

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

**KANALİZASYON SİSTEMLERİNİN DİFERANSİYEL EVRİM  
ALGORİTMASI KULLANILARAK OPTİMUM TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ERHAN TAN**

**DENİZLİ, EYLÜL - 2020**

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



**KANALİZASYON SİSTEMLERİNİN DİFERANSİYEL EVRİM  
ALGORİTMASI KULLANILARAK OPTİMUM TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ERHAN TAN**

**DENİZLİ, EYLÜL - 2020**

**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.**

**ERHAN TAN**



## ÖZET

### KANALİZASYON SİSTEMLERİNİN DİFERANSİYEL EVRİM ALGORİTMASI KULLANILARAK OPTİMUM TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ERHAN TAN

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

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

DENİZLİ, EYLÜL - 2020

Kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımı son yıllarda geçerliliğini koruyan önemli mühendislik problemlerinden biridir. Bu sistemlerin kurulum maliyetindeki ufak bir düşüş, ekonomik anlamda büyük miktarda tasarruf edilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle kanalizasyon sistemlerinin ilk yatırım maliyetinin hidrolik ve işletme kısıtlarına bağlı olarak minimize edilmesi literatürde dikkate alınan önemli optimizasyon problemleri arasında yer almaktadır.

Bu çalışmada kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımının yapılabildiği diferansiyel evrim (DE) optimizasyon tekniğine dayanan bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşımda her bir boruya ait eğim değeri optimizasyon modelinde karar değişkeni olarak kullanılmış ve boru çapları elde edilen eğime bağlı olarak, belirlenen piyasa çapları içerisinde seçilerek toplam sistem maliyeti minimize edilmiştir. Optimizasyon işlemi esnasında sağlanması gereken fiziksel ve yönetimsel kısıtların tümü penaltı fonksiyonu yaklaşımı kullanılarak optimizasyon modeline dahil edilmiştir. Geliştirilen yaklaşımın performansı iki örnek sistem üzerinde test edilmiş ve literatürde verilenlere benzer veya daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Kanalizasyon Sistemi, Optimum Tasarım, Optimizasyon, Diferansiyel Evrim Algoritması.

# **ABSTRACT**

## **OPTIMUM DESIGN OF SEWER SYSTEMS BY USING DIFFERENTIAL EVOLUTION ALGORITHM**

**MSC THESIS  
ERHAN TAN**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
CIVIL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. MUSTAFA TAMER AYVAZ)**

**DENİZLİ, SEPTEMBER 2020**

The optimum design of sewage systems is one of the major engineering problems that have remained valid in recent years. A slight decrease in the installation cost of these systems provides the large amount of economic savings. For this reason, minimizing the first investment cost of sewage systems by considering hydraulic and operational constraints is among the important optimization problems considered in the literature.

In this study, a solution approach which is based on the differential evolution (DE) optimization method is developed for optimum design of the sewer systems. In the developed approach, the slope of each pipe is used as the decision variable of the optimization model and the total system cost was minimized by choosing the pipe diameters from the available diameters in market depending on the obtained slope. All the physical and managerial constraints to be satisfied during the optimization process is included to the model by using the penalty function approach. The performance of the proposed approach is tested on two example systems and the similar or better results are obtained compared to the obtained results given in literature.

**KEYWORDS:** Sewer System, Optimum Design, Optimization, Differential Evolution Algorithm.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ .....	v
TABLO LİSTESİ .....	vi
SEMBOL LİSTESİ .....	vii
KISALTMA LİSTESİ .....	ix
ÖNSÖZ.....	x

<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Amaç ve Kapsam.....	1
1.2 Literatür Araştırması .....	4
1.3 Tezin Amacı .....	7
1.4 Tezin Organizasyonu .....	8

<b>2. KANALİZASYON SİSTEMLERİ TASARIM ESASLARI.....</b>	<b>9</b>
2.1 Giriş .....	9
2.2 Hidrolik Tasarım .....	11
2.2.1 Debi.....	11
2.2.2 Hız.....	12
2.2.3 Doluluk Oranı .....	12
2.2.4 Eğim.....	12
2.2.5 Boru Üst Dolgu Kalınlığı ve Kanal Derinliği .....	13
2.3 Hesap Yöntemleri.....	13
2.4 Kısmi Dolu Kanallarda Akım.....	14
2.5 Sistem Maliyetinin Belirlenmesi .....	16

<b>3. MODEL GELİŞTİRİLMESİ .....</b>	<b>17</b>
3.1 Giriş .....	17
3.2 Kanalizasyon Sistem Optimizasyonu .....	17
3.3 Diferansiyel Evrim Optimizasyon Tekniği .....	19
3.4 Problem Formülasyonu .....	21

<b>4. MODEL UYGULAMASI .....</b>	<b>25</b>
4.1 Giriş .....	25
4.2 Uygulama 1 .....	27
4.3 Uygulama 2 .....	33

<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>39</b>
5.1 Sonuçlar .....	39

5.2	Öneriler.....	40
<b>6.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>42</b>
<b>7.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>46</b>

# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 2.1: Dairesel kesitli kanallarda kısmi dolu akış özellikleri (İller Bankası, 2017).....	14
Şekil 2.2: Dairesel kesitli kanallarda hidrolik elemanlar (İller Bankası, 2017). .....	16
Şekil 3.1: Genel akış boykesiti.....	18
Şekil 4.1: Senorya A kapsamında kullanılan farklı DE çözüm parametrelerini içeren parametre kombinasyonları .....	26
Şekil 4.2: Uygulama 1'e ait boru ve düğüm nokta planı .....	27
Şekil 4.3: Uygulama 1'in Senorya A kapsamında 64 farklı parametre seti için çözülmesi sonucu elde edilen yakınsama grafikleri.....	29
Şekil 4.4: Uygulama 1'in Senaryo B kapsamında farklı rastgele sayı üreteçler için çözülmesi sonucunda elde edilen yakınsama grafikleri .....	30
Şekil 4.5: Uygulama 2'ye ait boru ve düğüm nokta planı.....	33
Şekil 4.6: Uygulama 2'nin Senaryo A kapsamında 64 farklı parametre seti için çözülmesi sonucu elde edilen yakınsama grafikleri.....	35
Şekil 4.7: Uygulama 2'nin Senaryo B kapsamında farklı rastgele sayı üreteçleri için çözülmesi sonucunda elde edilen yakınsama grafikleri .....	36



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

Tablo 4.1: Uygulama 1'e ait karakteristik özellikler. ....	27
Tablo 4.2: Uygulama 1 için Senaryo A ve B kapsamında elde edilen sonuçların istatistiksel değerlendirilmesi.....	30
Tablo 4.3: Uygulama 1 için optimizasyon modeli tarafından belirlenen karakteristikler.....	31
Tablo 4.4: Uygulama 1 için elde edilen sonuçların sistem maliyeti ve fonksiyon hesaplama sayısı bakımından karşılaştırılması .....	32
Tablo 4.5: Uygulama 2'ye ait karakteristik özellikler. ....	34
Tablo 4.6: Uygulama 2 için Senaryo A ve B kapsamında elde edilen sonuçların istatistiksel değerlendirilmesi.....	36
Tablo 4.7: Uygulama 2 için optimizasyon modeli tarafından belirlenen karakteristikler.....	37
Tablo 4.8: Uygulama 2 için elde edilen sonuçların sistem maliyeti bakımından karşılaştırılması .....	38

## SEMBOL LİSTESİ

$V$	:	Akış kesitindeki hız
$n$	:	Manning katsayısı
$R$	:	Hidrolik yarıçap
$J$	:	Eğim
$m$	:	Kutter katsayısı
$D$	:	Boru iç çapı
$k$	:	Pürüzlülük katsayısı
$g$	:	Yerçekimi ivmesi
$\nu$	:	Kinematik viskozite
$C_{hw}$	:	Hazen-Williams katsayısı
$f$	:	Darcy-Weisbach katsayısı
$h$	:	Kanal içerisindeki su derinliği
$\frac{h}{D}$	:	Doluluk oranı
$\theta$	:	Su kesitinin daire içinde oluşturduğu açı
$Q$	:	Kanaldaki debi
$Q_d$	:	Tam dolu akıştaki debi
$V$	:	Kanaldaki akış hızı
$V_d$	:	Tam dolu akışta akış hızı
$R$	:	Kanaldaki akış şartlarında kanalın hidrolik yarıçapı
$R_d$	:	Tam dolu akışta kanalın hidrolik yarıçapı
$A$	:	Kanaldaki akış şartlarında kanal kesit alanı
$A_d$	:	Tam dolu akışta kanal kesit alanı
$\Phi$	:	Amaç fonksiyonu değeri
$N$	:	Sistemdeki boru sayısı
$d_k$	:	$k$ numaralı borunun çapı

$L_k$	:	$k$ numaralı borunun uzunluğu
$Z_k$	:	$k$ numaralı borunun yerleştirilmesi için gerekli ortalama kazı derinliği
$F$	:	Toplam sistem maliyeti
$q_k$	:	$k$ numaralı boruda normal derinlik oluşturacak akım debisi
$Q_k^*$	:	$k$ numaralı boru için kullanılan tasarım debisi
$V_k$	:	$k$ numaralı borudaki akış hızı
$V_{min}$	:	$k$ numaralı boru için tanımlanmış minimum hız
$V_{max}$	:	$k$ numaralı boru için tanımlanmış maksimum hız
$y_k$	:	$k$ numaralı borudaki su yüksekliği
$\alpha$	:	Maksimum doluluk oranı
$S_k$	:	$k$ numaralı borunun eğimi
$S_{min}$	:	Minimum taban eğimi
$E_k^u$	:	$k$ numaralı borunun başlangıç noktası üzerindeki dolgu kalınlığı
$E_k^d$	:	$k$ numaralı borunun bitiş noktası üzerindeki dolgu kalınlığı
$E_{min}$	:	Minimum dolgu kalınlığı
$E_{max}$	:	Maksimum dolgu kalınlığı
$p$	:	Popölasyon sayısı
$C_r$	:	Çaprazlama olasılığı
$F$	:	Ölçek katsayısı

## KISALTMA LİSTESİ

- DE** : Diferansiyel Evrim Algoritması  
**DP** : Doğrusal Programlama  
**GA** : Genetik Algoritma  
**KKO** : Karınca Kolonisi Algoritması  
**PSO** : Parçacık Sürü Optimizasyonu  
**TB** : Tavlama Benzetimi Optimizasyonu  
**TA** : Tabu Arama Optimizasyonu

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca başarılarımı örnek aldığım, tez çalışmamın bütün aşamalarında büyük emek harcayan, ilgi, destek ve yönlendirmelerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bu süreçte göstermiş olduğu sabır ve hoşgörüden dolayı tez danışmanım Prof. Dr. Mustafa Tamer Ayvaz'a, Araş. Gör. Derya Sadak'a,

Tez jürimde yer alan Prof. Dr. Gürhan Gürarlan ve Dr. Öğr. Üyesi Recep Kaya Göktaş'a,

Her zaman yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Amaç ve Kapsam

Kanalizasyon sistemlerinin halk sağlığı ve çevre üzerine diğer kentsel altyapı sistemlerine göre daha belirgin etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle yerel yönetimler tarafından sadece kent merkezlerinde değil aynı zamanda küçük yerleşim alanlarında da kanalizasyon sistemleri inşaa edilmeye başlanmıştır. 08.01.2006 tarihinde yayımlanan Kentsel Atıksu Yönetmeliği (2006)'nde yerleşim yerlerindeki atıksuların toplanması, arıtılması ve alıcı ortama deşarj edilmesi gibi hususlar kapsamlı olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda evsel veya endüstriyel atıksuların toplanarak mesken mahalden uzaklaştırılması ve yönetmeliklerde belirtilen çevresel kalite standartları sağlanacak şekilde arıtılarak alıcı ortama deşarj edilmesi gerekmektedir. Bu sürecin en başında kentsel ve endüstriyel atıksuların toplandığı kanalizasyon sistemleri gelmektedir. Bu kapsamda herhangi bir yerleşim yeri için kanalizasyon sistemlerinin projelendirilmesi ve inşaa edilmesi günümüzde etkinliğini koruyan önemli mühendislik hizmetlerinden biri olarak görölmektedir.

Kentsel kanalizasyon sistemlerinin inşaa edilebilmesi için kamu kurum ve kuruluşları tarafından önemli bir bütçenin ayrılması gerekmektedir. Öyle ki, tasarım aşamasında sistem maliyetinde meydana gelecek ufak bir düşüş ekonomik anlamda büyük tasarruflara karşılık gelebilmektedir. Bu nedenle kanalizasyon sistemlerinin verilen hidrolik ve işletme kısıtlarına bağlı olarak minimum maliyetli tasarımı özellikle son yıllarda geçerliliğini koruyan önemli mühendislik problemlerinden biri olarak görölmektedir. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken hususlardan biri tasarım aşamasında belirtilen koşulların sağlanacağı pek çok çözüm alternatifinin bulunmasıdır. İlgili alternatifler arasından en uygun olanının seçilmesi ise kolay bir süreç değildir. Bu sebeple matematiksel bir yaklaşımın takip edilmesi gerek zaman gerekse hesaplama aşamasında büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu kapsamda ilgili problemin bir optimizasyon modeli kullanılarak çözümü son yıllarda yaygın olarak tercih edilmektedir.

Kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarım problemlerinin çözülebilmesi için öncelikle sistemin kurulacağı yerleşim yerine ait imar planı ve arazi topoğrafyası incelenerek sistemin geçeceği güzergâh ile akış yönlerinin belirlenmesi ve bu kapsamda hidrolik tasarımın yapılması gerekmektedir. Belirlenen kriterler doğrultusunda hidrolik modelin kurulmasının ardından kullanılacak optimizasyon modeli entegre edilerek farklı karar değişkeni değerleri için sistemin hidrolik açıdan verdiği tepki belirlenebilmektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri optimizasyon modeli kapsamında karar değişkeni olarak kullanılacak ve sistem yatırım maliyetini etkileyen faktörlerin doğru bir şekilde belirlenmesidir. Bu kapsamda sistem maliyetini etkileyen ana faktörler boru çapları ve eğimleridir. Literatürde boru çap ve eğim değerlerinin karar değişkeni olarak seçilmesinde 3 durumla karşılaşılmaktadır (Afshar 2012).

- i) Karar değişkeni olarak boru çaplarının kullanılması,
- ii) Karar değişkeni olarak boru eğimlerinin kullanılması,
- iii) Karar değişkeni olarak hem boru çaplarının hem de boru eğimlerinin kullanılması.

Birinci durumun seçilmesi halinde her bir borunun çapı optimizasyon modeli tarafından belirlenmektedir. Bu durumda boru eğimleri mevcut debi ve enkesit bilgilerinin Manning denkleminde kullanılması ile dolaylı olarak belirlenebilmektedir. İkinci durumda ise karar değişkeni olarak boru eğimleri kullanılmakta ve boru çapları yine Manning denklemi yardımıyla belirlenebilmektedir. Bu aşamada piyasada bulunan boru çapları ile tasarım yapılması gerektiğinden problemin çözümü boru eğimleri bakımından sürekli, boru çapları bakımından ise kesikli olmaktadır. Üçüncü durumda ise hem boru çapları hem de boru eğimleri optimizasyon modelinde karar değişkenleri olarak kullanılmakta olup en genel çözüm bu durum için elde edilmektedir. Ancak karar değişkeni sayısının artması ile matematiksel çözüm uzayının büyümesi çözüme ulaşmayı güçleştirmektedir (Afshar 2012).

Bu noktada dikkat edilmesi gereken diğer bir önemli husus ise her üç durum için belirlenen değişken değerleri için boru çap ve eğimlerinin birbiri ile sıkı bir etkileşim halinde olduğudur. Örnek olarak boru eğiminin artırılması aynı debinin daha küçük çaplı bir boru ile iletilmesine imkan sağlarken kazı maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Boru eğimlerinin azaltılması durumunda ise tam tersi olarak daha büyük

çaplı ve dolayısıyla daha maliyetli boruların kullanılması gerekmektedir. Bu kapsamda ilgili değişkenler arasındaki en uygun dengenin (trade-off) optimizasyon modelleri kullanılarak belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Yukarıda verilen 3 farklı durum için literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde ilgili problemin çözümünün hem doğrusal (Elimam ve diğ. 1989; Swamee ve Sharma 2013); hem de doğrusal olmayan programlamaya dayanan optimizasyon yaklaşımları kullanılarak yapılmış olduğu görülmektedir (Price 1978; Swamee 2001). Ancak genel anlamda kanalizasyon sistemlerindeki boruların seri bağlı yapıları sebebiyle ilgili optimizasyon probleminin çözümünde dinamik programlamaya dayanan çözüm yaklaşımları yaygın olarak kullanılmıştır (Mays ve Wenzel 1976; Li ve Matthew 1990). Bu yaklaşımların genel olarak kanalizasyon sistemleri gibi seri bağlı sistemlere kolayca uygulanabilir olmasına karşın sürekli ve ayrık yapıdaki karar değişkenlerinin aynı anda bulunduğu problemlerin çözümünün zor oluşu, hidrolik kısıtlarının sağlanmasındaki güçlük ve lokal optimum çözümlere yakalanma riskinin yüksek oluşu gibi nedenlerle her durumda optimum olarak çözülemeyebilmektedir (Yeh ve Chu 2011). Bu nedenle sezgisel optimizasyon tekniklerinin kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımında kullanımı yaygınlık kazanmıştır. Sezgisel optimizasyon teknikleri genel olarak doğada karşılaşılan süreçlerin matematiksel benzeşiminin optimizasyon problemlerinin çözümüne uyarlanmasını esas almaktadır. Geleneksel optimizasyon teknikleri ile karşılaştırıldıklarında sezgisel optimizasyon tekniklerinin en büyük avantajı birden çok aday çözüm ile özel bir başlangıç çözümüne gerek duyulmadan global optimum veya global optimuma yakın çözümlerin elde edilebilmesidir. Bu yöntemler ile ayrıca matematiksel çözüm uzayının sürekli ve içbükey-dışbükey olmaması durumlarında da optimum çözüme ulaşabilmektedir (Ayvaz 2010).

Literatürde kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarım probleminin çözümünde sezgisel optimizasyon tekniklerinin kullanıldığı farklı çözüm yaklaşımları bulunmaktadır. Bu çözüm yaklaşımları çözülen problemler bakımından farklılıklar gösterse de genel olarak aralarındaki temel fark, kullanılan optimizasyon tekniklerinin çeşitliliğinden kaynaklanmaktadır. İlgili problemin çözümünde literatürde yaygın olarak Afshar (2012), Afshar (2006), Çetin (2014) genetik algoritma (GA); Afshar (2008), Navin ve Mathur (2016) parçacık sürü optimizasyon tekniği (PSO); Afshar



(2006), Moeini ve Afshar (2016) karınca kolonisi optimizasyonu (KKO); Yeh ve Chu (2011), Karovic ve Mays (2014), Kumar ve diğ. (2018) tavlama benzetimi (TB); Yeh ve Chu (2011), Liang ve diğ. (2004), Haghghi ve Bakhshipour (2014) tabu arama (TA) gibi optimizasyon teknikleri kullanılmış olsa da diferansiyel evrim (DE) optimizasyon tekniğinin kullanıldığı çalışma sayısı oldukça kısıtlıdır. DE optimizasyon tekniği ile kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımı ile ilgili literatürde ulaşılabilen tek çalışma Liu ve diğ. (2014) tarafından gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışma kapsamında kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımı amacıyla yeni bir DE yaklaşımı önerilmiş ve karar değişkeni olarak kesikli yapıdaki boru çapları kullanılarak iki örnek uygulama çözülmüştür.

Bu çalışma kapsamında ise Liu ve diğ. (2014)'de yapılandırılarak farklı olarak ilgili problemin DE ile çözümü aşamasında karar değişkeni olarak boru eğimleri kullanılmış ve belirlenen eğim değerleri için uygun boru çapları, tanımlanan boru çapı kümesi içerisinde seçilmiştir. Bu sayede ilgili optimizasyon problemi sürekli bir çözüm uzayı üzerinde çözülmüştür. Çözüm aşamasında gerekli hidrolik ve işletme kısıtlarının tümü ceza fonksiyonu yaklaşımı ile amaç fonksiyonuna dahil edilmiştir. Geliştirilen çözüm yaklaşımının performansı literatürde verilen iki örnek sistem üzerinde farklı çözüm parametreleri ve rastgele sayı üreteçleri kullanılarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar DE tabanlı çözüm yaklaşımı ile literatürde farklı yaklaşımlar kullanılarak belirlenenlerle uyumlu sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir.

## **1.2 Literatür Araştırması**

Kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımı problemi oldukça fazla uygulaması olan önemli bir optimizasyon problemi olup literatürde bu kapsamda gerçekleştirilmiş pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar genel olarak problemin çözümü aşamasında kullanılan çözüm yaklaşımları bakımından çeşitlilik göstermektedir. Yukarıda belirtildiği gibi, ilgili problemin çözümünde deterministik ve sezgisel optimizasyon tekniklerinin kullanıldığı pek çok çözüm yaklaşımı geliştirilmiş olup bu bölüm kapsamında bahsi geçen yaklaşımlarla alakalı bir literatür taraması verilmiştir.

Mays ve Wenzel (1976) kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımı problemini diferansiyel dinamik programlamaya dayanan bir çözüm yaklaşımı ile çözmüşlerdir. Bu kapsamda seri ve seri olmayan olmak üzere iki çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Seri olmayan yaklaşımda, kanalizasyon sistemini oluşturan herhangi bir dal sistemi üzerinde bir boru parçası ve menhol dikkate alınırken, seri yaklaşımda sistem içerisinde menholleri birbirine bağlayan tüm boru parçaları dikkate alınmıştır. Geliştirilen seri ve seri olmayan çözüm yaklaşımlarının her ikisi birden ilgili problemin çözümüne uyarlanmış ve elde edilen sonuçlar kapsamlı olarak karşılaştırılmıştır.

Robinson ve Labadie (1981) kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımı yapabilmek için dinamik programlama optimizasyon tekniğine dayanan bir çözüm yaklaşımı geliştirmişlerdir. Benzer şekilde Kulkarni ve Khanna (1985) tarafından yerçekimli veya pompajlı atık su toplama sistemlerinin minimum maliyetli optimum tasarımı için dinamik programlama tabanlı bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşım kanalizasyon sistemlerinin tasarımı aşamasında boru çapı ve kazı derinliklerinin sistem maliyeti üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Miles ve Heaney (1988) atık su sistemlerinin minimum maliyetli tasarım probleminin elektronik tablolama programları ile çözülebildiği bir çözüm yaklaşımı geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu yaklaşım ile hidrolik hesaplar basit bir şekilde yapılabilmekte ve elde edilen sonuçlar doğrudan tablolar halinde sunulabilmektedir. Ayrıca boru çap ve eğim değerlerine bağlı olarak değişen hız, boru üst derinliği ve tasarım debisi gibi kısıtlar kontrol edilebilmektedir.

Swamee ve Sharma (2013) kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarım probleminin doğrusal programlama ile çözülebildiği bir çözüm yaklaşımı geliştirmişlerdir. Bu yaklaşım ile boru çapları ve kazı derinlikleri belirlenebilmekte ve normal şartlar altında doğrusal olmayan nitelikte bir problemin doğrusal olarak ifade edilmesi mümkün olabilmektedir.

Liang ve diğ. (2004) cazibe ile çalışan kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımı probleminin çözümünü sezgisel genetik algoritma ve tabu arama optimizasyon teknikleri ile yapabilen bir çözüm yaklaşımı geliştirmişlerdir. Benzer şekilde Afshar (2006), Afshar(2012), Çetin (2014) kanalizasyon-yağmursuyu

sistemlerinin optimum tasarımı probleminin genetik algoritma optimizasyon tekniği ile çözülebildiği bir yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşım ilgili problemin çözümlü aşamasında sağlanması gereken kısıtları ceza fonksiyonu yaklaşımı ile dikkate almaktadır.

Weng ve Liaw (2006) kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarım probleminde tamsayılı doğrusal olmayan programlama optimizasyon tekniğinin kullanıldığı bir çözüm yaklaşımı geliştirmişlerdir. İlgili çalışmada karar değişkeni olarak dikkate alınan boru çapları piyasada yer alan çaplar arasından seçilmiş ve bu ayrık çap değerleri optimize edilerek sistem maliyeti minimize edilmeye çalışılmıştır.

Afshar (2006), Afshar (2007) ve Moeini ve Afshar (2012) kapsamında optimum kanalizasyon sistem tasarım probleminin çözümlü sezgisel karınca kolonisi optimizasyon tekniği kullanılarak yapılmıştır. Bahsi geçen çalışmalar kapsamında problemin çözümlü aşamasında dikkate alınması gereken yönetimsel ve hidrolik kısıtların sağlanması amacıyla ceza fonksiyonu yaklaşımı kullanılmıştır. Bu sayede negatif eğim veya maksimum doluluk oranı gibi koşullar sağlanabilmiştir.

Pan ve Kao (2009) optimum kanalizasyon sistem tasarım probleminin çözümlü amacıyla genetik algoritma ve kuadratik programlama optimizasyon tekniklerinin entegre bir şekilde kullanıldığı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Önerilen bu yaklaşım kapsamında boru çapları ile pompa istasyonlarının yerleri karar değişkeni olarak seçilerek sistem maliyeti minimize edilmiştir.

Yeh ve diğ. (2011) kanalizasyon sistem tasarım probleminin çözümlü tabu arama ve tavlama benzetimi optimizasyon tekniklerini kullanarak yapmışlar ve her iki yöntem için elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre tavlama benzetimi optimizasyon tekniğinin tabu aramaya göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Benzer şekilde Karovic ve Mays (2014) ile Kumar ve diğ. (2018) kapsamında da ilgili problemin çözümlü tavlama benzetimi optimizasyon tekniği kullanılarak yapılmıştır.

