterization and identification of aquifer heterogeneity with generalized parameterization and Bayesian estimation”, *Water Resour. Res.*, 40, 10102, doi:10.1029/2003WR002893, (2004).

Tsai, F.T.C., Sun, N.Z. and Yeh, W.W.G., “Global-local optimization for parameter structure identification in three-dimensional groundwater modeling”, *Water Resour. Res.*, 39, 1043, doi:10.1029/2001WR001135, (2003^b).

Tung, C.P. and Chou, C.A., “Pattern classification using tabu search to identify thspatial distribution of groundwater pumping”, *Hydrogeol. J.*, 12, 488–496, doi:10.1007/S10040-004-0344-2/FIGURES/6, (2004).

Tung, C.P. and Tan, C.C., “An optimal procedure for identifying parameter structure and application to a confined aquifer”, *Environ. Geol.*, 47, 1062–1071, doi:10.1007/S00254-005-1239-9/TABLES/4, (2005).

Tung, C.P., Tang, C.C. and Lin, Y.P., “Improving groundwater-flow modeling using optimal zoning methods”, *Environ. Geol.*, 44, 627–638, doi:10.1007/S00254-003-0822-1/TABLES/5, (2003).

Voronoi, G., “Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. Premier mémoire. Sur quelques propriétés des formes quadratiques positives parfaites”, *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik* 133, 97–178, doi:10.1515/crll.1908.133.97, (1908)

Wang, Y., Ni, Y., Li, N., Lu, S., Zhang, S., Feng, Z. and Wang, J., “A method based on improved ant lion optimization and support vector regression for remaining useful life estimation of lithium-ion batteries”, *Energy Sci. Eng.*, 7, 2797–2813, doi:10.1002/ESE3.460, (2019b).

Wang, M., Wu, C., Wang, L., Xiang, D. and Huang, X., “A feature selection approach for hyperspectral image based on modified ant lion optimizer”, *Knowledge-Based Syst.*, 168, 39–48, doi:10.1016/J.KNOSYS.2018.12.031, (2019a).

Willis, R. and Yeh, W.W.G., “Groundwater systems planning and management”, United States, (1987).

- Wu, Z., Yu D. and Kang, X., “Parameter identification of photovoltaic cell model based on improved ant lion optimizer”, *Energy Convers. Manag.*, 151, 107–115, doi:10.1016/J.ENCONMAN.2017.08.088, (2017).
- Yamany, W., Tharwat, A., Hassanin, M.F., Gaber, T., Hassanien, A.E., Kim, T.H., “A New Multi-layer Perceptrons Trainer Based on Ant Lion Optimization Algorithm”, *Proc. - 2015 4th Int. Conf. Inf. Sci. Ind. Appl. ISI 2015*, 40–45. Doi:10.1109/ISI.2015.9, (2016).
- Yan, R., Lin, Y., Yu, N. and Wu, Y., “A low-carbon economic dispatch model for electricity market with wind power based on improved ant-lion optimisation algorithm”, *CAAI Trans. Intell. Technol.*, 8, 29–39, doi:10.1049/CIT2.12138, (2023).
- Yang, X.S. and Deb, S., “Cuckoo Search via L’evy flights”, *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC)*. pp. 210–214, (2009).
- Yang, D., Miao, J., Zhang, F., Tao, J., Wang, G. and Shen, Y., “Bearing Fault Diagnosis Using a Support Vector Machine Optimized by an Improved Ant Lion Optimizer”, *Shock Vib.*, 2019, doi:10.1155/2019/9303676 (2019).
- Yang X.S., Huyck C., Karamanoglu M. and Khan N., “True global optimality of the pressure vessel design problem: a benchmark for bio-inspired optimisation algorithms”, *Int. J. Bio-Inspired Comput.* 5, 329–335, doi:10.1504/IJBIC.2013.058910, (2013).
- Yao, Y., Li, Y., Xie, D., Hu, S., Wang, C. and Li, Y., “Coverage Enhancement Strategy for WSNs Based on Virtual Force-Directed Ant Lion Optimization Algorithm”, *IEEE Sens.J.*, 21, 19611–19622, doi:10.1109/JSEN.2021.3091619, (2021).
- Yao, P. and Wang, H., “Dynamic Adaptive Ant Lion Optimizer applied to route planning for unmanned aerial vehicle”, *Soft Comput.*, 21, 5475–5488, doi:10.1007/S00500-016-2138-6/FIGURES/10, (2017).
- Yeh, W.W., “Review of Parameter Identification Procedures in Groundwater Hydrology: The Inverse Problem” *Water Resour. Res.*, 22, 95–108, doi: 10.1029/WR022I002P00095, (1986).
- Yeh, W.-W.-G., “Review: Optimization methods for groundwater modeling and management”. *Hydrogeol. J.*” 23, 1051–1065” doi:10.1007/s10040-015-1260-3, (2015).
- Yogarajan, G. and Revathi, T., “Improved Cluster Based Data Gathering Using Ant Lion Optimization in Wireless Sensor Networks”, *Wirel. Pers. Commun.*, 98, 2711–2731, doi:10.1007/S11277-017-4996-3/FIGURES/14, (2018).
- Yue, X. and Zhang, H., “A Novel Industrial Image Contrast Enhancement Techniqu Based on an Improved Ant Lion Optimizer”, *Arab. J. Sci. Eng.*, 46, 3235–3246, doi:10.1007/S13369-020-05148-4/FIGURES/6, (2021).
- Zawbaa, H.M., Emary, E. and Grosan, C., “Feature Selection via Chaotic Antlion Optimization”, *PLoS One*, 11, e0150652, (2016).

EKLER

7. EKLER

EK A: SHALO Yaklaşımının Kısıtsız Test Fonksiyonları için Performans Analizi

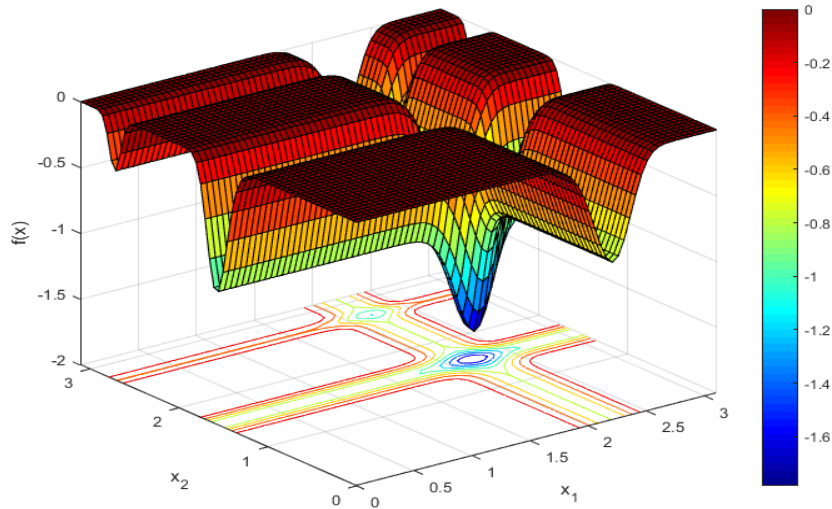
A.1. Michalewicz'in Test Fonksiyonu

Michalewicz fonksiyonu, değişken sayısı (d) kadar lokal optimum çözüm içeren doğrusal olmayan çok modlu bir test fonksiyonudur (Michalewicz 1992). Fonksiyonun matematiksel tanımı ve karar değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri Denklem (A1)'de verilmiştir.

$$\min f(x) = - \sum_{k=1}^d \sin(x_k) \left[\sin \left(\frac{k \cdot x_k^2}{\pi} \right) \right]^{2\mu} \quad (\text{A1})$$

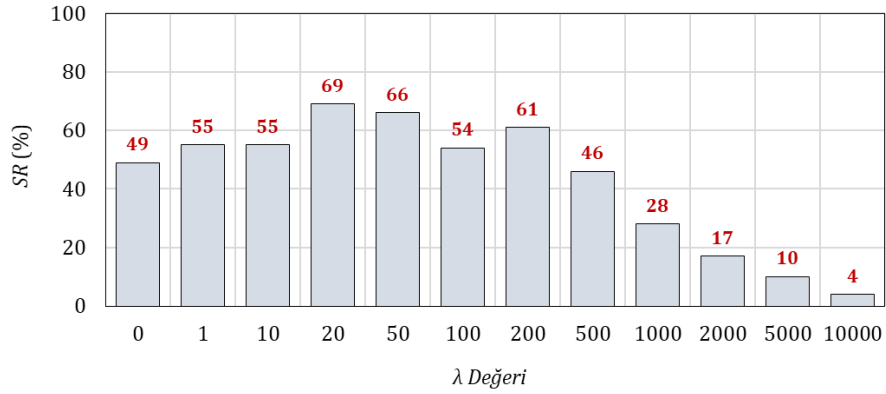
$$0 \leq x_k \leq \pi ; k = 1, 2, 3, \dots, d \quad (\text{A1a})$$

Denklem (A1)'de verilen μ parametresi fonksiyon yüzeyindeki kenar bölgelerin dikliğini tanımlamakta olup bu çözüm kapsamında değerinin 10 olduğu varsayılmıştır. Bu fonksiyon için global optimum çözüm $d = 5$ için $x^* = [2.202906 \ 1.570796 \ 1.284992 \ 1.923058 \ 1.720470]$ noktasında elde edilmiş olup fonksiyon değeri $f(x^*) = -4.688$ 'dir. Örnek olarak, $d = 2$ için bu fonksiyonun grafiksel gösterimi Şekil A.1'de sunulmuştur.



Şekil A. 1: Michalewicz'in test fonksiyonu.

Şekil A.1'den görülebileceği gibi, fonksiyon global optimum etrafında birçok yerel optimum çözüm içerdiğinden matematiksel olarak çözümü zor bir optimizasyon test problemi olarak sınıflandırılabilir. Daha önce belirtildiği gibi, bu problem SHALO'da farklı λ değerleri için çözülmüştür. Bununla beraber, her bir λ değeri için ilgili model 100 farklı rasgele sayı çekirdek değeri için çalıştırılmıştır. Bu model uygulamaları için hesaplanan SR değerleri Şekil A.2'de verilmiştir.



Şekil A. 2: Michalewicz'in test fonksiyonunda farklı λ değerleri için SR (%) değerlerinin değişimi.

