

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

**YERALTI SUYU TERS PROBLEMLERİNİN
SİMÜLASYON/OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI
KULLANILARAK ÇÖZÜMÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ONUR GÜNGÖR ŞAHİN

DENİZLİ, OCAK - 2021

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



**YERALTI SUYU TERS PROBLEMLERİNİN
SİMÜLASYON/OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI
KULLANILARAK ÇÖZÜMÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ONUR GÜNGÖR ŞAHİN

DENİZLİ, OCAK - 2021

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.

ONUR GÜNGÖR ŞAHİN

ÖZET

YERALTI SUYU AKIMI TERS PROBLEMLERİNİN SİMÜLASYON/OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI KULLANILARAK ÇÖZÜMÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ONUR GÜNGÖR ŞAHİN

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. GÜRHAN GÜRARSLAN)

DENİZLİ, OCAK - 2021

Bu çalışma kapsamında yeraltı suyu yönetim problemlerinin çözümü için Simülasyon-Optimizasyon (S/O) teknikleri kullanılmıştır. MODFLOW, yeraltı suyu akımı ve kirlilik taşınım denklemlerini çözen ve günümüze yeraltı suyu modellerinin simülasyonu amacıyla uluslararası standart haline gelmiş bir programdır. Bu nedenle simülasyon modelinin oluşturulmasında MODFLOW, Python programlama dilinde oluşturulan Flopy eklentisi aracılığı ile çalıştırılmıştır. Flopy, genellikle simülasyon modelleri için kullanılan kullanıcı ara yüzlerine alternatif olarak geliştirilmiştir. Python programlama dilinde bilimsel amaçlı kullanılan yaygın ve güvenilir kütüphaneler mevcuttur ve bu kütüphanelerle, Flopy birlikte kullanılarak kullanıcı ara yüzleriyle yapılması zor olan model analizleri gerçekleştirilebilir. Hidrolik yönetim modeli olarak ise tepki matrisi yaklaşımı seçilmiştir. S/O süreci başlamadan simülasyon modeli kullanılarak vekil model olarak tepki matrisleri oluşturulmuştur. Optimizasyon işlemi sürecindeyse tepki matrisleri kullanılmıştır. Yeraltı suyu yönetim probleminin tipine göre matematiksel yöntemler olan LP, SLP veya melez GA-LP, GA-SLP algoritmaları kullanılmıştır. Yeraltı suyu yönetim problemlerine örnek olarak drenaj problemleri, yeraltı-yerüstü su etkileşim problemleri ve bilinmeyen kuyu karakteristiklerinin bulunması problemleri incelenmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Yeraltı Suyu Yönetimi, Simülasyon-Optimizasyon, Tepki Matrisi yaklaşımı, Yeraltı-Yerüstü Suyu Etkileşimi.

ABSTRACT

SOLVING GROUNDWATER INVERSE PROBLEMS USING SIMULATION/OPTIMIZATION ALGORITHMS

MSC THESIS

ONUR GUNGOR SAHIN

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR:PROF. DR. GURHAN GURARSLAN)

DENİZLİ, JANUARY 2021

In this study, Simulation-Optimization (S/O) techniques utilized for solving groundwater management problems. MODFLOW is a program that solves groundwater flow and transport equations and has become an international standard for the simulation of groundwater models tomorrow. Therefore, MODFLOW is used for simulation of groundwater models using a program that operates in Python called Flopy which is an alternative to GUI's for simulation models. There are common and reliable libraries used for scientific purposes in the Python programming language. Using these libraries together with Flopy, the model analyzes that are difficult to do with GUI's can be performed. The response matrix approach selected as the hydraulic management model and before starting S/O process, the response matrix created using a simulation model. Mathematical LP, SLP, and metaheuristic GA or hybrid GA-LP, GA-SLP algorithms used according to the type of groundwater management problem. As examples of groundwater management problems, drainage problems, ground-surface water interaction, and identification of unknown pumping well and location problems examined.

KEYWORDS: Groundwater Management, Simulation- Optimization, Response Matrix, Ground-Surface Water Interaction.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç ve Kapsam.....	1
1.2 Tezin Organizasyonu	3
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1 Yeraltı Suyu Hidrolik Yönetim Modelleri	4
2.2 Optimizasyon Teknikleri.....	4
2.2.1 Matematiksel Programlama Teknikleri	4
2.2.2 Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri	5
3. SİMÜLASYON MODELİ	7
3.1 Yeraltı Suyu Modeli.....	7
3.1 Yeraltı Suyu Akım Denklemi.....	9
3.2 Yeraltı Suyu ve Yerüstü Sularının Etkileşimi	10
3.3 Simülasyon Modelinin Çözümü	11
3.4 Simülasyon Modelinin Testi	12
3.4.1 Uygulama 1	12
3.4.2 Uygulama 2	15
4. TEPKİ MATRİSİ YAKLAŞIMI	20
4.1 Yeraltı Suyu Hidrolik Yönetim Modeli	20
4.2 Taylor Serisi Açılımı	21
4.3 Tepki Katsayılarının Bulunması.....	22
4.3.1 Tepki Matrisi Yaklaşımının Testi	22
5. OPTİMİZASYON MODELİNİN OLUŞTURULMASI	24
5.1 Doğrusal Programlama (LP)	25
5.1.1 Doğrusal Programlama (LP) Modelinin Testi	25
5.2 Ardışık Doğrusal Programlama (SLP).....	26
5.2.1 Ardışık Doğrusal Programlama (SLP) Modelinin Testi.....	26
5.3 Genetik Algoritma	27
5.3.1 Genetik Algoritma Genel Akış Şeması	27
5.3.2 Genetik Algoritmanın Testi	28
6. YERALTI SUYU YÖNETİM PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ	30
6.1 Giriş	30
6.2 Yeraltı Suyu Drenaj Problemleri	30
6.2.1 Uygulama 3	31
6.2.1.1 Senaryo 1	32
6.2.1.1 Senaryo 2.....	34
6.2.1.1 Senaryo 3.....	38
6.2.1.1 Senaryo 4.....	40
6.2.1.2 Senaryo 5.....	40

6.3	Yeraltı – Yerüstü Su Etkileşimleri.....	41
6.3.1	Uygulama 4.....	41
6.3.1.1	Senaryo 1.....	42
6.3.1.2	Senaryo 2.....	45
6.4	Bilinmeyen Kuyu Yerleri, Sayıları ve Debilerinin Belirlenmesi	47
6.4.1	Yerel GA.....	49
6.4.2	Uygulama 5.....	50
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER	55
8.	KAYNAKLAR	57



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1: Yeraltı suyu modellerinin sınıflandırılması.....	7
Şekil 3.2: Sonlu farklar yöntemiyle çözüm bölgesinin oluşturulması (Wang ve Anderson, 1982).....	8
Şekil 3.3: Sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm bölgesinin oluşturulması (Wang ve Anderson, 1982)	8
Şekil 3.4: Akarsuları oluşturan elemanların gösterimi (Prudic vd. 2004)	10
Şekil 3.5: Uygulama 1 basınçlı akifer geometrisi ve sınır koşulları (Ayvaz, 2008)	13
Şekil 3.6: Uygulama 1 için iletim kapasitesi değerlerinin alansal dağılımı	13
Şekil 3.7: Bu çalışmada onuncu gün için elde edilen hidrolik yük değerlerinin alansal dağılımı.....	14
Şekil 3.8: Ayvaz (2008) çalışmasında onuncu gün için bulunan hidrolik yük değerlerinin alansal dağılımı	14
Şekil 3.9: Uygulama 2 akifer geometrisi ve sınır koşulları (Ahlfeld 2005).....	15
Şekil 4.1: Yeraltı suyu hidrolik yönetim modelleri	20
Şekil 5.1: Genetik algoritma genel akış şeması.....	28
Şekil 6.1: Uygulama 3 için geometri ve sınır koşullarının gösterimi (Ahlfeld 2005)	31
Şekil 6.2: Üçüncü senaryo için verilen akış şeması.....	34
Şekil 6.3: Uygulama 3, senaryo 2 için amaç fonksiyonundaki değişim	37
Şekil 6.4: Uygulama 3, senaryo 4 için amaç fonksiyonundaki değişim	41
Şekil 6.5: Yerel Arama tekniğinde, arama yapılan komşu hücrelerin gösterilmesi	49
Şekil 6.6: Gözlem ve pompaj kuyularının yerleri (Ayvaz, 2008)	51
Şekil 6.7: Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısına göre değişimi.....	54
Şekil EK-C.1: Rosenbrock test fonksiyonu.....	68
Şekil EK-C.2: Rosenbrock fonksiyonu için jenerasyon sayısı ile amaç fonksiyonundaki değişim	69
Şekil EK-C.3: Rastrigin test fonksiyonu	70
Şekil EK-C.4: Rastrigin fonksiyonu için jenerasyon sayısı ile amaç fonksiyonu arasındaki değişim	70
Şekil EK-C.5: Michalewicz fonksiyonu	71
Şekil EK-C.6: Michalewicz fonksiyonu için jenerasyon sayısı ile amaç fonksiyonundaki değişim	72

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Kuyular ve farklı sezonlar için kuyu işletim debileri (m ³ /gün)	16
Tablo 3.2: Doğal durumunda yerüstü-yeraltı suyu etkileşiminde akarsudaki akış değerleri (m ³ /gün)	17
Tablo 3.3: Üç farklı kuyudan 7 farklı debi değeriyle çekim yapılması sonucu akarsuda 12.sezonda oluşan akış değerleri (m ³ /gün)	18
Tablo 3.4: Pompaj nedeniyle gözlem yerlerinde debilerdeki oluşan azalmalar	19
Tablo 4.1: Uygulama 3 için elde edilen tepki katsayıları	23
Tablo 4.2: Tepki katsayıları kullanılarak kuyuların bulunduğu hücrelerdeki hidrolik yük değerlerinin bulunması	23
Tablo 5.1: Doğrusal programlama için test fonksiyonlarının global optimum değerleri ve elde edilen çözümler	25
Tablo 5.2: F4 test fonksiyonunda bulunan optimal çözüm ve karar değişkenleri .	26
Tablo 5.3: Genetik Algoritma modelinin testinden elde edilen sonuçlar	29
Tablo 6.1: Uygulama 3, senaryo 1 için elde edilen tepki katsayıları.....	33
Tablo 6.2: Uygulama 3, ilk senaryoda elde edilen debi ve hidrolik yük değerleri	33
Tablo 6.3: Başlangıç popülasyonu.....	35
Tablo 6.4: İlk birey için güncellenen tepki matrisi.....	36
Tablo 6.5: Birinci jenerasyonda popülasyondaki bireyler için sabit ve işletim maliyetleri.....	36
Tablo 6.6: Uygulama 3, ikinci senaryoda elde edilen debi ve hidrolik yük değerleri.....	37
Tablo 6.7: Uygulama 3, üçüncü senaryoda elde edilen hidrolik yük ve debi değerleri.....	39
Tablo 6.8: MODFLOW ve Tepki Matrisleriyle elde edilen hidrolik yük değerleri arasındaki mutlak hatalar	39
Tablo 6.9: Uygulama 3, senaryo 4 için elde edilen debi ve hidrolik yük değerleri	40
Tablo 6.10: Uygulama 4, senaryo 1 için kuyulardan çekilen debi değerleri (m ³ /gün).....	43
Tablo 6.11: Uygulama 4 senaryo 1 için gözlem yerlerinde oluşan yerüstü akış değerleri (m ³ /gün).....	44
Tablo 6.12: Uygulama 4 senaryo 1 için değişken pertürbasyon değerleriyle elde edilen mutlak ve rölatif hatalar (m ³ /gün)	44
Tablo 6.13: Uygulama 4 senaryo 1 için sabit pertürbasyon değeriyle elde edilen mutlak ve rölatif hatalar (m ³ /gün).....	45
Tablo 6.14: Uygulama 4, Senaryo 2 için elde edilen tepki katsayıları	46
Tablo 6.15: Uygulama 4, senaryo 2 için kuyulardan çekilen debi değerleri (m ³ /gün).....	46

Tablo 6.16: Uygulama 4, senaryo 2 için gözlem yerlerinde oluşan yerüstü akış değerleri (m ³ /gün).....	47
Tablo 6.17: Uygulama 4 senaryo 2 için gözlem yerlerinde oluşan mutlak ve rölatif hatalar.....	47
Tablo 6.18: Kuyulardan çekilen gerçek debi değerleri (m ³ /gün).....	51
Tablo 6.19: Kuyu sayısı ile beraber RE değerlerindeki değişim.....	52
Tablo 6.20: Farklı standart sapmalara sahip hata değerleri için bulunan RE değerleri.....	52
Tablo 6.21: 10 çalıştırmada farklı standart sapmalara sahip hata değerleriyle kuyuların doğru yerlerine gitme başarıları.....	52
Tablo 6.22: Belirlenen kuyu yerlerinin ve debi değerleri ve gerçek değerler ile karşılaştırılması.....	53
Tablo 6.23: Belirlenen kuyu yerleri ve RE değerlerinin Ayvaz (2008) çalışmasıyla karşılaştırılması.....	54
Tablo 6.24: 20 farklı çalıştırma için Klasik ve Yerel GA teknikleriyle elde edilen RE değerleri.....	54

SEMBOL LİSTESİ

ϵ	:	Durdurma kriteri
ϵ_1	:	SLP tekniğinde iki iterasyon arasında debilerdeki değişim farkını kontrol eden değer
ϵ_2	:	SLP tekniğinde İki iterasyon arasında amaç fonksiyonundaki değişimi kontrol eden parametre
α	:	Tepki katsayısı
σ	:	Standart sapma
A	:	Akarsu kesit alanı
C	:	Zaman birimine göre değişen sabit
b	:	Karar değişkenlerinin uyması gereken kısıtlar
$f(x)$:	Maksimize veya minimize edilecek olan amaç fonksiyonu
f^*	:	Amaç fonksiyonu için elde edilen optimum değer
$g(x)$:	Eşitsizlik kısıtı
GA	:	Genetik Algoritma
$GA-LP$:	Genetik Algoritmayla LP'nin melez kullanıldığı teknik
$GA-SLP$:	Genetik Algoritmayla SLP'nin melez kullanıldığı teknik
$H(x)$:	Eşitlik kısıtı
h	:	Hidrolik yük
h_s	:	Akarsuyun hidrolik yükü
h_a	:	Akiferin hidrolik yükü
h^0	:	Başlangıçta bilinen hidrolik yük değeri
Im_9	:	Dokuzuncu sezon için dışsal kaynaktan akifere aktarılan debiler

Im_{10}	:	Onuncu sezon için dışsal kaynaktan akifere aktarılan debiler
Im_{11}	:	On birinci sezon için dışsal kaynaktan akifere aktarılan debiler
Im_{12}	:	On ikinci sezon için dışsal kaynaktan akifere aktarılan debiler
J	:	Jacobiyen matrisi
K_{xx}	:	x yönündeki hidrolik iletkenlik değeri
K_{yy}	:	y yönündeki hidrolik iletkenlik değeri
K_{zz}	:	z yönündeki hidrolik iletkenlik değeri
K_s	:	Akarsu yatağının hidrolik iletkenliği
KDD	:	Kısmi Diferansiyel Denklem
LP	:	Doğrusal Programlama
l	:	Akarsu yatağının uzunluğu
m	:	Akarsu yatağının kalınlığı
n	:	Manning pürüzlülük katsayısı
R	:	Hidrolik yarıçap
Q_0	:	Başlangıç için bilinen debi değerleri
Q_s	:	Akarsu deşarj debisi
Q_{2a}	:	Kış sezonu için ikinci kuyudan çekilen debi değeri
Q_{2b}	:	İlkbahar sezonu için ikinci kuyudan çekilen debi değeri
Q_{2c}	:	Yaz sezonu için ikinci kuyudan çekilen debi değeri
Q_{2d}	:	Sonbahar sezonu için ikinci kuyudan çekilen debi değeri
Q_{3b}	:	İlkbahar sezonu için üçüncü kuyudan çekilen debi değeri
Q_{3d}	:	Sonbahar sezonu için üçüncü kuyudan çekilen debi değeri
Q_L	:	Akarsuyla akifer arasındaki sızıntı debisi
Q_{Δ}	:	Pertürbasyon debi değeri
Q^*	:	Kuyudan çekilen optimum debi değeri
$Qsfr$:	Kuyulardan debi çekilmesi halinde oluşan yüzeysel akış

$Qsfr^b$:	Kuyulardan çekim olmaması halindeki doğal yüzeysel akış
S	:	Depolama katsayısı
$SF1$:	Birinci debi gözlem lokasyonu için yüzeysel akış
$SF2$:	İkinci debi gözlem lokasyonu için yüzeysel akış
$SF3$:	Üçüncü debi gözlem lokasyonu için yüzeysel akış
$SF4$:	Birinci debi gözlem lokasyonu için yüzeysel akış
SLP	:	Ardışık Doğrusal Programlama
S_0	:	Akarsu yatağının eğimi
S_s	:	Özgül depolama katsayısı
$T_{x,y,z}$:	x, y, z yönlerindeki iletim katsayısı değerlerini
t	:	Zaman birimi
w_s	:	Akarsu yatağının genişliği
W	:	Kaynak-yitik terimi
X	:	Karar değişkenlerinin alt ve üst sınırlarını içeren küme
x^*	:	Karar değişkeni için elde edilen optimum değer

ÖNSÖZ

Öğrencilerini her daim sabır ve hoşgörüyle dinleyen, yüksek lisans eğitimim boyunca beni destekleyen, yönlendiren tez danışmanım Prof. Dr. Gürhan GÜRARSLAN'a,

Tavsiyeleriyle bu tezin şekillenmesine katkı sağlayan Prof. Dr. Mustafa Tamer AYVAZ'a,

Tez içindeki şekilleri oluşturmamda bana yardımcı olan ve yüksek lisans eğitimim boyunca yanımda olan Emine GÜNGÖR'e,

Hayatım boyunca her zaman örnek aldığım babam Rafet ŞAHİN'e, oğullarımı sonsuz sevgi ve şefkatle büyüten annem Necla ŞAHİN'e çok teşekkür ediyorum.

1. GİRİŞ

1.1 Amaç ve Kapsam

Dünya nüfusu küresel olarak hızlı bir şekilde artmaktadır ve 2050 yılında toplam nüfusun 9,5 milyara yaklaşacağı öngörülmektedir. Nüfusun artmasıyla endüstriyel, tarımsal ve kentsel kullanım ihtiyaçları nedeniyle insanların suya duyduğu ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Dünya çapında artan talepler ve küçülen su kaynakları nedeniyle yeraltı su kaynaklarının yönetimi, zorlu bir vazifedir (Singh, 2014).

Türkiye genelindeyse nüfusun 2050 yılında 95 milyona ulaşması beklenmektedir. Buna rağmen iklim değişikliği ve nüfus artışı sebebiyle, 2007'de 1610 m³ olan kişi başına düşen su potansiyelinin 2030'da 1300 m³'e düşmesi beklenmektedir (Yazicigil ve Ekmekci, 2020).

Nüfusun artışıyla beraber insan yoğunluğunun fazla olduğu kritik bölgelerdeki yerüstü su kaynakları büyük oranda kirlenmiş ve kullanılamaz hale gelmiştir. Bu sebeple yeraltı su kaynakları, su ihtiyacının temini konusunda daha fazla önem kazanmaya başlamıştır. Yeraltı suyu kaynaklarının aşırı kullanımı insanlık için yeni problemler oluşturmaktadır. Bu problemler; akifer depolama-tükenme gidişatının yönetilmesi, zemin oturmaları, yeraltı suyuna bağlı ekolojik sistemler, yeraltı suyuna tuzlu su girişi vb aşılması güç problemlerden bazılarıdır (Gorelick ve Zheng, 2015).

Gerek milli kaynakların düzgün yönetilmesi için gerekli su bütçesinin oluşturulması, gerekse de yukarıda tanımlanan yeraltı suyu yönetim problemlerinin çözülmesi amacıyla uzun süredir kullanılan araçlar Simülasyon-Optimizasyon (S/O) modelleridir.

Simülasyon modelleri kütlelerin korunumu ve Darcy kanunlarının birleşimiyle elde edilmiş fiziksel temelli diferansiyel denklemlerin çözümüne dayanır. Diferansiyel denklemlerin çözümü için kullanılan tekniklerden bazıları sonlu farklar

ve sonlu elemanlar yaklaşımlarıdır. Yeraltı suyu modelleri su kaynaklarının yönetimi konusunda karar almada kullanılan araçlardır (Yeh, 1992).

Yeraltı suyu hidrolik yönetim modellerinin oluşturulabilmesi için yerleşik yaklaşım ve tepki matrisi yaklaşımı kullanılmaktadır (Gorelick, 1983). Yerleşik ve tepki matrisi yaklaşımları aracılığıyla simülasyon ve optimizasyon modelleri birleştirilir. S/O modelleri büyük ve karmaşık yeraltı suyu sistemlerinde kullanıldığı zaman hesaplama yükü oldukça artmaktadır. Bu yüzden S/O modellerinde büyük çoğunlukla tepki matrisi yaklaşımı kullanılmaktadır (Bassel, 2015).

Optimizasyon metotları matematiksel ve sezgisel olarak ikiye ayrılır. Matematiksel tabanlı algoritmalar hesaplama olarak efektiftirler ancak kompleks problemlerde birden fazla yerel minimum olması durumunda yerel çözüme takılabilirler. 1990'lı yıllardan itibaren yeraltı suyu yönetim problemlerinde kullanılmaya başlayan sezgisel algoritmalar türev bilgisine ihtiyaç duymazlar ve global veya globale yakın çözümlere yakınsayabilmektedirler. Ancak sezgisel algoritmalar genellikle yoğun hesaplama yükü gerektirir.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında insan nüfusu arttıkça yeraltı suyu yönetim modellerine duyulan ihtiyaç da giderek artmaktadır. Bu tez kapsamında yeraltı suyu problemlerine çözüm geliştirebilmek amacıyla S/O teknikleri kullanılmıştır. Simülasyon modeli MODFLOW programıyla oluşturulmuş, MODFLOW'u çalıştırabilmek için Python programla dilinde yazılmış Flopy eklentisi kullanılmıştır. Hidrolik yönetim modeli olarak tepki matrisi yöntemi tercih edilmiştir. Optimizasyon modelinde, doğrusal problemlerin çözümünde hesaplama olarak efektif olduğu için LP kullanılmıştır. Doğrusal olmayan problemlerin çözümünde ise problemi doğrularlaştırarak iteratif çözüm yapan SLP algoritması kullanılmıştır. GA literatürde yaygın olarak kullanılan sezgisel algoritmalarından biridir ve süreksiz problemlerin çözümü GA ile yapılabilmektedir. Bu yüzden matematiksel yöntemlerin çözüme ulaşamadığı problemlerdeyse LP ve SLP algoritmaları Genetik Algoritmayla birlikte melez olarak kullanılmıştır.