Afshar ve diğ. (2011) kanalizasyon sistemleri için boru çapları ile kazı derinliklerinin belirlenmesi probleminin çözümlü hücrel otomat yaklaşımını kullanarak yapmışlardır. Kullanılan bu yaklaşımda kanalizasyon sisteminin düğüm

noktalarını temsil eden menholler hücresele otomatların temel birimi olan hücreler olarak kabul edilmiştir. Her bir hücre komşuluk ilişkisine bağlı olarak çevresindeki hücrelerin değerleri ile kendini güncelleştirerek problemin çözümünü iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Benzer şekilde Afshar ve Rohani (2012) ilgili problemin hidrolik tasarım optimizasyonunda hücresele otomat tabanlı hibrit bir çözüm yaklaşımı kullanmışlardır. Kullanılan bu yaklaşımda da karar değişkeni olarak boru çapları ile üst derinlik değerleri kullanılmıştır. Afshar ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada ise kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımı probleminin çözümünde hücresele otomat yaklaşımının performansı, geliştirilmiş olan uyarlanabilir iyileştirme yöntemi ile artırılmıştır.

Afshar (2008) ile Navin ve Mathur (2016) tarafından yapılan çalışmalarda ise kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımı problemi sezgisel parçacık sürü optimizasyon tekniği kullanılarak çözülmüştür. Geliştirilen yaklaşımların performansı ise optimizasyon aşamasında dikkate alınan bazı modifikasyonlarla iyileştirilmiştir.

Liu ve diğ., (2014) tarafından kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarım probleminin sezgisel diferansiyel evrim algoritması ile çözüldüğü bir yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yaklaşım kapsamında en uygun maliyetli kanalizasyon sistem tasarımı, hız, eğim, doluluk oranı gibi hidrolik kısıtlar sağlanacak şekilde belirlenmiştir. İlgili çalışma kapsamında geliştirilen yaklaşımın performansı iki örnek şebeke üzerinde test edilmiş ve elde edilen sonuçlar daha önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

### **1.3 Tezin Amacı**

Bu çalışmanın amacı kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımının yapılabildiği DE optimizasyon tekniğine dayanan bir çözüm yaklaşımı geliştirmektir. Geliştirilen bu yaklaşım optimizasyon modelinde karar değişkeni olarak Afshar (2012)'de belirtildiği gibi boru eğimleri kullanılmaktadır. Belirlenen eğim değerlerine bağlı olarak boru çapları, hidrolik ve işletme kısıtlarını sağlanacak şekilde pratikte kullanılan boru çaplarının bulunduğu bir küme içerisinde seçilmektedir. Bu çalışma kapsamında dikkate alınan diğer bir amaç ise DE optimizasyon tekniğinin kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımı probleminin çözümündeki performansını

farklı başlangıç değerleri ve çözümler parametreleri için test etmektir. Bu amaçla ilgili problemin mevcut çözümleri ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

#### **1.4 Tezin Organizasyonu**

Bu tez çalışması beş farklı bölümden oluşmaktadır. Yukarıda bahsedilenlerden de görüleceği gibi, birinci bölümde konunun önemi vurgulanmış ve literatürde yapılmış olan çalışmalar değerlendirilmiştir. İkinci bölümde kanalizasyon sistemlerinin tasarım esasları İller Bankası (2011)'de belirtilen hususlar dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Üçüncü bölümde kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımı problemine ait amaç fonksiyonu ve hidrolik ve işletme kısıtları hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında kullanılmış olan diferansiyel evrim (DE) optimizasyon tekniği hakkında bilgi verilmiş ve ilgili problemin DE ile nasıl entegre edildiğinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde geliştirilen optimizasyon modelinin iki örnek şebeke üzerinde uygulaması yapılmış ve literatürde farklı çözümler yaklaşımları kullanılarak elde edilmiş sonuçlarla karşılaştırması yapılmıştır. Son olarak beşinci bölümde elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

## 2. KANALİZASYON SİSTEMLERİ TASARIM ESASLARI

### 2.1 Giriş

Kanalizasyon sistemleri, yerleşim yerlerinde atık suyun toplanması ve çevreye zarar vermeden uzaklaştırılması amacıyla kullanılmaktadır. Bu sistemlerin tasarımı ülkelerin sahip olduğu yönetmelikler çerçevesinde gerçekleştirilmektedir. Ülkemizde ise kanalizasyon sistem tasarımı ve projelendirme aşamasında İller Bankası Atık Su Yönetmeliği (2011)'nde yer alan etüt, projelendirme çalışmaları ve projelendirme aşamaları dikkate alınmaktadır. İlgili yönetmelikte dikkate alınan konu başlıklarına aşağıda değinilmiştir.

İller Bankası Atık Su Yönetmeliği (2011)'nde belirtilen etüt çalışma kapsamındaki konu başlıkları:

- Harita ve imar planı durumu
- Nüfus
- Mevcut atık su tesislerinin durumu
- Mevcut içme ve kullanma suyu durumu
- Kirlilik kaynakları ve seviyesi
- Alıcı ortam özellikleri
- Demografik yapı
- Ekonomik, sosyal ve turistik yapı
- Arz ve talep tahminleri
- Tesisin büyüklüğü ve kapasitenin belirlenmesi
- Yerel yönetimin teknik ve mali kapasitesi

İller Bankası (2011) Atık Su Yönetmeliği'nde belirtilen kanalizasyon sistem projelendirme çalışmaları kapsamındaki konu başlıkları:

- Nüfus ve ihtiyaç hesapları
- Arazi çalışmaları
- Zemin çalışmaları
- Hidrolik çözümler

- Mimari ve statik çözümler
- Mekanik ve elektrik projeler
- Malzeme cins ve boyutlarının belirlenmesi
- Detay projeler
- Maliyet tahminleri
- Arıtma tesisi yerine ilişkin çalışmaları

İller Bankası (2011) projelendirme aşamaları kapsamında dikkat edilmesi gereken genel konu başlıkları:

- Projenin ilk etabında, 35 yıl sonraki nüfus ve debi tahminleri bulunmaktadır. İmar planına göre taslak planlar hazırlanarak sistem kurulur.
- Daha sonraki etapta, açık olan ve yerleşimin mevcut olduğu sokaklar 1. kademe, mevcut durumda açık olmayan ve yerleşim oluşmamış sokaklar 2. kademe olarak planlanır.
- 1. kademe olarak planlanan tüm sokaklarda arazi çalışmaları yapılarak zemin kotları okunur.
- 2. kademe olarak planlanan hatlar ise haritadan yararlanılarak elde edilen kotlar ile projelendirilir.
- Zemin kotları belirlendikten sonra proje çözülerek çaplar ve derinlikler belirlenir.
- Ayrıca proje sahasında belirlenen noktalarda araştırma çukurları açılarak veya sondaj işlemi gerçekleştirilerek zeminin durumu belirlenir.
- Proje inşaatına teşkil edecek metraj ve keşifler de projeler kapsamında yapılır.
- Tüm bu girdiler sonucunda her türlü detay proje ve inşaatın yapımıyla ilgili hususlar belirlenerek proje son şeklini alır.

Kanalizasyon sistemleri, birleşik ve ayırık sistem olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Birleşik sistemde, evsel veya endüstriyel atık suları ile yağmur suları aynı kanalda toplanarak uzaklaştırılırken ayırık sistemde evsel atık su ve yağmur suları ayrı kanallarda toplanarak uzaklaştırılmakta ve arıtma tesisine iletilmektedir (İller

Bankası, 2017). Günümüzde kentsel atık su tasarımında genellikle ayırık sistemli kanalizasyon çalışmaları yapılmaktadır.

## **2.2 Hidrolik Tasarım**

Kanalizasyon sistemlerinin hidrolik tasarım aşamasına geçilmeden önce borulardaki akış yönlerinin, sistemin planlandığı yerin yerleşim planı, yol durumu, zemin kotları vb. etkiler dikkate alınarak belirlenmesi gerekmektedir. Akış yönlerinin belirlenmesinin ardından hidrolik tasarım aşamasına geçilmektedir. Hidrolik tasarım aşamasında sistemi etkileyen çok fazla etken bulunmaktadır. Bu etkenler sırasıyla; boru çapı, kazı derinliği, menhol (baca) derinliği, boru eğimi, akış hızları, doluluk oranları ve debi olup bunların tamamının problemin çözümü aşamasında değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu aşamada dikkate alınması gereken bazı yönetimsel ve hidrolik kısıtlar bulunmaktadır. Örnek olarak borular içindeki akış hızının yönetmeliklerde belirtilen minimum değerden düşük, maksimum değerden yüksek olmaması verilebilir. Bu kapsamda hidrolik tasarım aşamasında dikkate alınması gereken etkenlerle alakalı detaylı bilgi ve bunların sağlanması gereken koşullar aşağıda kapsamlı olarak sunulmuştur:

### **2.2.1 Debi**

Kanalizasyon sistemlerinde, yerleşim yerlerinin kısa, orta ve uzun süreli nüfus projeksiyonları dikkate alınarak hidrolik kapasitenin belirlenmesi gerekmektedir. Toplam atık su debisinin hesaplanmasında, tahmin edilen proje nüfusu, ortalama atık su debisi ve kişi başı ortalama birim su tüketimi dikkate alınmaktadır. Kanalizasyon sistemine giren debinin belirlenmesinin ardından menhol giriş ve çıkış debileri dikkate alınarak sisteme yan kollardan bağlanan servis hatlarındaki debilerin belirlenmesi ve bu debilerin ana hatlara aktarılması gerekmektedir. Bununla birlikte akışın projelendirme aşamasında, yerleşim yerinin mevcut olduğu bölgelerde 1. kademe ve imar planında mevcut ancak yerleşim oluşmamış bölgelerde 2. kademe olarak belirlenen kanalizasyon hatlarının bir bütün olarak değerlendirilmesi önem arz etmektedir.



### **2.2.2 Hız**

Kanalizasyon sistemlerinde boru içerisindeki minimum ve maksimum hız kontrolleri, tasarım aşamasında dikkate alınan iki önemli hidrolik parametredir. Minimum hız kontrolü, kanalizasyon sistemi ve menhol içerisinde katı madde birikimini engellerken maksimum hız kontrolü, kanalizasyon sisteminde boru parçalarının aşırı zarar görmesini önlemektedir. İller Bankası (2017) yönetmeliğinde kanalizasyon sistemindeki hızın 0.5 m/s'nin altına düşmemesi ve 3.5 m/s'yi geçmemesi gerektiği belirtilmektedir.

### **2.2.3 Doluluk Oranı**

Atık su kanallarında, yönetmeliklerde belirtildiği gibi, minimum ve maksimum doluluk oranına göre tasarım yapılmaktadır. Kanallarda kısmi akışı sağlamaya yönelik çalışmaların yapılma sebepleri arasında; kullanılmış suların zamanla ayrışarak metan ve hidrojen sülfür gibi gazları oluşturması, kanalın kimyasal yapısından dolayı kanal kapasitesinin zamanla azalması, gelecekte su kullanımının öngörülen değerden fazla olması ve yer altı suyundan kanala sızmaların olabileceği gibi durumlar yer almaktadır.

### **2.2.4 Eğim**

Kanalizasyon sistemlerinde akış hızları ve kazı derinliği büyük ölçekte eğime bağlı olarak değişmektedir. Örnek olarak boru eğiminin artırılması aynı debinin daha küçük çaplı bir boru ile iletilmesine imkân sağlarken kazı maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Boru eğimlerinin azaltılması durumunda ise tam tersi olarak daha büyük çaplı ve dolayısıyla daha maliyetli boruların kullanılması gerekmektedir. Ayrıca sistemde minimum eğim kontrolü yapılması da oldukça önemli bir husustur. Minimum eğim kontrolü ile minimum hız parametresinin altında bir eğim değerinin belirlenmemesini sağlamaktadır.

### 2.2.5 Boru Üst Dolgu Kalınlığı ve Kanal Derinliği

Kanalizasyon sistemini oluşturan kanallarda boru üst derinlik kontrolü, kanalizasyon hattı ile içme suyu şebekesi arasında yükseklik farkını oluşturmamak, sistem üzerindeki araç yüklerinin hatta zarar vermesini önlemek ve don derinliğinin altına inmek amacıyla yapılmaktadır. Kanalizasyon sisteminde kanal derinlikleri, cadde genişliklerine ve bodrum katların atık su kanalına doğrudan bağlanıp bağlanmamasına göre belirlenmektedir. Atık su kanallarında minimum toprak örtü kalınlığı 2.70 m olup bölgede bodrum katlarından atık su şebekesine doğrudan bağlantı yapılmaması halinde bu değer daha küçük alınabilmektedir.