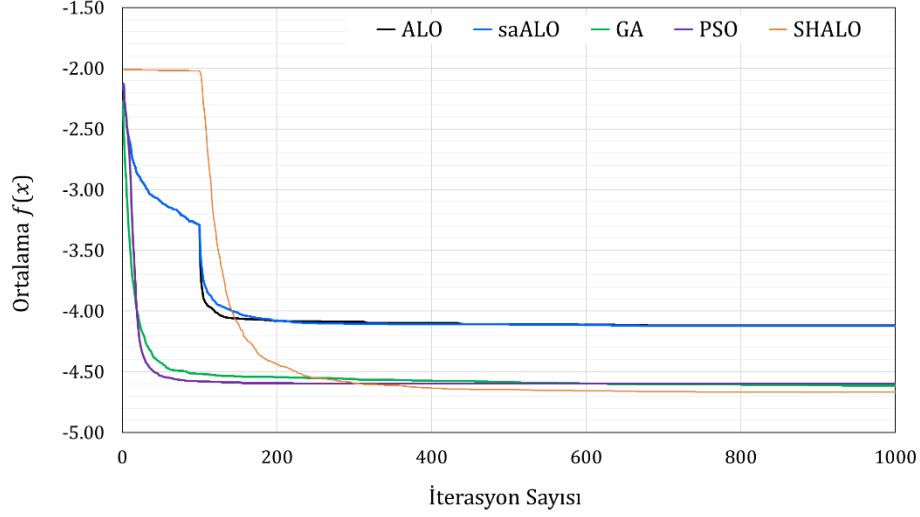
Şekil A.2'den görüldüğü üzere, SR 'nin maksimum değeri $\lambda = 20$ için yapılan çözümde elde edilmiştir. Bu çözüme ait sonuçlar, aynı problemin aynı koşullar altında ALO, saALO, GA ve PSO yaklaşımları ile çözülmesiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma kapsamındaki sonuçların istatistiksel değerlendirmesi Tablo A.1'de sunulmuştur.

Tablo A. 1: Farklı yaklaşımlar için Michalewicz test fonksiyonunun sonuçlarının değerlendirilmesi.

Ölçüt	ALO	saALO	GA	PSO	SHALO
SR (%)	3	4	48	32	69
En iyi	-4.688	-4.688	-4.688	-4.688	-4.688
En kötü	-3.151	-3.151	-4.333	-4.059	-4.496
Ortalama	-4.119	-4.122	-4.616	-4.596	-4.668
Medyan	-4.251	-4.251	-4.646	-4.646	-4.688
St. Sapma	0.435	0.436	0.087	0.100	0.040

Tablo A.1'de görüldüğü üzere, her yaklaşım global optimum çözümü (-4.688) en az bir kez bulabilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, ALO ve saALO yaklaşımlarının başarı oranları (SR) sırasıyla %3 ve %4 olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık, GA ve PSO yaklaşımlarının SR değerleri sırasıyla %48 ve %32 olarak elde

edilmiştir. SHALO yaklaşımı için ise SR değeri %69 olarak belirlenmiş olup, bu değer diğer yaklaşımlara kıyasla daha üstündür. ALO, saALO, GA, PSO ve SHALO yaklaşımlarının ortalama yakınsama grafikleri Şekil A.3'te sunulmuştur. Bu grafikler, her bir optimizasyon yaklaşımı için 100 model uygulamasının aritmetik ortalaması alınarak oluşturulmuştur.



Şekil A. 3: Michalewicz test fonksiyonu için elde edilen ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması

Şekil A.3'ten görüldüğü üzere, 100 farklı çözüm dikkate alındığında, önerilen SHALO yaklaşımı diğer yaklaşımlara kıyasla daha iyi ortalama amaç fonksiyonu değerlerine ulaşmıştır. Tablo A.1'de sunulan en iyi çözümler için elde edilen karar değişkenleri ve fonksiyon değerleri Tablo A.2'de karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi, kullanılan yaklaşımların tümü en az bir kez küresel optimum çözüme yakınsamayı başardığından, belirlenen tüm değerler aynıdır.

Tablo A. 2: En iyi çözümler için Michalewicz'in test fonksiyonuna ait nihai karar değişkenleri ve fonksiyon değerleri.

Değişkenler ve fonksiyon değerleri	ALO	saALO	GA	PSO	SHALO
x_1	2.203	2.203	2.203	2.203	2.203
x_2	1.571	1.571	1.571	1.571	1.571
x_3	1.285	1.285	1.285	1.285	1.285
x_4	1.923	1.923	1.923	1.923	1.923
x_5	1.720	1.720	1.720	1.720	1.720
$f(x)$	-4.688	-4.688	-4.688	-4.688	-4.688

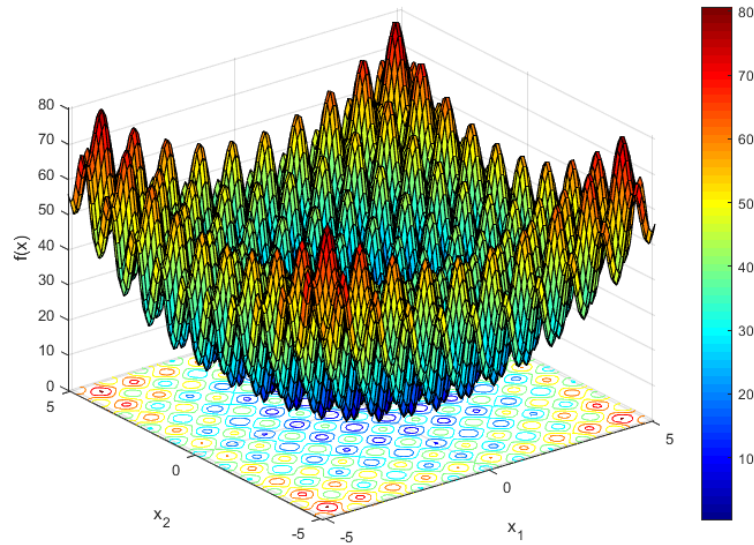
A2. Rastrigin'in Test Fonksiyonu

Rastrigin'in test fonksiyonu, doğrusal olmayan ve çok modlu bir yapıya sahip olup büyük sayıda yerel optimum çözüm içerir (Rastrigin 1974). Bu özelliği sayesinde, sezgisel ve optimizasyon algoritmalarının performansını test etmek amacıyla sıkça kullanılır. Fonksiyonun matematiksel ifadesi ve karar değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri Denklem (A2)'de tanımlanmıştır.

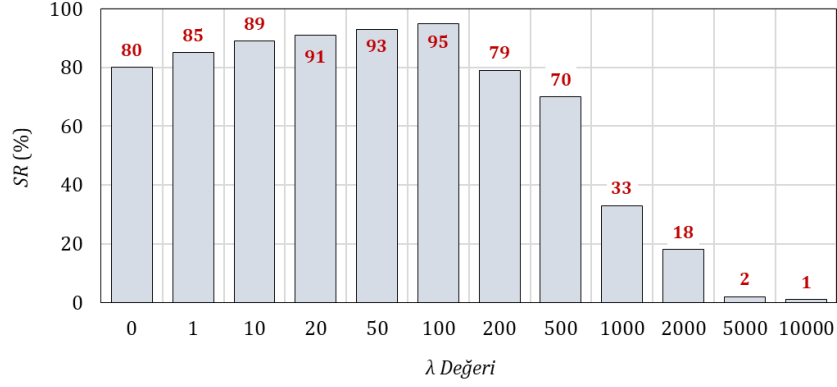
$$\min f(x) = 10d + \sum_{k=1}^d [x_k^2 + 10 \cos(2\pi x_k)] \quad (\text{A2})$$

$$-5.12 \leq x_k \leq 5.12 \quad k = 1, 2, \dots, d \quad (\text{A2a})$$

Bu fonksiyon için global optimum çözüm karar değişkenlerinin sayısından bağımsız olarak $x_k^* = 0$ ($k = 1, 2, \dots, d$) noktasında $f(x^*) = 0$ fonksiyon değeri ile verilmiştir. Bu çalışma kapsamında, ilgili problem $d = 5$ karar değişkeni dikkate alınarak çözülmüştür. Örnek olarak, $d = 2$ karar değişkeni için bu fonksiyonun grafiksel gösterimi Şekil A.4'te verilmiştir. Görülebileceği gibi, fonksiyon birden çok yerel optimum çözüm içermekte olup, bu özelliği nedeniyle çözümü zorlayıcı bir test problemi olarak sınıflandırılabilir. Bu fonksiyon, aynı çözüm şeması kullanılarak farklı λ değerleri için 100 kez çözülmüştür. Elde edilen SR değerleri Şekil A.5'te sunulmuştur.



Şekil A. 4: Rastrigin'in test fonksiyonu



Şekil A. 5: Rastrigin'in test fonksiyonunda farklı λ değerleri için SR (%) değerlerinin değişimi.

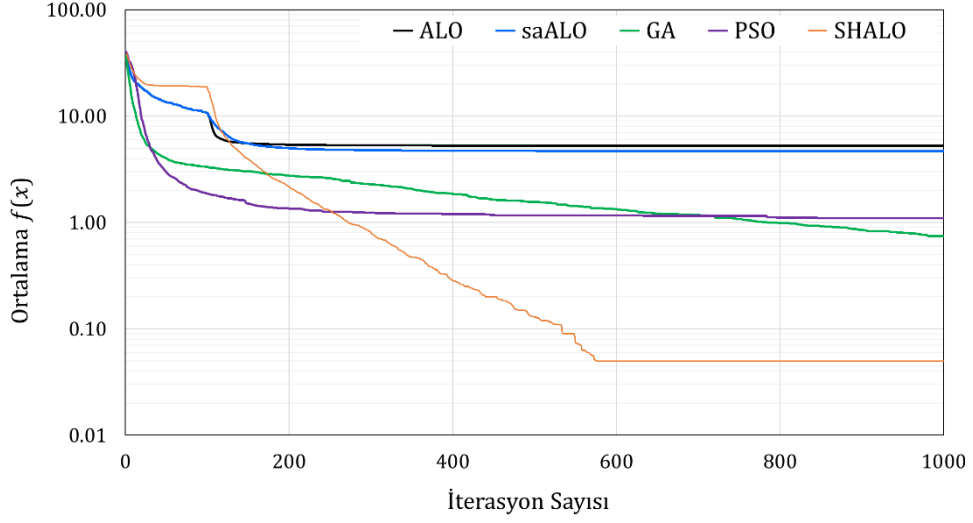
Şekil A.5'te görüleceği gibi, SHALO yaklaşımı kapsamında maksimum SR değeri $\lambda = 100$ için %95 olarak elde edilmiştir. Bu çözüm için elde edilen sonuçlar, aynı koşullar altında ALO, saALO, GA ve PSO yaklaşımlarıyla elde edilen sonuçlarla Tablo A.3'te karşılaştırılmıştır. Görülebileceği üzere, standart ALO yaklaşımı 100 farklı çözümün hiçbirinde global optimum çözümü bulamamıştır. Benzer şekilde, saALO yalnızca bir kez global optimum çözümünü elde edebilmiştir. Aynı koşullar altında, GA ve PSO sırasıyla 46 ve 36 kez global optimum çözümü bulabilmiştir. Buna karşın, önerilen SHALO yaklaşımı 100 çözümün 95'inde global optimum çözümü elde etmiştir. Bu sonuç, SHALO için hesaplanan ortalama ve medyan fonksiyon değerlerine bakıldığında da açıkça görülmektedir.