1.2 Tezin Organizasyonu

Bu tez yedi ana bölümden oluşacak şekilde organize edilmiştir. İlk bölümde tezin amacı ve konusuyla ilgili genel bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde yeraltı suyu yönetimiyle ilgili geniş literatür bilgisi yer almaktadır. Üçüncü bölümde yeraltı suyu akım denkleminin çözümünün yapıldığı simülasyon modelinin nasıl oluşturulduğu açıklanmıştır. Daha sonra oluşturulan simülasyon modeli literatürde yer alan iki hipotetik problemle test edilmiştir. Dördüncü bölümde hidrolik yönetim modelinin oluşturulmasında kullanılan tepki matrisi yaklaşımında, tepki katsayılarının ve tepki matrisinin nasıl oluşturulduğu açıklanmış ve bu konuda bir uygulama yapılarak yaklaşımın doğru şekilde çalışıp çalışmadığı test edilmiştir. Beşinci bölümdeyse optimizasyon modeli oluşturulmuştur. LP ve SLP algoritmaları için uygulamalar çözümlenerek algoritmaların çalışması test edilmiştir. GA ise literatürde yer alan üç farklı test fonksiyonu kullanılarak test edilmiştir. Altıncı bölümdeyse karar vericilerin karşılaştığı yeraltı suyu yönetim problemlerinden birkaçı tanıtılmış ve bu problemler oluşturulan S/O teknikleriyle çözülmüştür. Son bölümdeyse yapılan tez çalışmasına ait sonuçlar ve öneriler kapsamlı şekilde verilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Yeraltı Suyu Hidrolik Yönetim Modelleri

Simülasyon ve optimizasyon modellerinin birlikte çalıştırılabilmesi için kullanılan en yaygın metotlar yerleşik yaklaşım [Gorelick, 1983; Gharbi ve Peralta, 1994; Peralta vd., 1995; Khadem ve Afshar, 2013; Ayvaz & Elçi, 2013] ve tepki matrisi yaklaşımıdır [Gorelick, 1983; Danskin ve Gorelick, 1985; Hallaji ve Yazicigil, 1996; Barlow vd., 2003; Ahlfeld,2005; Rejani vd., 2009; Peralta vd., 2011; Wanakule ve Adams, 2014]. Diğer yaklaşımlarsa regresyon denklemleri [Ejaz ve Peralta, 1995; Cooper vd., 1998], yapay sinir ağlarıdır [Rogers ve Dowla, 1994; Aly ve Peralta, 1999].

Yerleşik yaklaşım, her zaman adımı ve her hücre için bir denklem içerdiği için zamana bağlı akımlarda daha fazla bilgisayar hafızası gereklidir ve işlem yükü artabilir. Genel olarak zamana bağlı problemlerde tepki matrisi yaklaşımı ile oluşturulan S/O modelleri tercih edilir (Peralta vd., 1995).

Hidrolik yönetim modelleri arasında yaygın olarak yerleşik yaklaşım ve tepki matrisi yaklaşımı kullanılmaktadır. Kısıt olarak çok fazla hücrenin kullanılmadığı durumlarda bilgi-işlem süresini kısalttığı için ve çok yönlü analizler yapılabildiği için tepki matrisi yaklaşımı tercih edilmektedir.

2.2 Optimizasyon Teknikleri

2.2.1 Matematiksel Programlama Teknikleri

Optimum yeraltı suyu yönetiminde kullanılan en eski ve yaygın yöntemler matematiksel programlama teknikleridir. Literatürde kullanılan programlama teknikleri şunlardır: Doğrusal programlama (LP) [Aguado ve Remson, 1974; Barlow vd., 2003; Ahlfeld,2005; Wanakule ve Adams, 2014], Doğrusal olmayan

programlama (NLP) [Gorelick vd., 1984; Mantoglou ve Papantoniou, 2008], Diferansiyel Dinamik Programlama (DDP) [Jones vd., 1987; Chang vd., 1992; Hsiao ve Chang, 2002]

Yeraltı suyu yönetiminde matematiksel tekniklerinin kullanımı hakkında detaylı bilgiler derleme çalışmalarda [Das ve Datta, 2001; Singh, 2012; Gorelick ve Zheng, 2015] detaylı olarak verilmiştir.

Barlow vd., (2003) çalışmasında kuyuların yerüstü sularına etkisinin incelendiği zamana bağlı bir yönetim modeli kullanılmıştır. Hidrolik yönetim modeli olarak kuyulardan çekilen debilerle, yerüstü akışındaki azalmalar arasında cebirsel ilişkilerin kurulduğu tepki matrisi yaklaşımını ve optimizasyon modelindeyse LP tekniğini kullanılmıştır.

Ahlfeld, (2005) çalışmasında yeraltı suyu yönetim akım problemlerinin çözüldüğü Fortran tabanlı bir program geliştirilmiştir. Hidrolik yönetim modeli olarak tepki matrisi yaklaşımı, optimizasyon modelindeyse LP, SLP teknikleri kullanılmıştır.

Tampa Bay Water, Florida'nın en büyük su sağlayıcısıdır ve 2,3 milyon insana yaklaşık olarak günlük 833 milyon – 990 milyon litre su sağlamaktadır. Tampa Bay Water sistemi S/O tekniklerinin kullanımında en modern, sofistike örneklerinden biridir. Yerüstü-yeraltı sularının birlikte modellendiği sistemde amaç fonksiyonu, su talep kısıtlarını sağlayarak doğal sistemi korumaktır. Hidrolojik modeli çalıştırmanın uzun sürmesi ve karar değişken sayısının çokluğu sebebiyle karar vericiler Tampa Bay Water için hidrolik yönetim modeli olarak yerleşik yaklaşım yerine tepki matrisi yaklaşımı ve optimizasyon modeli içinse LP programla tekniğini tercih etmişlerdir.

2.2.2 Sezgisel Optimizasyon Yöntemleri

Matematiksel programlama tekniklerinin sınırlamaları nedeniyle 1990 yıllardan itibaren sezgisel optimizasyon yöntemleri geliştirilmekte ve yeraltı suyu yönetim problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sezgisel yöntemlerin dezavantajları çözüm uzayında rastgele arama yaptıkları için hesaplama yükü oluştururlar.

Avantajlarıysa türev bilgisine ihtiyaç duymadıkları için global veya globale yakın çözümlere yakınsayabilmektedirler.

Yeraltı suyu yönetim modellerinde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri Genetik Algoritmadır (GA) [Goldberg , 1989]. GA'nın optimizasyon tekniği olarak literatürde bir çok çalışmada kullanılmıştır [McKinney ve Lin, 1994; Wang ve Zheng, 1998; Reed vd., 2000; Ayvaz ve Elçi, 2018].

Yeraltı suyu yönetiminde Genetik Algoritma ve diğer modern yöntemler hakkında detaylı bilgiler, bu yöntemlerin su yönetiminde kullanımı (Tayfur, 2017) derleme çalışmasında kapsamlı bir biçimde verilmiştir.

Hsiao ve Chang, (2002) çalışmasında kuyuların işletim maliyetinin yanı sıra sabit maliyetleri de dahil etmek amacıyla GA tekniğini kullanmışlardır. Sabit maliyet problemlerinde çözüm uzayında oluşan süreksizliklerden dolayı LP, SLP gibi klasik matematiksel tekniklerle çözüm bulunamamaktadır. Bu sorunu aşmak için bahsedilen çalışmada hidrolik yönetim modeli olarak yerleşik yaklaşım ve GA-DDP melez bir optimizasyon tekniği kullanılmıştır.

Yeraltı suyunun planlanması ve yönetiminde yeraltı suyu kalitesi ve hidrolik yük değerleri için uygun gözlem verileri gereklidir. Gözlem kuyuları alansal olarak modellenen havzalara dağılmıştır ve ekonomik sebeplerle havzaya yayılı en az gözlem kuyusu olması istenmektedir. Ayvaz ve Elçi, (2017,2018) çalışmalarında en az gözlem kuyusuyla, mekânsal olarak yeraltı suyu kalitesinin ve hidrolik yüklerin incelenebildiği bir gözlem ağı oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu amaçla optimizasyon tekniği olarak genetik algoritma kullanılmıştır.

3. SİMÜLASYON MODELİ

3.1 Yeraltı Suyu Modeli

Modeller gerçek hayata dair karmaşık problemlerin basitleştirilerek temsil edilebilmesi amacıyla oluşturulur. Örneğin haritalar karmaşık coğrafi yapıları basitleştirilmiş şekillerde temsil eden modellerdir. Aynı şekilde yeraltı suyu modelleri de yeraltı suyu kaynaklarının yönetilmesinde kullanılan değerli araçlardır.

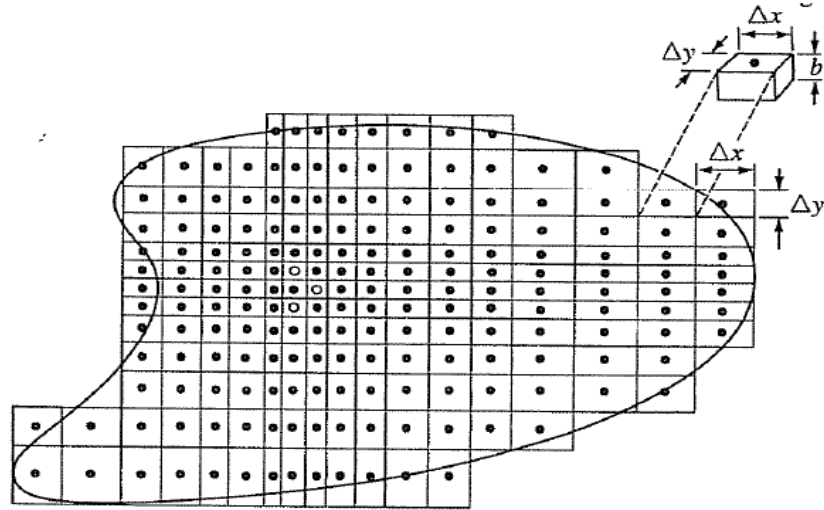
Yeraltı suyu modelleri Şekil 3.1’de gösterildiği gibi kum tankı, elektriksel ve matematiksel modeller olarak üçe ayrılmaktadır. Kum tankı modeli ve elektriksel model fiziksel modellerdir ve laboratuvar ölçeğindedirler. 1960’lı yıllardan sonra yüksek hızlı dijital bilgisayarların yaygınlaşması ile fiziksel modeller önemini kaybetmiş, matematiksel modeller yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır (Wang ve Anderson, 1982).

Matematiksel model, fiziksel bir olayın kısmi diferansiyel denklemler ile temsil edilmesidir. Yeraltı suyu akışını temsil eden matematiksel model, analitik veya sayısal çözüm yöntemleri kullanılarak çözülebilir. Analitik çözümlerin yapılması için temsil edilen fiziksel süreçte birtakım basitleştirmelerin yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, analitik çözüm yöntemi kompleks sistemlerinin çözümü için elverişsizdir. Karmaşık geometriye ve sınır koşullarına sahip heterojen ortamda üç boyutlu, zamana bağlı yeraltı suyu hareketinin çözülmesi zahmetli bir problemdir ve sayısal yöntemler ile çözülebilir (Anderson vd., 2015).

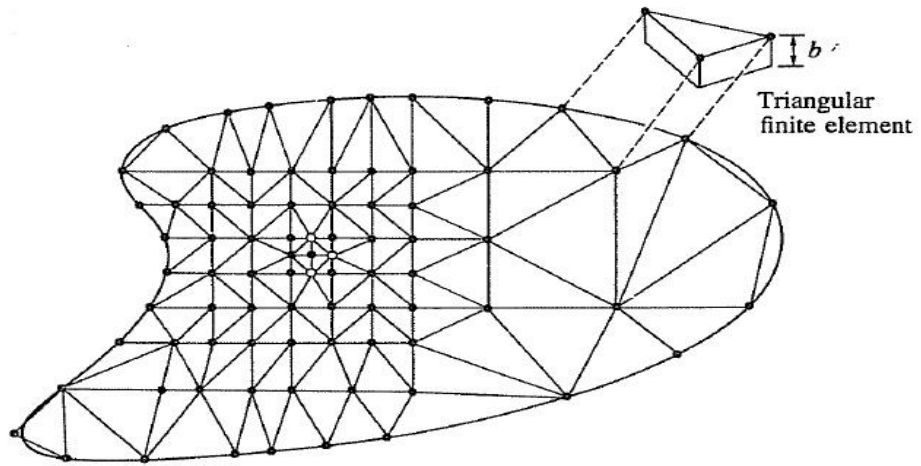


Şekil 3.1: Yeraltı suyu modellerinin sınıflandırılması

Günümüzde yaygın olarak kullanılan sayısal metotlar sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleridir. Sonlu farklar metodunu yeraltı suyu problemlerinde uygulamak daha pratiktir. Ancak Şekil 3.2’de gösterildiği gibi çözüm alanı kare veya dikdörtgen hücrelere bölündüğü için düzensiz sınır bölgelerinde çözümün duyarlılığı azalmaktadır. Sonlu elemanlar metoduyla ise çözüm bölgesi Şekil 3.3’teki gibi üçgen veya farklı geometrik yapıdaki birimlere bölünerek sonlu farklar metoduna göre daha hassas sonuçlar elde edilebilmektedir.



Şekil 3.2: Sonlu farklar yöntemiyle çözüm bölgesinin oluşturulması (Wang ve Anderson, 1982)



Şekil 3.3: Sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm bölgesinin oluşturulması (Wang ve Anderson, 1982)

3.1 Yeraltı Suyu Akım Denklemi

Bir akifer sistemi için genel formda üç boyutlu, zamana bağlı yeraltı suyu hareketini temsil eden KDD Denklem (3.1)'de verilmiştir (Harbaugh, 2005).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de h , hidrolik yükü [L]; K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} , x, y, z yönlerindeki hidrolik iletkenlik değerlerini [L/T]; W , kaynak- yitik terimini [L/T]; S_s , özgül depolama katsayısını göstermektedir.

Denklem (3.1)'de verilen KDD, h 'ye göre ikinci dereceden türev içeren genel bir matematiksel ifadedir. Çözümün ilgilendiğimiz probleme özgü olması için problemin başlangıç ve sınır koşullarının bilinmesi gerekmektedir (Wang ve Anderson, 1982). Başlangıç koşulu zamana bağlı akış problemlerinde kullanılmaktadır. Zamana bağlı problemlerde, $t = 0$ anındaki akış sistemine ait hidrolik yük değerlerinin dağılımının bilinmesi gerekmektedir (Batu, 1998). Ayrıca, sistemin kararlı şekilde çalıştırılmasıyla elde edilen hidrolik yük değerleri de zamana bağlı problemler için başlangıç koşulu olarak kullanılabilir.

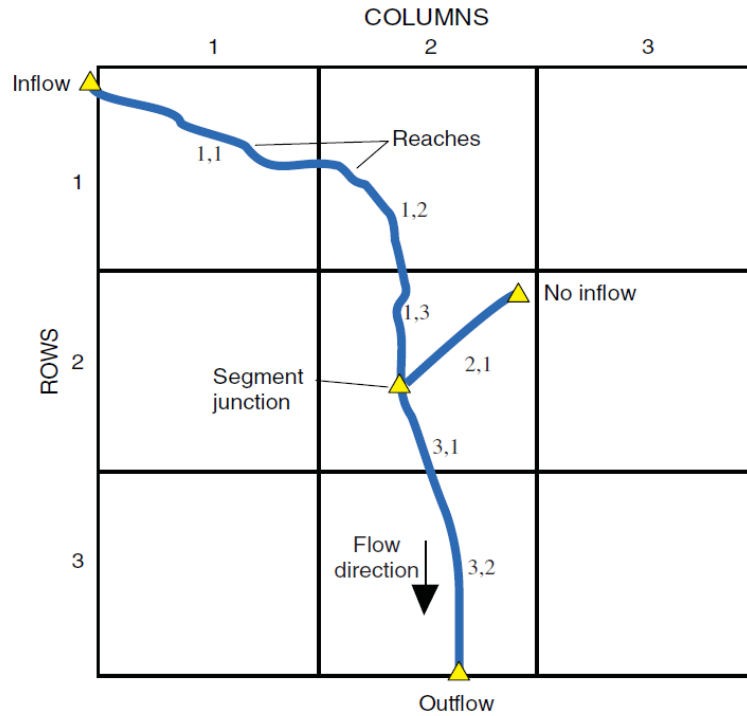
Sınır koşulu olarak ise literatürde yaygın olarak kullanılan üç tip sınır koşulu bulunmaktadır. Dirichlet sınır koşulu incelenen bölgedeki belirli sınırlardaki hidrolik yük değerlerinin (nehir göl vb) bilinmesi, Neumann sınır koşulu geçirimsiz bir yüzey ya da komşu akiferlerden sızma olması, Cauchy sınır koşulu ise nehir ve göl gibi yüzeylerde hem hidrolik yük değerlerinin bilinmesi hem de akiferin bu yüzeylerden beslenmesi durumunda kullanılmaktadır (Ayvaz, 2008).

3.2 Yeraltı Suyu ve Yerüstü Sularının Etkileşimi

Yerüstü suları ekolojik olarak yeraltı suyuna bağımlı ekolojik sistemlerdir. Çoğunlukla akarsu ve nehirler, yeraltı suyunun deşarj olduğu yerüstü su kaynaklarıdır.

Yeraltı suyunun akarsu ve nehirlere olan deşarjı bölge ve zamana göre yıllık akış debisinin %90'ını oluşturabilir. Bu nedenle yeraltı suyu yerüstü kaynaklarının beslenmesinde kritik bir öneme sahiptir (Barlow ve Leake, 2012).

Yeraltı suyu, yerüstü suyu etkileşimini inceleyebilmek için akarsu, segment ve akış kolu olmak üzere iki parçaya bölünür (Şekil 3.4). Her akış kolu kendine ait sonlu farklar şemasındaki bir hücreden sorumludur (Şekil 3.2). Segment ise birden fazla akış kolunun bir araya gelmesiyle oluşmaktadır (Prudic, 1989).



Şekil 3.4: Akarsuları oluşturan elemanların gösterimi (Prudic vd. 2004)

Akarsu ve akifer arasındaki akış Darcy yasasıyla hesaplanmaktadır ve Denklem (3.2)'te verilmiştir (Prudic vd. 2004).

$$CRIV_n = \frac{K_s w_s l}{m} \quad (3.2.a)$$

$$Q_L = CRIV_n (h_s - h_a) \quad (3.2.b)$$

Burada Q_L , akarsu ile akifer arasındaki sızıntı debisi [L^3/T]; K_s , akarsu yatağının hidrolik iletkenliği [L/T]; w_s , akarsu yatağının genişliği [L]; l , akarsu yatağının uzunluğu [L]; m , akarsu yatağının kalınlığı [L]; h_s , akarsuyun hidrolik yükü [L]; h_a , akiferin hidrolik yükü [L]; $CRIV_n$, hidrolik kondüktans [L^2/T] temsil etmektedir. Tanımlanan parametreler akifer ve akarsu etkileşiminin olduğu bir sonlu fark hücresi için verilmiştir.

Etkileşim içinde olan akarsu ve akiferin hidrolik yük değerine göre akarsudan akifere ya da akiferden akarsuya sızıntı olabilir. Sızıntı yönünün belirlenmesi için, akarsudaki su derinliğinin hesaplanması gerekmektedir. Su derinliği Manning denklemi ile hesaplanabilir.

$$Q_s = \frac{C}{n} A R^{0.66} S_0^{0.5} \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'te Q_s , akarsuyun deşarj debisini [L^3/T]; n , Manning pürüzlülük katsayısı; A , akarsu kesit alanı [L^2]; R , hidrolik yarıçap [L]; S_0 , akarsu yatağının eğimi [L/L]; C ise zaman birimini temsil etmektedir. [$L^{1/3}/T$]; C sabiti, uzunluk birimi metre ise 1, uzunluk birimi feet ise 1.486 olarak alınmaktadır.

Akiferden akarsuya veya akarsudan akifere doğru olan sızıntı debisi su derinliğine bağlıdır. Su derinliği Manning denklemi ile elde edildiği için Denklem (3.3) doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Bu sebeple Newton-Raphson gibi bir çözüm tekniği kullanılarak iteratif olarak çözülebilmektedir.

3.3 Simülasyon Modelinin Çözümü

MODFLOW, 1980'lerin ortalarından itibaren McDonald ve Harbaugh (1984) kullanılmaya başlanmış ve yeraltı suyu-yerüstü suyu etkileşiminin simülasyonunda

uluslararası standart haline gelmiştir. MODFLOW altı farklı çekirdek versiyondan MODFLOW (84, 88, 96, 2000, 2005, 6) oluşmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında Denklem (3.1)'te verilen KDD'nin çözümü için MODFLOW-2005 Harbaugh, (2005) versiyonu kullanılmıştır.

Yeraltı suyu ve yerüstü suyu etkileşimlerini modelleyebilmek ve Denklem (3.2) ve (3.3)'ün çözümü için ise SFR2 paket programı Niswonger ve Prudic, (2010) kullanılmıştır.

MODFLOW tabanlı modelleri oluşturmak, çalıştırmak ve işlem sonrası (görselleştirme vb) adımları uygulayabilmek için kullanıcı ara yüzlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Python programla dilinde birbirinden bağımsız ve açık kaynak olarak oluşturulmuş paket programlar (Scipy, Matplotlib vb) birbirleri ile etkin şekilde çalışabilmektedir. Oluşturulan bu programlama ortamı kullanıcılara büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Bu amaçla MODFLOW, Python programlama dilinde oluşturulmuş Flopy (Bakker vd., 2016) eklentisi aracılığı ile kullanılacaktır.