### 2.3 Hesap Yöntemleri

Kanalizasyon sisteminin tasarımı, serbest yüzeyli akım koşullarını sağlayacak şekilde yapılmaktadır. Tasarım aşamasında dikkate alınan denklemler aşağıda verilmiştir (Çetin, 2014).

$$\text{Manning} \quad V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \quad (2.1)$$

$$\text{Kutter} \quad V = \frac{100R\sqrt{J}}{m + \sqrt{R}} \quad (2.2)$$

$$\text{Colebrook-White} \quad V = -2\sqrt{2gDJ} \log_{10} \left( \frac{k}{3.71D} + \frac{2.51\nu}{D\sqrt{2gDJ}} \right) \quad (2.3)$$

$$\text{Hazen-Williams} \quad V = 0.849 C_{hw} R^{0.63} J^{0.54} \quad (2.4)$$

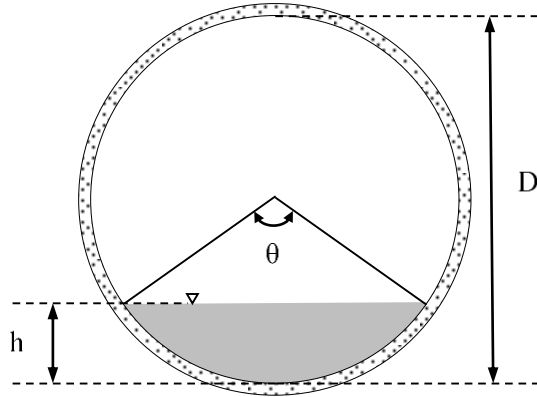
$$\text{Darcy-Weisbach} \quad V = \sqrt{\frac{8gJ}{f}} \quad , \quad f = 1.325 \left[ \ln \frac{\varepsilon}{12R} + \frac{0.625\nu}{VR\sqrt{f}} \right]^{-2} \quad (2.5)$$

Burada  $V$ , akış kesitindeki hızı;  $n$ , Manning yüzey pürüzlülük katsayısını;  $R$ , hidrolik yarıçapı;  $J$ , eğimi;  $m$ , Kutter katsayısını;  $D$ , boru çapını;  $k$  ve  $\varepsilon$ , boru yüzey pürüzlülüğünü;  $g$ , yerçekimi ivmesini;  $\nu$ , kinematik viskoziteyi;  $C_{hw}$ , Hazen-Williams yük kayıp katsayısını;  $f$ , Darcy-Weisbach yük kayıp katsayısını ifade etmektedir. Yukarıdaki denklemlerin her biri serbest yüzeyli kanalların hidrolik tasarımında kullanılabilirle birlikte İller Bankası (2017) yönetmeliğinde dairesel

kesitli veya dairesel kesitli olmayan atık su kanallarının hidrolik tasarımında Colebrook-White, Manning veya Kutter denklemleri ile hesaplandığı belirtilmektedir.

#### 2.4 Kısmi Dolu Kanallarda Akım

Kanalizasyon sistemlerinin işletme ömrü boyunca sağlıklı bir şekilde çalışabilmesinde, hıza bağlı olan doluluk oranının, eğimin ve boru çapının önemli etkisi vardır. Şekil 2.1’de dairesel kesitli kanallarda kısmi dolu akış özellikleri verilmiştir. Şekil 2.1’den görüleceği gibi  $h$ , kanal içerisindeki su derinliğini;  $D$ , boru çapını;  $\theta$ , su kesitinin dairesel kesit merkezinde oluşturduğu açiyı ifade etmektedir. Doluluk oranı ise  $h/D$  oranı ile temsil edilmekte olup doluluk oranının 0.1’in üzerinde olmasının kanal içerisinde tıkanma olasılığını düşürdüğü belirtilmektedir (Samsunlu, 2012).



**Şekil 2.1:** Dairesel kesitli kanallarda kısmi dolu akış özellikleri (İller Bankası, 2017)

Dairesel kesitli atık su kanallarında doluluk oranıyla ilgili hidrolik hesaplarda aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır.

$$Q = V \cdot A \quad (2.6)$$

$$R_d = \frac{D}{4} \quad (2.7)$$

$$\frac{Q}{Q_d} = \frac{1}{2\pi} \frac{(\theta - \sin \theta)^{5/3}}{\theta^{2/3}} \quad (2.8)$$

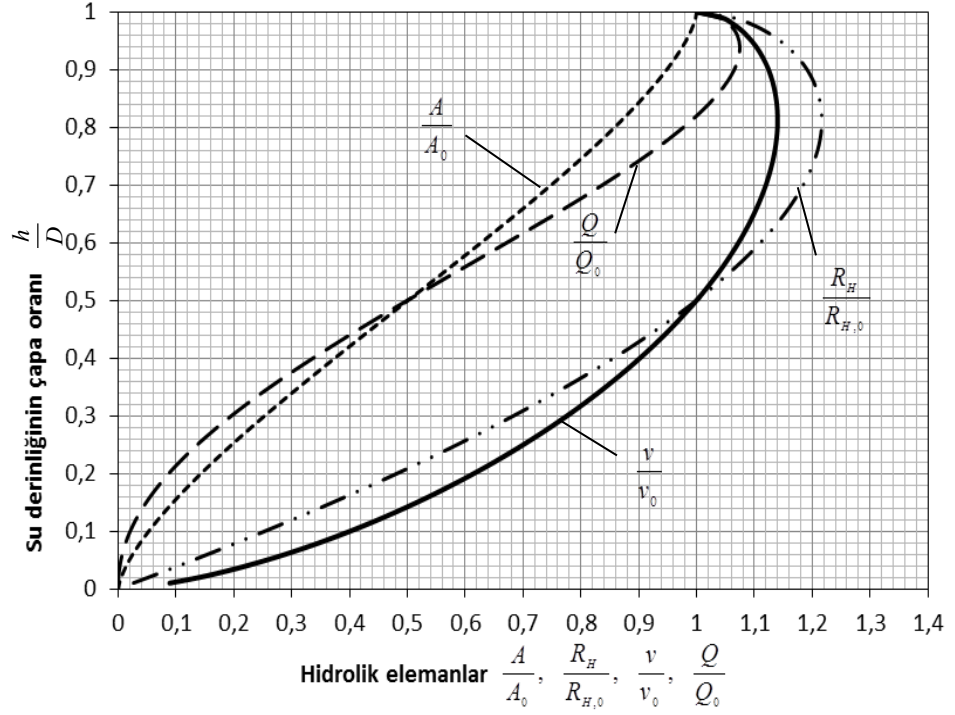
$$\frac{V}{V_d} = \left( \frac{\theta - \sin \theta}{\theta} \right)^{2/3} \quad (2.9)$$

$$\frac{R}{R_d} = \frac{\theta}{\theta - \sin \theta} \quad (2.10)$$

$$\frac{A}{A_d} = \frac{1}{2\pi} (\theta - \sin \theta) \quad (2.11)$$

$$\frac{h}{D} = \frac{1}{2} \left( 1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.12)$$

Burada  $\theta$  , su kesitinin dairesel kesit merkezinde oluşturduğu açığı;  $Q$  , kanaldaki debiyi;  $Q_d$ , tam dolu akıştaki debiyi;  $V$ , kanaldaki akış hızını;  $V_d$ , tam dolu akışta akış hızını;  $R$ , mevcut akış durumunda kanalın hidrolik yarıçapını;  $R_d$ , tam dolu akışta kanalın hidrolik yarıçapını;  $A$ , mevcut akış durumunda ıslak alanı;  $A_d$  ise tam dolu akıştaki ıslak alanı (kanal kesit alanı) ifade etmektedir. Bu ifadelerden yararlanılarak hidrolik hesaplarda kanalda ilk olarak bir boru çapı seçilmekte ve kanalda tam dolu akış varsayımı yapılmaktadır. Kanal tam dolu iken Manning formülü yardımıyla  $V_d$  ve  $Q_d$  hesaplanmaktadır. Hesaplanan  $Q_d$  değeri ile kanaldaki debi kullanılarak  $Q/Q_d$  değeri elde edilmekte ve Şekil 2.2'deki abak yardımıyla  $V/V_d$  ve  $h/D$  ifadeleri hesaplanmaktadır. Elde edilen  $V/V_d$  değeri ile hesaplanan  $V_d$  değeri çarpılarak kanal içerisindeki akış hızı hesaplanmaktadır. Elde edilen bu değerlere göre başlangıçta seçilen boru çapı değeri için çap kontrolü yapılmakta ve boru çapının uygun olmadığı durumlarda bir üst çap seçimi yapılarak işlem adımları tekrarlanmaktadır (Çetin, 2014).



**Şekil 2.2:** Dairesel kesitli kanallarda hidrolik elemanlar (İller Bankası, 2017)

## 2.5 Sistem Maliyetinin Belirlenmesi

Kanalizasyon sistemlerinde cazibeli akış koşullarında boru maliyetine kazı maliyeti ve menhol maliyeti etki ederken pompa istasyonlarının bulunduğu sistemlerde pompa maliyeti toplam maliyete ilave edilmektedir. Bu kapsamda toplam sistem maliyeti aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\boxed{\text{Toplam Sistem Maliyeti}} = \boxed{\text{Boru Maliyeti}} + \boxed{\text{Kazı Maliyeti}} + \boxed{\text{Menhol Maliyeti}} + \boxed{\text{Pompa Maliyeti}}$$

### 3. MODEL GELİŞTİRİLMESİ

#### 3.1 Giriş

Bu bölümde öncelikle kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarım problemine ait problem formülasyonu verilmiştir. Ardından, sezgisel DE optimizasyon tekniği hakkında kapsamlı bilgi verilmiş ve son olarak ilgili problem formülasyonunun DE ile nasıl entegre edildiği hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

#### 3.2 Kanalizasyon Sistem Optimizasyonu

Kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımı problemi matematiksel olarak bir optimizasyon modeli kullanılarak çözülebilir. Bu problemin çözümü aşamasında dikkate alınan değişken değerlerine bağlı olarak sistem maliyetinin hesaplanması gereklidir. Bu süreç matematiksel olarak amaç fonksiyonu ile ifade edilmekte olup optimizasyon modelinin amacı tanımlanmış olan amaç fonksiyonunun sayısal değerini minimum yapacak şekilde değişken değerlerinin belirlenmesidir. Bu aşamada problem ile alakalı yönetimsel ve fiziksel kısıtlar da dikkate alınmaktadır. Buradan yola çıkarak, bu çalışma kapsamında kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarım problemi ile ilgili olarak aşağıdaki amaç fonksiyonu ve kısıtlar dikkate alınmıştır (Afshar, 2012):

$$\Phi = \min \left\{ \sum_{k=1}^N F(d_k, L_k, Z_k) \right\} \quad (3.1)$$

Kısıtlar:

$$g_{k,1}: q_k \geq Q_k^* \quad (3.2)$$

$$g_{k,2}: V_k \leq V_{max} \quad (3.3)$$

$$g_{k,3}: V_k \geq V_{min} \quad (3.4)$$

$$g_{k,4}: \frac{y_k}{d_k} \leq \alpha \quad (3.5)$$

$$g_{k,5}: S_k \geq S_{min} \quad (3.6)$$

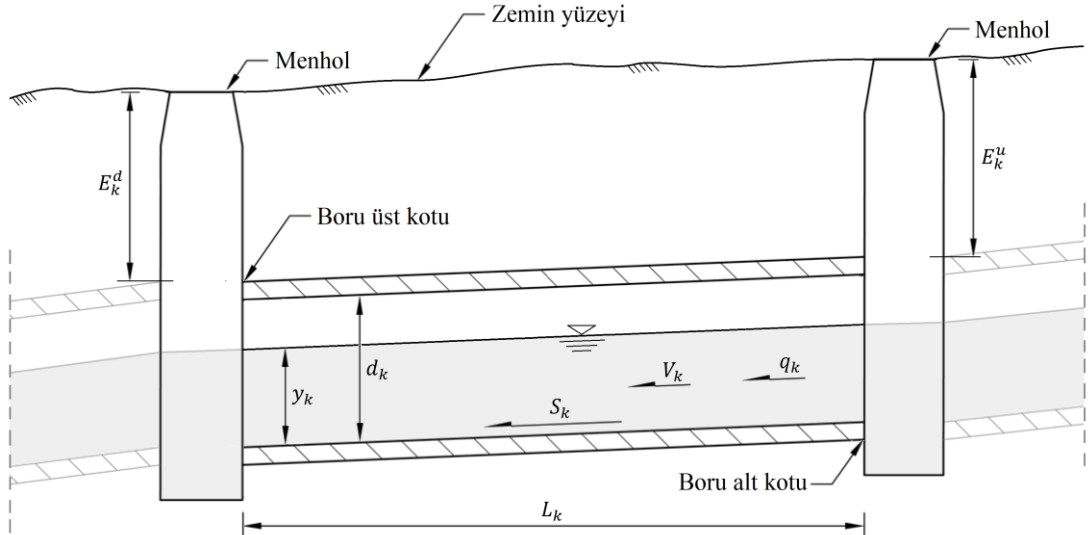
$$g_{k,6}: E_k^u \leq E_{max} \quad (3.7)$$

$$g_{k,7}: E_k^u \geq E_{min} \quad (3.8)$$

$$g_{k,8}: E_k^d \leq E_{max} \quad (3.9)$$

$$g_{k,9}: E_k^d \geq E_{min} \quad (3.10)$$

Burada  $\Phi$ , amaç fonksiyonunu;  $N$ , sistemdeki boru sayısını;  $d_k$ ,  $k$  numaralı borunun çapını;  $L_k$ ,  $k$  numaralı borunun uzunluğunu;  $Z_k$ ,  $k$  numaralı borunun yerleştirilmesi için gerekli ortalama kazı derinliğini;  $F(\bullet)$ , boru çap, uzunluk ve kazı giderlerini dikkate alarak hesaplanan toplam sistem maliyetini;  $q_k$ ,  $k$  numaralı boruda normal derinlik oluşturacak akım debisini;  $Q_k^*$ ,  $k$  numaralı boru için kullanılan tasarım debisini;  $V_k$ ,  $k$  numaralı borudaki akış hızını;  $V_{min}$ ,  $k$  numaralı boru için tanımlanmış minimum hızı;  $V_{max}$ ,  $k$  numaralı boru için tanımlanmış maksimum hızı;  $y_k$ ,  $k$  numaralı borudaki su yüksekliğini;  $\alpha$ , tüm borular için müsaade edilebilir maksimum doluluk oranını;  $S_k$ ,  $k$  numaralı borunun eğimini;  $S_{min}$ , tüm borular için tanımlanan minimum taban eğimini;  $E_k^u$ ,  $k$  numaralı borunun başlangıç noktası üzerindeki dolgu kalınlığını;  $E_k^d$ ,  $k$  numaralı borunun bitiş noktası üzerindeki dolgu kalınlığını;  $E_{min}$  ve  $E_{max}$  ise tüm borular için kabul edilebilir minimum ve maksimum dolgu kalınlıklarını göstermektedir. Belirtilen bu büyüklükler Şekil 3.1’de detaylı olarak gösterilmiştir.