Tablo A. 3: Farklı yaklaşımlar için Rastrigin test fonksiyonunun sonuçlarının değerlendirilmesi.

Ölçüt	ALO	saALO	GA	PSO	SHALO
SR (%)	0	1	46	36	95
En iyi	0.995	0.000	0.000	0.000	0.000
En kötü	14.924	13.929	3.980	5.970	0.995
Ortalama	5.253	4.686	0.746	1.094	0.050
Medyan	4.975	3.980	0.995	0.995	0.000
St. Sapma	3.224	2.922	0.825	1.165	0.217

Her bir yaklaşımın 100 farklı çekirdek değeri ile çalıştırılması sonucunda elde edilen ortalama amaç fonksiyonu değerlerinin iterasyon sayısına bağlı değişimini gösteren yakınsama grafikleri, Şekil A.6'da karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerden, önerilen SHALO yaklaşımının kullanılan diğer yaklaşımlara kıyasla daha iyi bir fonksiyon değerine yakınsadığı açıkça görülmektedir. Tablo A.3'teki en iyi çözümler için nihai değişken ve fonksiyon değerleri Tablo A.4'te karşılaştırılmıştır. Görüleceği

üzere, belirlenen tüm değişken ve fonksiyon değerleri, global optimum çözüm olan 0'a çok yakın olarak elde edilmiştir.



Şekil A. 6: Michalewicz test fonksiyonu için elde edilen ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması.

Tablo A. 4: En iyi çözümler için Rastrigin'in test fonksiyonuna ait nihai karar değişkenleri ve fonksiyon değerleri.

Değişkenler ve fonksiyon değerleri	ALO	saALO	GA	PSO	SHALO
x_1	-9.95E-01	3.68E-08	1.47E-09	2.95E-09	-2.53E-08
x_2	-3.87E-08	2.06E-07	2.36E-09	-5.25E-10	2.37E-08
x_3	2.52E-07	-1.66E-07	-3.53E-09	-3.28E-09	-1.69E-08
x_4	3.15E-07	-1.39E-07	4.58E-10	2.29E-09	9.31E-09
x_5	-3.42E-07	-4.28E-08	3.05E-09	-1.79E-09	2.83E-08
$f(x)$	9.95E-01	1.83E-11	0.00E+00	0.00E+00	4.62E-13

A.3. Trefethen'in Test Fonksiyonu

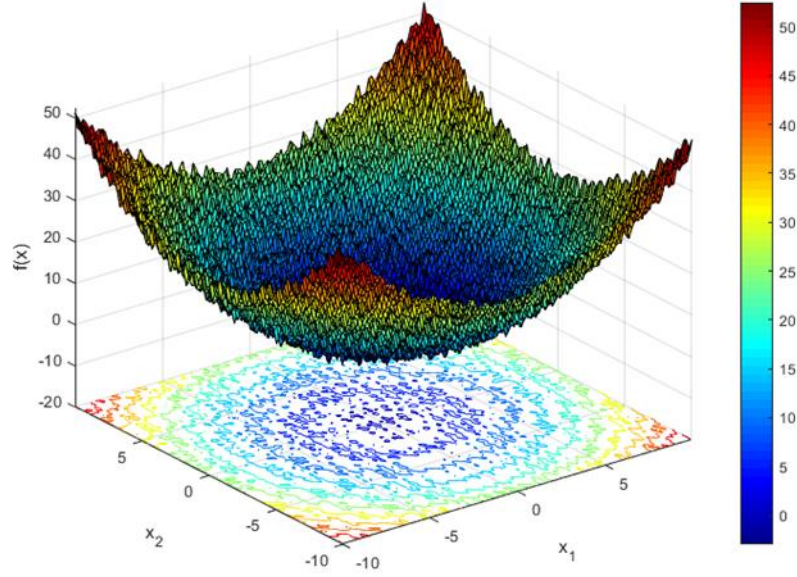
Trefethen'in test fonksiyonu (Adorio ve Dilman 2005), kısıtsız ve doğrusal olmayan çok modlu bir test fonksiyonudur. Bu fonksiyon iki karar değişkeni ($d = 2$) içerir ve üstel, trigonometrik ve aritmetik ifadeleri tek bir fonksiyonda birleştirir. Fonksiyonun matematiksel formu ve değişkenlerin alt ve üst sınır değerleri Denklem (A3)'te verilmiştir.

$$\min f(x) = e^{\sin(50x_1)} + \sin(60e^{x_2}) + \sin(70\sin(x_1)) + \sin(80\sin(x_2)) - \sin(10(x_1 + x_2)) + \frac{1}{4}(x_1^2 + x_2^2) \quad (\text{A3})$$

$$-6.5 \leq x_1 \leq 6.5 \quad (\text{A3a})$$

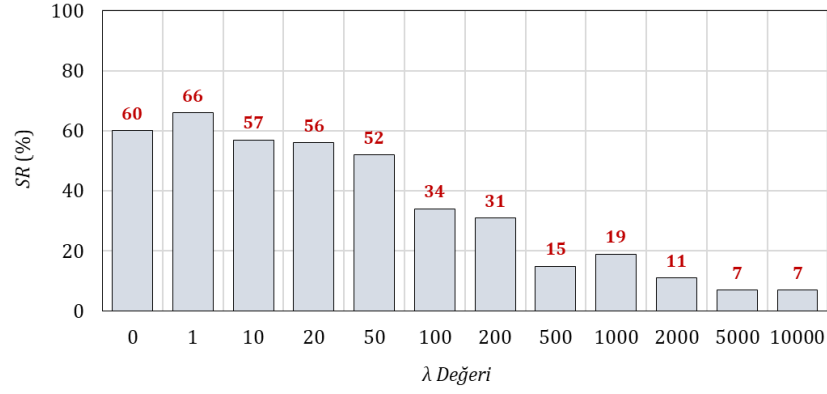
$$-4.5 \leq x_2 \leq 4.5 \quad (\text{A3b})$$

Bu fonksiyon için global optimum çözüm $x^* = [-0.0244031 \ 0.2106124]$ noktasında gözlenmiş olup bu noktadaki fonksiyon değeri $f(x^*) = -3.307$ 'dir. İlgili fonksiyonun grafiksel gösterimi Şekil A.7'de verilmiştir.



Şekil A. 7: Trefethen'in test fonksiyonu.

Görülebileceği gibi, fonksiyon pek çok bölgede lokal salınımlar içerir ve bu salınımlar lokal optimum çözümler gibi davranır. Diğer örneklerde olduğu gibi, bu fonksiyon da farklı λ ve çekirdek değerleri dikkate alınarak çözülmüştür. Her bir λ değeri için yapılan 100 çözüm sonucunda elde edilen SR değerleri Şekil A.8'de verilmiştir.



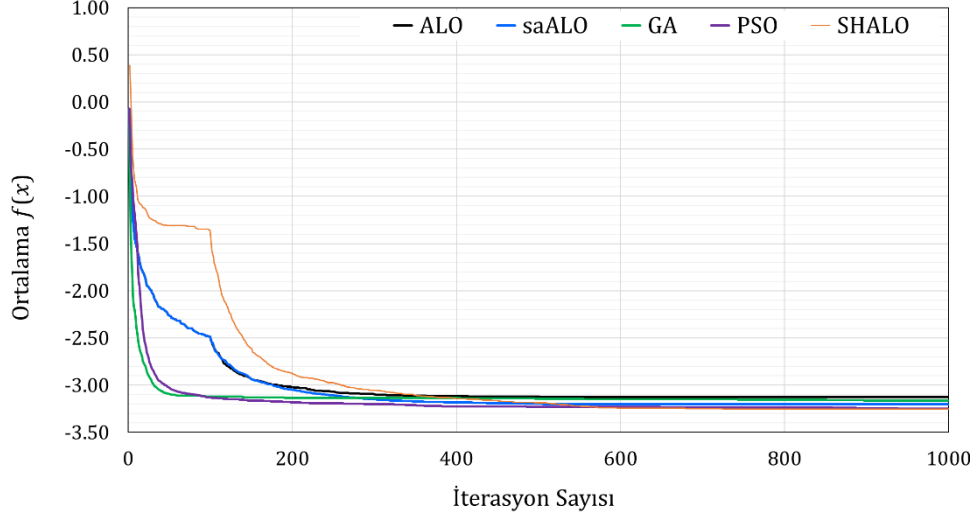
Şekil A. 8: Trefethen'in test fonksiyonunda farklı λ değerleri için SR (%) değerlerinin değişimi.

Şekil A.8'de görüldüğü gibi, SR değeri bakımından en iyi çözüm $\lambda = 1$ için elde edilmiştir. Bu değer için gerçekleştirilen 100 çözümün sonuçları, aynı problemin sırasıyla ALO, saALO, GA ve PSO yaklaşımları kullanılarak çözülmesiyle elde edilen sonuçlarla Tablo A.5'te karşılaştırılmıştır.

Tablo A. 5: Farklı yaklaşımlar için Trefethen test fonksiyonunun sonuçlarının değerlendirilmesi.

Ölçüt	ALO	saALO	GA	PSO	SHALO
SR (%)	47	56	36	63	66
En iyi	-3.307	-3.307	-3.307	-3.307	-3.307
En kötü	-2.643	-2.643	-2.729	-3.063	-2.761
Ortalama	-3.126	-3.201	-3.163	-3.248	-3.254
Medyan	-3.176	-3.307	-3.208	-3.307	-3.307
St. Sapma	0.221	0.159	0.146	0.088	0.090

Tablo A.5'den görülebileceği gibi, kullanılan tüm yaklaşımlar global optimum çözüm olan -3.307'ye ulaşabilmiştir. Hesaplanan SR değerleri ALO, saALO, GA ve PSO yaklaşımları için sırasıyla %47, %56, %36 ve %63 olarak elde edilmiştir. Bu fonksiyon için SHALO kullanılarak SR değeri %66 olarak elde edilmiştir ve bu diğer yaklaşımlara kıyasla en iyi sonuçtur. Tüm yaklaşımlar için ortalama amaç fonksiyonu değerlerinin değişimini gösteren yakınsama grafikleri Şekil A.9'da sunulmuştur. Görülebileceği gibi, önerilen SHALO yaklaşımı diğer yaklaşımlara kıyasla daha iyi ortalama fonksiyon değerine yakınsamıştır. Tablo A.5'te verilen en iyi çözümler için nihai değişken ve fonksiyon değerleri Tablo A.6'da karşılaştırılmıştır. Görülebileceği gibi, tüm yaklaşımlar global optimum çözümü en az bir kez belirlediğinden tabloda verilen tüm değerler aynıdır.



Şekil A. 9: Trefethen test fonksiyonu için elde edilen ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması.