3.4 Simülasyon Modelinin Testi

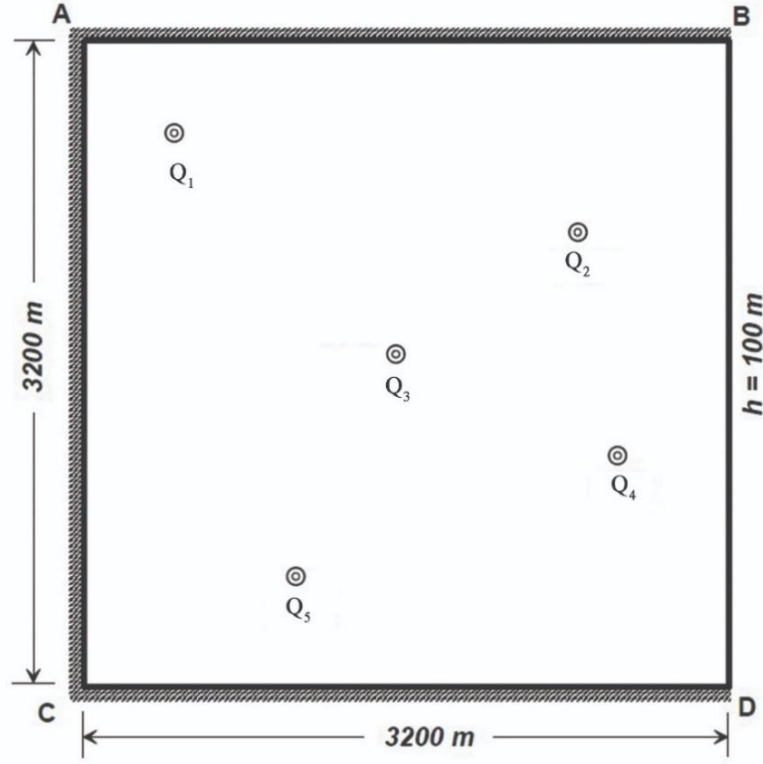
3.4.1 Uygulama 1

Tsai ve Diğ, (2003) ve Ayvaz (2008) çalışmalarında incelenen 3200x3200 m boyutlarındaki hipotetik basınçlı akifer örneğine ait geometri ve sınır koşulları Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

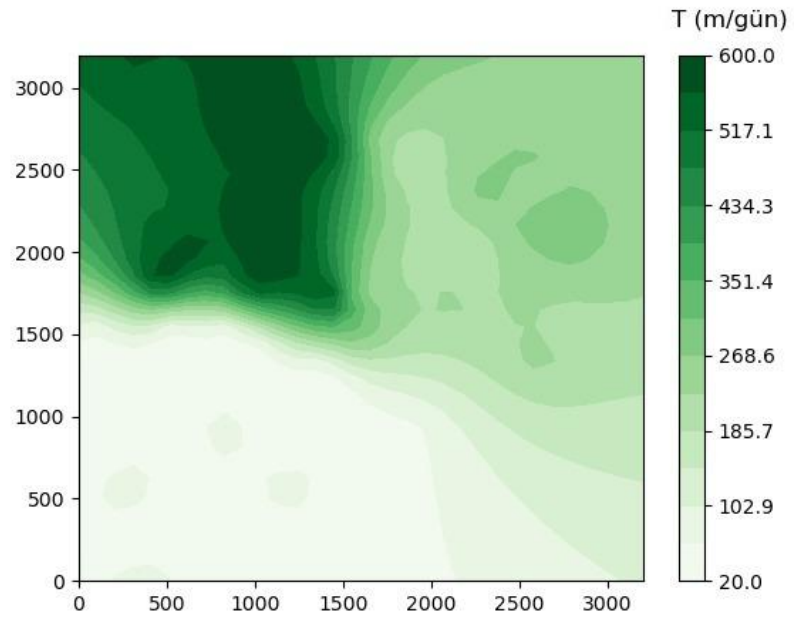
Hipotetik basınçlı akifer sisteminde BD doğrultusunda sabit hidrolik yük koşulu hakimdir ve değeri 100 m'dir. AB, AC, CD doğrultularındaysa geçirimsiz yüzey sınır koşulu hakimdir. Grid aralıkları 100 m olacak şekilde sistem sonlu fark hücrelerine bölünmüştür. İletim kapasitesi değerleri en küçük $33 \text{ m}^2/\text{gün}$ ile en büyük $595 \text{ m}^2/\text{gün}$ olmak üzere alansal olarak değişmektedir (Şekil 3.6). Depolama katsayısı $S=0.0002$ 'dir.

Akifer üzerinde beş adet kuyu bulunmaktadır ve ilk dört kuyu için pompaj debileri $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = 4000 \text{ m}^3/\text{gün}$ 'dür. Beşinci kuyu için ise debi değeri

$Q_5 = 2000 \text{ m}^3/\text{gün}$ 'dür. Simülasyon süresi on gündür ve zaman aralığı bir gün olarak alınmıştır.

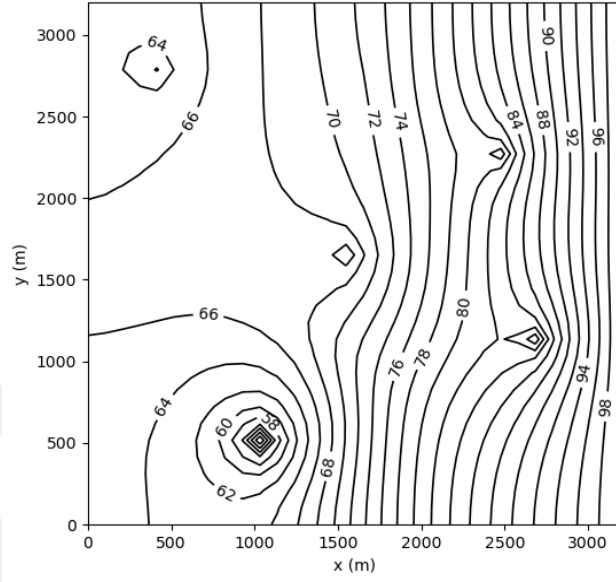


Şekil 3.5: Uygulama 1 basınçlı akifer geometrisi ve sınır koşulları (Ayvaz, 2008)

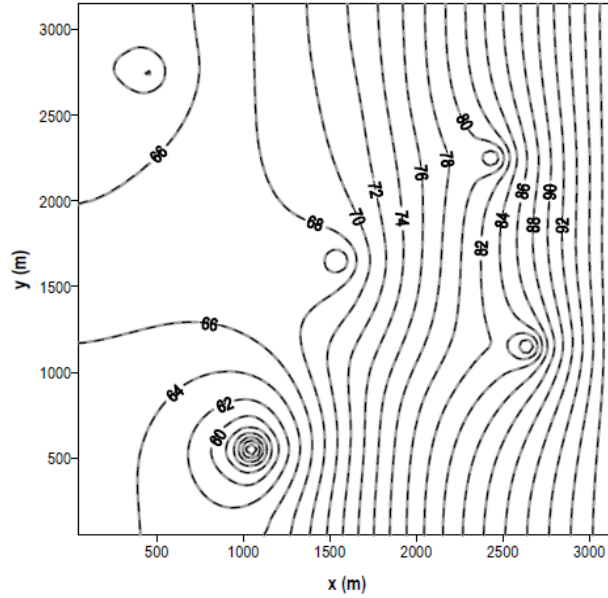


Şekil 3.6: Uygulama 1 için iletim kapasitesi değerlerinin alansal dağılımı

Flopy aracılığı ile MODFLOW programı çalıştırılarak onuncu gün için hidrolik yük değerleri bulunmuştur. Bulunan hidrolik yük değerleri Ayvaz (2008) karşılaştırılmıştır ve sonuçlar Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de verilmiştir.



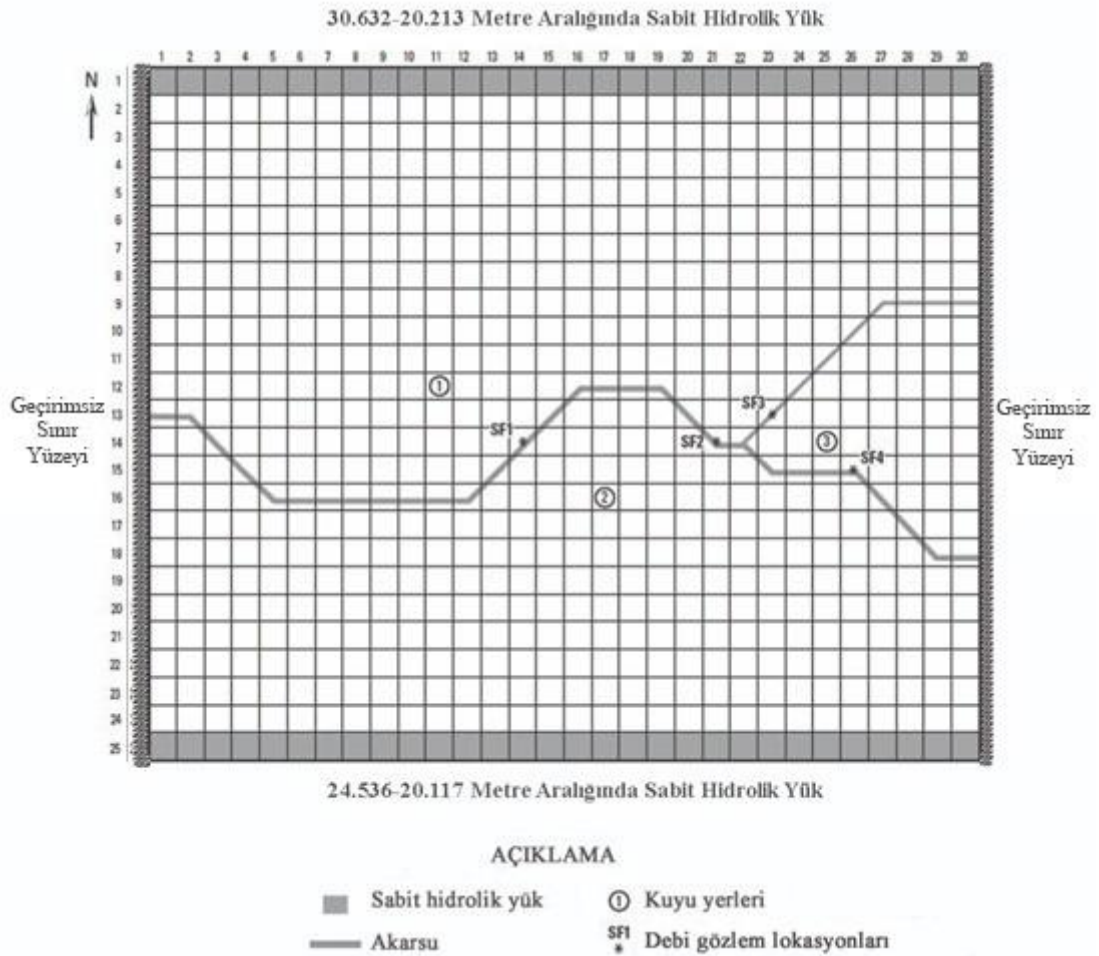
Şekil 3.7: Bu çalışmada onuncu gün için elde edilen hidrolik yük değerlerinin alansal dağılımı



Şekil 3.8: Ayvaz (2008) çalışmasında onuncu gün için bulunan hidrolik yük değerlerinin alansal dağılımı

3.4.2 Uygulama 2

Geliştirilen simülasyon modelinin test edilmesi amacıyla bu uygulamada Ahlfeld ve Diğ. (2005) ve Ahlfeld ve Diğ. (2009) çalışmalarında verilen basınçlı hipotetik akifer kullanılmıştır. $1829\text{ m} \times 1524\text{ m}$ boyutlarındaki akiferin geometrisi ve sınır koşulları Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Bu uygulamada üçer aylık on iki sezondan oluşmaktadır. İlgili uygulama üç senelik bir periyotta pompaj nedeniyle akarsu debisindeki azalmalar incelenmiştir.



Şekil 3.9: Uygulama 2 akifer geometrisi ve sınır koşulları (Ahlfeld 2005)

Model yirmi beş satır, otuz sütundan oluşan $60.96\text{ m} \times 60.96\text{ m}$ boyutlarındaki hücrelere bölünmüştür. Akifer homojendir ve iletim kapasitesi $464.52\text{ m}^2/\text{gün}$, depolama katsayısı $S = 0.05$ 'tir. Akiferin doğu ve batı yakalarında geçirimsiz yüzey, kuzey ve güney yakalarındaysa sabit hidrolik yük sınır

koşulu hakimdir (Şekil 3.9). Akiferin beslenme değerleri kış sezonları için 0.000152 m/gün , ilkbahar sezonları için 0.00061 m/gün , sonbahar sezonları için 0.000305 m/gün 'dür. Yaz sezonları için ise akiferde beslenme yoktur.

Akarsu üç koldan oluşmaktadır ve her segment için akarsu genişliği 6.096 m , akarsu yatağı hidrolik kondüktans değeri $1858.1 \text{ m}^2/\text{gün}$ 'dür. Ana kol üzerinde akarsu yatağı eğimi 0.0025 , yan kollar için akarsu yatağı eğimi 0.0010 'dur. Akifer alanında üç adet kuyu bulunmaktadır. Birinci kuyu simülasyon süresi boyunca tek debiyle (Q_1), ikinci kuyu kış sezonlarını için (Q_{2a}), ilkbahar sezonları için (Q_{2b}), yaz sezonları için (Q_{2c}), sonbahar sezonları için (Q_{2d}) debi değeriyle, üçüncü kuyu ise ilkbahar sezonları için (Q_{3b}), sonbahar sezonları için (Q_{3d}) debi değeriyle işletilmektedir.

Tablo 3.1: Kuyular ve farklı sezonlar için kuyu işletim debileri ($\text{m}^3/\text{gün}$)

Debiler	Değerler
Q_1	98.6675
Q_{2a}	1415.842
Q_{2b}	778.632
Q_{2c}	762.1117
Q_{2d}	757.4717
Q_{3b}	1388.048
Q_{3d}	228.2678

Doğal durumunda üç sene sonrasında on ikinci sezon için yerüstü-yeraltı suyu etkileşimindeki akış değerleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir. Tablo 3.1'de verilen debi değerleri ile kuyular işletilirse on ikinci sezon için akarsuda oluşan akış değerleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Akarsuyun iki kolundan toplamda günlük $4247.527 \text{ m}^3/\text{gün}$ debi girmektedir. Sisteme kuyular aracılığı ile etki olmaması durumunda akarsu sonunda çıkış debisi $37534 \text{ m}^3/\text{gün}$ olarak bulunmuştur. Şekil 3.9'da verilen yerüstü su kaynağını %88,68 oranla akifer beslemektedir. Tablo 3.1'de verilen debi değerleri ile kuyuların işletilmesi durumunda akarsu sonundaki çıkış debisi $36650,5 \text{ m}^3/\text{gün}$ olarak elde edilmektedir. Pompaj etkisiyle azalan toplam debi $4425.48 \text{ m}^3/\text{gün}$ 'dür. Uygulama 2 için bu çalışma kapsamında oluşturulan

simülasyon modeliyle, Ahlfeld (2009) çalışması arasındaki en büyük rölatif fark %9 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3.2: Doğal durumunda yerüstü-yeraltı suyu etkileşiminde akarsudaki akış değerleri (m³/gün)

Satır	Sütun	Segment	Akış Kolu	Akış Koluna Giren Debi	Akiferden Akış koluna Sızan Debi	Akış kolundan Çıkan Debi
13	1	1	1	2831.7	790.4	3622.0
13	2	1	2	3622.0	1066.8	4688.7
14	3	1	3	4688.7	938.7	5627.4
15	4	1	4	5627.4	917.0	6544.6
16	5	1	5	6544.6	959.9	7504.5
16	6	1	6	7504.5	839.0	8343.3
16	7	1	7	8343.3	834.2	9177.5
16	8	1	8	9177.5	839.8	10017.4
16	9	1	9	10017.4	842.6	10860.1
16	10	1	10	10860.1	844.0	11704.2
16	11	1	11	11704.2	862.0	12566.2
16	12	1	12	12566.2	1020.1	13586.1
15	13	1	13	13586.1	985.0	14571.3
14	14	1	14	14571.3	1001.9	15573.1
13	15	1	15	15573.1	1064.8	16637.8
12	16	1	16	16637.8	1235.5	17873.3
12	17	1	17	17873.3	967.0	18840.3
12	18	1	18	18840.3	921.1	19761.5
12	19	1	19	19761.5	1037.0	20798.4
13	20	1	20	20798.4	762.7	21561.0
14	21	1	21	21561.0	562.0	22123.1
14	22	1	22	22123.1	50.6	22173.5
9	30	2	1	1415.8	754.3	2170.1
9	29	2	2	2170.1	824.2	2994.2
9	28	2	3	2994.2	945.7	3940.0
9	27	2	4	3940.0	1346.4	5286.5
10	26	2	5	5286.5	949.6	6235.9
11	25	2	6	6235.9	713.5	6949.5
12	24	2	7	6949.5	527.5	7477.1
13	23	2	8	7477.1	375.8	7852.8
14	22	2	9	7852.8	211.5	8064.4
14	22	3	1	30236.7	436.1	30672.8
15	23	3	2	30672.8	674.3	31349.6
15	24	3	3	31349.6	561.2	31910.3
15	25	3	4	31910.3	549.6	32459.6
15	26	3	5	32459.6	627.8	33088.2
16	27	3	6	33088.2	831.5	33917.9
17	28	3	7	33917.9	1031.5	34951.5
18	29	3	8	34951.5	1342.6	36293.7
18	30	3	9	36293.7	1240.8	37534.0

Tablo 3.3: Üç farklı kuyudan 7 farklı debi değeriyle çekim yapılması sonucu akarsuda 12.sezonda oluşan akış değerleri (m³/gün)

Satır	Sütun	Segment	Akış Kolu	Akış Koluna Giren Debi	Akiferden Akış Koluna Sızan Debi	Akış Kolundan Çıkan Debi
13	1	1	1	2831.7	788.1	3619.7
13	2	1	2	3619.7	1063.4	4683.3
14	3	1	3	4683.3	935.2	5618.3
15	4	1	4	5618.3	913.4	6531.8
16	5	1	5	6531.8	956.4	7488.1
16	6	1	6	7488.1	834.6	8322.9
16	7	1	7	8322.9	828.3	9151.2
16	8	1	8	9151.2	831.8	9982.8
16	9	1	9	9982.8	831.6	10814.5
16	10	1	10	10814.5	828.9	11643.3
16	11	1	11	11643.3	839.8	12483.2
16	12	1	12	12483.3	977.7	13460.7
15	13	1	13	13460.7	924.0	14384.7
14	14	1	14	14384.7	929.6	15314.3
13	15	1	15	15314.3	998.5	16313.1
12	16	1	16	16313.1	1195.5	17508.6
12	17	1	17	17508.6	925.5	18434.0
12	18	1	18	18434.0	883.4	19317.5
12	19	1	19	19317.5	1006.9	20324.4
13	20	1	20	20324.4	716.5	21040.8
14	21	1	21	21040.8	515.9	21556.8
14	22	1	22	21556.8	38.9	21595.6
9	30	2	1	1415.8	751.5	2167.3
9	29	2	2	2167.3	821.2	2988.6
9	28	2	3	2988.6	942.6	3931.2
9	27	2	4	3931.2	1342.6	5273.7
10	26	2	5	5273.7	941.6	6215.3
11	25	2	6	6215.3	697.9	6913.3
12	24	2	7	6913.3	504.1	7417.3
13	23	2	8	7417.3	353.2	7770.4
14	22	2	9	7770.4	196.6	7967.2
14	22	3	1	29562.8	423.8	29987.5
15	23	3	2	29987.5	641.5	30627.5
15	24	3	3	30627.5	525.4	31154.2
15	25	3	4	31154.2	490.5	31644.1
15	26	3	5	31644.1	593.6	32238.7
16	27	3	6	32238.7	816.5	33054.3
17	28	3	7	33054.3	1022.4	34076.5
18	29	3	8	34076.5	1336.8	35413.0
18	30	3	9	35413.0	1236.8	36650.5

Tablo 3.4: Pompaj nedeniyle gözlem yerlerinde debilerdeki oluşan azalmalar

Sezon	Debi Gözlem Yeri	Debideki Azalmalar ($m^3/gün$)		Rölatif Fark
		Bu Çalışma	Ahlfeld (2009)	
9	SF1	424.75	424.75	6.35E-06
10	SF1	274.73	274.65	3.09E-04
11	SF1	260.18	260.26	3.08E-04
12	SF1	258.90	258.70	7.63E-04
9	SF2	26.99	27.01	8.98E-04
10	SF2	424.76	424.75	1.72E-05
11	SF2	22.37	22.17	8.93E-03
12	SF2	82.43	82.32	1.37E-03
11	SF3	566.17	566.34	2.95E-04
12	SF3	566.22	566.34	2.06E-04
11	SF4	668.28	667.17	1.66E-03
12	SF4	849.70	849.51	2.29E-04

4. TEPKİ MATRİSİ YAKLAŞIMI

4.1 Yeraltı Suyu Hidrolik Yönetim Modeli

Yeraltı suyu yönetim modelleri genel olarak hidrolik yönetim modelleri ve kalite yönetim modelleri olmak üzere ikiye ayrılır. Hidrolik yönetim modellerinde amaç, çeşitli sınırlamalarla çalışan çok sayıdaki kuyu yerlerinin ve debilerinin optimizasyon işlemidir. Şekil 4.1’de verildiği gibi yeraltı suyu hidrolik yönetim modellerinin oluşturulabilmesi için yerleşik yaklaşım ve tepki matrisi yaklaşımı kullanılmaktadır (Gorelick, 1983).



Şekil 4.1: Yeraltı suyu hidrolik yönetim modelleri

Yerleşik yaklaşımda, yeraltı suyu akım denkleminin sayısal çözümü, optimizasyon modelinde kısıt olarak kullanılmaktadır. Örneğin her optimizasyon adımı için karar değişkenlerine göre sayısal çözüm yapan MODFLOW programı çağrılarak, elde edilen hidrolik yük değerlerinin belirli bir değerinin altına düşmemesi istenilebilmektedir. Tepki matrisi yaklaşımındaysa, karar değişkenlerindeki (pompaj debileri) değişimin gözlem kuyularında oluşturduğu tepki katsayıları kullanılarak oluşturulan cebirsel ifadeyle vekil model oluşturulur. Tepki matrisi yaklaşımında bu model kullanılarak optimizasyon işlemi gerçekleştirilir.

Her iki yöntemde birbirlerine göre belirgin avantajları vardır. Yerleşik yaklaşımda, optimizasyondan önce tepki katsayıları elde edilebilmek için simülasyon modelinin defalarca çalıştırılması gerekmemektedir. Ayrıca bütün zaman

adımlarında her hücredeki hidrolik yükler bilinmektedir. Ancak her zaman adımı ve her hücre için hidrolik yükleri elde etmek bazen hesaplama yükü oluşturmaktadır. Tepki matrisi metodunda istenilen zaman adımı ve hücre için hesap yapılabilir. Zamana bağlı simülasyon modellerinde tepki matrisi yaklaşımı daha kullanışlıdır. Ancak zamandan bağımsız problemlerde veya çok fazla hücre kısıt olarak kullanılıyorsa, bu durumda yerleşik yaklaşım metodu daha az işlem yükü gerektirir. (Peralta vd., 1991).