**Şekil 3.1:** Genel akış boykesiti

Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, Denklem (3.1)'de verilen amaç fonksiyonunun DE ile minimizasyonu aşamasında Denklem (3.2) ile (3-10) arasında verilen kısıtların sağlanması gerektiğidir. Bu kısıtlardan  $g_{k,1}$ , borular içerisindeki akım debisinin proje debisine eşit veya büyük olması;  $g_{k,2}$  ve  $g_{k,3}$ , borular içerisindeki akım hızının yönetmeliklerde belirtilen minimum ve maksimum hız şartlarını sağlaması;  $g_{k,4}$ , borular içerisinde serbest yüzeyli akım koşullarını ve yönetmeliklerde belirtilen doluluk oranı şartının sağlanması;  $g_{k,5}$ , borular için minimum eğim koşulunun sağlanması;  $g_{k,6}$  ve  $g_{k,8}$  boru başlangıç ve bitiş noktaları üstündeki dolgu kalınlığının yönetmeliklerde verilen maksimum değerin altında kalmasını;  $g_{k,7}$  ve  $g_{k,9}$  ise boru başlangıç ve bitiş noktaları üstündeki dolgu kalınlığının yönetmeliklerde verilen minimum değerin üzerinde olmasını sağlamak amacıyla tanımlanmıştır. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus da Denklem (3.1) ile (3.10) arasında ifade edilen matematiksel formülasyonun basitleştirilmiş kanalizasyon sistemleri için tanımlanmış olduğudur. Daha genel bir problemin çözümünde tek bir tasarım debisi kullanmak yerine bu debinin zamanla değişimini gösteren hidrografın modele girilmesi ve problemin zamanla değişen akım koşullarında çözülmesi gerekmektedir. Bununla birlikte yerçekimli akış koşullarının sağlanamadığı durumlarda pompa gibi ilave ekipman gerektiren durumların da modelleme aşamasına göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

### 3.3 Diferansiyel Evrim Optimizasyon Tekniği

Bu çalışma kapsamında kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarım probleminin çözümü DE tabanlı bir optimizasyon modeli kullanılarak yapılmıştır. İlk olarak Storn ve Price (1995) tarafından sürekli optimizasyon problemlerini çözmek amacıyla geliştirilmiş olan DE hesap stratejisi bakımından genetik algoritma (GA) ile büyük benzerlik taşıyan evrimsel tabanlı bir optimizasyon tekniğidir. Genel işleyiş ve hesaplama mantığı bakımından GA ile büyük benzerlikler gösterse de DE'nin GA'dan en büyük farkı ilgili problemin ikilik sayı dizileri yerine onluk sayı dizileri ile kodlanarak çözülmesidir. GA'da kullanılan mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörlerinin DE'de de kullanılmasına karşın, GA'dan farklı olarak popülasyondaki tüm bireyler (kromozom) bu operatörler tarafından işlem görmektedir (Keskintürk, 2006). Bu amaçla bireyleri oluşturan kromozomlar içerisinde rastgele üç kromozom



seçimi yapıldıktan sonra mutasyon ve çaprazlama işlemlerini de dahil ederek yeni birey oluşturulmaktadır. Bireyin bir sonraki jenerasyona aktarımı, seçim işlevi ile yapılmakta ve amaç fonksiyonu değeri daha iyi olan birey bir sonraki jenerasyona aktarılmaktadır. Genel olarak DE'nin diğer optimizasyon tekniklerine göre en büyük avantajı kolay programlanabilir ve güçlü bir algoritma olmasıdır. Matematiksel olarak DE aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$p$ , popülasyondaki birey (çözüm vektörü) sayısını;  $n$ , karar değişkeni sayısını;  $G$ , jenerasyon indisini;  $\mathbf{x}_{i,G} = [x_{i,G}^1, x_{i,G}^2, x_{i,G}^3, \dots, x_{i,G}^n]$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, p$ ), optimizasyon modeli tarafından belirlenecek  $n$  boyutlu çözüm vektörünü;  $\mathbf{x}_{\min} = \{x_{\min}^1, x_{\min}^2, x_{\min}^3, \dots, x_{\min}^n\}$  ve  $\mathbf{x}_{\max} = \{x_{\max}^1, x_{\max}^2, x_{\max}^3, \dots, x_{\max}^n\}$  sırasıyla karar değişkenlerinin alt ve üst sınırlarından oluşan çözüm vektörlerini göstermek üzere popülasyon içindeki  $i$  nolu aday çözümüne ait  $j$  nolu karar değişkeninin  $G = 0$  jenerasyonundaki başlangıç değeri, Denklem (3.11)'de verilen eşitliğe bağlı olarak üretilmektedir.

$$x_{i,0}^j = x_{\min}^j + r(0,1) \times (x_{\max}^j - x_{\min}^j) \quad (3.11)$$

Burada  $r(0,1)$  değeri 0 ile 1 arasında değişen üniform dağılıma sahip rastgele sayıyı göstermektedir. Bu aşamadan sonra, DE kapsamındaki mutasyon operatörü kullanılarak yeni bir mutant vektörü  $\mathbf{v}_{i,G} = [v_{i,G}^1, v_{i,G}^2, v_{i,G}^3, \dots, v_{i,G}^n]$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, p$ ) oluşturulmaktadır. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri mutant vektörü oluşturma aşamasında literatürde önerilmiş olan farklı mutasyon stratejilerinin olduğudur. Bu stratejilerden “DE/rand/1” stratejisine göre mutant vektör  $\mathbf{v}_{i,G}$  Denklem (3.12)'de verilen eşitliğe bağlı olarak üretilmektedir (Storn 1996).

$$v_{i,G} = x_{r_1^i,G} + F(x_{r_2^i,G} - x_{r_3^i,G}) \quad (3.12)$$

Burada  $F$ , mutasyon işleminin etkisinin kontrol edildiği ölçek katsayısını;  $r_k^i$  ( $k = 1, 2, 3$ ) ise  $[1, p]$  kapalı aralığında birbirinden ve  $i$  değerinden farklı olarak üretilmiş rastgele tamsayıları göstermektedir. Bu aşamanın ardından yeni çözüm

vektörü  $\mathbf{u}_{i,G} = [u_{i,G}^1, u_{i,G}^2, u_{i,G}^3, \dots, u_{i,G}^n]$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, p$ ) çaprazlama operatörü kullanılarak Denklem (3.13)'de verilen eşitlik ile üretilmektedir.

$$u_{i,G}^j = \begin{cases} v_{i,G}^j, & \text{eğer } r_j(0,1) \leq C_r \text{ veya } j = j_{rand} \\ x_{i,G}^j, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (3.13)$$

Burada  $C_r$ , çaprazlama oranını;  $j_{rand}$  ise  $[1, n]$  kapalı aralığında rastgele olarak üretilmiş üniform dağılıma sahip tamsayıyı göstermektedir. Görüleceği gibi,  $r_j(0,1) \leq C_r$  veya  $j = j_{rand}$  ( $j = 1, 2, 3, \dots, n$ ) koşullarından herhangi birinin sağlanması durumunda  $\mathbf{u}_{i,G}$  vektörünün  $j$  nolu bileşeni  $\mathbf{v}_{i,G}$  vektöründen, aksi halde ise  $\mathbf{x}_{i,G}$  vektöründen seçilmektedir. Burada  $j = j_{rand}$  koşulu en az bir tane değer üretilen yeni kromozomdan seçilmesini garanti etmek amacıyla konulmuştur (Keskintürk, 2006). Çaprazlama işleminin ardından yeni jenerasyona aktarılacak aday çözümler seçim operatörü ile Denklem (3.14)'te verildiği gibi belirlenmektedir.

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} u_{i,G} & \text{eğer } f(u_{i,G}) \leq f(x_{i,G}) \\ x_{i,G} & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (3.14)$$

Burada  $f(\bullet)$ , ilgili çözüm için hesaplanan amaç fonksiyonu değerini göstermektedir. Denklem (3.14)'te görüleceği gibi amaç fonksiyonu değeri bakımından daha iyi olan çözüm, bir sonraki jenerasyona aktarılmak üzere seçilmektedir. Yukarıda verilen hesap şeması takip edilerek yeni jenerasyona ait tüm aday çözümlerin seçimi yapıldıktan sonra, Denklem (3.12) ile (3.14) arasındaki işlemler, tanımlanan durma koşulu sağlanıncaya kadar tekrar edilmekte ve global optimum açısından etkili sonuçlar bulunabilmektedir.

### 3.4 Problem Formülasyonu

Yukarıda belirtildiği gibi kanalizasyon sistemlerinin minimum maliyetli olacak şekilde optimum tasarım problemi DE tabanlı bir optimizasyon modeli kullanılarak çözülmüştür. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri Denklem (3.1)'in minimizasyonunun Denklem (3.2) ile (3.10)'da verilen kısıtlar sağlanacak

şekilde yapılması gerektiğidir. Ancak, diğer sezgisel optimizasyon tekniklerinde olduğu gibi DE’de kısıtsız optimizasyon problemlerinin çözümü aşamasında kullanılabilir. Bu nedenle problem formülasyonunun DE’nin çözebileceği formata dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu kapsamda literatürde en yaygın kullanılan yaklaşımlardan biri ceza fonksiyonu yaklaşımıdır. Bu yaklaşım kapsamında problemin çözümünde dikkate alınan kısıtların sağlanmaması durumunda çözüme ceza verilmektedir. Bu süreç takip edilerek kısıtlı bir optimizasyon problemi kısıtsız bir problem haline dönüştürülebilmektedir. Genel olarak kısıtlı bir optimizasyon probleminin ceza fonksiyonu yaklaşımı ile düzenlenmiş hali Denklem (3.15)’da verilmiştir.

$$\Phi' = \min \left\{ \Phi + \sum_{k=1}^N \lambda \cdot P(\mathbf{g}_k) \right\} \quad (3.15)$$

Burada  $\Phi'$ , ceza fonksiyonu eklenmiş amaç fonksiyonu değerini;  $\mathbf{g}_k = [\mathbf{g}_{k,1}, \mathbf{g}_{k,2}, \mathbf{g}_{k,3}, \dots, \mathbf{g}_{k,9}]$  ( $k = 1, 2, 3, \dots, N$ ), Denklem (3.2)-(3.10)’da verilen kısıtların sağlandığı kısıt vektörünü;  $P(\bullet)$ , kısıt ihlali durumunda ilgili ceza değerinin hesaplanmasında kullanılan ceza fonksiyonunu;  $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_9]$  ise Denklem (3.2)-(3.10)’da verilen kısıtlar için tanımlanmış olan ceza parametrelerini göstermektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri ceza fonksiyonlarının modele entegre edilmesinde kullanılan  $\lambda$  parametre değerlerinin seçimidir. Probleme bağlı olarak seçimi yapılan parametre değeri ne kadar büyük alırsa, ilgili koşulun sağlanması için harcanacak çaba o derece fazla olmaktadır (Ayvaz, 2009). Literatürde verilen koşulların sağlanabilmesi amacıyla önerilmiş farklı ceza fonksiyonu yapıları bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında kısıt ihlali durumunda ihlal edilen kısıtın karelerinin, ceza olarak kullanıldığı aşağıdaki amaç fonksiyonu ve normalize edilmiş kısıt yapıları kullanılmıştır.

$$\Phi' = \min \left\{ \sum_{k=1}^N F(d_k, L_k, Z_k) + \sum_{l=1}^9 \lambda_l \sum_{k=1}^N (\hat{g}_{k,l})^2 \right\} \quad (3.16)$$

Kısıtlar:

$$\hat{g}_{k,1}: \left(1 - \frac{q_k}{Q_k^*}\right) \leq 0 \quad (3.17)$$

$$\hat{g}_{k,2}: \left(\frac{V_k}{V_{max}} - 1\right) \leq 0 \quad (3.18)$$

$$\hat{g}_{k,3}: \left(1 - \frac{V_k}{V_{min}}\right) \leq 0 \quad (3.19)$$

$$\hat{g}_{k,4}: \left(\frac{y_k}{\alpha \cdot d_k} - 1\right) \leq 0 \quad (3.20)$$

$$\hat{g}_{k,5}: \left(1 - \frac{S_k}{S_{min}}\right) \leq 0 \quad (3.21)$$

$$\hat{g}_{k,6}: \left(\frac{E_k^u}{E_{max}} - 1\right) \leq 0 \quad (3.22)$$

$$\hat{g}_{k,7}: \left(1 - \frac{E_k^u}{E_{min}}\right) \leq 0 \quad (3.23)$$

$$\hat{g}_{k,8}: \left(\frac{E_k^d}{E_{max}} - 1\right) \leq 0 \quad (3.24)$$

$$\hat{g}_{k,9}: \left(1 - \frac{E_k^d}{E_{min}}\right) \leq 0 \quad (3.25)$$

Burada  $\hat{g}_{k,l}$  ( $k = 1,2,3, \dots, N; l = 1,2,3, \dots, 9$ ), Denklem (3.2)-(3.10)'da verilmiş olan kısıtların normalize edilmiş hallerini göstermektedir. Geliştirilen çözüm yaklaşımı ile Denklem (3.16)-(3.25), DE optimizasyon tekniği kullanılarak kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarım problemi çözülebilmektedir. Bu çözüm işlemi aşamasında tasarlanan sistemin hidrolik çözümü ile optimizasyon süreci aşağıdaki işlem adımlarına bağlı olarak entegre edilmektedir:

Adım 1: Optimizasyon modeli tarafından her bir boruya ait eğim değerini belirle.