Tablo A. 6: En iyi çözümler için Trefethen test fonksiyonuna ait nihai karar değişkenleri ve fonksiyon değerleri.

Değişkenler ve fonksiyon değerleri	ALO	saALO	GA	PSO	SHALO
x_1	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024	-0.024
x_2	0.211	0.211	0.211	0.211	0.211
$f(x)$	-3.307	-3.307	-3.307	-3.307	-3.307

A.4. De Villiers–Glasser 1 Fonksiyonu

De Villiers–Glasser 1 fonksiyonu, sürekli bir yapıya sahip olup türevlenebilir ancak ayrıştırılamayan ve ölçeklendirilemeyen özellikleriyle dikkat çeken doğrusal olmayan bir optimizasyon test fonksiyonudur (de Villiers ve Glasser 1981). Çözüm uzayı çok modlu bir matematiksel yapıya sahiptir ve bu durum fonksiyonun optimizasyon problemlerinde zorluk derecesini artırmaktadır. Fonksiyon, belirli özellikleri nedeniyle özellikle optimizasyon algoritmalarının performansını test etmek için tercih edilmektedir. Fonksiyonun matematiksel yapısı ve karar değişkenlerinin çözüm uzayı Denklem (A4)'te verilmiştir.

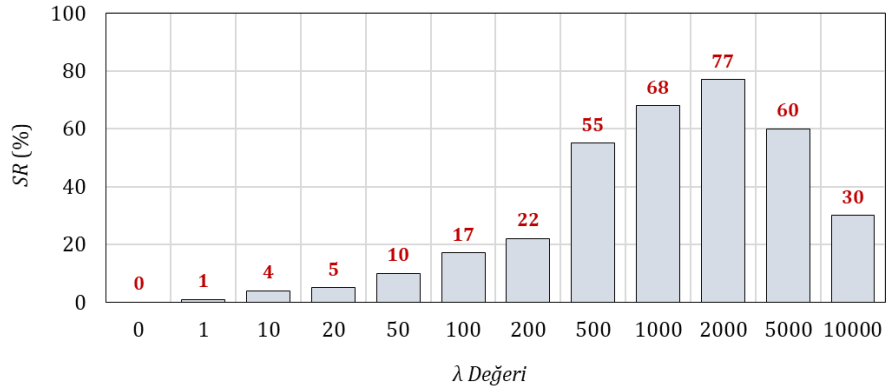
$$\min f(x) = \sum_{i=1}^{24} [x_1 x_2^{t_i} \sin[x_3 t_i + x_4] - y_i]^2 \quad (\text{A4})$$

$$t_i = 0.1(i - 1) \quad (\text{A4a})$$

$$y_i = 60.137 \cdot 1.371^{t_i} \cdot \sin(3.112t_i + 1.761) \quad (\text{A4b})$$

$$\text{s.t. } 1 \leq x_k \leq 100 \quad k = 1, 2, \dots, d \quad (\text{A4c})$$

Bu fonksiyonda $d = 4$ için global optimum çözüm $x^* = [60.137, 1.371, 3.112, 1.761]$ noktasında $f(x^*) = 0$ olan bir fonksiyon değeri ile elde edilmiştir. Diğer problemlerde olduğu gibi bu problem de SHALO kapsamında farklı λ değerleri için 100'er kez çözülmüştür. Yapılan her bir çözüm için elde edilen nihai SR değerleri Şekil A10'da verilmiştir.



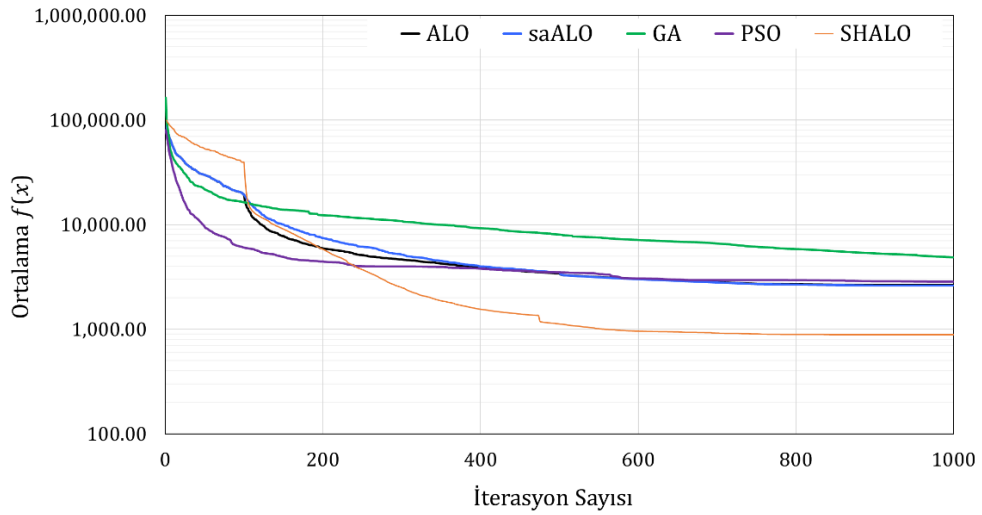
Şekil A. 10: De Villiers–Glasser 1 test fonksiyonunda farklı λ değerleri için SR (%) değerlerinin değişimi.

Şekil A10'dan görülebileceği gibi en büyük SR değeri değeri $\lambda = 2000$ için elde edilmiştir. En iyi λ değerinin belirlenmesinin ardından elde edilen sonuçlar aynı problemin sırasıyla ALO, saALO, GA ve PSO yaklaşımları kullanılarak elde edilen sonuçlarla Tablo A.7'de karşılaştırılmıştır. Görülebileceği gibi, orijinal ALO, saALO ve GA yapılan 100 çözümün hiçbirinde global optimuma ulaşamamıştır. Buna karşın, ilgili problem PSO ve SHALO yaklaşımlarıyla sırasıyla 60 ve 77 kez çözülebilmıştır.

Tablo A. 7: Farklı yaklaşımlar için De Villiers–Glasser 1 test fonksiyonunun sonuçlarının değerlendirilmesi.

Ölçüt	ALO	saALO	GA	PSO	SHALO
SR (%)	0	0	0	60	77
En iyi	0.990	1.210	0.050	0.000	0.000
En kötü	11786.676	12355.975	50179.865	35863.062	41453.299
Ortalama	2649.741	2619.385	4851.426	2845.219	886.577
Medyan	1713.426	1693.898	138.214	0.000	0.000
St. Sapma	2840.333	3032.582	10817.759	7014.526	5822.534

Kullanılan tüm yaklaşımlar için hesaplanan ortalama fonksiyon değerlerinin iterasyonlara bağlı olarak değişimini gösteren yakınsama grafikleri Şekil A.11’de sunulmuştur. Şekil incelendiğinde, önerilen SHALO yaklaşımının diğer yaklaşımlara göre daha iyi bir ortalama fonksiyon değerine ulaşarak daha etkili bir yakınsama performansı sergilediği açıkça görülmektedir. Tablo A.7’de yer alan en iyi çözümlerden elde edilen nihai değişken ve fonksiyon değerleri ise Tablo A.8’de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre yalnızca PSO ve SHALO yaklaşımlarının global optimum ya da global optimuma oldukça yakın çözümleri tespit edebildiği görülmüştür.



Şekil A. 11: De Villiers–Glasser 1 test fonksiyonu için elde edilen ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması.

Tablo A. 8: En iyi çözümler için De Villiers–Glasser 1 test fonksiyonuna ait nihai karar değişkenleri ve fonksiyon değerleri.

Değişkenler ve fonksiyon değerleri	ALO	saALO	GA	PSO	SHALO
x_1	60.625	60.676	60.141	60.137	60.138
x_2	1.365	1.364	1.371	1.371	1.371
x_3	65.942	65.942	3.111	3.112	3.112
x_4	52.029	64.595	96.010	1.761	1.761
$f(x)$	0.990	1.210	0.050	0.000	0.000

EK B: SHALO Yaklaşımının Kısıtlı Test Fonksiyonları için Performans Analizi

Bu bölümde, önerilen SHALO yaklaşımının performansı literatürde verilen iki kısıtlı optimizasyon test problemi ve iki mühendislik tasarım problemi çözülerek test edilmiştir. Bu problemlerin çözümü aşağıdaki genel optimizasyon formülasyonu dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir:

$$\min f(x) \quad (B5)$$

$$g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (B5a)$$

$$h_j(x) = 0 \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (B5b)$$

burada m , eşitsizlik kısıtlarının sayısını; $g_i(x)$, i nolu eşitsizlik kısıtını; n , eşitlik kısıtlarının sayısını; $h_j(x)$, j nolu eşitlik kısıtını temsil etmektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta hem ALO'nun hem de SHALO'nun sezgisel bir optimizasyon yaklaşımı olduğu ve orijinal halinde sadece kısıtsız optimizasyon problemlerinin çözümünde etkin olarak kullanılabilmiştir. Bu nedenle, ilgili yaklaşımların kullanılabilmesi için aşağıda verilen ceza fonksiyonu yaklaşımı ile çözülmesi gereken kısıtlı optimizasyon problemleri kısıtsız hale dönüştürülmüştür:

$$\min f^*(x) = f(x) + \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot P_i^g + \sum_{j=1}^n \beta_j \cdot P_j^h \quad (B6)$$

$$P_i^g = \begin{cases} 0 & \text{eğer } g_i(x) \leq 0 \\ [g_i(x)]^2 & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (B6a)$$

$$P_j^h = \begin{cases} 0 & \text{eğer } h_j(x) = 0 \\ [h_j(x)]^2 & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (B6b)$$

burada $f^*(x)$, kısıtsız hale dönüştürülmüş amaç fonksiyonunu; P_i^g ve P_j^h sırasıyla eşitsizlik ve eşitlik kısıtları için tanımlanmış ceza fonksiyonlarını; α_i ve β_j , sırasıyla eşitsizlik ve eşitlik kısıtlarının amaç fonksiyonuna entegre edilmesi aşamasında kullanılan ceza parametrelerini göstermektedir. Denklem (B6)'dan görüleceği üzere,

verilen kısıtlı optimizasyon problemi ceza fonksiyonlarının sisteme dahil edilmesiyle kısıtsız bir optimizasyon problemine dönüştürülmüştür. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta tüm kısıtların sağlanması durumunda Denklem (B6a) ve (B6b) kapsamında ceza fonksiyonlarının değerlerinin sıfır olmasıdır. Ancak, kısıtlar ihlal edildiğinde bu fonksiyonlar kısıt ihlalinin büyüklüğü ile orantılı bir ceza üretmektedir. Bu durumda, uygulanan cezaların büyüklüğünü ayarlamak için α_i ve β_j ceza parametreleri kullanılmaktadır. Bu parametrelerin değerleri büyük ölçüde incelenen problemin türüne bağlıdır ve optimizasyon sürecine başlamadan önce bazı deneme çalışmaları yapılarak uygun değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada yapılan denemelere bağlı olarak tüm problemler için ceza parametrelerinin değerleri 1000 olarak sabitlenmiştir.