4.2 Taylor Serisi Açılımı

Pompaj debileri ile i . konumdaki hidrolik yükler arasındaki verilen ilişki Denklem (4.1)'de verildiği gibidir (Ahlfeld ve Mulligan, 2000).

$$h_i(Q) = h_i^0 + \sum_{j=1}^n \frac{\partial h_i}{\partial Q_j}(Q_0)(Q_j - Q_0) + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \left[\frac{\partial^2 h_i}{\partial Q_j \partial Q_k}(Q_0) \frac{(Q_j - Q_j^0)(Q_k - Q_k^0)}{2!} \right] \quad (4.1)$$

Burada h_i^0 , i . konumdaki başlangıç hidrolik yük değerini [L]; Q_j , j . konumdaki kuyudan çekilen debiyi [L^3/T] ifade etmektedir. Jacobian matrisi literatürde tepki katsayıları, tepki fonksiyonları, Dirac delta fonksiyonları ve discrete kernels gibi farklı birçok şekilde ifade edilmektedir.

Hidrolik yüklerle çekilen debiler arasında basınçlı akiferler de olduğu gibi doğrusal bir ilişki olduğu takdirde Taylor serisindeki ikinci dereceden ifadeler ihmal edilebilir. Bu kabul neticesinde ve $Q_0=0$ seçilerek Denklem (4.1) yeniden aşağıdaki şekilde yazılır.

$$h_i(Q) = h_i^0 + \sum_{j=1}^n \frac{\partial h_i}{\partial Q_j} Q_j \quad (4.2)$$

4.3 Tepki Katsayılarının Bulunması

Tepki matrisi yaklaşımında S/O modeli arasındaki bağlantı tepki katsayılarıyla oluşturulmaktadır. Denklem (4.3)'te gösterildiği gibi tepki katsayıları hidrolik yükün, hidrolik yüke etkiyen strese (pompa) göre türevinin sonlu farklar yöntemiyle bulunmasıyla elde edilmektedir.

$$\frac{\partial h_i}{\partial Q_j} \cong \frac{\Delta h_i}{\Delta Q_j} = \frac{h_i(Q_{\Delta j}) - h_i(Q_0)}{Q_{\Delta j} - Q_0} \quad (4.3)$$

Denklem 4.3'te $Q_{\Delta j}$, j .kuyudaki pertürbasyon değeridir [L^3/T]. Pertürbasyon değeri, hidrolik yük üzerindeki tepkiyi ölçmek amacıyla, Q_0 başlangıç debisinin belirli bir değerde arttırılmasıyla elde edilen debi değeridir.

Denklem (4.2) açık şekilde yazıldığında doğrusal denklem sistemi süperpoze edilerek Denklem (4.4-4.6) formuna dönüşür.

$$\alpha_{1,1}Q_1 + \alpha_{1,2}Q_2 + \alpha_{1,3}Q_3 + \dots + \alpha_{1,j}Q_j + h_1^0 = h_1 \quad (4.4)$$

$$\alpha_{2,1}Q_1 + \alpha_{2,2}Q_2 + \alpha_{2,3}Q_3 + \dots + \alpha_{2,j}Q_j + h_2^0 = h_2 \quad (4.5)$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$\alpha_{i,1}Q_1 + \alpha_{i,2}Q_2 + \alpha_{i,3}Q_3 + \dots + \alpha_{i,j}Q_j + h_i^0 = h_i \quad (4.6)$$

Denklem (4.4-4.6)'de $\alpha_{i,j}$, j .kuyudan çekilen debi değerinin i .hücredeki hidrolik yükünü etkileyen tepki katsayılarını ifade etmektedir.

4.3.1 Tepki Matrisi Yaklaşımının Testi

Tepki katsayılarının elde edilebilmesi için daha önce kullanılan ve geometrisi Şekil 3.5'te verilen uygulama kullanılacaktır (bkz. Bölüm 3.5.1). Akifer üzerinde Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 , Q_5 olmak üzere beş adet kuyu bulunmaktadır. İlk dört kuyudan, $4000 \text{ m}^3/\text{gün}$, Q_5 'ten ise $2000 \text{ m}^3/\text{gün}$ debi çekilmektedir. Onuncu gün için

kuyuların bulunduğu beş hücrede hidrolik yük değerlerinin bilinmesi istenmektedir. Bu nedenle tepki matrisinin boyutu 5×5 olacaktır. Denklem (4.3-4.6) kullanılarak Tablo 4.1’de gösterilen tepki katsayıları elde edilmiştir.

Tablo 4.1: Uygulama 3 için elde edilen tepki katsayıları

$\alpha_{i,j}$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$
$i = 1$	0.00469	0.00108	0.00235	0.00056	0.00174
$i = 2$	0.00108	0.00292	0.00104	0.00042	0.00071
$i = 3$	0.00235	0.00104	0.00399	0.00067	0.00178
$i = 4$	0.00056	0.00042	0.00067	0.00339	0.00067
$i = 5$	0.00046	0.00032	0.00067	0.00246	0.00027

Tablo 4.1’de verilen tepki katsayılarını Denklem (4.2)’de kullanarak kuyularının bulunduğu hücrelerdeki hidrolik yük değerleri bulunabilmektedir. Farklı pertürbasyon değerleri Q_{Δ} için hidrolik yükler hesaplanmış ve MODFLOW çözümleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Tablo 4.2’de gösterilmektedir. Farklı pertürbasyon değerleri için elde edilen hidrolik yük değerlerinde küçük değişimler olsa dahi mutlak hatalar kabul edilebilir düzeydedir.

Tablo 4.2: Tepki katsayıları kullanılarak kuyuların bulunduğu hücrelerdeki hidrolik yük değerlerinin bulunması

Kuyu Yeri	$Q_{\Delta} = 100$		$Q_{\Delta} = 500$		$Q_{\Delta} = 1500$	
	Hidrolik Yük (m)	Mutlak Hata	Hidrolik Yük (m)	Mutlak Hata	Hidrolik Yük (m)	Mutlak Hata
1	61.81473	6.87E-05	61.81482	2.29E-05	61.81479	7.63E-06
2	76.78010	1.91E-04	76.78027	7.63E-06	76.78029	1.27E-05
3	64.24942	3.05E-05	64.24939	0	64.24940	1.02E-05
4	78.50479	7.63E-06	78.50476	2.29E-05	78.50479	7.63E-06
5	48.06442	2.17E-04	48.06424	3.43E-05	48.06422	1.40E-05

5. OPTİMİZASYON MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Optimizasyon, sınırlı kaynakları verilen koşullar altında en iyi şekilde kullanarak maksimum faydayı elde etme çabasıdır. Optimizasyon problemleri amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar olmak üzere üç ana elemandan oluşmaktadır. Karar değişkenleri için akiferde açılacak kuyu yerlerinin veya kuyulardan çekilecek debilerin belirlenmesi, amaç fonksiyonu için çekilen debiyi maksimize etmek veya işletme maliyetini minimize etmek, kısıtlar içinse hidrolik yükleri belirli sınırlar içerisinde kontrol altında tutmak, yeraltı suyu problemlerine optimizasyon işlemine örnek olarak verilebilir.

En genel halde optimizasyon problemi Denklem (5.1)'de verildiği gibi matematiksel olarak ifade edilebilir (Gürarlan, 2011).

$$\min f(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in \mathbf{X} \quad (5.1. a)$$

$$g_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (5.1. b)$$

$$H_j(\mathbf{x}) = 0, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5.1. c)$$

Burada $f(\mathbf{x})$, maksimize veya minimize edilecek olan amaç fonksiyonunu, $g_i(\mathbf{x})$ fonksiyonu eşitsizlik kısıtlarını ve $H_j(\mathbf{x})$ fonksiyonuysa eşitlik kısıtlarını göstermektedir. \mathbf{X} kümesi karar değişkenlerinin alt ve üst sınırlarını içeren kümedir. Tüm kısıtları sağlayan $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ vektörü problemin bir uygun çözümünü temsil etmektedir. Kısıtlar ve amaç fonksiyonu doğrusal ise problem doğrusal optimizasyon problemi, kısıtlardan biri veya amaç fonksiyonu doğrusal değilse doğrusal olmayan optimizasyon problemi olarak adlandırılır.

Optimizasyon işlemi, yeraltı suyu yönetiminde birçok farklı problemde kullanılabilir. Kirlilik kontrolü, yapı alanlarında drenaj işlemleri, oturma kontrolleri, yeraltı suyuna tuzlu su karışması, su ihtiyaç temini gibi problemler yeraltı suyu yönetiminde karşılaşılan problemlerdir (Ahlfeld ve Mulligan, 2000).

5.1 Doğrusal Programlama (LP)

Dantzig (1963)'in çalışmalarıyla geliştirilen Simplex yöntemiyle birlikte optimizasyon çalışmalarında yeni bir çağ başlamıştır. Simplex yöntemiyle karmaşık ve büyük çaptaki problemler, sistematik ve efektif bir şekilde modellenebilmekte ve çözülebilmektedir. Günümüzde optimizasyon işleminin yapılabilmesi için kullanılan en yaygın yöntem Simplex yöntemidir. 1950'li yıllardan günümüze ekonomi, finans, mühendislik vb bir çok alanda doğrusal veya doğrusal olmayan modellerin çözümünde Simplex temelli algoritmalar kullanılmaktadır (Nocedal ve Wright, 2006).

5.1.1 Doğrusal Programlama (LP) Modelinin Testi

Bu tez kapsamında doğrusal programlama problemlerinin çözümünde Python programlama dilinde bilimsel hesaplama amacıyla sıkça kullanılan SciPy (Virtanen vd., 2020) ve CVXOPT kütüphaneleri kullanılmıştır. Modelin testi için F1, F2, F3 olmak üzere üç test fonksiyonu kullanılmıştır. Test fonksiyonlarının yapısı, çözümleriyle ilgili detaylı bilgiler EK-A 'da gösterilmiştir. Kullanılan fonksiyonlar için global optimum değerleriyle, bulunan değerlerin karşılaştırılması Tablo 5.1'de yer almaktadır.

Tablo 5.1: Doğrusal programlama için test fonksiyonlarının global optimum değerleri ve elde edilen çözümler

EK	Fonksiyon	Global Optimum		Bulunan Değerler	
		$f(\mathbf{X})$	\mathbf{X}	$f(\mathbf{X})$	\mathbf{X}
A	F1	13	(3,0,1)	13	(3,0,1)
	F2	10	(0,4,2)	10	(0,4,2)
	F3	17	(2,0,1,0)	17	(2,0,1,0)

5.2 Ardışık Doğrusal Programlama (SLP)

SLP yöntemi orijinal olarak doğrusal olmayan problemlerin, bir dizi doğrusal programlama problemlerine dönüştürülerek iteratif olarak çözülmesi işlemidir. Doğrusal olmayan amaç fonksiyonu ve kısıtlar rastgele bir başlangıç noktası için Taylor serisine açılarak doğrusallaştırılır. Doğrusal hale dönüşen problem Simplex yöntemiyle hızlı bir biçimde çözülebilir (Rao, 2009).

5.2.1 Ardışık Doğrusal Programlama (SLP) Modelinin Testi

SLP yöntemine dair işlem adımları ve çalışma prensibi EK B'de verilmiştir. Oluşturulan modelinin testi amacıyla bir adet F4 fonksiyonu kullanılmıştır. Test fonksiyonunun yapısı ve çözümlenmeyle ilgili detaylarda ayrıca EK B'de yer almaktadır. F4 fonksiyonu için optimal çözüm için karar değişkenleri $\mathbf{X}^* = (0, 1)$ ve amaç fonksiyonu $f(\mathbf{X}^*) = -1$ 'dir. Tablo 5.2'de görülebileceği gibi 9 adım sonucunda $\mathbf{X} = (-0.073, 0.929)$ ve amaç fonksiyonu değeri $f(\mathbf{X}) = -1.008$ olarak bulunmuştur.

Tablo 5.2: F4 test fonksiyonunda bulunan optimal çözüm ve karar değişkenleri

İterasyon	\mathbf{X}	$f(\mathbf{X})$	$g(\mathbf{X})$
1	(-2,2)	-2.562	6.199
2	(-0.5625,2)	-1.721	2.119
3	(-0.529,0.837)	-1.367	1.430
4	(-0.053,1.160)	-1.213	0.477
5	(0.426,1.484)	-1.058	0.484
6	(0.170,1.206)	-1.036	0.131
7	(0.018,1.041)	-1.022	0.046
8	(-0.166,0.840)	-1.032	0.048
9	(-0.073,0.929)	-1.008	0.010

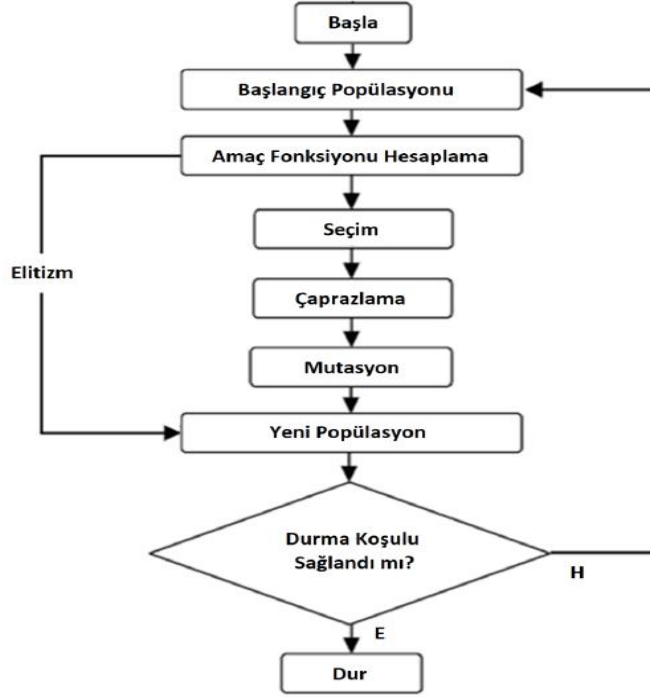
5.3 Genetik Algoritma

Genetik algoritmayla beraber geleneksel matematiksel optimizasyon yöntemlerinin dışında yeni yöntemler de geliştirilmeye başlamıştır. Modern tekniklerde, amaç fonksiyonunun bilinmesi yeterlidir, türev bilgisine ihtiyaç yoktur. Süreksiz konveks olmayan yapıdaki optimizasyon problemlerinin çözümünde geleneksel matematiksel optimizasyon teknikleri, hesaplama olarak yetersiz ve başlangıç çözümüne bağlı olduğu için genellikle yerel çözümler elde edilir (Rao, 2009). Genetik algoritmayla ise bu tür problemlerde teorik olarak global veya pratik olarak globale yakın çözümler elde edilebilmektedir (Ayvaz 2008). Felsefi olarak genetik algoritma, Darwin'in evrim teorisindeki en uygun bireyin hayatta kalması prensibine dayanmaktadır.

5.3.1 Genetik Algoritma Genel Akış Şeması

Genetik algoritmayla genel hesap adımları Şekil 5.1'de gösterilmiştir ve şu şekildedir.

- 1) Başlangıç popülasyonunu verilen alt-üst sınırlara göre rastgele olarak üret.
- 2) Üretilen popülasyon içindeki her birey için amaç fonksiyonlarını hesapla.
- 3) Elitizm operatörüyle en iyi çözümü bir sonraki nesle aktarmak için sakla.
- 4) Bir sonraki jenerasyonu üretmek için seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörlerini uygula.
- 5) Elit çözümü ve oluşturulan yeni jenerasyonu başlangıç çözümüne ata.
- 6) Verilen durma koşulu sağlanana kadar 2-5 arasındaki işlemleri tekrarla.



Şekil 5.1: Genetik algoritma genel akış şeması

Temel genetik algoritma kodlarında kullanılan seçim operatörleri rulet tekeri ve turnuva seçim yöntemleridir. Turnuva seçim yöntemi, yakınsama konusunda rulet tekerine seçim yöntemime göre daha etkilidir (Jinghui et al., 2005). Bu tez kapsamında bir sonraki jenerasyonu üretmek için turnuva seçim yöntemi ve çaprazlama operatörü olarak tek noktalı çaprazlama kullanılmıştır. Mutasyon işlemi ise, bit çevirme operatörü ile belli bir olasılık altında seçilen gen 1 ise 0 veya 0 ise 1 yapılarak uygulanmıştır.

5.3.2 Genetik Algoritmanın Testi

Şekil 5.2’de gösterilen akış şemasına uyumlu şekilde genetik algoritma, Python programla dilinde hazırlanmıştır. Genetik algoritma kodunun performansı üç adet kısıtsız optimizasyon test fonksiyonu kullanılarak sınanmıştır. Kullanılan test fonksiyonları sırasıyla Rosenbrock, Rastrigin ve Michalewicz test fonksiyonlarıdır. Her test fonksiyonu için popülasyon sayısı 50, çaprazlama olasılığı 0.8, mutasyon olasılığı 0.03 ve jenerasyon sayısı 5000 olarak alınmıştır. Kullanılan test fonksiyonlarının yapısı, çözümleriyle ilgili detaylı bilgiler EK-C’de verilmiştir. Elde

edilen sonuçlar Tablo 5.3'te özetlenmiştir. Tüm test fonksiyonları için bulunan değerler, optimum değerlere yakınsamıştır.

Tablo 5.3: Genetik Algoritma modelinin testinden elde edilen sonuçlar

EK	Fonksiyon	Global Optimum		Bulunan Değerler	
		$f(\mathbf{X})$	\mathbf{X}	$f(\mathbf{X})$	\mathbf{X}
C	Rosenbrock	0	(1, 1)	3.23E-12	(1, 1)
	Rastrigin	0	(0, 0)	3.23E-12	(0, 0)
	Michalewicz	-4.6876	(2.203, 1.571, 1.285, 1.923, 1.721)	-4.6876	(2.203, 1.571, 1.285, 1.923, 1.721)

6. YERALTI SUYU YÖNETİM PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ

6.1 Giriş

Birinci bölümde değinilen nüfusun giderek artması ve su duyulan ihtiyaç nedeniyle yeraltı suyu kaynaklarının aşırı kullanımı yeraltı suyu yönetiminde problemler oluşturmaktadır. Bu problemler; akifer depolama-tükenme gidişatının yönetilmesi, zemin oturmaları, yeraltı suyuna bağlı ekolojik sistemler, yeraltı suyuna tuzlu su girişi vb aşılması güç problemlerden bazılarıdır.

Altıncı bölümde, insan aktivitelerinden kaynaklı yukarıda bahsedilen yeraltı suyu yönetiminde ortaya çıkan problemlerin tanımı yapılacak ve daha önceki bölümlerde açıklanan Simülasyon/Optimizasyon teknikleri kullanılarak bu problemlere ait hipotetik örnekler çözülecektir.

6.2 Yeraltı Suyu Drenaj Problemleri

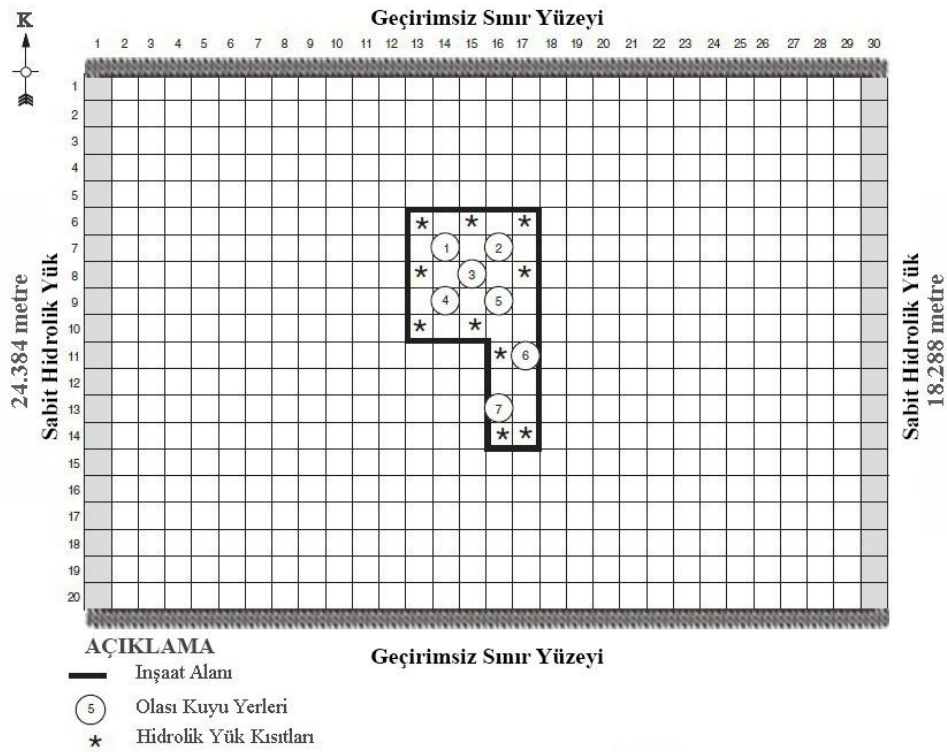
Nüfus artışı ve aşırı şehirleşme sebebiyle yapılaşmaya uygun alanlar giderek azalmaktadır. Bu sebeple zemin özellikleri bakımından uygunsuz alanlar yapılaşmaya açılmaktadır. Bu tip alanlarda en çok karşılaşılan problemlerden birisi yüksek yeraltı su seviyesidir. Yüksek yeraltı su seviyesi, kazı alanında şev stabilite problemleri ve güvenli çalışma sorunları yaratmaktadır. Bu tip alanlarda kazı işlemlerine başlamadan önce yeraltı su seviyesinin düşürülmesi gerekir. Kazı alanında açılacak olan kuyu adedi, açılacak olan kuyuların yerleşimi ve açılan her kuyudan çekilecek olan su miktarı mühendislik açısından bir optimizasyon problemidir. Burada amaç en düşük maliyet ile kazı alanından yeraltı suyunun uzaklaştırılması işlemidir (Ayvaz, 2018).