Adım 2: Dikkate alınan boru çapı kümesinde yer alan en küçük boru çapını seç.

Adım 3: Seçilen çap değerini kullanarak boru içindeki akım debisini ve ortalama akış hızını hesapla.

Adım 4: Denklem (3.3) ile (3.5)'de verilen kısıtların sağlanıp sağlanmadığını kontrol et. Sağlanmaması durumunda boru çapı kumesindeki bir büyük çapa geç ve Adım 2'ye geri dön.

Adım 5: Amaç fonksiyonunu hesapla.

Adım 6: Diğer kısıtları hesapla.

Adım 7: Kısıtların tümünü ceza fonksiyonu yaklaşımı ile amaç fonksiyonu değerine entegre et ve verilen durma koşulu sağlanıncaya kadar her bir aday çözüm için ilgili hesaplamaları tekrarla.

Adım 8: Her bir aday çözüm için mutasyon, çaprazlama ve seçim işleminin ardından en iyi amaç fonksiyonu değerini veren bireyi bir sonraki jenerasyona aktar.

Adım 10: Bu işlem adımlarını maksimum jenerasyon sayısına ulaşıncaya kadar devam et.

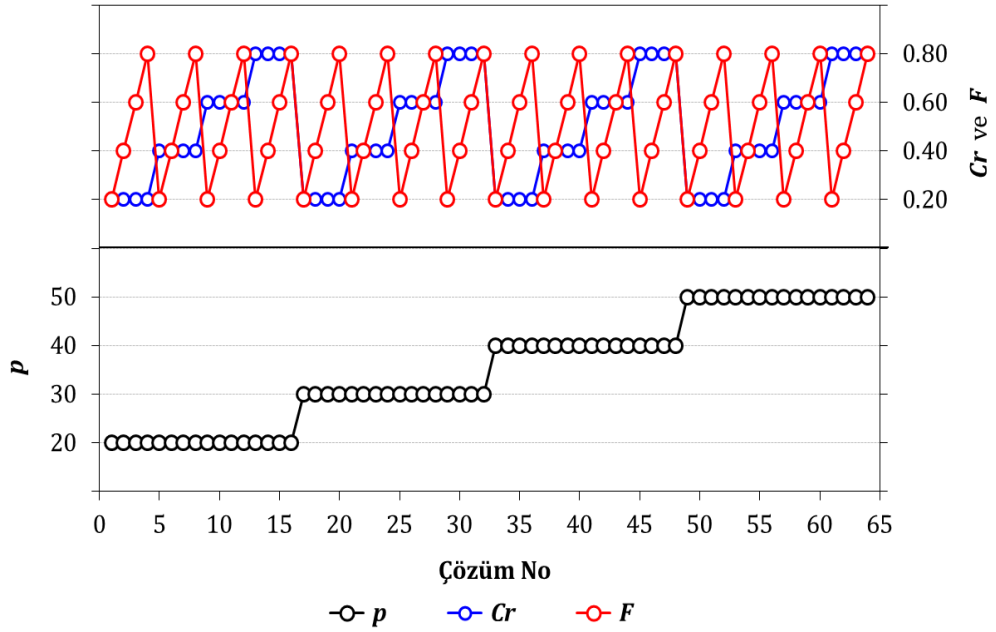
## 4. Model Uygulaması

### 4.1 Giriş

Bu çalışma kapsamında geliştirilen DE tabanlı optimizasyon modelinin optimum kanalizasyon sistem tasarım problemi üzerindeki performansı, iki örnek uygulama üzerinde test edilmiştir. Kullanılan örnek uygulamalardan ilki Mays ve Wenzel (1976) tarafından tasarlanmıştır. İlgili model, Miles ve Heaney (1988), Robinson ve Labadie (1981), Afshar (2006) ve Afshar (2012) kapsamında da kullanılmıştır. Diğer örnek uygulama ise ilk olarak Afshar ve diğ. (2011) tarafından kullanılmış ve İran'ın Kirman şehrinde yer alan örnek bir sistemdir. Bu örnek uygulamaların geliştirilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımı ile çözümü aşamasında MATLAB ortamında hazırlanmış olan DE tabanlı optimizasyon modeli kullanılmıştır. Bu kapsamda ilgili uygulamaların hidrolik çözümü yine MATLAB ortamında Denklem (3.16)-(3.25)'da verilen optimizasyon formülasyonu dikkate alınarak yapılmıştır. Önceki bölümlerde de belirtildiği gibi Denklem (3.16)-(3.25)'da verilen kısıtların tümü optimizasyon sürecine ceza fonksiyonu yaklaşımı kullanılarak entegre edilmiştir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli husus, entegrasyon aşamasında  $\lambda$  ceza parametre değerlerinin belirlenmesi gerektiğidir. Daha önce de belirtildiği gibi ceza parametrelerinin değeri büyük oranda probleme bağlı olduğundan dolayı ilgili uygulamaların çözümüne başlamadan önce  $\lambda$  değerleri için denemeler yapılmış ve nihai değerler belirlenmiştir. Yapılan denemeler sonucunda bu değerlerin tümü  $\lambda_{1-9} = 10^9$  olarak belirlenmiştir.

DE tabanlı optimizasyon modeli ile ilgili problemin çözümü aşamasında dikkat edilmesi gereken diğer bir husus da optimizasyon modelinde kullanılan parametre değerlerinin ve MATLAB ortamında üretilen rastgele sayılara ait çekirdek (seed) değerlerinin çözüm üzerindeki etkisinin belirlenmesidir. Her ne kadar DE'nin global optimumu ya da global optimuma yakın sonuçlar bulmadaki performansının yüksek olduğu bilinse de algoritmanın performansının farklı çözüm parametreleri ve rastgele sayı çekirdekleri kullanılarak test edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda her iki örnek uygulama da iki farklı senaryo dikkate alınarak çözülmüştür. Senaryo A'da farklı çözüm parametre değerleri için DE tabanlı optimizasyon modelinin performansı

değerlendirilmiştir. Bu kapsamda  $p \in [20, 30, 40, 50]$ ,  $C_r \in [0.20, 0.40, 0.60, 0.80]$  ve  $F \in [0.20, 0.40, 0.60, 0.80]$  alınmış ve bu parametre değerlerinin birbirine göre değişiminin dikkate alındığı  $4^3 = 64$  farklı parametre kombinasyonu için problem çözülmüştür. Şekil 4.1’de Senaryo A kapsamında kullanılan 64 parametre kombinasyonu için çözüm parametrelerinin değişimi gösterilmektedir. Bu parametre kombinasyonları kullanılarak problemin çözümü sonucunda minimum amaç fonksiyonu değerini veren parametre seti problemin çözümünde kullanılmıştır.

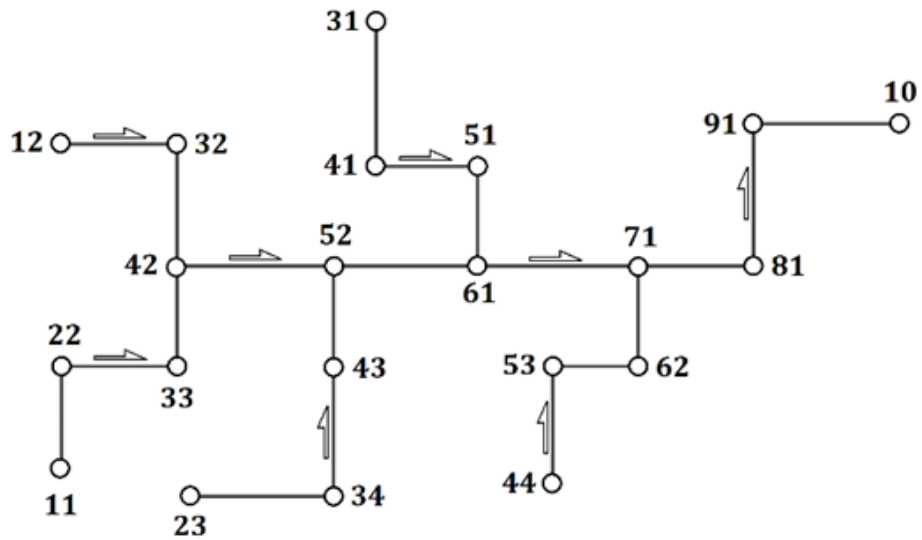


**Şekil 4.1:** Senaryo A kapsamında kullanılan farklı DE çözüm parametrelerini içeren parametre kombinasyonları

Senaryo A kapsamında yapılan çözümlerden minimum amaç fonksiyonu değerini veren parametre kombinasyonunun belirlenmesinin ardından, Senaryo B kapsamında her iki örnek uygulamanın performansı farklı rastgele sayı üreticileri için değerlendirilmiştir. Bu bağlamda 10 farklı çekirdek değeri için her iki problem de çözülmüş ve geliştirilen yaklaşımın performansının rastgele sayılara ne oranda bağlı olduğu detaylı olarak değerlendirilmiştir. Senaryo A ve B kapsamında erken yakınsama probleminin önüne geçmek amacıyla durma koşulu 500,000 amaç fonksiyonu hesaplaması şeklinde alınmıştır. Bu kapsamda maksimum jenerasyon sayısı  $G_{max} = 500.000/p$  olarak modele girilmiştir.

## 4.2 Uygulama 1

Bu bölümde geliştirilen modelin performansı ilk olarak Mays ve Wenzel (1976) tarafından tasarlanan ve daha sonra pek çok çalışmada kullanılan örnek bir sistem üzerinde test edilmiştir. Şekil 4.2’de görüleceği gibi kanalizasyon sistemi 21 düğüm noktası ve toplam uzunluğu yaklaşık 2.6 km olan 20 borudan oluşmaktadır. Sistem ile ilgili karakteristik özellikler Tablo 4.1’de sunulmuştur. Problemin çözümü aşamasında minimum ve maksimum hız değerleri sırasıyla 0.6 m/s ve 3.6 m/s olarak verilmiş olup tüm borular içerisindeki akış hızının belirlenen aralık içerisinde olması gerekmektedir. Bununla birlikte tüm borular için müsaade edilebilir minimum ve maksimum dolgu kalınlıkları sırasıyla 2.4 m ve 6.0 m olarak alınmış olup dolgu kalınlıklarının bu aralıkta model tarafından belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 4.2: Uygulama 1’e ait boru ve düğüm nokta planı

Tablo 4.1: Uygulama 1’e ait karakteristik özellikler

Boru	Zemin Kotu (m)		L (m)	$Q^* \left(\frac{m^3}{sn}\right)$
	Memba	Mansap		
11-22	152.4	150.88	106.68	0.1132
22-33	150.88	148.49	121.92	0.1982
33-42	148.49	146.30	106.68	0.2548
12-32	149.35	147.83	121.92	0.1132
32-42	147.83	146.30	131.08	0.2265
42-52	146.30	143.26	167.68	0.6229
23-34	149.35	147.83	147.64	0.2265



**Tablo 4.1 (devam):**

34-43	147.83	144.78	137.16	0.3398
43-52	144.78	143.26	106.68	0.4530
52-61	143.26	141.73	152.40	1.2459
31-41	147.83	144.78	152.40	0.2548
41-51	144.78	143.26	106.68	0.4530
51-61	143.26	141.73	106.68	0.5663
61-71	141.73	138.65	172.21	2.0104
44-53	142.65	141.43	121.92	0.1132
53-62	141.43	140.21	91.44	0.1699
62-71	140.21	138.65	105.23	0.2548
71-81	138.65	137.46	121.92	2.4635
81-91	137.46	136.55	152.40	2.5201
91-10	136.55	135.64	186.54	2.6617