B.1. Floudas ve Pardalos Test Fonksiyonu

Floudas ve Pardalos test fonksiyonu, 13 karar değişkenine ve 9 eşitsizlik kısıtına sahip doğrusal olmayan bir optimizasyon test fonksiyonudur (Floudas ve Pardalos 1990). Bu fonksiyon, optimizasyon yaklaşımlarının doğrusal olmayan, çok değişkenli ve kısıtlı çözüm alanlarında nasıl performans gösterdiğini değerlendirmek amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fonksiyonun matematiksel yapısı, dikkate alınan kısıtlar ve karar değişkenlerine ait alt ve üst sınır değerleri Denklem (B7)'de sunulmuştur.

$$\min f(x) = 5 \sum_{k=1}^4 x_k - 5 \sum_{k=1}^4 x_k^2 - \sum_{k=5}^{13} x_k \quad (\text{B7})$$

$$g_1(x) = 2x_1 + 2x_2 + x_{10} + x_{11} - 10 \leq 0 \quad (\text{B7a})$$

$$g_2(x) = 2x_1 + 2x_3 + x_{10} + x_{12} - 10 \leq 0 \quad (\text{B7b})$$

$$g_3(x) = 2x_2 + 2x_3 + x_{11} + x_{12} - 10 \leq 0 \quad (\text{B7c})$$

$$g_4(x) = -8x_1 + x_{10} \leq 0 \quad (\text{B7d})$$

$$g_5(x) = -8x_2 + x_{11} \leq 0 \quad (\text{B7e})$$

$$g_6(x) = -8x_3 + x_{12} \leq 0 \quad (\text{B7f})$$

$$g_7(x) = -2x_4 - x_5 + x_{10} \leq 0 \quad (\text{B7g})$$

$$g_8(x) = -2x_6 - x_7 + x_{11} \leq 0 \quad (\text{B7h})$$

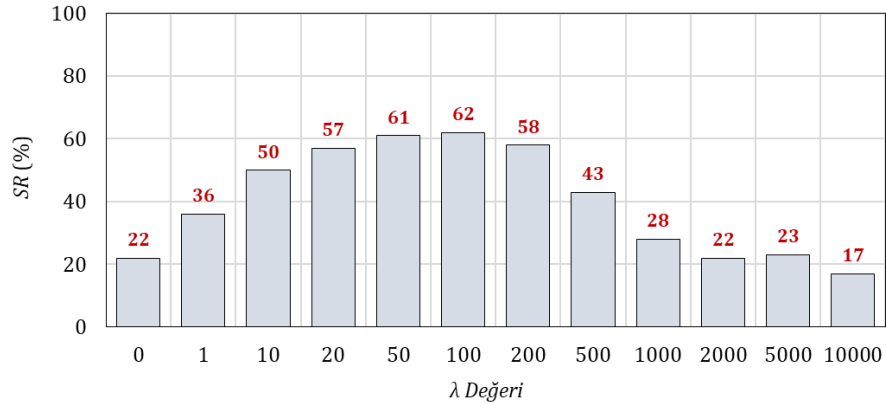
$$g_9(x) = -2x_8 - x_9 + x_{12} \leq 0 \quad (\text{B7j})$$

$$0 \leq x_k \leq 1, \quad k = 1, 2, \dots, 9 \quad (\text{B7k})$$

$$0 \leq x_k \leq 100, \quad k = 10, 11, 12 \quad (\text{B7l})$$

$$0 \leq x_k \leq 1, \quad k = 13 \quad (\text{B7m})$$

Floudas ve Pardalos'un fonksiyonu $x^* = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 3 \ 3 \ 3 \ 1]$ noktasında bir global optimum çözüme sahip olup bu noktadaki fonksiyon değeri $f(x^*) = 15$ 'tir. Diğer problemlerde olduğu gibi, bu problem de farklı λ değerleri için 100 farklı rastgele sayı çekirdeği kullanılarak çözülmüştür. Yapılan her bir çözüm için elde edilen SR değerleri Şekil B.1'de verilmiştir.



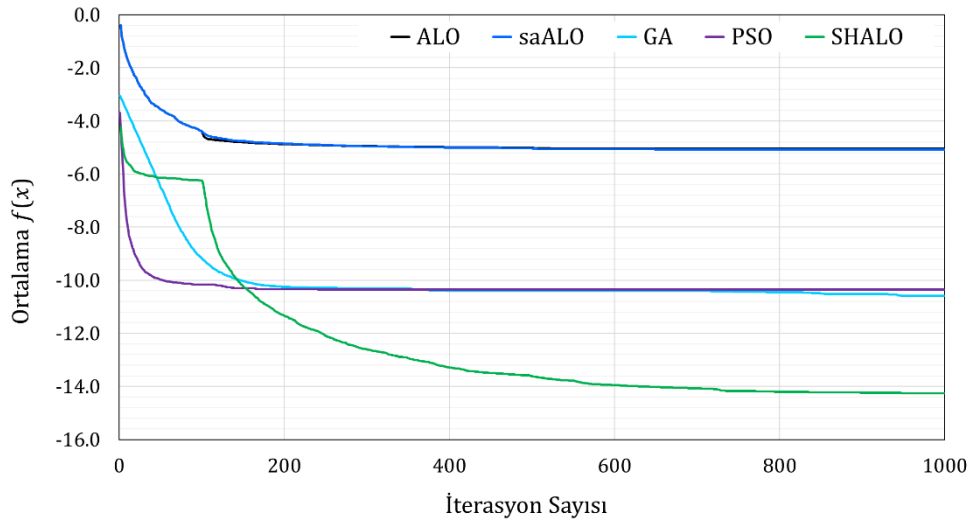
Şekil B. 1: Floudas ve Pardalos test fonksiyonunda farklı λ değerleri için SR (%) değerlerinin değişimi.

Şekil B.1'den görülebileceği gibi, en büyük SR değeri $\lambda = 100$ için 62 olarak elde edilmiştir. Bu nedenle, bu çözüm aynı problemin sırasıyla ALO, saALO, GA ve PSO yaklaşımlarıyla çözülmesiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan bu karşılaştırma işlemine ait sonuçlar Tablo B.1'de verilmiştir.

Tablo B. 1: Farklı yaklaşımlar için Floudas ve Pardalos test fonksiyonunun sonuçlarının değerlendirilmesi.

Ölçüt	ALO	saALO	GA	PSO	SHALO
SR (%)	0	0	8	10	62
En iyi	-10.655	-9.536	-15.000	-15.000	-15.000
En kötü	-2.536	-2.510	-6.000	-6.000	-11.420
Ortalama	-5.051	-5.077	-10.598	-10.357	-14.260
Medyan	-4.922	-4.867	-11.413	-9.000	-14.970
St. Sapma	1.454	1.319	2.613	2.470	1.105

Tablo B.1'den görüleceği üzere, orijinal ALO, saALO ve EALO yaklaşımları gerçekleştirilen 100 çözümün hiçbirinde global optimum çözüme ulaşamamıştır. Buna karşın, GA, PSO ve SHALO yaklaşımları sırasıyla 8, 10 ve 62 kez global optimum çözüme elde etmiştir. Bu sonuçlar, SHALO yaklaşımının hesaplanan SR ölçütü bakımından diğer yaklaşımlara kıyasla en iyi tanımlama performansını sunduğunu ortaya koymaktadır. İstatistiksel değerlendirmelerde, SHALO'nun ortalama ve medyan değerlerinin diğer yaklaşımlara göre global optimum çözüme çok daha yakın olduğu görülmektedir. Her bir yaklaşım için ortalama amaç fonksiyonu değerlerinin iterasyonlarla değişimini gösteren yakınsama grafikleri Şekil B.2'de karşılaştırılmıştır. Grafiklerden açıkça görülebileceği gibi SHALO yaklaşımı diğer yaklaşımlarla kıyaslandığında çok daha iyi bir performans sergilemiştir.



Şekil B. 2: Floudas ve Pardalos test fonksiyonu için elde edilen ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması.

Her bir yaklaşım kullanılarak elde edilen en iyi çözümler için (Tablo B.1) elde edilen karar değişkenleri, amaç ve kısıt fonksiyonu değerleri Tablo B.2’de verilmiştir. Görülebileceği gibi, GA, PSO ve önerilen SHALO yaklaşımı optimum karar değişkeni değerlerini belirleyebilmiştir. Elde edilen sonuçlar kısıtların sağlanıp sağlanmama durumları bakımından değerlendirildiğinde, kullanılan yaklaşımlarının tümünün herhangi bir kısıt ihlali olmadan sonuçlandığı görülmüştür.

Tablo B. 2: En iyi çözümler için Floudas ve Pardalos test fonksiyonuna ait nihai karar değişkenleri, amaç ve kısıt fonksiyonu değerleri.

Değişkenler ve fonksiyon değerleri	ALO	saALO	GA	PSO	SHALO
x_1	0.575	0.529	1.000	1.000	1.000
x_2	0.794	0.852	1.000	1.000	1.000
x_3	1.000	0.998	1.000	1.000	1.000
x_4	0.994	0.928	1.000	1.000	1.000
x_5	0.784	0.794	1.000	1.000	1.000
x_6	0.992	0.865	1.000	1.000	1.000
x_7	0.996	0.998	1.000	1.000	1.000
x_8	0.838	0.742	1.000	1.000	1.000
x_9	0.491	0.450	1.000	1.000	1.000
x_{10}	2.772	2.649	3.000	3.000	3.000
x_{11}	2.980	2.728	3.000	3.000	3.000
x_{12}	2.166	1.935	3.000	3.000	3.000
x_{13}	0.707	0.596	1.000	1.000	1.000
$g_1(x)$	-1.510	-1.860	0.000	0.000	0.000
$g_2(x)$	-1.913	-2.361	0.000	0.000	0.000
$g_3(x)$	-1.266	-1.636	0.000	0.000	0.000
$g_4(x)$	-1.825	-1.587	-5.000	-5.000	-5.000
$g_5(x)$	-3.374	-4.092	-5.000	-5.000	-5.000
$g_6(x)$	-5.832	-6.049	-5.000	-5.000	-5.000
$g_7(x)$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$g_8(x)$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$g_9(x)$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$f(x)$	-10.655	-9.536	-15.000	-15.000	-15.000

B.2. Rastrigin'in Kısıtlı Test Fonksiyonu

Rastrigin'in kısıtlı test fonksiyonu, Poole ve Allen (2019) tarafından önerilmiş olup, orijinal kısıtsız Rastrigin test fonksiyonunun değiştirilmiş bir versiyonudur. Bu fonksiyon, çözüm uzayında global optimum sayısını kontrol etmek için bir parametre, Heaviside fonksiyonu ve orijinal fonksiyonu kısıtlı hale getiren bir kısıt fonksiyonu içermektedir. Poole ve Allen (2019) tarafından önerilen bu kısıtlı test fonksiyonunun matematiksel formu ve karar değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri Denklem (B8)'de sunulmuştur.