Aguado vd (1974), Aguado ve Remson (1980) ilk olarak yeraltı suyu drenaj problemlerini tanımlamışlar ve S/O tekniklerini kullanarak bu tip problemlere çözüm

geliştirmişlerdir. Simülasyon modelinde yeraltı suyu hareketini temsil eden KDD'nin çözümünde sonlu farklar yöntemi kullanmışlar ve simülasyon modelini yerleşik yaklaşım metoduyla optimizasyon modelinde kullanmışlardır. Ahlfeld (2005) yeraltı suyu drenaj problemlerinde tepki matrisi yaklaşımı ve tamsayı-doğrusal karışık programlama teknikleri kullanmıştır. Tepki matrislerini MODFLOW kullanarak sayısal çözümleme teknikleriyle elde etmiştir. Ayvaz (2018), simülasyon modelinde analitik çözüm, optimizasyon modelinde ise sezgisel yöntemler olan diferansiyel evrim ve armoni araştırma tekniklerini kullanmıştır.

6.2.1 Uygulama 3

Daha önce Ahlfeld (2005)'te çözülen kararlı akım drenaj probleminde hipotetik basınçlı akiferin geometrik özellikleri ve sınır koşulları Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1: Uygulama 3 için geometri ve sınır koşullarının gösterimi (Ahlfeld 2005)

914.4 m x 609.6 m boyutlarındaki basınçlı akiferde, kuzey ve güney sınır koşullarında geçirimsiz yüzey koşulu, doğuda 18.288 m, batıdaysa 24.384 m sabit

hidrolik yük sınır koşulu hakimdir. Akiferin iletim katsayısı $4.645 \text{ m}^2/\text{gün}$ 'dür. Akifer homojendir ve iletim katsayısı bütün hücrelerde aynıdır. Bu örnekte Şekil 6.1'de görülen inşaat sahasından yeraltı suyunun uzaklaştırılması gerekmektedir. Amaç fonksiyonu, hidrolik yük kısıtlarının bulunduğu hücrelerdeki su seviyelerini 15.24 m 'e düşürmek için gereken en düşük işletim-sabit maliyeti elde etmektir. Yapı sahasındaki kuyulardan 1000 gün boyunca su çekildiği varsayılmaktadır. Su çekilmesinin maliyeti $0.7063 \text{ \$/m}^3$ 'tür.

6.2.1.1 Senaryo 1

İlk senaryoda sadece işletim maliyetleri göz önüne alınarak kuyuların açılması için gereken sabit giderler ihmal edilirse, optimizasyon işleminin amaç fonksiyonu ve kısıtları aşağıdaki gibidir.

Amaç fonksiyonu:

$$\min f = 706.3 \sum_{i=1}^7 Q_i \quad (6.1.a)$$

Kısıtlar:

$$h_i \leq 15.240 \quad i = 1, 2, \dots, 10 \quad (6.1.b)$$

$$0 \leq Q_i \leq 566.340 \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (6.1.c)$$

İlk senaryoda 7 farklı karar değişkeni ve 10 hidrolik yük kısıtı vardır. Bölüm 4'te açıklandığı şekilde kuyuların, hidrolik yük kısıtları üzerindeki tepki katsayıları elde edilmiş ve Tablo 6.1'de verilmiştir. Tepki katsayıları elde edildikten sonra doğrusal programlamayla optimizasyon işlemi yapılmıştır ve optimal kuyu işletim maliyeti $57313.2 \text{ \$}$ olarak bulunmuştur. İşletim maliyeti için elde edilen debi değerleri ve hidrolik yükler Tablo 6.2'de verilmiştir. Bulunan işletim maliyeti ve debiler Ahlfeld (2005) ile karşılaştırılmış ve birebir aynı değerler bulunmuştur.

Tablo 6.1: Uygulama 3, senaryo 1 için elde edilen tepki katsayıları

h_i/Q_i	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7
h_1	0.01019	0.00778	0.00797	0.00750	0.00660	0.00517	0.00463
h_2	0.01030	0.01034	0.00929	0.00761	0.00764	0.00579	0.00494
h_3	0.00782	0.01030	0.00804	0.00663	0.00761	0.00599	0.00491
h_4	0.00991	0.00752	0.00894	0.00972	0.00734	0.00579	0.00534
h_5	0.00755	0.01002	0.00901	0.00737	0.00982	0.00747	0.00582
h_6	0.00731	0.00642	0.00759	0.00961	0.00724	0.00636	0.00631
h_7	0.00742	0.00745	0.00890	0.00971	0.00975	0.00832	0.00734
h_8	0.00628	0.00668	0.00734	0.00759	0.00883	0.01105	0.00890
h_9	0.00479	0.00494	0.00534	0.00568	0.00595	0.00742	0.01142
h_{10}	0.00463	0.00487	0.00519	0.00541	0.00585	0.00758	0.01002

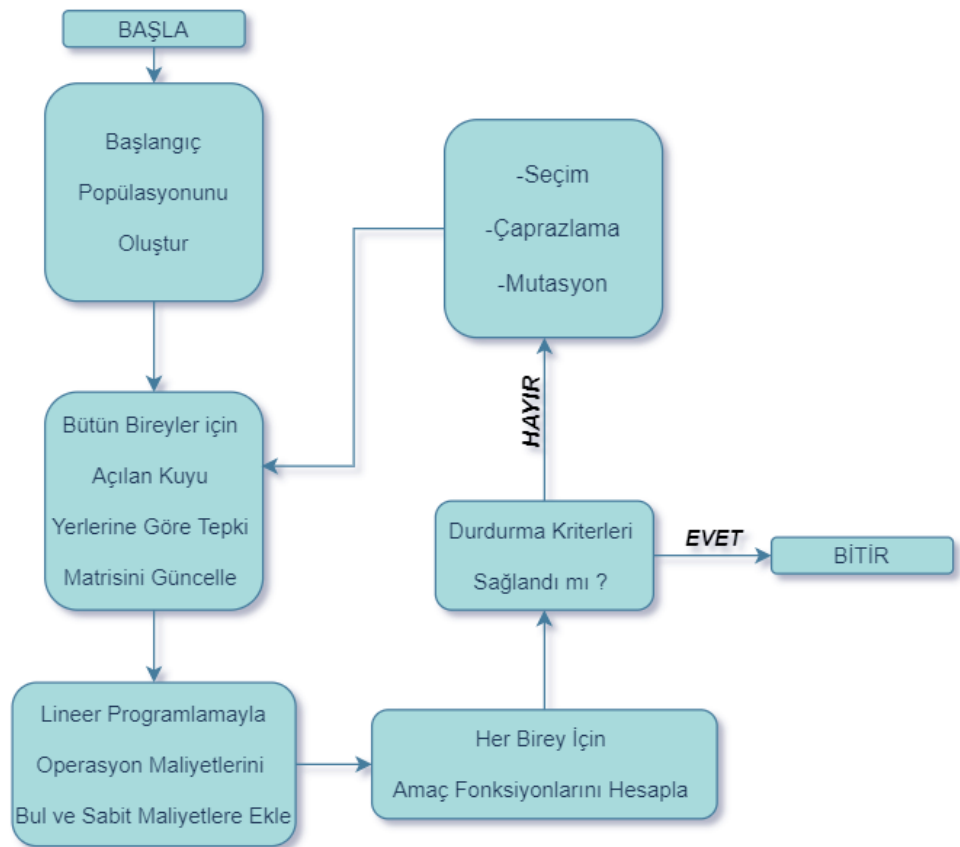
Tablo 6.2: Uygulama 3, ilk senaryoda elde edilen debi ve hidrolik yük değerleri

i	$h_i^0(m)$	$Q_i^*(m^3/gün)$	$h_i(m)$		Kısıtlar
1	21.862	30.508	15.240	\leq	15.240
2	21.441	2.215	14.608	\leq	15.240
3	21.021	0.000	15.240	\leq	15.240
4	21.862	21.774	14.614	\leq	15.240
5	21.021	0.000	14.900	\leq	15.240
6	21.862	0.000	15.240	\leq	15.240
7	21.441	26.648	14.442	\leq	15.240
8	21.231	-	14.674	\leq	15.240
9	21.231	-	14.930	\leq	15.240
10	21.021	-	15.240	\leq	15.240

Tablo 6.2’de h_i^0 , kısıt hücrelerdeki başlangıç hidrolik yük değerlerini, h_i , optimizasyon işlemi sonucu bulunan hidrolik yük değerlerini göstermektedir.

6.2.1.1 Senaryo 2

İkinci Senaryoda ise kuyu sayısı 0-7 arası değişken olup açılan her kuyu amaç fonksiyonuna sabit maliyet olarak eklenmektedir. Yani debiler bilinmediği gibi optimum çözüm için 7 olası kuyu yerinden hangisinde kuyu açılacağı da bilinmemektedir. Bu durumda doğrusal programlamayla matematiksel çözüm uzayında oluşan süreksizlik sebebiyle çözüm bulunamamaktadır. Ahlfeld (2005) bu durumu çözmek için tamsayı-doğrusal programlama tekniğini kullanmıştır. Bu tez kapsamında ise sabit maliyetleri hesaba katmak için Hsiao ve Chang (2002) çalışmasında kullanıldığı şekilde genetik algoritma kullanılacaktır. Kullanılan melez optimizasyon tekniğinin akış şeması Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Denklem (6.1)’e sabit maliyetlerde eklenirse Denklem (6.2) elde edilir.



Şekil 6.2: Üçüncü senaryo için verilen akış şeması

Amaç fonksiyonu:

$$\min f = 706.3 \sum_{i=1}^n Q_i + \sum_{i=1}^n \$2000, \quad n = \text{round}(1 + 6 * \text{rand}) \quad (6.2. a)$$

Kısıtlar:

$$h_i \leq 15.240 \quad i = 1, 2, \dots, 10 \quad (6.2. b)$$

$$0 \leq Q_i \leq 566.340 \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (6.2. c)$$

İlk adım olarak Tablo 6.3' de verildiği gibi rastgele olacak şekilde başlangıç popülasyonun oluşturulması gerekmektedir. 1'ler aktif kuyu hücrelerini temsil etmektedir.

Tablo 6.3: Başlangıç popülasyonu

0	0	1	1	0	1	1
1	1	0	1	1	1	0
0	1	0	1	1	0	1
1	0	0	0	1	1	0
1	0	0	1	0	0	0
0	1	1	1	1	0	0
0	0	1	1	1	0	1
0	1	1	0	1	0	1
1	1	1	0	0	1	0
1	1	0	1	0	1	1

Başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra her birey için Tablo 6.1'de kuyuların açılmadığı kolonlar silinerek tepki matrisleri güncellenir. Popülasyon içindeki ilk birey için oluşturulan tepki matrisi Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4: İlk birey için güncellenen tepki matrisi

h_i/Q_i	Q_3	Q_4	Q_6	Q_7
h_1	0.007970	0.007505	0.005175	0.004633
h_2	0.009296	0.007611	0.005796	0.004946
h_3	0.008043	0.006638	0.005999	0.004913
h_4	0.008945	0.009723	0.005796	0.005348
h_5	0.009016	0.007379	0.007474	0.005823
h_6	0.007596	0.009614	0.006362	0.006319
h_7	0.008906	0.009719	0.008329	0.007345
h_8	0.007345	0.007594	0.011054	0.008906
h_9	0.005347	0.005689	0.007420	0.011420
h_{10}	0.005196	0.005416	0.007584	0.010020

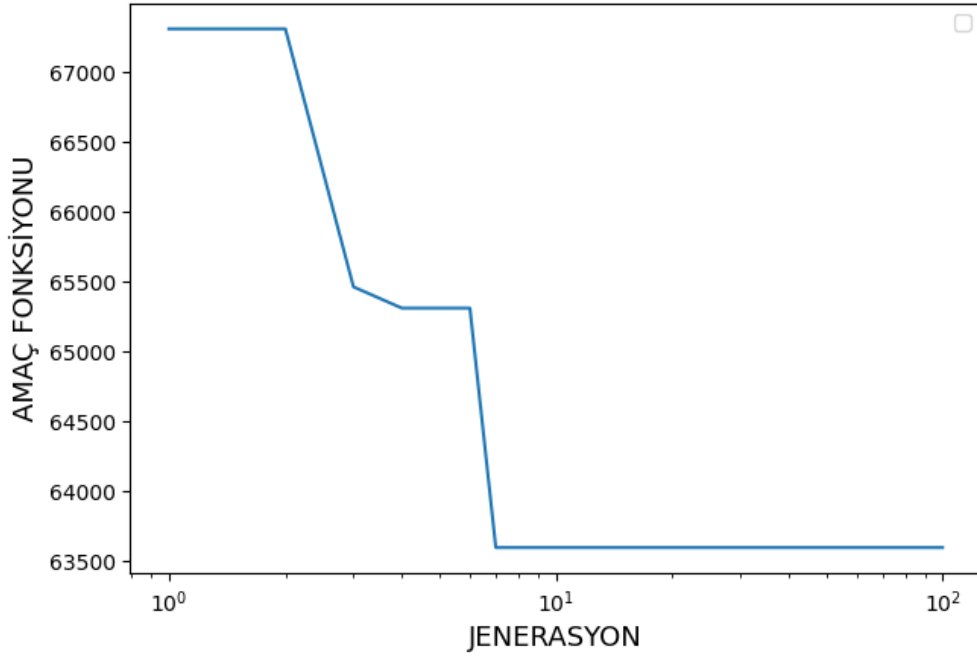
Daha sonra işletim maliyetleri doğrusal programlamayla bulunur ve sabit maliyetlere eklenir (Tablo 6.5). Sonra bireyler genetik operatörleriyle güncellenir. 100 jenerasyon sonunda toplam maliyet 63598 \$ olarak bulunur. Bulunan debiler ve hidrolik yük değerleri Tablo 6.6'da, amaç fonksiyonundaki değişim ise Şekil 6.3'de gösterilmiştir.

Tablo 6.5: Birinci jenerasyonda popülasyondaki bireyler için sabit ve işletim maliyetleri

Birey	İşletim Maliyeti (\$)	Sabit Giderler (\$)	Toplam (\$)
1	60285.00	8000	68285.00
2	61629.71	10000	71629.71
3	61663.81	8000	69663.81
4	62868.93	6000	68868.93
5	70038.19	4000	74038.19
6	66002.93	8000	74002.93
7	60258.00	8000	68258.00
8	60258.00	8000	68258.00
9	62577.04	8000	70577.04
10	57313.20	10000	67313.20

Tablo 6.6: Uygulama 3, ikinci senaryoda elde edilen debi ve hidrolik yük değerleri

i	Q_i^* ($m^3/gün$)	$h_i(m)$		Kısıtlar
1	35.183	15.240	\leq	15.240
2	0.000	14.608	\leq	15.240
3	0.000	15.240	\leq	15.240
4	19.656	14.614	\leq	15.240
5	0.000	14.900	\leq	15.240
6	0.000	15.240	\leq	15.240
7	26.711	14.442	\leq	15.240
8	-	14.674	\leq	15.240
9	-	14.930	\leq	15.240
10	-	15.240	\leq	15.240



Şekil 6.3: Uygulama 3, senaryo 2 için amaç fonksiyonundaki değişim

Sabit maliyetler dahil edildiğinde ikinci kuyu kapanmıştır. Eğer sabit maliyetler \$5000 olursa 1.kuyu da kapanmaktadır. Şekil 6.3'te görüldüğü gibi tek başına doğrusal programlamayla ani değişimler, süreksizlikler probleme dahil edilememektedir. Yeraltı suyu drenaj problemlerine genetik algoritmayla, doğrusal programlama birlikte kullanılarak efektif bir çözüm elde edilmiştir.

6.2.1.1 Senaryo 3

Üçüncü senaryodaysa geometrisi ve sınır koşulları Şekil 6.1’de verilen akifer serbest yüzeyledir. Akifer kalınlığı 30.48 m ve hidrolik iletkenlik katsayısı $K = 0.1524 \text{ m / gün}$ ’dür. Serbest yüzeyle akiferler doğrusal olmayan davranış gösterdikleri için serbest yüzeyle akiferlerin çözümü, daha önce Ahlfeld ve Baro-Montes (2008) tarafından kullanılan SLP tekniği kullanılarak çözülecektir. Senaryo 1’de olduğu gibi sabit maliyetler ihmal edilmiştir ve kuyu yerleri sabittir.

Amaç fonksiyonu:

$$\min f = 706.3 Q^{k+1} \quad (6.3. a)$$

Kısıtlar:

$$J(Q^k)Q^{k+1} \leq 15.240 - h(Q^k) + J(Q^k)Q^k \quad i = 1,2, \dots, 10 \quad (6.3. b)$$

$$0 \leq Q_i \leq 113.267 \quad i = 1,2, \dots, 7 \quad (6.3. c)$$

$$J(Q) = \frac{\partial h}{\partial Q} \quad (6.3. d)$$

SLP yöntemiyle Denklem (6.3)’te gösterildiği şekilde problem doğrusallaştırma yapılarak, iteratif olarak çözülür ve işlem adımları aşağıdaki gibidir.

Adım 1: Q^0 değerlerini belirle ve $k = 0$ olarak iterasyonu başlat.

Adım 2: $h(Q^k)$ ve $J(Q^k)$ değerlerini hesapla.

Adım 3: Denklem (6.3)’te verilen problemi Simplex yöntemiyle çöz ve Q^{k+1} değerlerini bul

Adım 4: Yakınsama koşullarını test et. Koşullar sağlandıysa iterasyonu durdur sağlanmadıysa $k = k + 1$ iterasyon sayacını arttır ve Adım 2’ye git.

Bu tez kapsamında iki yakınsama koşulu kullanılmıştır. ϵ_1 iki iterasyon arasında debilerdeki değişim farkını kontrol etmekte ϵ_2 ise amaç fonksiyonundaki değişimi kontrol etmektedir. $\epsilon_1 = 0.001$, $\epsilon_2 = 0.001$ olarak alınmıştır.

Seçilen yakınsama parametreleri için SLP algoritmasının işlem adımları uygulanmış ve üç iterasyon sonucunda yakınsama koşulları sağlanmıştır. İşletim maliyeti 93150.72 \$ olarak bulunmuştur. Elde edilen hidrolik yük değerleri ve debiler Tablo 6.7’de gösterilmiştir. Her iterasyonda elde edilen mutlak hata değerleriyse Tablo 6.8’de gösterilmiştir.

Tablo 6.7: Uygulama 3, üçüncü senaryoda elde edilen hidrolik yük ve debi değerleri

i	$Q_i^*(m^3/gün)$	$h_i(m)$		Kısıtlar
1	50.450	15.240	\leq	15.240
2	2.426	14.550	\leq	15.240
3	0	15.240	\leq	15.240
4	36.209	14.546	\leq	15.240
5	0	14.868	\leq	15.240
6	0	15.240	\leq	15.240
7	42.802	14.357	\leq	15.240
8	-	14.620	\leq	15.240
9	-	14.917	\leq	15.240
10	-	15.240	\leq	15.240

Tablo 6.8: MODFLOW ve Tepki Matrisleriyle elde edilen hidrolik yük değerleri arasındaki mutlak hatalar

Mutlak Hatalar		
$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
1.53E+00	1.54E-02	8.31E-05
1.66E+00	1.52E-02	6.37E-05
1.18E+00	8.71E-03	1.76E-05
1.88E+00	2.01E-02	1.10E-04
1.34E+00	1.02E-02	2.53E-05
1.54E+00	1.52E-02	7.50E-05
1.77E+00	1.68E-02	7.80E-05
1.54E+00	1.30E-02	5.06E-05
1.39E+00	1.12E-02	3.98E-05
1.17E+00	9.19E-03	2.98E-05

6.2.1.1 Senaryo 4

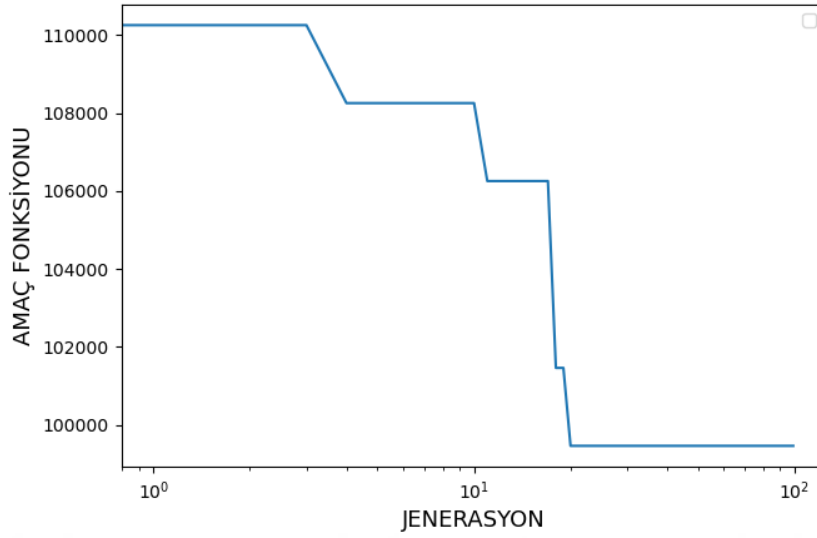
Senaryo 2’de kuyu yerlerinin sabit olmadığı durum için GA-LP melez optimizasyon tekniği kullanılarak sabit ve işletim maliyetleri bulunmuştur. Serbest yüzeyli akiferler için ise GA-SLP optimizasyon tekniği kullanılarak Denklem (6.3.a)’ya sabit maliyetler eklenilebilir. Şekil 6.2’de verilen akış şemasında doğrusal programlama yerine SLP yöntemi kullanılırsa, bulunan debi ve hidrolik yük değerleri Tablo 6.9’da verilmiştir. Bulunan işletim ve sabit maliyet giderleri 99462.93 \$’dır. Senaryo 2’de olduğu gibi sabit maliyetler eklenince ikinci kuyu kapanmıştır. Amaç fonksiyonun değişimi Şekil 6.4’te verilmiştir.

Tablo 6.9: Uygulama 3, senaryo 4 için elde edilen debi ve hidrolik yük değerleri

i	$Q_i^*(m^3/gün)$	$h_i(m)$		Kısıtlar
1	55.569	15.124	\leq	15.240
2	0	14.474	\leq	15.240
3	0	15.240	\leq	15.240
4	33.889	14.470	\leq	15.240
5	0	14.885	\leq	15.240
6	0	15.240	\leq	15.240
7	42.870	14.373	\leq	15.240
8	-	14.628	\leq	15.240
9	-	14.916	\leq	15.240
10	-	15.240	\leq	15.240

6.2.1.2 Senaryo 5

Popülasyon içindeki her birey için SLP yöntemi kullanıldığı ve defalarca tepki matrisleri yeniden hesaplandığı için GA-SLP optimizasyon tekniği hesaplama olarak ekstra yük oluşturabilmektedir. Bu sorunu çözmek için ilk adım olarak Tablo 6.8’de ilk iterasyonda görüleceği gibi büyük mutlak hatalar yapmayı kabul ederek serbest yüzeyli akifer GA-LP optimizasyon tekniği ile çözülerek kuyu yerleri belirlenir. Kuyu yerleri belirlendikten sonra Senaryo 3’teki gibi SLP tekniği kullanılarak mutlak hatalar kabul edilebilir düzeylere indirilir. Bu süreç kullanılan uygulama için denenmiş ve birebir olarak Senaryo 4’teki ile aynı değerler elde edilmiştir.