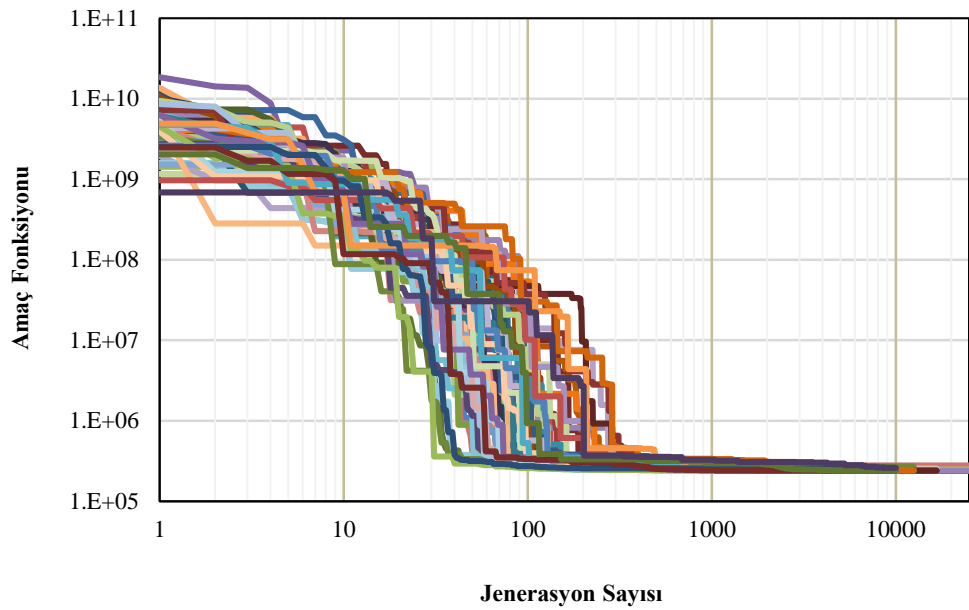
Bu uygulamanın çözümü Mays ve Wenzel (1976) tarafından ilk olarak diferansiyel dinamik programlama tekniğine dayanan bir optimizasyon yaklaşımı ile yapılmış ardından pek çok araştırmacı tarafından aynı problemin çözümünde farklı yöntemler kullanılmıştır (Robinson ve Labadie 1981; Yen ve diğ. 1984; Miles ve Heaney 1988; Afshar 2006; Afshar 2012; Swamee ve Sharma 2012). Bu çözümlerin tümünde Meredith (1972) tarafından kullanılan ve Denklem (4.1)-(4.2)'de verilmiş olan maliyet fonksiyonu kullanılmıştır.

$$C_p = \begin{cases} 10.98d + 0.80H - 5.98 & ; H < 10 \\ 5.94d + 1.17H + 0.50Hd - 9.64 & ; d \leq 3, H \geq 10 \\ 30.00d + 4.90H - 105.90 & ; d > 3 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$C_m = 250 + h^2 \quad (4.2)$$

Burada  $C_p$ , boru maliyet terimini (\$/ft);  $C_m$ , menhol maliyet terimini (\$);  $d$ , boru çapını (ft);  $H$ , ortalama boru alt kot derinliği (ft);  $h$  ise menhol derinliğini (ft) ifade etmektedir. Bu ifadeler ile kanalizasyon sisteminin toplam maliyeti tüm borular için hesaplanan  $C_p$  ve  $C_m$  değerlerinin toplamına eşit kabul edilmiş ve DE tabanlı optimizasyon yaklaşımı ile bu maliyeti minimum yapan sistem tasarımının belirlenmesi amaçlanmıştır. Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi her bir boruya ait eğim değeri ( $S_k; k = 1,2,3, \dots, 20$ ) optimizasyon modelinde karar değişkeni olarak kullanılmıştır. Çözüm aşamasında tüm borular için Manning yüzey pürüzlülüğü  $n = 0.013$  ve müsaade edilebilir maksimum doluluk oranı  $\alpha = 0.82$  olarak alınmıştır.

Belirlenen eğim değerleri için piyasada bulunan şu boru çapları arasından seçim yapılmıştır: 304.8 mm (12 inç), 381.0 mm (15 inç), 457.2 mm (18 inç), 533.4 mm (21 inç), 762 mm (30 inç), 914.4 mm (36 inç), 1066.8 mm (42 inç) ve 1219.2 mm (48 inç). Bu seçim, optimizasyon modeli tarafından her bir boruya ait eğim değeri belirlendikten sonra Denklem (3.3) ve (3.5)'te verilen kısıtlar sağlanacak şekilde yukarıda verilen boru çapları küçükten büyüğe doğru teker teker denenerek yapılmıştır. Bu aşamadan sonra ilgili problemler Senorya A için çözülmüş ve her bir çözüm için Şekil 4.3'te verilen yakınsama grafikleri elde edilmiştir.



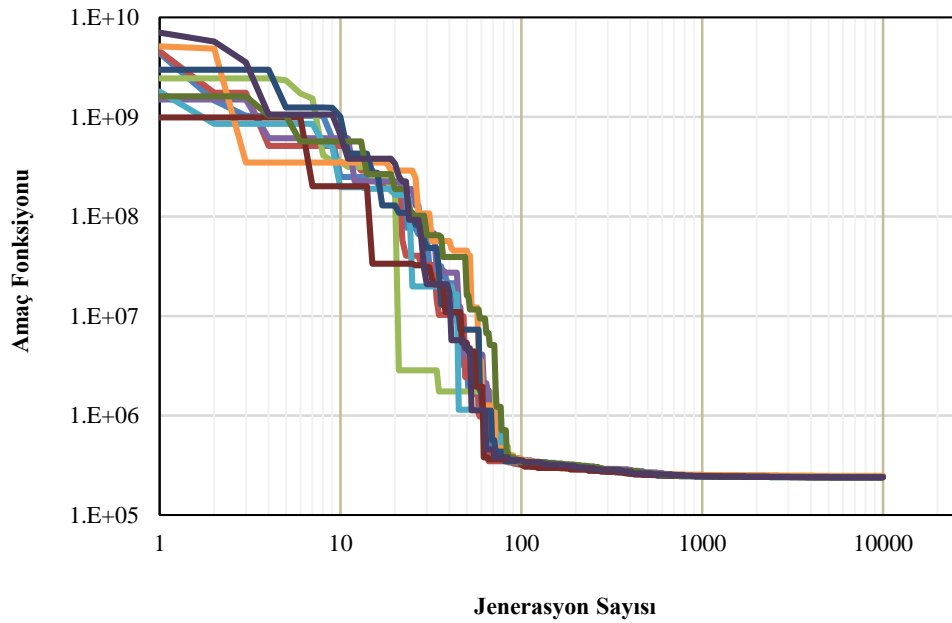
**Şekil 4.3:** Uygulama 1'in Senorya A kapsamında 64 farklı parametre seti için çözümleri sonucu elde edilen yakınsama grafikleri

Şekil 4.3'den görüleceği gibi tüm çözümler farklı başlangıç noktalarından başlamakta olup yaklaşık olarak benzer mertebedeki sonuçlara yakınsamaktadır. Genel olarak çözümlere ait yakınsama davranışı değerlendirildiğinde başlangıç jenerasyonlarında kısıtların sağlanmadığı ve bunun sonucunda da amaç fonksiyonu değerleri üzerinde yüksek ceza değerleri bulunduğu açıkça görülmektedir. Farklı DE çözüm parametreleri için yapılan 64 çözümün istatistiksel değerlendirmesi Tablo 4.2'de verilmiştir.

**Tablo 4.2:** Uygulama 1 için Senaryo A ve B kapsamında elde edilen sonuçların istatistiksel değerlendirilmesi

	Toplam Maliyet (ABD \$)	
	Senaryo A	Senorya B
Çözüm Sayısı	64	10
En Küçük	239,961	239,961
En Büyük	279,367	239,979
Ortalama	244,682	239,964
Standart Sapma	8,389	6

Tablo 4.2'den görüleceği gibi Senaryo A kapsamında yapılan 64 çözümün sonucunda sistem içinde toplam maliyet en küçük 239,961 \$, en büyük 279,367 \$, ortalama 244,682 \$ olarak belirlenmiştir. Yapılan çözümler ortalama etrafında 8,389 \$'lık bir standart sapma ile dağılım göstermektedir. Bu değerlendirmeler sonucunda en küçük amaç fonksiyonu değerine  $p = 50$ ,  $C_r = 0.60$  ve  $F = 0.40$  parametre değerleri ile ulaşıldığı görülmektedir. Bu aşamanın ardından belirlenen parametre değerleri kullanılarak Senaryo B kapsamında ilgili problem 10 farklı rastgele sayı üretici için tekrar çözülmüştür. Yapılan bu 10 çözüme ait yakınsama grafikleri Şekil 4.4'te verilmiştir.



**Şekil 4.4:** Uygulama 1'in Senaryo B kapsamında farklı rastgele sayı üreticiler için çözümleri sonucunda elde edilen yakınsama grafikleri

Şekil 4.4'te görüleceği gibi farklı başlangıç noktalarına sahip tüm çözümler merite olarak aynı amaç fonksiyonu değerine yakınsamıştır. Senaryo B kapsamında elde edilen bu sonuçların istatistiksel değerlendirmesi ise Tablo 4.2'de verilmiştir. Görüleceği gibi en küçük ve en büyük sistem maliyetleri sırasıyla 239,961 \$ ve 239,979 \$ olarak elde edilmiş ve yapılan 10 çözüm için standart sapma değeri 6 \$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen DE tabanlı optimizasyon yaklaşımı ile başlangıç çözümlerine çok fazla bağlı kalmadan aynı mertebede sonuçlara ulaşabileceğini göstermektedir. Senaryo B kapsamında elde edilen en küçük sistem maliyeti (239,961 \$) için optimizasyon modeli tarafından belirlenen sistem karakteristikleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

**Tablo 4.3:** Uygulama 1 için optimizasyon modeli tarafından belirlenen karakteristikler

Boru	Eğim	Çap	Hız	Doluluk Oranı	Dolgu Kalınlıkları	
	$S_k$ (m/m)	$d_k$ (mm)	$V_k$ (m/s)	$y_k/d_k$ (m/m)	$E_k^u$ (m)	$E_k^d$ (m)
11-22	0.0142	304.8	1.88	0.77	2.40	2.40
22-33	0.0196	381.0	2.47	0.66	2.40	2.40
33-42	0.0205	381.0	2.62	0.80	2.40	2.40
12-32	0.0126	304.8	1.77	0.82	2.40	2.42
32-42	0.0116	457.2	2.10	0.63	2.42	2.40
42-52	0.0193	533.4	3.18	0.82	2.40	2.59
23-34	0.0153	381.0	2.26	0.82	2.40	3.14
34-43	0.0168	457.2	2.65	0.73	3.14	2.40
43-52	0.0142	533.4	2.68	0.71	2.40	2.40
52-61	0.0115	762.0	3.11	0.82	2.40	2.62
31-41	0.0200	381.0	2.59	0.80	2.40	2.40
41-51	0.0142	533.4	2.68	0.71	2.40	2.40
51-61	0.0237	533.4	3.43	0.69	2.40	3.40
61-71	0.0121	914.4	3.60	0.80	3.40	2.40
44-53	0.0126	304.8	1.77	0.82	2.40	2.72
53-62	0.0099	381.0	1.82	0.77	2.72	2.40
62-71	0.0148	457.2	2.38	0.62	2.40	2.40
71-81	0.0098	1066.8	3.54	0.73	2.40	2.40
81-91	0.0078	1066.8	3.21	0.82	2.40	2.68
91-10	0.0087	1066.8	3.39	0.82	2.68	3.40

Tablo 4.3'ten görüleceği gibi optimizasyon modeli tarafından belirlenen eğim değeri için hesaplanan hız, doluluk oranı ve dolgu kalınlığı kısıtlarının tümünün sağlandığı bir çözüm oluşturulmuştur. Sistem içerisindeki her bir boru için çap seçiminde daha önceden tanımlanan piyasa boru çaplarına ait kesikli çözüm kümesinden yararlanılmıştır. Daha önceden belirtildiği gibi bu problem literatürde farklı çözüm yaklaşımları kullanılarak da çözülmüştür. Bu çalışma kapsamında DE optimizasyon yaklaşımı ile elde edilen sistem maliyetinin literatürde verilenlerle karşılaştırılması Tablo 4.4'te sunulmuştur.

**Tablo 4.4:** Uygulama 1 için elde edilen sonuçların sistem maliyeti ve fonksiyon hesaplama sayısı bakımından karşılaştırılması

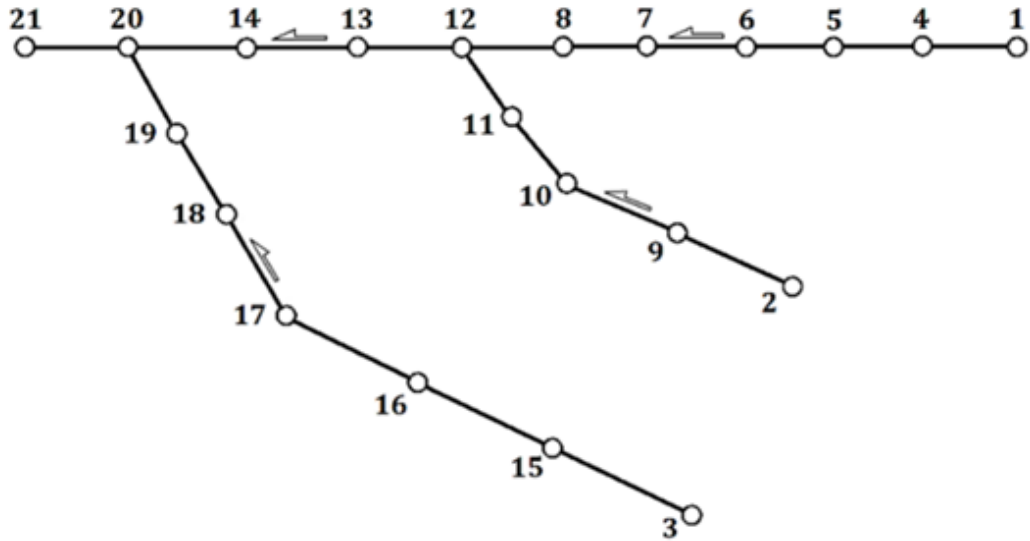
	Toplam Maliyet (ABD \$)	Fonksiyon Hesaplama Sayısı
Mays ve Wenzel (1976)	265,775	-
Robinson ve Labadie (1981)	275,218	-
Miles ve Heaney (1988)	245,874	-
Afshar (2006)	241,496	29,900
Afshar (2012)	241,896	100,000
	248,008	29,900
Mevcut çalışma	240,860	100,000
	239,961	420,450

Tablo 4.4'ten görüleceği gibi geliştirilen yaklaşım ile elde edilen sistem maliyeti (239,961 \$), gerek deterministik gerek sezgisel tabanlı çözüm yaklaşımlarından daha düşüktür. Bu noktada model performanslarının karşılaştırılmasında dikkat edilecek en önemli husus amaç fonksiyonunun kaç kez hesaplanması sonucu bu sonuçlara ulaşıldığıdır. Daha önceden belirtildiği gibi geliştirilen yaklaşım kapsamında ilgili problemin çözümü 500,000 amaç fonksiyonu hesabı için yapılmış olup Tablo 4.4'te verilen en iyi çözüm (239,961 \$) ilgili amaç fonksiyonu değerinin 420,450'nci çözümü sonucu elde edilmiştir. Literatürde verilen sonuçlar incelendiğinde ilgili problem Afshar (2006) tarafından karınca kolonisi optimizasyon tekniği iyileştirilerek çözülmüş ve 29,900 çözüm sonrasında sistem maliyeti 241,496 \$ olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde Afshar (2012) tarafından genetik algoritma tabanlı optimizasyon yaklaşımıyla, ilgili problem çözülmüş ve 100,000 amaç fonksiyonu çözümü sonrasında toplam sistem maliyeti 241,896 \$ olarak bulunmuştur.