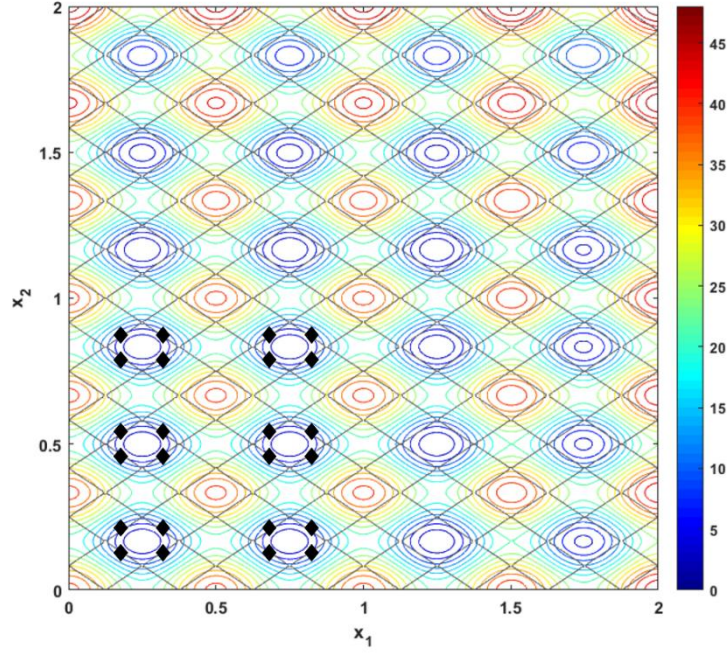
$$\min f(x) = \sum_{k=1}^d \{10(1 + \cos(2\pi\mathcal{K}_k x_k)) + 2\mathcal{K}_k(x_k - 1)^2 H(x_k - 1)\} \quad (\text{B8})$$

$$g(x) = \sum_{k=1}^d 20\cos(4\pi\mathcal{K}_k x_k) \leq 0 \quad (\text{B8a})$$

$$H(y) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } y > 0 \\ 0 & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (\text{B8b})$$

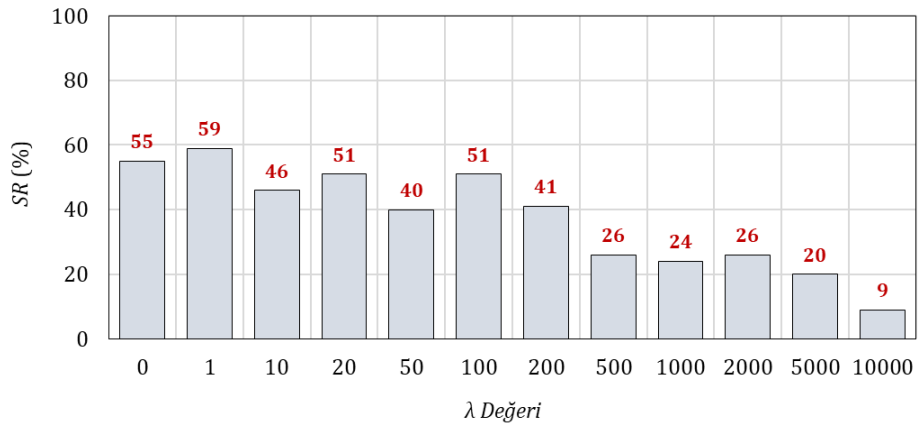
$$0 \leq x_k \leq 2, \quad k = 1, 2, 3, \dots, d \quad (\text{B8c})$$

burada $H(y)$, Heaviside fonksiyonunu; $\mathcal{K}_k \in \mathcal{K}$ ise her arama yönü için global optimum sayısını kontrol eden bir parametreyi temsil etmektedir. Bu değiştirilmiş problemin $2^d \prod_{k=1}^d \mathcal{K}_k$ adet global optimum çözümü olup her bir çözüme karşılık gelen amaç fonksiyonu değeri $f = 10d - 5d\sqrt{2}$ eşitliği ile verilmiştir (Poole ve Allen 2019). Karar değişkeni sayısının $d = 2$ alınması durumu için Rastrigin'in kısıtlı test fonksiyonunun matematiksel çözüm uzayı grafiksel olarak Şekil B.3'te gösterilmiştir. Görülebileceği gibi, matematiksel çözüm uzayında aynı global optimum değerine sahip 24 farklı çözüm bulunmaktadır. Bu uygulama kapsamında ilgili problemin çözümü $d = 5$ karar değişkeni dikkate alınarak yapılmış olup her bir değişken için \mathcal{K}_k değerleri $\mathcal{K} = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 2]$ içinden seçilmiştir.



Şekil B. 3: Rastrigin'in kısıtlı test fonksiyonunun $d = 2$ için grafiksel gösterimi (siyah elmaslar küresel optimum çözümün yerlerini temsil etmektedir).

Bu problem de SHALO'nun performansının tam olarak test edilebilmesi amacıyla farklı λ değerleri için 100'er defa çözülmüştür. Yapılan bu analiz sonucunda her bir farklı λ değeri için elde hesaplanan SR değerleri Şekil B.4'te verilmiştir. Görülebileceği gibi, elde edilen sonuçlar arasında $\lambda = 1$ çözümü en yüksek SR değerini vermiş olup diğer yaklaşımlarla performans karşılaştırması aşamasında bu çözüm kullanılmıştır. İlgili problemin aynı koşullar altında orijinal ALO, saALO, GA ve PSO yaklaşımlarıyla çözümlenmesiyle elde edilen sonuçlar Tablo B.3'te verilmiştir.

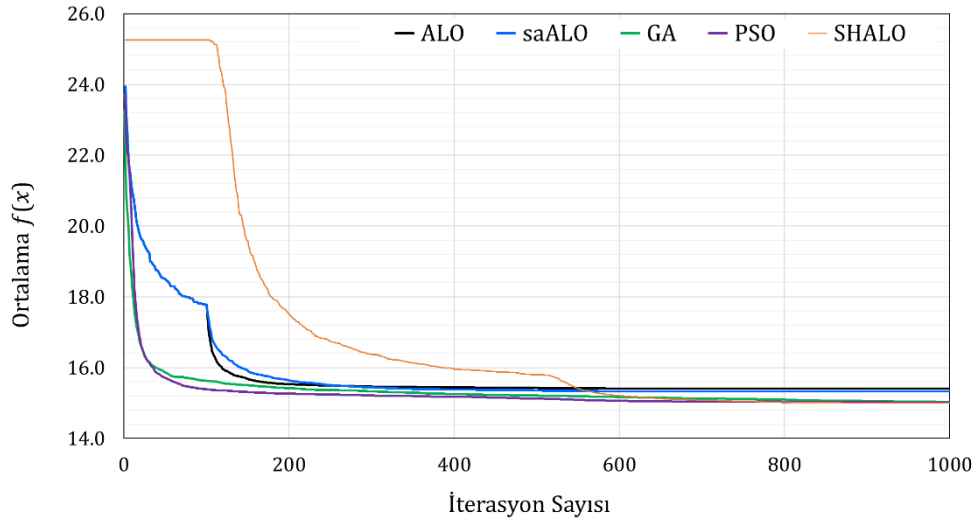


Şekil B. 4: Rastrigin'in kısıtlı test fonksiyonunda farklı λ değerleri için SR (%) değerlerinin değişimi.

Tablo B. 3: Farklı yaklaşımlar için Rastrigin'in kısıtlı test fonksiyonunun sonuçlarının değerlendirilmesi.

Ölçüt	ALO	saALO	GA	PSO	SHALO
SR (%)	30	37	43	58	59
En iyi	14.645	14.645	14.650	14.645	14.645
En kötü	17.573	17.572	16.036	16.113	16.248
Ortalama	15.408	15.330	15.027	15.007	15.002
Medyan	15.273	15.203	14.969	14.927	14.924
St. Sapma	0.608	0.619	0.263	0.318	0.286

Tablo B.3'ten görülebileceği gibi, orijinal ALO ve saALO yaklaşımları için hesaplanan SR değerleri sırasıyla %30 ve %37 olarak elde edilmiştir. Aynı koşullar altında GA, global optimum çözüme %43 oranında ulaşırken PSO ve SHALO yaklaşımları için bu değer sırasıyla %58 ve %59 olarak elde edilmiştir. Daha önce belirtildiği gibi global optimum çözüm sayısı $2^d \prod_{k=1}^d \mathcal{K}_k$ olarak verilmiştir. $d = 5$ ve $\mathcal{K}_k \in [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 2]$ için aynı amaç fonksiyonu değerine (14.645) sahip global optimum çözümlerin sayısı 64 olarak hesaplanmıştır. Her bir yaklaşım için ortalama amaç fonksiyonu değerlerine göre hazırlanan yakınsama grafikleri Şekil B.5'te karşılaştırılmıştır.



Şekil B. 5: Rastrigin'in kısıtlı test fonksiyonu için elde edilen ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması.

Şekil B.5'ten görüleceği gibi, önerilen SHALO yaklaşımının diğer yaklaşımlardan daha düşük ortalama amaç fonksiyonu değerlerine yakınsamıştır. Tablo B.3'teki en iyi

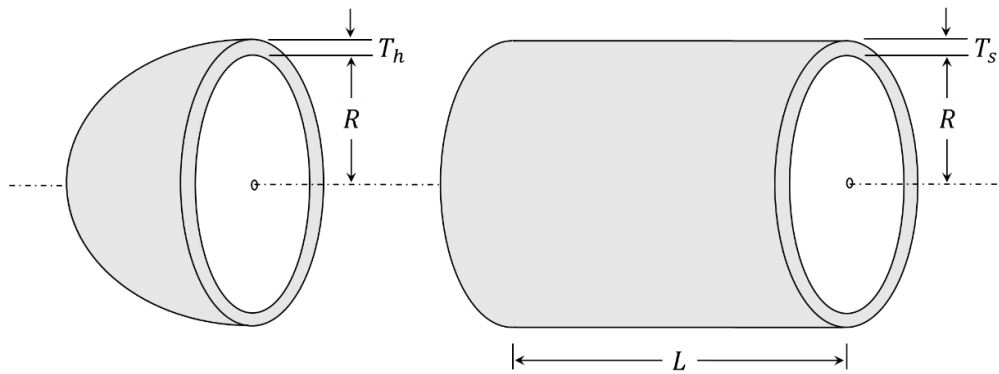
çözümler için nihai karar değişkenleri ile amaç ve kısıt fonksiyonu değerleri Tablo B.4'te karşılaştırılmıştır. Görülebileceği gibi, her bir yaklaşım tarafından farklı karar değişkeni değerleri elde edilmiştir. Buna karşın, bu çözümlere karşılık gelen amaç fonksiyonu değerleri global optimum çözüm olan 14.645 ile aynıdır. Bu sonuç ilgili problemin 64 farklı global optimum çözümü olmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo B. 4: En iyi çözümler için Floudas ve Pardalos test fonksiyonuna ait nihai karar değişkenleri, amaç ve kısıt fonksiyonu değerleri.