Şekil 6.4: Uygulama 3, senaryo 4 için amaç fonksiyonundaki değişim

6.3 Yeraltı – Yerüstü Su Etkileşimleri

Yerüstü suları hidrolojik ve ekolojik olarak yeraltı suyuna bağımlı sistemlerdir. Genellikle yerüstü su kaynaklarındaki toplam akışı, mühim miktarlarda yeraltı suyu besler. Kuyularla yeraltı suyunun çekilmesi yerüstü su kaynaklarının beslenmesini azaltır bazı durumlarda akış ters yönde yeraltı su sistemine doğru olur. Bu nedenlerle kuyulardan su çekilmesi yerüstü su akışını azaltıp ekolojik dengeyi bozduğu için ciddi bir su yönetim problemidir (Barlow ve Leake, 2012). Dudley ve Stewart (2006) kuyular nedeniyle inceledikleri Pleasant nehir havzasında nehir akışında yaklaşık olarak $0.0914 - 0.244 \text{ m}^3/\text{s}$ düşüşler olduğunu bildirmişlerdir. Bu miktar nehirdeki toplam akışta yaklaşık olarak %1.7 – %10'luk bir düşüğe tekabül etmektedir. Bu sebeple nehir akarsu vb ekolojik sistemler önemli bir biçimde yeraltı suyuna bağımlıdır.

6.3.1 Uygulama 4

Bu bölümde kuyulardan çekilen yeraltı suyunun, bağlı olduğu ekolojik sistemlere etkisini inceleyebilmek için geometrisi ve sınır koşulları Şekil 3.9'te verilen daha önce Uygulama 2'de tanımlanmış olan problem kullanılacaktır.

6.3.1.1 Senaryo 1

İlk kuyudan sabit debiyle Q_1 , ikinci kuyudan kış, ilkbahar, yaz ve sonbahar sezonları için farklı debilerle ($Q_{2a}, Q_{2b}, Q_{2c}, Q_{2d}$) ve üçüncü kuyudansa ilkbahar ve sonbahar sezonları için (Q_{3b}, Q_{3d}) debi değerleri ile çekim yapılmaktadır. İlk senaryoda üç senelik bir periyotta amaç fonksiyonu üç kuyudan çekilen su miktarını, yerüstü akışındaki azalmaları belli seviyelerde tutmak ve su temin kısıtlarını sağlamak şartıyla maksimize etmektir. $Im_9, Im_{10}, Im_{11}, Im_{12}$ son dört sezon için dışsal bir kaynaktan akifere aktarılan debilerdir. Dışsal bir kaynaktan akifere su aktarmanın maliyeti $\$0.0424/m^3$ 'tür. Çekilen debilerden elde edilen fayda $\$0.0353/m^3$ 'tür. Amaç fonksiyonu ve kısıtlar aşağıdaki gibi yazılabilir.

Amaç fonksiyonu:

$$\begin{aligned} \max f = & 38.67Q_1 + 9.747 Q_{2a} + 9.641Q_{2b} + 9.641Q_{2c} + 9.641Q_{2d} \\ & + 9.641Q_{3b} + 9.641Q_{3d} - 3.9(Im_9 + Im_{10} + Im_{11} + Im_{12}) \end{aligned} \quad (6.4. a)$$

Kısıtlar:

$$\begin{aligned} 849.51 \leq Q_1 + Q_{2,M} + Q_{3,M} \leq 2265.35, \quad M = a, b, c, d \\ Q_{3a} = Q_{3c} = 0 \end{aligned} \quad (6.4. b)$$

$$\begin{aligned} 1274.26 \leq Q_1 + Q_{2,M} + Q_{3,M} + Im_t \leq 2265.35 \quad M = a, b, c, d \\ t = 9, 10, 11, 12 \quad Q_{3a} = Q_{3c} = 0 \end{aligned} \quad (6.4. c)$$

$$Qsfr_{r,t} - Qsfr_{r,t}^b \leq 424.75, \quad r = 14, 8 \quad t = 9, 10, 11, 12 \quad (6.4. d)$$

$$Qsfr_{r,t} - Qsfr_{r,t}^b \leq 566.34, \quad r = 21 \quad t = 11, 12 \quad (6.4. e)$$

$$Qsfr_{r,t} - Qsfr_{r,t}^b \leq 849.51, \quad r = 5 \quad t = 11, 12 \quad (6.4. f)$$

$$0 \leq Im_9, Im_{10}, Im_{11}, Im_{12} \leq 23316.85 \quad (6.4. g)$$

$$0 \leq Q_{j,M} \leq 1415.84 \quad j = 1,2,3 \quad M = a, b, c, d \quad (6.4. h)$$

Denklem (6.4)'te $Qsfr_{r,t}$, t . zamanda r . akış kolundaki yüzeysel akışı [L^3/T]: $Qsfr_{r,t}^b$ t . zamanda r . akış kolundaki kuyulardan çekim olmaması halindeki doğal yüzeysel akışı [L^3/T] göstermektedir. Optimizasyon problemi yedi karar değişkeninden ve yirmi sekiz kısıttan oluşmaktadır.

Simülasyon modelinde MODFLOW'u çalıştırabilmek için Python ortamında Flopy (Bakker ve diğ., 2016) tarafından oluşturulan paket program kullanılmıştır. Optimizasyon modelinde de önceki uygulamalarda kullanılan SLP yöntemi kullanılmıştır. Başlangıç pertübasyon değeri Ahlfeld (2005)'te kullanıldığı gibi ilk iterasyon için $283.17 \text{ m}^3/\text{gün}$, sonraki her iterasyon için ise önceki değerin yarısıdır. Tolerans değerleri $\epsilon_1 = 10^{-5}$, $\epsilon_2 = 10^{-4}$ 'tir. Verilen amaç fonksiyonu ve kısıtları altında bulunan debiler Tablo 6.10'da verilmiştir. Amaç fonksiyonu Ahlfeld (2009)' da $53022 \$$ 'dir. Bu çalışmada ise küçük bir farkla $53015 \$$ olarak bulunmuştur. Debi gözlem yerlerindeki yerüstü akış debileri Tablo 6.11'de verilmiştir.

Tablo 6.10: Uygulama 4, senaryo 1 için kuyulardan çekilen debi değerleri ($\text{m}^3/\text{gün}$)

Debiler	Değerler
Q_1	98.59
Q_{2a}	1415.84
Q_{2b}	778.43
Q_{2c}	762.22
Q_{2d}	757.75
Q_{3b}	1388.33
Q_{3d}	227.09
Im_9	0
Im_{10}	0
Im_{11}	413.45
Im_{12}	190.84

Gözlem yeri ve farklı sezonlarda yapılan mutlak hatalar ve rölatif hatalar Tablo 6.12’de verilmiştir. Akış değerlerine ve yapılan mutlak hatalara bakıldığında rölatif hatalar oldukça küçük ve kabul edilebilir düzeydedir.

Tablo 6.11: Uygulama 4 senaryo 1 için gözlem yerlerinde oluşan yerüstü akış değerleri (m³/gün)

Sezon	Debi Gözlem Yeri	Doğal Akış	Pompaj Nedeniyle Oluşan Yerüstü Akışı	Yerüstü Akışındaki Azalmalar	Kısıtlar	Yüzesel Yerüstü Akışında Azalmalar
9	SF1	15493.19	15068.44	424.75	424.75	2.74
10	SF1	15753.60	15478.87	274.73	424.75	1.74
11	SF1	15414.45	15154.30	260.15	424.75	1.69
12	SF1	15573.19	15314.52	258.67	424.75	1.66
9	SF2	7817.26	7790.30	26.96	424.75	0.34
10	SF2	7929.96	7505.21	424.75	424.75	5.36
11	SF2	7782.21	7759.84	22.37	424.75	0.29
12	SF2	7852.91	7770.88	82.03	424.75	1.04
11	SF3	21889.15	21322.81	566.34	566.34	2.59
12	SF3	22122.99	21556.65	566.34	566.34	2.56
11	SF4	32742.54	32074.44	668.11	849.51	2.04
12	SF4	33087.41	32237.91	849.51	849.51	2.57
Yüzesel toplam yerüstü akışındaki azalmalar						24.67

Tablo 6.12: Uygulama 4 senaryo 1 için değişken pertürbasyon değerleriyle elde edilen mutlak ve rölatif hatalar (m³/gün)

Sezon	Debi Gözlem Yeri	Mutlak Hatalar	Rölatif Hatalar
9	SF1	0.00	2.68E-10
10	SF1	0.04	2.60E-06
11	SF1	0.02	1.16E-06
12	SF1	0.25	1.65E-05
9	SF2	0.00	6.71E-08
10	SF2	0.02	3.02E-06
11	SF2	0.00	5.23E-07
12	SF2	0.04	5.13E-06
11	SF3	0.17	7.97E-06
12	SF3	0.17	7.88E-06
11	SF4	0.17	5.44E-06
12	SF4	0.06	1.76E-06

Eğer pertürbasyon değeri sabit olarak $7 \text{ m}^3/\text{gün}$ ve $\epsilon_1 = 10^{-3}$, $\epsilon_2 = 10^{-3}$ alınırsa amaç fonksiyonu 53035 \$ olarak bulunmuştur. Çözüm iyileşmiş ayrıca yapılan mutlak hata değerleri de azalmıştır. Buna karşılık ilk iterasyonda yapılan hatalar ciddi şekilde artmaktadır. Elde edilen mutlak ve rölatif hatalar Tablo 6.13'te verilmiştir.

Tablo 6.13: Uygulama 4 senaryo 1 için sabit pertürbasyon değeriyle elde edilen mutlak ve rölatif hatalar ($\text{m}^3/\text{gün}$)

Sezon	Debi Gözlem Yeri	Mutlak Hatalar		Rölatif Hatalar
9	SF1	0.03	0.03	1.88E-06
10	SF1	0.07	0.05	2.91E-06
11	SF1	0.19	0.04	2.61E-06
12	SF1	0.03	0.05	3.23E-06
9	SF2	0.03	0.00	5.14E-12
10	SF2	0.04	0.03	3.78E-06
11	SF2	0.02	0.00	1.95E-07
12	SF2	0.01	0.01	7.82E-07
11	SF3	0.14	0.14	6.64E-06
12	SF3	0.20	0.11	5.25E-06
11	SF4	1.59	0.11	3.31E-06
12	SF4	0.28	0.28	8.78E-06

6.3.1.2 Senaryo 2

İkinci senaryoda farklı olarak üçüncü kuyudan ilkbahar ve yaz sezonları için (Q_{3b}, Q_{3c}) debi değerleri ile çekim yapılmaktadır. Diğer kuyuların işletimi aynıdır. Bu uygulama daha önce Ahlfeld (2011) çalışmasında kullanılmıştır. Bu uygulamada amaç fonksiyonu su temin kısıtları altında kuyuların ekolojik dengedeki etkilerini yani yerüstü su akışındaki azalmaları en aza indirmektir.

Amaç fonksiyonu on birinci yaz sezonu için Şekil 3.9'da verilen debi gözlem yerleri SF1, SF2, SF3, SF4'te yerüstü su akışı maksimize edilecektir. Amaç fonksiyonu ve kısıtlar Denklem (6.5)'te verilmiştir.

Amaç fonksiyonu:

$$\max f = SF1 + SF2 + SF3 + SF4 \quad (6.5. a)$$

Kısıtlar:

$$849.51 \leq Q_1 + Q_{2a} \leq 2264.35 \quad (6.5. b)$$

$$1274.26 \leq Q_1 + Q_{2b} + Q_{3b} \leq 2264.35 \quad (6.5. c)$$

$$1699.01 \leq Q_1 + Q_{2c} + Q_{3c} \leq 2264.35 \quad (6.5. d)$$

$$849.51 \leq Q_1 + Q_{2d} \leq 2264.35 \quad (6.5. e)$$

Senaryo 1’de olduğu gibi SLP yöntemi kullanılabileceği gibi aynı zamanda problemin doğrusal olduğu kabulü yapılarak LP tekniği de kullanılabilir. Bu tez kapsamında bu uygulamanın çözümü için basitliği sebebiyle LP tekniği tercih edilmiştir. Bulunan tepki katsayıları Tablo 6.14’ de, tepki matrisini kullanarak bulunan debiler Tablo 6.15’te, gözlem yerlerindeki akış değerleri Tablo 6.16’da verilmiştir. Yapılan mutlak ve rölatif hatalarsa Tablo 6.17’de verilmiştir.

Tablo 6.14: Uygulama 4, Senaryo 2 için elde edilen tepki katsayıları

	Q_1	Q_{2a}	Q_{2b}	Q_{2c}	Q_{2d}	Q_{3b}	Q_{3c}
SF1	0.57430	0.00010	0.01180	0.25300	0	0.00010	0.00270
SF2	0.01510	0.00010	0.00140	0.01710	0	0.00580	0.29520
SF3	0.75830	0.00110	0.02430	0.61470	0	0.00120	0.02400
SF4	0.78000	0	0.03040	0.72460	0	0.01130	0.88310

Tablo 6.15: Uygulama 4, senaryo 2 için kuyulardan çekilen debi değerleri (m³/gün)

Debiler	Değerler
Q_1	0.00
Q_{2a}	849.51
Q_{2b}	0.00
Q_{2c}	283.17
Q_{2d}	849.51
Q_{3b}	1274.26
Q_{3c}	1415.84

Tablo 6.16: Uygulama 4, senaryo 2 için gözlem yerlerinde oluşan yerüstü akış değerleri (m³/gün)

Sezon	Debi Gözlem Yeri	Doğal Akış	Pompaj Nedeniyle Oluşan Yerüstü Akışı	Yerüstü Akışındaki Azalmalar	Yüzdesel Yerüstü Akışındaki Azalmalar
11	SF1	15414.45	15338.77	75.68	0.49
11	SF2	21889.15	21678.64	210.51	0.96
11	SF3	7782.21	7351.93	430.27	5.53
11	SF4	32742.54	31272.63	1469.91	4.49
Yüzdesel toplam yerüstü akışındaki azalmalar					11.47

Tablo 6.17: Uygulama 4 senaryo 2 için gözlem yerlerinde oluşan mutlak ve rölatif hatalar

Debi Gözlem Yeri	Mutlak Hatalar	Rölatif Hatalar
SF1	0.13	8.30E-06
SF2	0.51	2.35E-05
SF3	2.11	2.86E-04
SF4	1.37	4.39E-05

6.4 Bilinmeyen Kuyu Yerleri, Sayıları ve Debilerinin Belirlenmesi

Kuyu yerlerinin belirlenmesi ayrık tip, debi değerlerinin belirlenebilmesi ise sürekli tip problemlerdir. Doğası gereği bir arada ayrık-sürekli çözüm uzayına sahip yeraltı suyu ters problemi çözülmesi zahmetli bir problemdir. Çekim yapılan kuyu sayısının da bilinmemesi problemi karmaşıktır.

Ayvaz ve Karahan, (2008) çalışmasında bu problemi çözebilmek için kuyu yerlerinin belirlenebilmesi için “Hareketli Alt Bölge Yaklaşımı” adı verilen bir çözüm tekniği geliştirilmiştir. Kuyu sayıları ve yerleri bu yaklaşımla, debilerse GA ile bulunmaktadır.

Bilinmeyen kuyu yerleri, sayıları ve debilerinin belirlenmesi tipindeki problemlere ait amaç fonksiyonu ve kısıtlar Denklem (6.6)’da verilmiştir (Ayvaz, 2008).

Amaç fonksiyonu:

$$RE = \min \left[\sum_{t=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_d} (h_k(t) - h'_k(t))^2 \right] \quad (6.6. a)$$

Kısıtlar:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \sum_{i \in I} \frac{Q_i}{\Delta x \Delta y} \delta(x_i, y_i) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6.6. b)$$

$$(Q_i)_{min} \leq Q_i(x_i, y_i) \leq (Q_i)_{max} \quad (6.6. c)$$

$$(x_i)_{min} \leq x_i \leq (x_i)_{max} \quad (6.6. d)$$

$$(y_i)_{min} \leq y_i \leq (y_i)_{max} \quad (6.6. e)$$

Denklem (6.6)'da h_k ve h'_k k . gözlem kuyusundaki hesaplanan ve ölçülen gözlem hidrolik yük değerlerini [L]: N_d , toplam gözlem kuyu sayısını; N_t , toplam stres periyodu sayısını; $(Q_i)_{min}$, $(Q_i)_{max}$ i . kuyudaki en küçük ve en büyük pompaj debilerini [L³/T]: $(x_i)_{min}$, $(x_i)_{max}$, $(y_i)_{min}$, $(y_i)_{max}$ i . kuyu için koordinatların alabileceği değerlerin en küçük ve en büyük sınırlarını [L]: RE ise artık hata değerini [L]: δ , Dirc-delta fonksiyonlarını göstermektedir.

Denklem (6.6.b)'de akım denklemini yerleşik yaklaşımla kısıtlara gömülmüştür ve her optimizasyon adımında akım denkleminin çözülmesi gerekmektedir. Daha önceki bölümlerde kullanıldığı gibi yerleşik yaklaşım yerine tepki matrisi yaklaşımı kullanılırsa Denklem (6.6) yeniden Denklem (6.7)'deki gibi yazılabilir. Ayrıca LP'de amaç fonksiyonunda sadece karar değişkenleri ve onlara ait katsayılar bulunabilmesi sebebiyle Denklem (6.6.a), LP'yle ifade edilememektedir. Bu sorunu aşmak amacıyla Denklem (6.6.a)'da verilen amaç fonksiyonu Denklem (6.7.b)'de verildiği gibi kısıtlara yazılmıştır ve amaç fonksiyonu debileri maksimize etmektir. Debiler belli değerlere kadar arttıkça hesaplanan ve gözlenen hidrolik yük değerleri birbirine yaklaşmakta, hata değeri RE ise sıfıra doğru gitmektedir.

Amaç fonksiyonu:

$$\max f = c^T Q \quad (6.7. a)$$

Kısıtlar:

$$h_k^0 + \sum_{j=1}^n \frac{\partial h_k}{\partial Q_j} Q_j - h'_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, N_g \quad (6.7. b)$$

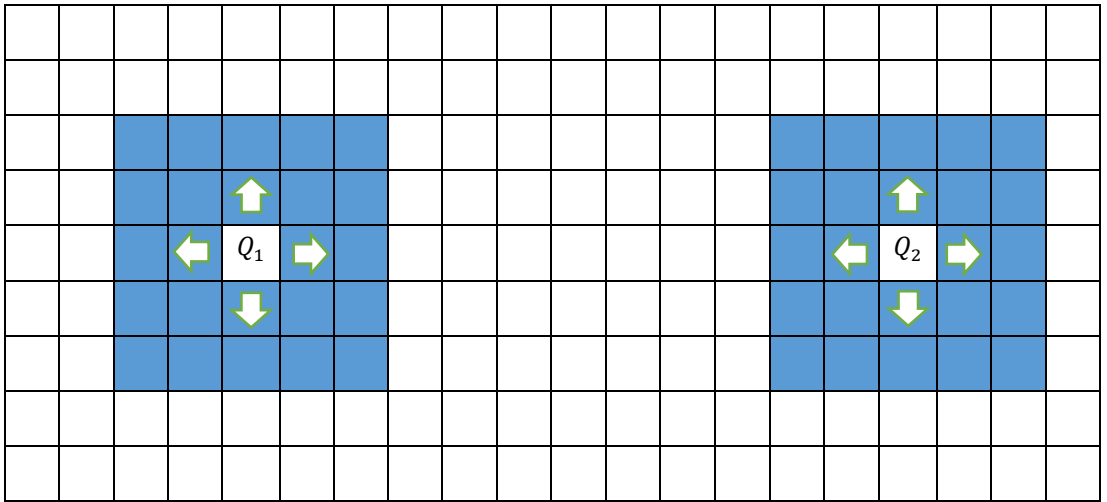
$$(Q_i)_{min} \leq Q_i(x_i, y_i) \leq (Q_i)_{max} \quad (6.7. c)$$

$$(x_i)_{min} \leq x_i \leq (x_i)_{max} \quad (6.7. d)$$

$$(y_i)_{min} \leq y_i \leq (y_i)_{max} \quad (6.7. e)$$

Burada N_g , tüm zaman adımları ve gözlem noktaları için toplam gözlem sayısı; c , Jacobiyen matrisinin kolonlarının toplamını içeren vektördür.

6.4.1 Yerel GA



Şekil 6.5: Yerel Arama tekniğinde, arama yapılan komşu hücrelerin gösterilmesi

Yerel arama teknikleri, mevcut çözümün kullanılarak komşu uzayda daha iyi bir çözümün araştırıldığı bir optimizasyon tekniğidir. Şekil 6.5 'da görülebileceği

gibi en iyi çözümün içerisinde kuyular rastgele komşu arama uzayında hücelere yerleşerek daha iyi çözüm araştırılır. Yerel aramanın GA tekniğiyle kullanılmasında işlem adımları aşağıdaki gibidir.

Adım 1: GA'da belli bir jenerasyon boyunca çözüm gelişmediyse yerel arama sürecini başlat.

Adım 2: Popülasyon içinden iyi çözümü veren bireyi seç.

Adım 3: En iyi bireye ait genlerin onluk sistemdeki karşılığını bul.

Adım 4: Tüm kuyular içinden rastgele kuyular seç.

Adım 5: Seçilen kuyuları komşu uzayda rastgele olarak konumlandır ve yeni çözümü oluştur.

Adım 6: Yeni çözüm için amaç fonksiyonunu hesapla.

Adım 7: Çözümde iyileşme varsa yeni çözümü onluk tabandan ikilik tabana çevir ve popülasyon içindeki en kötü çözümle yer değiştir.

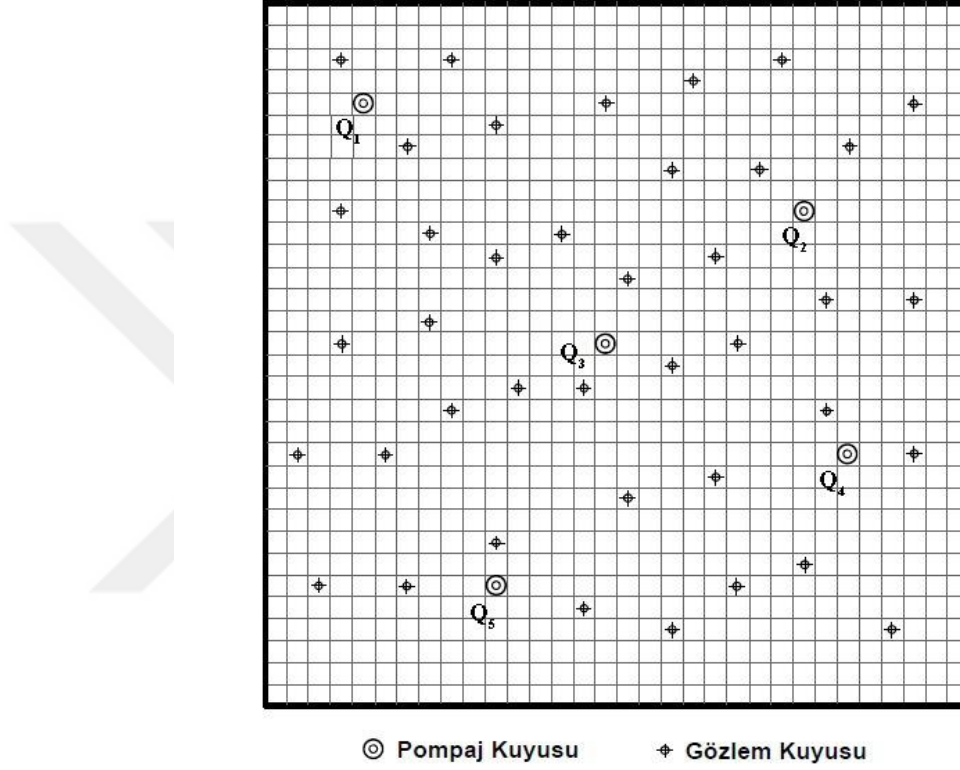
Bu bölümde kuyu yerleri ve sayılarının bulunması için klasik GA ve Yerel GA yöntemleri, belirlenen kuyularda tüm stres periyotları için ise çekilen debiler LP tekniği kullanılarak belirlenecektir.

6.4.2 Uygulama 5

Bu kısımda daha önce geometri ve sınır koşulları Şekil 3.5' te verilen ve Uygulama 1'de ele alınan problem kullanılacaktır. Basıncılı akifer üzerinde 40 adet gözlem kuyusu ve 5 adet pompaj kuyusu bulunmaktadır. Kuyu yerleri Şekil 6.6'da gösterilmiştir. Simülasyon süresi 360 gün, 90 günlük 4 stres periyoduna bölünmüştür. Bütün stres periyotları için pompaj kuyularından çekilen debiler Tablo 6.18'de verilmiştir. Bu debiler kullanılarak gözlem kuyularındaki hidrolik yük değerleri kaydedilmiştir. Kaydedilen gözlem verilerine normal dağılıma uygun ortalaması 0 ve standart sapması 0.1 olan hata değerleri eklenmiştir.

Tablo 6.18: Kuyulardan çekilen gerçek debi değerleri (m³/gün)

Stres Periyodu	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
1	1000	0	0	2000	3000
2	3000	1000	0	2000	3000
3	5000	3000	4000	2000	3000
4	2000	2000	2000	2000	2000



Şekil 6.6: Gözlem ve pompaj kuyularının yerleri (Ayvaz, 2008)

Kuyu yerleri ve sayıları bilinmediği için, doğu sınır koşulu harici tüm hücreler muhtemel pompaj kuyusu olarak probleme dahil edilmektedir. 40 gözlem kuyusunda 160 ölçüm değeri vardır. Bu nedenle tepki matrisinin boyutu 167 x 3968'dir. Sistemde 5 kuyu açılması durumunda Denklem (6.7)'de 4 stres periyodu için karar değişkeni sayısı 20 ve kısıt sayısı 167'dir.

Tablo 6.19'da kuyu sayılarının artmasıyla RE değerinin nasıl değiştiği görülmektedir. Kuyu sayısı 4 iken RE değeri 61.72, kuyu sayısı 5 olduğu zamansa RE 4.74'tür. Rölatif değişim oranı yaklaşık %93 olduğu için iterasyon durdurulmuştur ve akiferde pompaj yapan kuyu sayısı 5 olarak bulunmuştur.

Tablo 6.19: Kuyu sayısı ile beraber RE değerlerindeki değişim

Kuyu Sayısı	RE	Simülasyon Sayısı
1	6261.13	3968
2	683.56	
3	259.7	
4	61.72	
5	4.74	

Tablo 6.20: Farklı standart sapmalara sahip hata değerleri için bulunan RE değerleri

Çözüm	$\sigma=0.00$	$\sigma=0.05$	$\sigma=0.10$	$\sigma=0.20$	$\sigma=0.30$	$\sigma=0.50$
1	0.000	1.929	6.511	23.956	51.236	117.691
2	0.000	1.957	4.740	33.842	61.090	161.738
3	0.000	2.322	6.629	30.130	68.678	152.604
4	0.000	1.070	6.576	30.387	41.856	208.937
5	0.000	1.482	8.089	31.487	50.715	233.395
6	0.000	1.669	6.838	36.559	48.751	123.049
7	0.000	2.601	10.617	30.453	44.331	138.514
8	0.000	1.783	8.684	26.228	47.416	311.526
9	0.000	1.730	6.889	24.297	43.062	184.809
10	0.000	1.895	5.764	27.833	58.819	135.865
ORTALAMA	0.000	1.844	7.134	29.517	51.595	176.813

Tablo 6.21: 10 çalışmada farklı standart sapmalara sahip hata değerleriyle kuyuların doğru yerlerine gitme başarıları

Kuyu no	Gerçek	$\sigma=0.00$	$\sigma=0.05$	$\sigma=0.1$	$\sigma=0.2$	$\sigma=0.3$	$\sigma=0.5$
1	(5, 5)	10	10	10	8	7	4
2	(11, 27)	10	10	10	10	9	8
3	(16, 16)	10	10	10	10	8	4
4	(25, 10)	10	10	8	2	0	0
5	(27, 21)	10	10	10	7	8	0

Kullanılan S/O tekniğinin farklı standart sapmalara sahip hata değerleriyle çalıştırılması sonucu elde edilen değerler Tablo 6.20 ve Tablo 6.21’de verilmiştir. $\sigma=0.2$ m değerini aştığı zaman 4 numaralı kuyu tespit edilememektedir.

Tablo 6.22: Belirlenen kuyu yerlerinin ve debi değerleri ve gerçek değerler ile karşılaştırılması

Kuyu No	Kuyu Yerleri		Debiler ($m^3/gün$)		Rölatif Hatalar (%)	RE
	Belirlenen	Gerçek	Belirlenen	Gerçek		
1	(5, 5)	(5, 5)	907.94	1000	9.21	4.74
			3036.89	3000	1.23	
			4929.58	5000	1.41	
			2060.98	2000	3.05	
2	(11, 27)	(11, 27)	0.00	0	-	
			996.44	1000	0.36	
			2998.24	3000	0.06	
			2006.92	2000	0.35	
3	(16, 16)	(16, 16)	40.21	0	-	
			0.00	0	-	
			4074.29	4000	1.86	
			2021.64	2000	1.08	
4	(25, 10)	(25, 10)	1967.51	2000	1.62	
			1815.49	2000	9.23	
			1823.19	2000	8.84	
			1656.51	2000	17.17	
5	(27, 21)	(27, 21)	2991.30	3000	0.29	
			2978.83	3000	0.71	
			3062.13	3000	2.07	
			2005.65	2000	0.28	

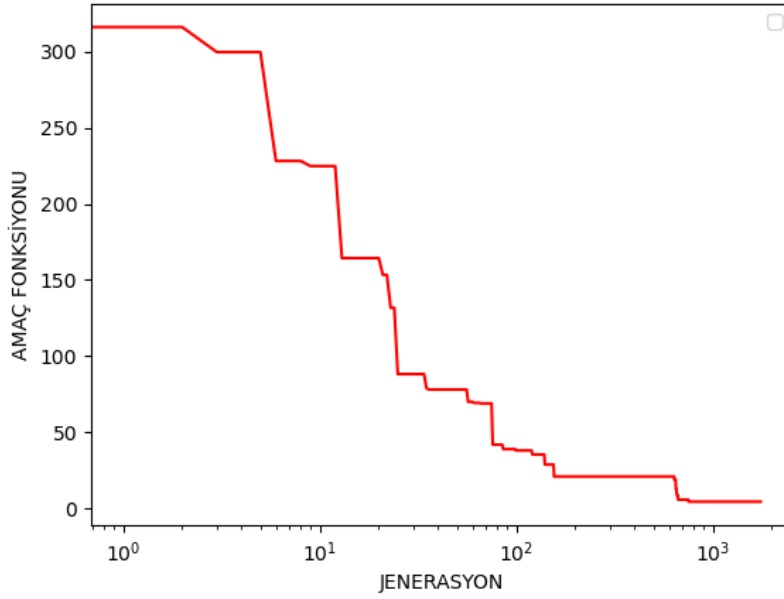
Toplam artık hata değeri $RE = 4.74$ olarak bulunmuştur. Bulunan debi değerlerindeki en büyük göreceli hata değeri %17.17’dir. Tüm kuyu yerleri tam olarak tespit edilebilmiştir. Çözümün yakınsama grafiği Şekil 6.7’de verilmiştir.

Kullanılan S/O modeli bu problem için Ayvaz (2008)’de kullanılan modellerle karşılaştırılmıştır. İlk yaklaşımda optimizasyon modelinde sadece GA, ikincideyse ise ‘Hareketli Bölge Yaklaşımı’ kullanılmıştır. Sonuçlar sırasıyla Tablo 6.23’te verilmiştir.

Klasik ve Yerel GA tekniklerinin performansları karşılaştırılmıştır ve sonuçlar Tablo 6.24’te verilmiştir. Yerel GA yöntemi her çalıştırmada optimum çözüme gitmiştir ve standart sapma değeri 0’dır.

Tablo 6.23: Belirlenen kuyu yerleri ve RE değerlerinin Ayvaz (2008) çalışmasıyla karşılaştırılması

Kuyular		GA (Ayvaz, 2008)	Hareketli Bölge Yaklaşımı (Ayvaz, 2008)	GA-LP
Kuyu No	Gerçek Kuyu Yerleri	Belirlenen Kuyu Yerleri	Belirlenen Kuyu Yerleri	Belirlenen Kuyu Yerleri
1	(5,5)	(5,5)	(6,4)	(5,5)
2	(11,27)	(12,24)	(10,28)	(11,27)
3	(16,16)	(16,14)	(16,16)	(16,16)
4	(25,10)	(24,12)	(24,11)	(25,10)
5	(27,21)	(28,23)	(28,23)	(27,21)
<i>RE</i>		87.59	44.13	4.74



Şekil 6.7: Amaç fonksiyonun jenerasyon sayısına göre değişimi

Tablo 6.24: 20 farklı çalıştırma için Klasik ve Yerel GA teknikleriyle elde edilen RE değerleri

RE Değerleri	Klasik GA			Yerel GA		
	<i>P=20</i>	<i>P=35</i>	<i>P=50</i>	<i>P=20</i>	<i>P=35</i>	<i>P=50</i>
En İyi	4.740	4.740	4.740	4.74	4.74	4.74
En Kötü	24.721	7.183	28.713	4.74	4.74	4.74
Ortalama	7.661	5.644	8.932	4.74	4.74	4.74
Standart Sapma	5.018	1.334	7.709	0	0	0

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kapsamında, yeraltı suyu yönetim problemleri farklı S/O teknikleri kullanılarak çözülmüştür. Model MODFLOW programıyla oluşturulmuş ve kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü aynı programla gerçekleştirilmiştir. Simülasyon modeliyle optimizasyon modeli, tepki matrisi yaklaşımıyla birleştirilmiştir. Çözülen yeraltı suyu yönetim probleminin tipine göre matematiksel yöntemler LP, SLP veya melez optimizasyon teknikleri olan GA-LP, GA-SLP teknikleri kullanılmıştır. Kullanıcı ara yüzleriyle yapılması zor optimizasyon işlemleri Flopy eklentisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Drenaj problemlerinde akifer basınçlıysa ve kuyu yerleri sabitse, problem LP programlama tekniğiyle çözülebilmektedir. Kullanılan S/O tekniği hesaplama olarak efektiftir ve çözüme hızlı şekilde ulaşılmaktadır.

Kuyu yerlerinin sabit olmadığı durumda çözüm uzayında meydana gelen süreksizliklerden dolayı LP tekniğiyle ile çözüm tek başına bulunamamaktadır. Bu durumda GA-LP melez optimizasyon tekniği kullanılmıştır ve çözüme ulaşılmıştır.

Drenaj problemlerinde eğer akifer serbest yüzeyleyse ve kuyu yerleri sabitse SLP tekniği kullanılarak çözüme ulaşılmıştır. Kuyu yerlerinin sabit olmadığı durumda serbest yüzeyle akiferler için GA-SLP melez optimizasyon tekniği kullanılmıştır ancak popülasyon içindeki her birey ve her iterasyon için tepki matrisleri tekrar güncellendiği için GA-SLP tekniği hesaplama yükünü arttırmaktadır. Bu nedenle önce GA-LP melez tekniği kullanılarak hızlı bir şekilde kuyu yerleri belirlenmiş daha sonra SLP yöntemiyle gerçek debiler bulunmuştur.

Nehir akarsu vb yerüstü su sistemleri ekolojik olarak yeraltı suyuna önemli derecelerde bağlı sistemlerdir. LP ve SLP teknikleri kullanılarak kuyulardan çekilen suların yerüstü suyuna olan etkisi incelenmiştir. İlk senaryoda amaç fonksiyonu, kuyulardan çekilen debiyi maksimize etmektir. Sonuç olarak belirtilen kısıtlar altında dört farklı gözlem yeri ve dört farklı zaman adımı için yerüstü akışındaki düşüşler kümülatif olarak %25 seviyelerindedir.

İkinci senaryodaysa amaç fonksiyonu farklı gözlem yerlerindeki yerüstü suyu akışını maksimize etmek veya ekolojik dengeye verilen zararı minimize etmektir. İkinci senaryo için yerüstü akışındaki düşüşler kümülatif olarak %12 seviyelerindedir.

Sürdürülebilir su yönetim modellerinin oluşturulabilmesi ve doğa korumacı politikaların izlenebilmesi için amaç fonksiyonun yerüstü suyu akışını veya hidrolik yükleri maksimize etmek ya da ekolojik dengeye verilen zararı minimize etmek olmalıdır.

Tanımlanan S/O teknikleri bilinmeyen kuyu karakteristiklerinin belirlenmesi problemlerinde de efektif olarak kullanılabilir. Gözlem değerlerindeki ölçüm hataları nedeniyle ise çekilen debi değerleri en büyük %17,17 rölatif hata değeriyle tespit edilebilmiştir. Bulunan değerler literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmış ve en küçük artık hata değerini bu tez çalışması kapsamında kullanılan S/O modeli vermiştir.

Standart sapmanın $\sigma=0.2$ m'den daha küçük olduğu durumlar için kullanılan S/O tekniği efektif şekilde kuyu yerlerini ve sayılarını tespit edebilmektedir. σ değerinin 0.2'den büyük olduğu durumlardaysa kuyu yerlerini tespit etmek zorlaşmaktadır. Sadece GA kullanılarak pratikte globale yakın çözümler bulunabilmektedir. Yerel arama yöntemiyle GA birleştirildiği zaman global çözümü bulma olasılığı oldukça güçlenmektedir. Bu çalışma da 0 standart sapmayla Yerel GA yöntemiyle optimum çözüme ulaşmıştır.

Kullanılan örnekler hipotetik olduğu için hidrolik iletkenlik gibi saha parametreleri kesin olarak bilinmemektedir. Ancak gerçek havza modellemelerinde, modele ait birçok parametre noktasal olarak bilinmemektedir ve sahanın tümünde parametre tahminleri yapılmaktadır. Bu nedenle havza ölçeğinde modellerin oluşturulmasında S/O tekniklerinin yanında belirsizlik analizlerinin de yapılması gerekmektedir.

Son olarak iklim değişiklikleri ve sıcaklıklarının artmasıyla suya olan ihtiyacın her geçen gün arttığı günümüzde, ülkemizin su kaynaklarının korunabilmesi ve su bütçesinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için yeraltı -yerüstü su kaynaklarının bir bütün halinde modellenmesi gerekmektedir.

8. KAYNAKLAR

- Aguado, E. and Remson, I., "Ground-water hydraulics in aquifer management", *Journal of the Hydraulics Division*, 100(1), pp. 103–118, (1974).
- Ahlfeld, D. P. and A. E., "*Optimal management of flow in groundwater systems*", United States: Academic Press, (2000).
- Ahlfeld, D. P. and Baker, K. M. and Barlow, P. M., "GWM-2005 - A groundwater-management process for MODFLOW-2005 with local grid refinement (LGR) capability techniques and methods", *US Geological Survey, Techniques and Methods*, 6–A33, 65 p, (2009).
- Ahlfeld, D. P. and Barlow, P. M. and Mulligan, A. E., "GWM - A ground-water management process for the U.S. Geological Survey modular ground-water model (MODFLOW-2000)", *U.S. Geological Survey, Open File Report 2005-1072*, 172 p, (2005).
- Ahlfeld, D. P. and Baro-Montes, G., "Solving unconfined groundwater flow management problems with successive linear programming", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(5), pp. 404–412, (2008).
- Aly, A. H. and Peralta, R. C., "Optimal design of aquifer cleanup systems under uncertainty using a neural network and a genetic algorithm", *Water Resources Research*, 35(8), pp. 2523–2532, (1999).
- Anderson, M. P. and Woessner, W. W. and Hunt, R. J. "*Applied modeling groundwater simulation of flow and advective transport*", United States: Elsevier, (2015).
- Ayvaz, M. T. and Elçi, A., "A groundwater management tool for solving the pumping cost minimization problem for the tahtali watershed (Izmir-Turkey) using hybrid HS-Solver optimization algorithm", *Journal of Hydrology*, 478, pp. 63–76, (2013).
- Ayvaz, M. T. and Elçi, A. "Identification of the optimum groundwater quality monitoring network using a genetic algorithm based optimization approach", *Journal of Hydrology*, 573, pp. 1078-1091, (2018).
- Ayvaz, M. T. and Karahan, H., "A simulation/optimization model for the identification of unknown groundwater well locations and pumping rates", *Journal of Hydrology*, 357(1–2), pp. 76–92, (2008).
- Ayvaz, M. T., "Heterojen bir akiferde pompaj kuyu karakteristiklerinin genetik algoritma ile belirlenmesi", Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Denizli, (2008).
- Ayvaz, M.T., "Optimal dewatering of an excavation site by using the linked simulation–optimization approaches", *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(3), pp. 1020-1031, (2018).

- Ayvaz, M. T, and Elçi, A., "Seeking the optimum groundwater monitoring network using a genetic algorithm approach", *Proceedings of the 37th IAHR World Congress*, Malaysia, (2017).
- Bakker, M. and Post, V. and Langevin, C. D. and Hughes, J. D. and White, J. T. and Starn, J. J. and Fienen, M. N., "Scripting MODFLOW model development using Python and FloPy", *Groundwater*, 54(5), pp. 733–739, (2016).
- Barlow, P. M. and Ahlfeld, D. P. and Dickerman, D. C., "Conjunctive-management models for sustained yield of stream-aquifer systems", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(1), pp. 35–48, (2003).
- Barlow, P. M. and Leake, S. A., "Streamflow depletion by wells-Understanding and managing the effects of groundwater pumping on streamflow", *U.S. Geological Survey Circular 1376*, 84 p, (2012).
- Bassel, T., "Innovative and efficient simulation-optimization tools for successful groundwater management and conflict resolution", Ph.D Thesis, *Utah State University Irrigation Engineering*, Utah, (2015).
- Batu, V., "*Aquifer hydraulics: A comprehensive guide to hydrogeologic data analysis*", New York-America: Wiley, (1998).
- Chang, L. C. and Shoemaker, C. A. and Liu, P. L. F., "Optimal time-varying pumping rates for groundwater remediation: Application of a constrained optimal control algorithm", *Water Resources Research*, 28(12), pp. 3157–3173, (1992).
- Cooper, G. S. and Peralta, R. C. and Kaluarachchi, J. J., "Optimizing separate phase light hydrocarbon recovery from contaminated unconfined aquifers", *Advances in Water Resources*, 21(5), pp. 339–350, (1998).
- Danskin, W. R. and Gorelick, S. M., "A policy evaluation tool: Management of a multiaquifer system using controlled stream recharge", *Water Resources Research*, 21(11), pp. 1731–1747, (1985).
- Das, A. and Datta, B., "Application of optimisation techniques in groundwater quantity and quality management", *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 26(4), pp. 293-316, (2001).
- Dudley, R. W. and Stewart, G. J., "Estimated Effects of Ground-Water Withdrawals on Stream- Water Levels of the Pleasant River near Crebo Flats , Maine , July 1 to September 30", *U.S. Geological Survey*, Scientific Investigations Report 2006-5268, (2006)
- Ejaz, M. S. and Peralta, R. C., "Maximizing conjunctive use of surface and ground water under surface water quality constraints", *Advances in Water Resources*, 18(2), pp. 67–75, (1995).
- Gharbi, A. and Peralta, R. C., "Integrated embedding optimization applied to Salt Lake Valley aquifers", *Water Resources Research*, 30(3), pp. 817–832, (1994).
- Goldberg, E. D., "*Genetic Algorithms in Search. Optimization, and Machine Learning*", United States: Addison-Wesley Publishing, (1989).