Değişkenler ve fonksiyon değerleri	ALO	saALO	GA	PSO	SHALO
x_1	0.625	0.626	0.378	0.375	0.375
x_2	0.625	0.625	0.624	0.375	0.375
x_3	0.375	0.625	0.623	0.375	0.375
x_4	0.625	0.625	0.373	0.625	0.625
x_5	0.187	0.188	0.685	0.313	0.687
$g(x)$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$f(x)$	14.645	14.645	14.650	14.645	14.645

B.3. Basıncı Tank Tasarım Problemi

Basıncı tank tasarım problemi, Kannan ve Kramer (1994) tarafından önerilen ve literatürde sıklıkla incelenen kısıtlı bir mühendislik tasarım problemidir. Bu problemin temel amacı, malzeme, şekillendirme ve kaynak maliyetlerini dikkate alarak tankın toplam maliyetini minimize etmektir. Problem kapsamında tasarım kısıtları tankın yapısal dayanımı ve geometrik sınırlamalarını içermektedir. Tasarlanacak tankın şematik gösterimi Şekil B.6'da sunulmuştur.



Şekil B. 6: Basıncı tank tasarım probleminin şematik görünümü

Şekil B.6'dan görülebileceği gibi, ilgili problemde dört tasarım değişkeni bulunmaktadır: T_s (cidar kalınlığı), T_h (başlık kalınlığı), R (iç çap) ve L (silindirik bölümün uzunluğu). Bu değişkenler sırasıyla $x_1 - x_4$ değişkenleri ile temsil edilmiştir. Bu tasarım değişkenleri arasında, T_s ve T_h yalnızca 0.0625 inç'in tam katları olan ayırık (discrete) değerler alırken, R ve L değişkenleri sürekli (continuous) değerler alabilmektedir. İlgili problemin matematiksel yapısı ile karar değişkenlerinin alt ve üst sınır değerleri Denklem (B9)'da verilmiştir.

$$\min f(x) = 0.6224x_1x_3x_4 + 1.7781x_2x_3^2 + 3.1661x_1^2x_4 + 19.84x_1^2x_3 \quad (\text{B9})$$

$$g_1(x) = -x_1 + 0.0193x_3 \leq 0 \quad (\text{B9a})$$

$$g_2(x) = -x_2 + 0.00954x_3 \leq 0 \quad (\text{B9b})$$

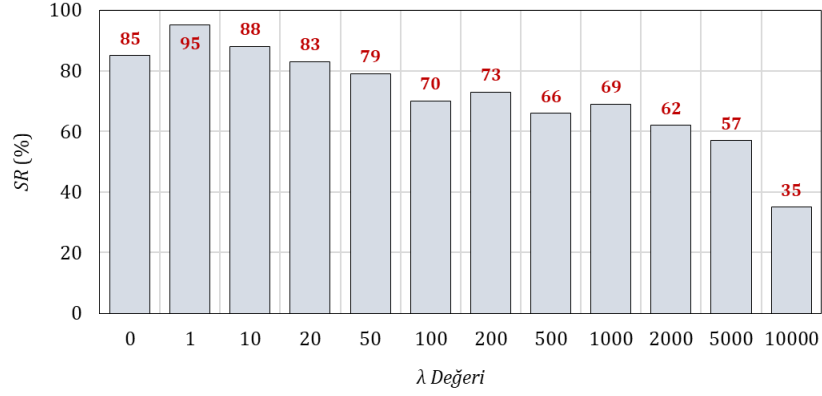
$$g_3(x) = -\pi x_3^2 x_4 - 1.3333\pi x_3^3 + 1296000 \leq 0 \quad (\text{B9c})$$

$$g_4(x) = x_4 - 240 \leq 0 \quad (\text{B9d})$$

$$0.0625 \leq x_1, x_2 \leq 99 \times 0.0625 \quad (\text{B9e})$$

$$10 \leq x_3, x_4 \leq 200 \quad (\text{B9f})$$

Literatürde bu fonksiyon için global optimum çözümün $x^* = [0.8125 \ 0.4375 \ 42.0984 \ 176.6366]$ noktasında olduğu ve bu nokta için fonksiyon değerinin $f(x^*) = 6059.7143$ olduğu Yang ve diğ. (2013) tarafından ispatlanmıştır. Bu mühendislik tasarım probleminin çözümü önerilen SHALO yaklaşımı ile farklı λ değerleri ve 100 farklı rastgele çekirdek değeri için gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu analiz kapsamında elde edilen SR değerleri Şekil B.7'de karşılaştırılmıştır. Görülebileceği gibi, farklı çözümler arasından en büyük SR değeri %95 olarak $\lambda = 1$ için elde edilmiştir. Bu aşamanın ardından ilgili çözüm aynı problemin aynı koşullar altında sırasıyla ALO, saALO, GA ve PSO yaklaşımları ile çözülmesiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Her bir yaklaşım için elde edilen sonuçlar Tablo B.5'te karşılaştırılmıştır.

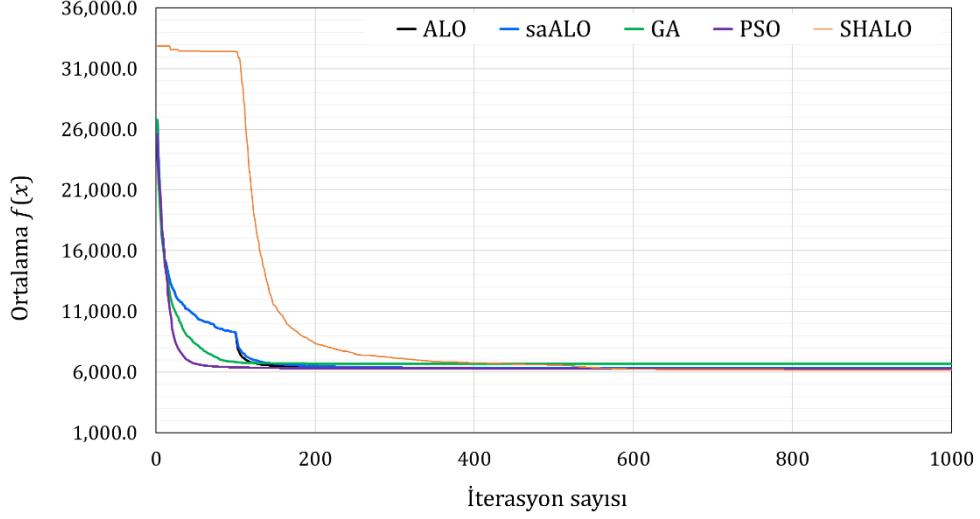


Şekil B. 7: Basıncı tank tasarım probleminde farklı λ değerleri için SR (%) değerlerinin değişimi.

Tablo B. 5: Farklı yaklaşımlar için basıncı tank tasarım probleminin sonuçlarının değerlendirilmesi.

Ölçüt	ALO	saALO	GA	PSO	SHALO
SR (%)	84	88	36	84	95
En iyi	6059.714	6059.714	6059.769	6059.714	6059.714
En kötü	7332.842	7332.842	7551.971	7353.978	6820.422
Ortalama	6307.377	6288.707	6685.965	6277.594	6174.185
Medyan	6090.527	6090.527	6566.208	6090.526	6090.528
St. Sapma	326.329	317.147	457.941	338.994	198.342

Tablo B.5'ten anlaşılacağı üzere, ALO ve saALO yaklaşımları için SR değerleri sırasıyla %84 ve %88 olarak elde edilmiştir. Buna karşın, aynı ölçütün değerleri GA, PSO ve SHALO yaklaşımlarında sırasıyla %36, %84 ve %95 olarak belirlenmiştir. Her bir yaklaşım için iterasyon sayısına bağlı olarak ortalama amaç fonksiyon değerlerinin değişimini gösteren yakınsama grafikleri Şekil B.8'de karşılaştırılmıştır. Grafikler incelendiğinde, bu uygulamada da SHALO'nun daha iyi amaç fonksiyonu değerine yakınsadığı açıkça görülmektedir. Tablo B.5'te yer alan en iyi çözümler için elde edilen nihai tasarım değişken değerleri ile amaç ve kısıt fonksiyonu değerleri Tablo B.6'da karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere, elde edilen tüm tasarım değişken değerleri birbirine oldukça yakın olup, tüm yaklaşımlar için herhangi bir kısıt ihlali olmadan çözüm üretilmiştir.



Şekil B. 8: Basıncılı tank tasarım problemi için elde edilen ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması.

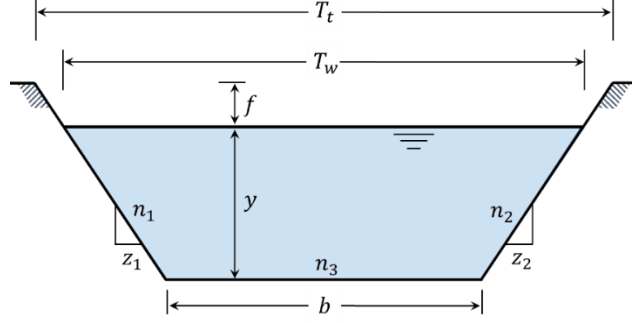
Tablo B. 6: En iyi çözümler için basıncılı tank tasarım problemine ait nihai karar değişkenleri, amaç ve kısıt fonksiyonu değerleri.

Değişkenler ve fonksiyon değerleri	ALO	saALO	GA	PSO	SHALO
x_1	0.813	0.813	0.813	0.813	0.813
x_2	0.438	0.438	0.438	0.438	0.438
x_3	42.098	42.098	42.098	42.098	42.098
x_4	176.637	176.637	176.642	176.637	176.637
$g_1(x)$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$g_2(x)$	-0.036	-0.036	-0.036	-0.036	-0.036
$g_3(x)$	-0.011	-0.012	0.000	0.000	-0.007
$g_4(x)$	-63.363	-63.363	-63.358	-63.363	-63.363
$f(x)$	6059.714	6059.714	6059.769	6059.714	6059.714

B.4. Trapez açık kanal tasarım problemi

Trapez açık kanalların tasarımı, su kaynakları mühendisliğinde kritik öneme sahip bir optimizasyon problemidir. Bu tür kanallar, suyun serbest yüzeyli ve cazibeli bir şekilde sulama, taşkın kontrolü ve su temini gibi çeşitli amaçlarla uzak mesafelere iletilmesini sağlar. Kanal enkesit boyutlarında yapılacak küçük bir iyileştirme veya azaltma, projenin toplam maliyetinde önemli tasarruflar sağlama potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, trapez açık kanalların tasarımı literatürde birçok araştırmacı

tarafından ele alınmış ve kapsamlı olarak incelenmiştir (örneğin, Kaveh ve Talatahari 2010, Das 2000, Jain ve diğ. 2004, Subramanya 2015). Bu çalışma kapsamında dikkate alınan trapez kanala ait enkesit şematik olarak Şekil B.9’da verilmiştir. Bu problem için tasarım değişkenleri yatak genişliği (b), akış derinliği (y) ve kanalın sol ve sağ yüzlerinin eğimleridir (z_1 ve z_2). Bu değişkenler sırasıyla $x_1 - x_4$ değişkenleri ile temsil edilmiştir.



Şekil B. 9: Trapez açık kanal tasarım probleminin şematik görünümü.

Şekil B.9’da T_t , kesitin üst genişliğini; T_w , akış kesitinin üst genişliğini, f hava payını, n_1 , n_2 ve n_3 sırasıyla sol, sağ yüzler ile kanal yatağı için Manning yüzey pürüzlülük katsayısını temsil etmektedir. Açık kanal tasarım probleminin amacı, matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilen maliyet fonksiyonunu minimize etmektir:

$$\min f(x) = c_1 A_t + c_2 P_1 + c_3 P_2 + c_4 P_3 \quad (\text{B10})$$

$$g(x) = \left| \frac{Q n_e}{\sqrt{S_0}} - \frac{A_w^{5/3}}{P_w^{2/3}} \right| - \varepsilon \leq 0 \quad (\text{B10a})$$

burada c_1 , kanalın birim uzunluğu ve birim enkesit alanı için kazı maliyetini; c_2 , c_3 ve c_4 , sırasıyla birim uzunluk için kanalın sol ve sağ şevleri (hava payı dahil) ile kanal tabanı için perdaqlama maliyetini; A_t , kanalın toplam enkesit alanını; P_1 , P_2 ve P_3 sırasıyla kanalın sol ve sağ şevleri ile (hava payı dahil) ve kanal tabanının uzunluklarını; ε , tolerans eşik değerini; Q , kanaldaki akımın debisini; S_0 , kanal taban eğimini; A_w , ıslak enkesit alanını; P_w , ıslak çevreyi ve n_e eşdeğer Manning yüzey pürüzlülük katsayısını göstermektedir. Bu parametreler kullanılarak kanaldaki akımın sürekliliği aşağıdaki eşitliklere bağlı olarak hesaplanmaktadır (Subramanya 2015):

$$A_w = by + (z_1 + z_2) \frac{y^2}{2} \quad (\text{B10b})$$

$$P_w = \{[(z_1^2 + 1)^{1/2} + (z_2^2 + 1)^{1/2}]y + b\} \quad (\text{B10c})$$

$$T_w = b + (z_1 + z_2)y \quad (\text{B10d})$$

$$n_e = \left[\frac{(\sqrt{z_1^2 + 1} \cdot n_1^{3/2} + \sqrt{z_2^2 + 1} \cdot n_2^{3/2})y + b \cdot n_3^{3/2}}{P_w} \right]^{2/3} \quad (\text{B10e})$$

$$A_t = b(y + f) + (z_1 + z_2) \frac{(y + f)^2}{2} \quad (\text{B10f})$$

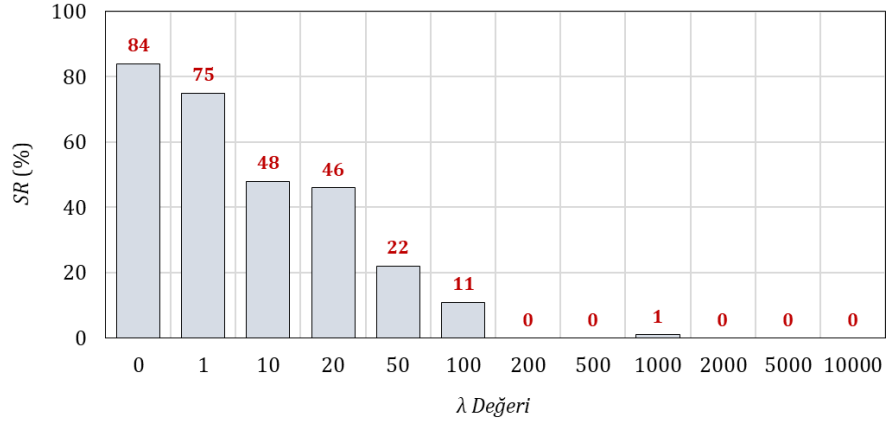
$$P_t = \{[(z_1^2 + 1)^{1/2} + (z_2^2 + 1)^{1/2}](y + f) + b\} \quad (\text{B10g})$$

$$P_1 = \sqrt{(z_1^2 + 1)(y + f)} \quad (\text{B10h})$$

$$P_2 = \sqrt{(z_2^2 + 1)(y + f)} \quad (\text{B10k})$$

$$P_3 = b \quad (\text{B10l})$$

Önerilen SHALO yaklaşımının performansını test etmek amacıyla bu tasarım problemi de farklı λ değerleri ve rastgele sayı çekirdek değerleri dikkate alınarak çözülmüştür. Bu çözümlerde problemle alakalı parametreler şu şekilde kullanılmıştır: $Q = 100$, $f = 0.5$, $S_0 = 0.0016$, $n_1 = 0.018$, $n_2 = 0.020$, $n_3 = 0.015$, $c_1 = 0.60$, $c_2 = 0.25$, $c_3 = 0.20$, $c_4 = 0.30$ ve $\varepsilon = 0.001$. Bu değerler kullanılarak yapılan her bir çözüm için elde edilen SR değerleri Şekil B.10'da karşılaştırılmıştır. Görülebileceği gibi, yapılan çözümler arasından en iyi SR değeri $\lambda = 0$ için elde edilmiştir. Bu çözümü dikkate alarak SHALO yaklaşımının performansı aynı problemin aynı koşullar altında orijinal ALO, saALO, GA ve PSO yaklaşımları ile çözülmesiyle elde edilen sonuçlarla Tablo B.7'de karşılaştırılmıştır. Görülebileceği gibi orijinal ALO ve saALO için SR değerleri sırasıyla %13 olarak elde edilmiştir. Öte yandan, GA, PSO ve SHALO yaklaşımları problemi sırasıyla %4, %46 ve %84'lük SR değerleri ile çözmüştür.

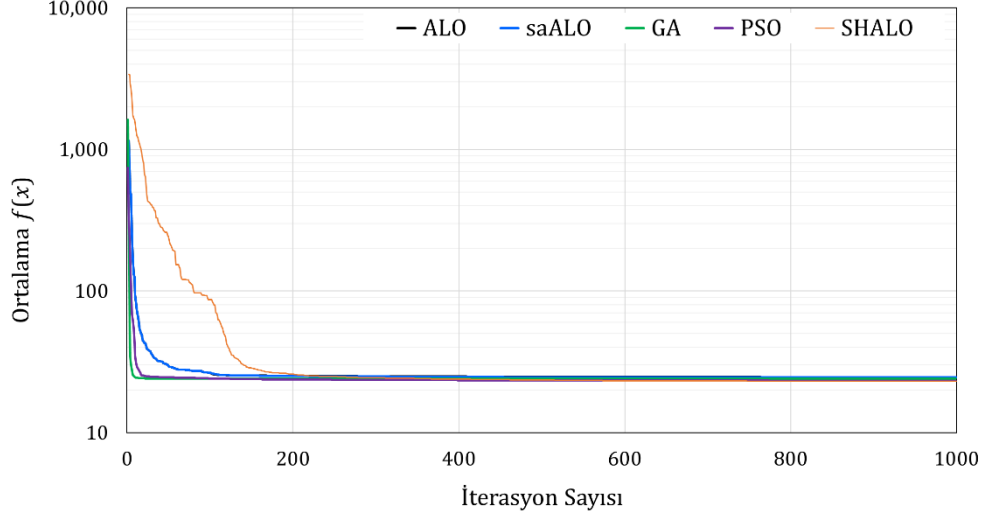


Şekil B. 10: Trapez açık kanal tasarım probleminde farklı λ değerleri için SR (%) değerlerinin değişimi.

Tablo B. 7: Farklı yaklaşımlar için trapez açık kanal tasarım probleminin sonuçlarının değerlendirilmesi.

Ölçüt	ALO	saALO	GA	PSO	SHALO
SR (%)	13	13	4	46	84
En iyi	22.961	22.959	22.968	22.958	22.958
En kötü	29.379	28.697	27.702	24.400	23.993
Ortalama	24.652	24.511	23.975	23.202	23.041
Medyan	24.221	24.117	23.854	23.080	22.968
St. Sapma	1.494	1.370	0.717	0.290	0.182

Tablo B.7’de sunulan istatistiksel sonuçlardan da görülebileceği gibi, SHALO kapsamında elde edilen standart sapma değerinin diğer yaklaşımlardan elde edilenlerden daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu sonuç elde edilen sonuçlarda büyük bir sapma olmadığını göstermektedir. ALO, saALO, GA, PSO ve SHALO yaklaşımlarının 100 defa çalıştırılması sonucunda elde edilen ortalama fonksiyon değerlerinin iterasyon sayısı ile değişimini gösteren yakınsama grafikleri Şekil E21’de karşılaştırılmıştır. Görülebileceği gibi, önerilen SHALO yaklaşımı diğer yaklaşımlardan daha düşük bir ortalama amaç fonksiyon değerine yakınsadığı görülmektedir. Tablo B.7’deki en iyi çözümler için elde edilen nihai değişken değerleri ile amaç ve kısıt fonksiyonu değerleri Tablo B.8’de verilmiştir. Görüleceği gibi belirlenen tasarım değişkenlerinde bazı farklılıklar olmasına rağmen bu değişiklikler hesaplanan amaç fonksiyon değerlerinde önemli bir değişikliğe neden olmamaktadır. Ayrıca, tüm çözümler herhangi bir kısıt ihlali olmadan elde edilmiştir.



Şekil B. 11: Trapez açık kanal tasarım problemi için elde edilen ortalama yakınsama grafiklerinin karşılaştırılması.

Tablo B. 8: En iyi çözümler için trapez açık kanal tasarım problemine ait nihai karar değişkenleri, amaç ve kısıt fonksiyonu değerleri

Değişkenler ve fonksiyon değerleri	ALO	saALO	GA	PSO	SHALO
x_1	5.942	5.787	6.020	5.854	5.839
x_2	4.041	4.049	3.906	4.048	4.047
x_3	0.258	0.289	0.286	0.263	0.262
x_4	0.209	0.244	0.262	0.239	0.248
$g(x)$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$f(x)$	22.961	22.958	22.984	22.968	22.958