- Gorelick, S. M., "A review of distributed parameter groundwater management modeling methods", *Water Resources Research*, 19(2), pp. 305-319, (1983).
- Gorelick, S. M. and Voss, C. I. and Gill, P. E. and Murray, W. and Saunders, M. A. and Wright, M. H., "Aquifer reclamation design: The use of contaminant transport simulation combined with nonlinear programming", *Water Resources Research*, 20(4), pp. 415-427, (1984).
- Gorelick, S. M. and Zheng, C., "Global change and the groundwater management challenge", *Water Resources Research*, 51(5), pp. 3031-3051, (2015).
- Gürarlan, G. "Yeraltısuyu kirletici kaynak yerlerinin ve boşalım geçmişlerinin diferansiyel gelişim algoritması kullanılarak belirlenmesi", Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2011).
- Hallaji, K. and Yazicigil, H., "Optimal management of a coastal aquifer in Southern Turkey", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(4), pp. 233-244, (1996).
- Harbaugh, A. W., "MODFLOW-2005, The U. S. Geological survey modular groundwater model - the ground-water flow process", *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*, 6-A16, (2005).
- Hsiao, C. T. and Chang, L. C., "Dynamic optimal groundwater management with inclusion of fixed costs", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128(1), pp. 57-65, (2002).
- Jinghui, Z. and Xiaomin, H. and Min, G., and Jun, Z., "Comparison of performance between different selection strategies on simple genetic algorithms", *International Conference on Computational Intelligence for Modelling*, Austria, (2005).
- Jones, L. and Willis, R. and Yeh, W. W. G., "Optimal control of nonlinear groundwater hydraulics using differential dynamic programming", *Water Resources Research*, 23(11), pp. 2097-2106, (1987).
- Khadem, M. and Afshar, M. H., "An efficient hybrid LP-LP method for the optimal utilization of confined aquifers", *Irrigation and Drainage*, 62(1), pp. 120-128, (2013).
- Mantoglou, A. and Papantoniou, M., "Optimal design of pumping networks in coastal aquifers using sharp interface models", *Journal of Hydrology*, 361(1-2), pp. 52-63, (2008).
- McDonald, M. G., & Harbaugh, A. W. "A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model", United States: USGS, (1988)
- McKinney, D. C. and Lin, M. D. "Genetic algorithm solution of groundwater management models", *Water Resources Research*, 30(6), pp. 1897-1906, (1994).
- Niswonger, R. G. and Prudic, D. E., "Documentation of the streamflow-routing (SFR2) package to include unsaturated flow beneath streams—A modification to SFR1", *U.S. Geological Survey, Techniques and Methods*, 6-A13, (2010).
- Nocedal, J. and Wright, S. J., "*Numerical Optimization*", United States: Springer,

(2006).

- Peralta, R. C. and Cantiller, R. R. A. and Terry, J. E. "Optimal large-scale conjunctive water-use planning: case study", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(6), pp. 471–478, (1995).
- Peralta, R. C. and Timani, B. and Das, R., "Optimizing safe yield policy implementation", *Water Resources Management*, 25(2), 483–508, (2011).
- Peralta, R. C. and Azarmnia, H. and Takahashi, S., "Embedding and response matrix techniques for maximizing steady-state ground-water extraction: computational comparison", *Ground Water*, 29(3), pp. 357–364, (1991).
- Prudic, D. E., "Documentation of a computer program to simulate stream-aquifer relations using a modular, finite-difference ground-water flow model", *U.S. Geological Survey, Open-File Report 88-729*, 113 p, (1989).
- Prudic, D. E. and Konikow, L. F. and Banta, E. R., "A new streamflow-routing (SFR1) package to simulate stream-aquifer interaction with MODFLOW-2000", *U.S. Geological Survey, Open-File Report 2004-1042*, 104, (2004).
- Rao, S. S., "*Engineering Optimization: Theory and Practice: Fourth Edition*", United States: John-Wiley and Sons, (2009).
- Reed, P. and Minsker, B. and Valocchi, A. J., "Cost-effective long-term groundwater monitoring design using a genetic algorithm and global mass interpolation", *Water Resources Research*, 36(12), pp. 3731–3741, (2000).
- Rejani, R. and Jha, M. K. and Panda, S. N., "Simulation-optimization modelling for sustainable groundwater management in a coastal basin of Orissa, India" *Water Resources Management*, 23(2), pp. 235–263, (2009).
- Rogers, L. L. and Dowla, F. U., "Optimization of groundwater remediation using artificial neural networks with parallel solute transport modeling" *Water Resources Research*, 30(2), pp. 457–481, (1994).
- Singh, A., "An overview of the optimization modelling applications", *Journal of Hydrology*. 466-467, pp. 167-182, (2012).
- Singh, A., "Groundwater resources management through the applications of simulation modeling: A review", *Science of the Total Environment*, 499, pp. 414–423, (2014).
- Tayfur, G., "Modern optimization methods in water resources planning, engineering and management", *Water Resources Management*, 31(10), pp. 3205–3233, (2017).
- Tsai, F. T. C. and Sun, N. Z. and Yeh, W. W. G., "A combinatorial optimization scheme for parameter structure identification in ground water modeling", *Ground Water*, 41(2), pp. 156-169, (2003).
- Virtanen, P. and Gommers, R. "SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python", *Nature Methods*, 17(3), pp. 261–272, (2020).

- Wang, H. F. and Anderson, M. P., "*Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods*", United States: Academic Press, (1982).
- Wang, M. and Zheng, C., "Ground water management optimization using genetic algorithms and simulated annealing: formulation and comparison", *Journal of the American Water Resources Association*, 34(3), pp. 519–530, (1998).
- Wanakule, N. and Adams, A., "Using optimization in wellfield operations: an implementation case study at Tampa Bay Water", *Introduction To Optimization Analysis in Hydrosystem Engineering, Topics in Safety, Risk, Reliability And Quality*, 25, pp. 239-263, (2014).
- Harmancıoğlu, N. B. and Altınbilek, D. (Eds.), "*Water resources of Turkey*" Switzerland: Springer, 159-201, (2020).
- Yeh, W. W. G., "Systems analysis in ground-water planning and management", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 118(3), pp. 224–237, (1992).



EKLER

EKLER

EK A Doğrusal Programlama Modelinin Testi İçin Kullanılan Fonksiyonlar

Doğrusal programlama modelinin testi için $F1, F2, F3$ olmak üzere 3 test fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyonlar aşağıdaki gibidir.

Amaç Fonksiyonu 1:

$$\max F1 = 5x_1 + 4x_2 + 3x_3$$

Kısıtlar:

$$2x_1 + 3x_2 + x_3 \leq 5$$

$$4x_1 + x_2 + 2x_3 \leq 11$$

$$3x_1 + 4x_2 + 2x_3 \leq 8$$

$$x_1, x_2, x_3 \geq 0$$

$x_1^* = 3, x_2^* = 0, x_3^* = 1$ noktaları için optimum değeri $F1^* = 13$ 'tür.

Amaç Fonksiyonu 2:

$$\max F2 = x_1 + 2x_2 + x_3$$

Kısıtlar:

$$2x_1 + x_2 - x_3 \leq 2$$

$$-2x_1 + x_2 - 5x_3 \leq -6$$

$$4x_1 + x_2 + x_3 \leq 6$$

$$x_1, x_2, x_3 \geq 0$$

$x_1^* = 0, x_2^* = 4, x_3^* = 2$ noktaları için optimum değeri $F2^* = 10$ 'dur.

Amaç Fonksiyonu 3:

$$\max F3 = 6x_1 + 8x_2 + 5x_3 + 9x_4$$

Kısıtlar:

$$2x_1 + x_2 + x_3 + 3x_4 \leq 5$$

$$x_1 + 3x_2 + x_3 + 2x_4 \leq 3$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \geq 0$$

$x_1^* = 2, x_2^* = 0, x_3^* = 1, x_4^* = 0$ noktaları için optimum değeri $F3^* = 17$ 'dir.

EK B SLP Modelinin İşlem adımları ve Kullanılan Fonksiyonun Özellikleri

SLP Yöntemi İşlem Adımları

Adım 1: İterasyon sayacı $i=1$ alınır ve karar değişkenlerine \mathbf{X}_i başlangıç değerleri verilir. Seçilen değerlerin fizibil olmasına gerek yoktur.

Adım 2: Denklem (5.1)'de verilen amaç fonksiyonu ve kısıtlar, aşağıdaki gibi \mathbf{X}_i değerleri kullanılarak doğrusallaştırılır.

$$f(\mathbf{X}) = f(\mathbf{X}_i) + \nabla f(\mathbf{X}_i)^T (\mathbf{X} - \mathbf{X}_i)$$

$$g_j(\mathbf{X}) = g_j(\mathbf{X}_i) + \nabla g_j(\mathbf{X}_i)^T (\mathbf{X} - \mathbf{X}_i)$$

$$H_k(\mathbf{X}) = h_k(\mathbf{X}_i) + \nabla h_k(\mathbf{X}_i)^T (\mathbf{X} - \mathbf{X}_i)$$

Adım 3: Doğrusallaştırılan optimizasyon problemi aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

Amaç fonksiyonu:

$$\min f(\mathbf{X}) = f(\mathbf{X}_i) + \nabla f(\mathbf{X}_i)^T (\mathbf{X} - \mathbf{X}_i)$$

Kısıtlar:

$$g_j(\mathbf{X}) = g_j(\mathbf{X}_i) + \nabla g_j(\mathbf{X}_i)^T (\mathbf{X} - \mathbf{X}_i)$$

$$H_k(\mathbf{X}) = h_k(\mathbf{X}_i) + \nabla h_k(\mathbf{X}_i)^T (\mathbf{X} - \mathbf{X}_i)$$

$$\mathbf{X}_i \geq 0$$

4) Denklem (5.7)'de gösterilen doğrusal optimizasyon problemini Simplex metoduyla çözülür

5) Yeni \mathbf{X}_{i+1} karar değişkenlerine göre kısıtlar güncellenir. Eğer $g_j(\mathbf{X}_{i+1}) \leq \varepsilon$ ve $|H_k(\mathbf{X}_{i+1})| \leq \varepsilon$ şartları sağlanıyorsa iterasyon durdurulur. Sağlanmıyorsa iterasyon sayacı arttırılır ve adım 2'ye gidilir.

F4 Test Fonksiyonu Yapısı ve Çözümü

Amaç fonksiyonu:

$$\min f(x_1, x_2) = x_1 - x_2$$

Kısıtlar:

$$g_1(x_1, x_2) = 3x_1^2 - 2x_1x_2 + x_2^2 - 1 \leq 0$$

$$-2 \leq x_1, x_2 \leq 2$$

Burada görüldüğü gibi amaç fonksiyonu doğrusal ancak g_1 kısıtı doğrusal değildir. Durdurma kriteri olan $\varepsilon = 0.02$ olarak seçilmiştir. Optimal çözüm için karar değişkenleri $\mathbf{X}^* = (0, 1)$ ve $f(\mathbf{X}^*) = -1$ 'dir.

$\mathbf{X}_1 = (-2, 2)$ seçilerek iterasyon başlatılır. Seçilen değerler için $g_1 = 23 \geq \varepsilon$ olduğu için g_1 kısıtı doğrusallaştırılır.

$$g_1(\mathbf{X}_2) = g_1(\mathbf{X}_1) + \nabla g_1(\mathbf{X}_1)^T(\mathbf{X} - \mathbf{X}_1)$$

$$g_1(\mathbf{X}_2) = 23 + \begin{pmatrix} -16 \\ 8 \end{pmatrix} [(x_1 + 2, x_2 - 2)]$$

$$g_1(\mathbf{X}_2) = -16x_1 + 8x_2 - 25 \leq 0$$

Amaç fonksiyonu:

$$\min f(x_1, x_2) = x_1 - x_2$$

Kısıtlar:

$$g_1(x_1, x_2) = -16x_1 + 8x_2 - 25 \leq 0$$

$$-2 \leq x_1, x_2 \leq 2$$

Yukarıdaki doğrusal problem Simplex metoduyla çözülür ve $\mathbf{X}_2 = (-0.5625, 2)$, karar değişkenleri için $f(\mathbf{X}_2) = -2.5625$ olarak bulunur. $g_1(\mathbf{X}_2) = 6.19922 \leq 0.02$, durdurma kriteri şartı sağlanmadığı için karar değişkenleri $\mathbf{X}_2 = (-0.5625, 2)$ kullanılarak durdurma kriteri sağlanana kadar aynı işlemler tekrarlanır. Durdurma kriteri 9 adımda sağlanmıştır. 9 adım sonucunda $\mathbf{X} = (-0.073, 0.929)$ ve amaç fonksiyonu değeri $f(\mathbf{X}) = -1$ olarak bulunmuştur.

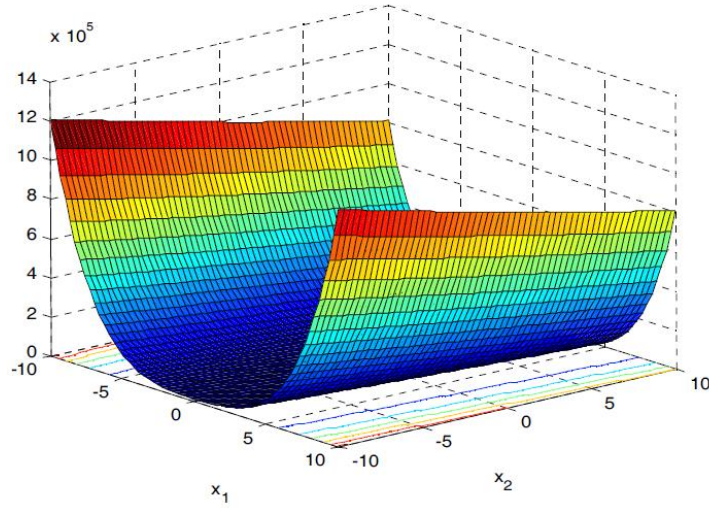
EK C Genetik Algoritma Modelinin Testi İçin Kullanılan Fonksiyonlar

Rosenbrock Test Fonksiyonu

$$f(x) = \min 100(x_1^2 - x_2)^2 + (1 - x_1)^2$$

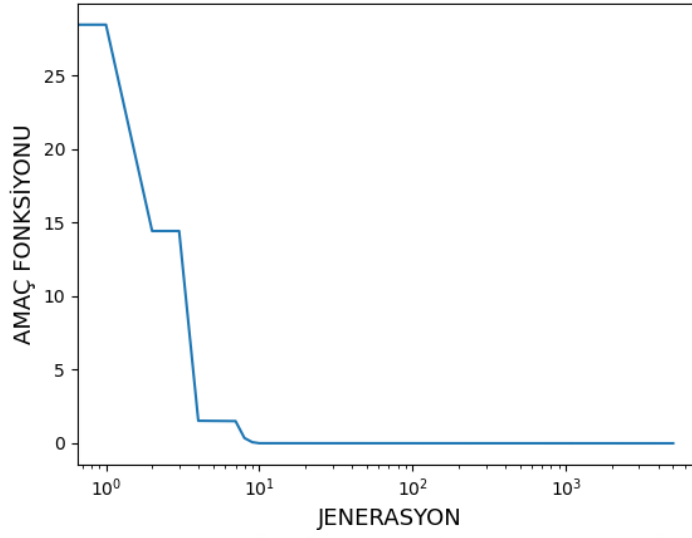
$$-5 \leq x_1, x_2 \leq 10$$

Rosenbrock fonksiyonu, dar parabolik şekilli bir vadi oluşturmaktadır ve Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Bu vadideki global minimum noktası $x_1^* = 1, x_2^* = 1$ noktaları için $f(x)^* = 0$ 'dır.



Şekil EK-C.1: Rosenbrock test fonksiyonu

Rosenbrock test fonksiyonunun çözümü için elde edilen değerler $x_1^* = 0.99999982$, $x_2^* = 0.99999982$ noktaları için $f(x)^* = 3.22941578e - 12$ 'dir. Jenerasyon sayısı ile birlikte amaç fonksiyonundaki değişim Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



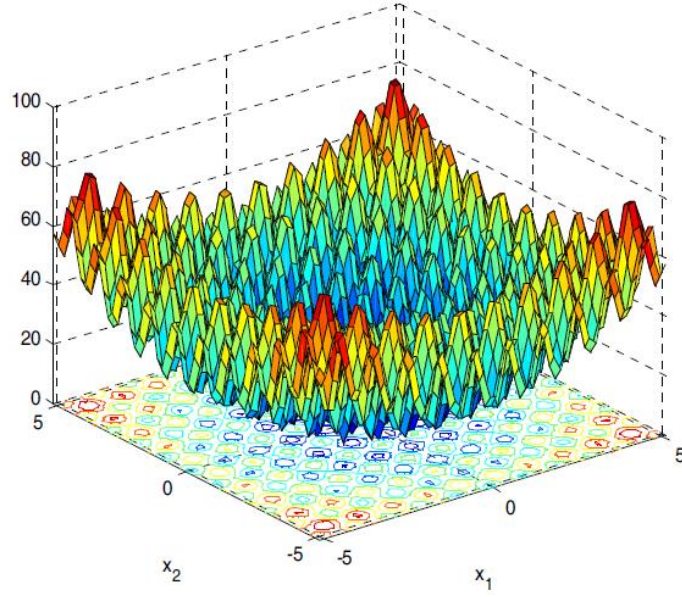
Şekil EK-C.2: Rosenbrock fonksiyonu için jenerasyon sayısı ile amaç fonksiyonundaki değişim

Rastrigin Test Fonksiyonu

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

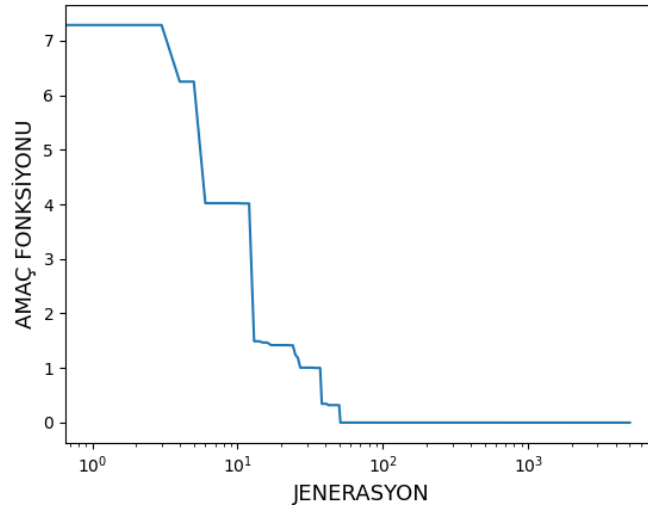
$$-5.12 \leq x_i \leq 5.12, i = 1, 2, \dots, n$$

Şekil 5.5'te de görüleceği gibi Rastrigin fonksiyonu çözüm uzayında birçok yerel minimuma sahip bir test fonksiyonudur. Rastrigin fonksiyonunda global minimum noktası için karar değişkenleri ve amaç fonksiyonu değeri $x_1^*=0, x_2^*=0$ $f(x)^*=0$ 'dır



Şekil EK-C.3: Rastrigin test fonksiyonu

Rastrigin test fonksiyonunun çözümü için elde edilen değerler $x_1^* = -4.76837e - 09$, $x_2^* = -4.76837e - 09$ noktaları için $f(x)^* = 7.10542736e - 15$ 'dir. Jenerasyon sayısı ile birlikte amaç fonksiyonundaki değişim şekil 5.6'te gösterilmiştir.

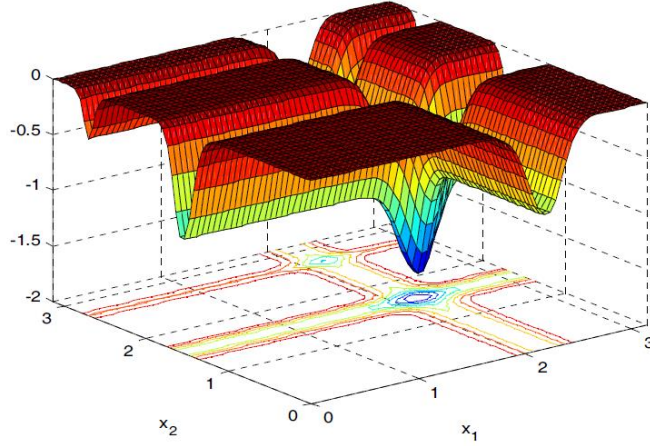


Şekil EK-C.4: Rastrigin fonksiyonu için jenerasyon sayısı ile amaç fonksiyonu arasındaki değişim

Michalewicz Test Fonksiyonu

$$f(x) = \min\left[-\sum_{i=1}^n \sin(x_i) \sin\left(\frac{ix_i^2}{\pi}\right)^{2m}\right], m = 10, n = 5$$

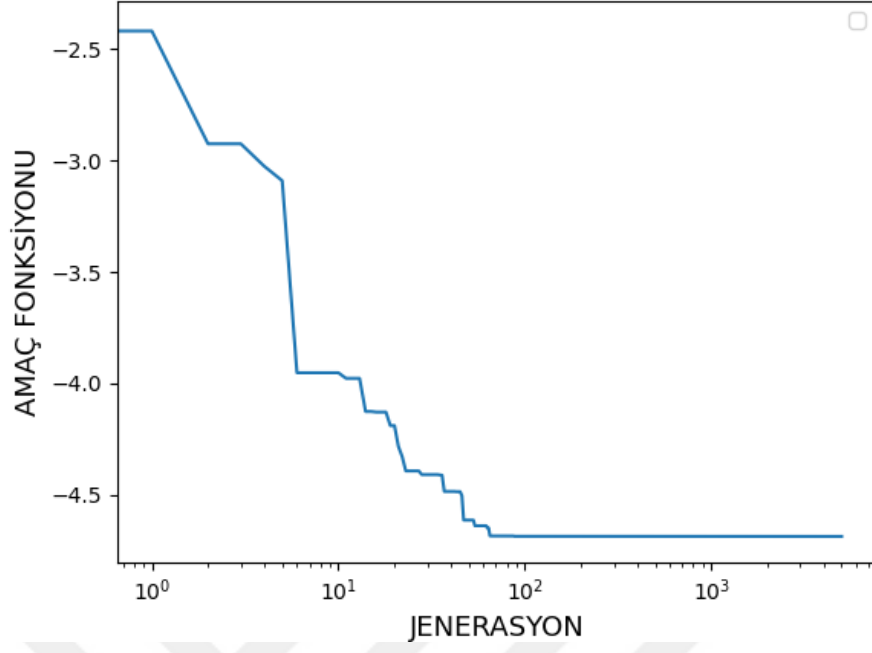
$$0 \leq x_i \leq \pi, i = 1, 2, \dots, n$$



Şekil EK-C.5: Michalewicz fonksiyonu

$n=2$ için Michalewicz fonksiyonun çözüm uzayı şekil 5.7'deki gibidir. $n=5$ için Michalewicz fonksiyonunda global minimum noktası için amaç fonksiyonu değeri $f(x)^* = -4.687658$ 'dir.

Michalewicz test fonksiyonunun çözümü için elde edilen değerler $x_1^* = 2.20289$, $x_2^* = 1.57079$, $x_3^* = 1.28499$, $x_4^* = 1.92305$, $x_5^* = 1.72046$ noktaları için $f(x)^* = -4.68765818$ 'dir. Jenerasyon sayısı ile birlikte amaç fonksiyonundaki değişim şekil 5.6'te gösterilmiştir.



Şekil EK-C.6: Michalewicz fonksiyonu için jenerasyon sayısı ile amaç fonksiyonundaki değişim

Kullanılan üç test fonksiyonunda da oluşturulan genetik algoritma kodu global minimum noktasına yakınsamıştır ve düzgün bir şekilde çalışmaktadır.