Karşılaştırma amacıyla, bu çalışma kapsamında geliştirilen yaklaşımın 29,900 ve 100,000'nci amaç fonksiyonu hesabı sonucunda sistem maliyeti Tablo 4.4'te görüldüğü gibi sırasıyla 248,008 \$ ve 240,860 \$ olarak elde edilmiştir. Görüleceği gibi 29,900'ncü çözüm sonrası elde edilen sistem maliyeti (248,008 \$), Afshar (2006) tarafından elde edilen sonuçtan (241,496 \$) daha büyüktür. Buna karşın 100,000'nci çözüm sonrası elde edilen sistem maliyetinin (240,860 \$), Afshar (2012) tarafından elde edilen sistem maliyetinden (241,896 \$) daha küçük olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, geliştirilen DE tabanlı çözüm yaklaşımı ile literatürde verilenlerle uyumlu ve daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini göstermektedir.

### 4.3 Uygulama 2

Bu uygulama kapsamında Afshar ve diğ. (2011) tarafından kullanılan ve İran'ın Kirman şehrinde bulunan örnek bir sistem çözülmüştür. Şekil 4.5'te yerleşim planı verilen sistemin toplam şebeke uzunluğu 7.62 km olup 20 adet borudan ve 21 adet düğüm noktasından oluşmaktadır. Sistem ile ilgili karakteristik özellikleri Tablo 4.5'te sunulmuştur.



Şekil 4.5: Uygulama 2'ye ait boru ve düğüm nokta planı

**Tablo 4.5:** Uygulama 2'ye ait karakteristik özellikler

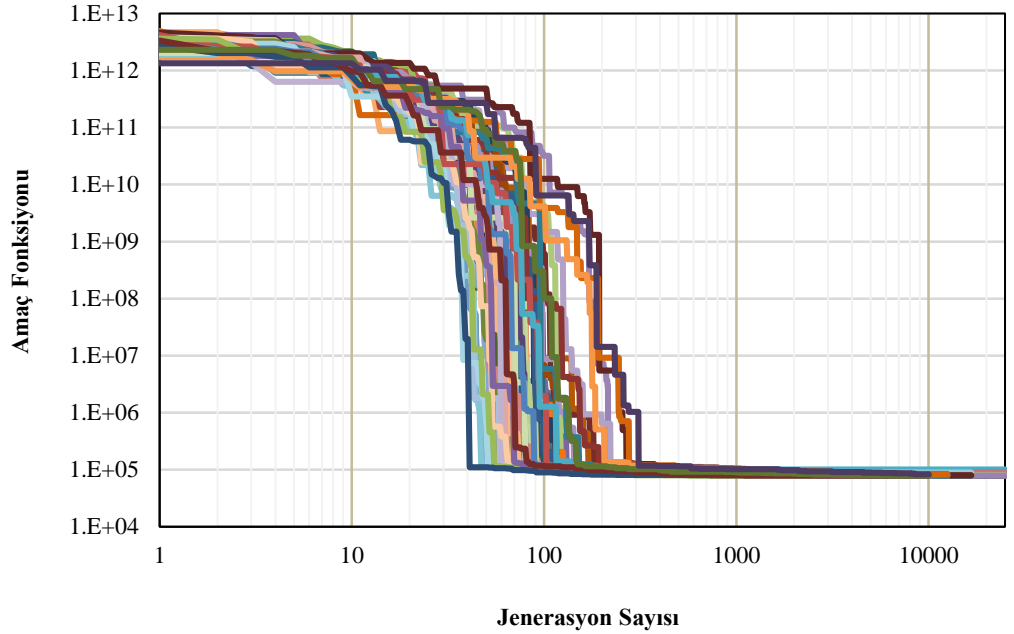
Boru	Zemin Kotu (m)		L (m)	Q* (m <sup>3</sup> /s)
	Memba	Mansap		
1-4	74.59	73.66	260	0.0279
2-9	70.70	69.90	300	0.0549
3-15	73.00	71.50	400	0.0211
4-5	73.66	72.10	460	0.0304
5-6	72.10	71.19	260	0.0324
6-7	71.19	69.85	300	0.0340
7-8	69.85	68.24	450	0.0366
8-12	68.24	67.28	400	0.0387
9-10	69.90	69.30	270	0.0562
10-11	69.30	68.40	310	0.0580
11-12	68.40	67.28	440	0.0596
12-13	67.28	66.22	470	0.0967
13-14	66.22	65.82	350	0.1012
14-20	65.82	65.42	340	0.1047
15-16	71.50	70.10	400	0.0264
16-17	70.10	68.60	400	0.0300
17-18	68.60	66.80	500	0.0319
18-19	66.80	66.10	400	0.0403
19-20	66.10	65.42	590	0.0446
20-21	65.42	64.50	320	0.0279

Bu uygulama için çözüm aşamasında dikkate alınan minimum ve maksimum hız değerleri sırasıyla 0.3 m/s ve 3.0 m/s olarak alınmıştır. Bununla birlikte tüm borular için müsaade edilebilir minimum ve maksimum dolgu kalınlıkları sırasıyla 2.45 m ve 6.0 m olarak alınmıştır. Manning yüzey pürüzlülük katsayısı  $n = 0.013$  ve maksimum doluluk oranı  $\alpha = 0.82$  olarak tanımlanmıştır. Karar değişkeni olarak belirlenen boru eğimleri için boru çapları şu çaplar arasından seçilmiştir: 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm, 400 mm, 500 mm, 600 mm, 700 mm. Bu çalışma kapsamında amaç fonksiyonun hesaplanabilmesi ve literatürde verilen sonuçlarla karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla Afshar ve diğ. (2011) tarafından belirlenen ve Denklem (4.3) ile (4.4)'te verilen sistem maliyet fonksiyonu kullanılmıştır.

$$C_p = 1.93e^{3.43d} + 0.812H^{1.53} + 0.437dH^{1.47} \quad (4.3)$$

$$C_m = 41.46h \quad (4.4)$$

Burada  $C_p$ , boru maliyet terimini (\$/m);  $C_m$ , menhol maliyet terimini (\$);  $d$ , boru çapını (m);  $H$ , ortalama boru alt kot derinliği (m);  $h$ , ise menhol derinliğini (m) ifade etmektedir. Bu tanımlamalar altında sistem için toplam maliyet  $C_p$  ve  $C_m$  değerlerinin toplamına eşit kabul edilmiş olup bu maliyeti minimum yapan sistem tasarımının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu uygulamanın çözümü de Senorya A ve B kapsamında farklı çözüm parametreleri ve rastgele sayı çekirdek değerleri için yapılmıştır. Şekil 4.6'da Senorya A kapsamında yapılan 64 çözüm için elde edilen yakınsama grafikleri verilmiştir.



**Şekil 4.6:** Uygulama 2'nin Senaryo A kapsamında 64 farklı parametre seti için çözülmesi sonucu elde edilen yakınsama grafikleri

Şekil 4.6'da verilen yakınsama grafiklerinden görüleceği gibi başlangıç aşamasındaki çözümlerin tümü kısıtların sağlanmaması ile alakalı olarak yüksek ceza değerlerine sahiptir. İlerleyen jenerasyonlarda ise kısıtların sağlanmasıyla beraber amaç fonksiyonu değerleri düşmekte ve yaklaşık aynı mertebedeki sonuçlara

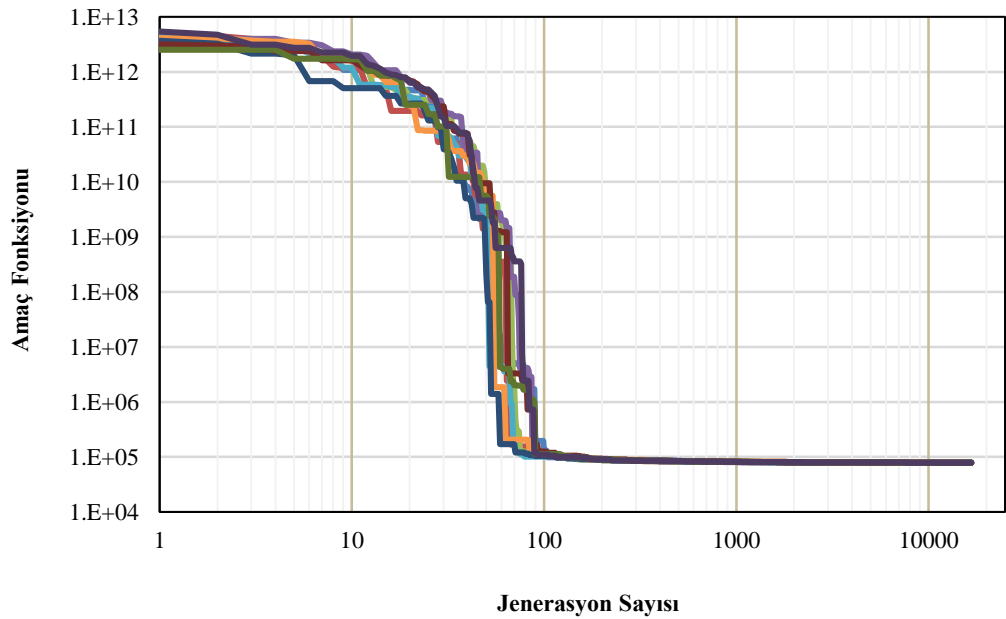


yakınsamaktadır. Yapılan bu çözümlerin istatistiksel değerlendirmesi Tablo 4.6’da verilmiş ve 64 çözüm için sistem maliyeti en küçük 78,699 \$, en büyük 100,751 \$, ortalama 81,097 \$ olarak elde edilmiştir. Tamamlanan 64 çözüm ortalama etrafında 3,977 \$’lık bir standart sapma ile dağılım göstermiştir.

**Tablo 4.6:** Uygulama 2 için Senaryo A ve B kapsamında elde edilen sonuçların istatistiksel değerlendirilmesi

	Toplam Maliyet (ABD \$)	
	Senaryo A	Senaryo B
Çözüm Sayısı	64	10
En Küçük	78,699	78,694
En Büyük	100,751	78,873
Ortalama	81,097	78,727
Standart Sapma	3,977	54

Elde edilen bu sonuçlar için en küçük amaç fonksiyon değeri, verilen parametre kombinasyonları içerisinde  $p = 30$ ,  $C_r = 0.20$  ve  $F = 0.40$  ile elde edilmiştir. Bu aşamanın ardından Senaryo B kapsamında ilgili problem için belirlenen parametre kullanılarak 10 farklı rastgele sayı üretici için tekrar çözülmüştür. Yapılan bu çözümlere ait yakınsama grafikleri Şekil 4.7’de verilmiştir.



**Şekil 4.7:** Uygulama 2’nin Senaryo B kapsamında farklı rastgele sayı üreticileri için çözümlenmesi sonucunda elde edilen yakınsama grafikleri

Şekil 4.7'den görüleceği gibi tüm çözümler farklı başlangıç noktalarından başlamış ve merteye olarak aynı amaç fonksiyonu değerlerine yakınsamıştır. Yapılan bu 10 çözüm için elde edilen sonuçlar da Tablo 4.6'da verilmiştir. Görüleceği gibi Senaryo B kapsamında en küçük, en büyük ve ortalama sistem maliyetleri sırasıyla 78,694 \$, 78,873 \$ ve 78,727 \$ olarak elde edilmiştir. Yapılan bu 10 çözüm için standart sapma değeri ise 54 \$ olarak elde edilmiş olup geliştirilen yaklaşım kullanılarak farklı başlangıç çözümleri için yapılan çözümlerin yaklaşık olarak aynı amaç fonksiyonu değerlerine yakınsadığı sonucuna ulaşılmıştır. Senaryo B kapsamında elde edilen en küçük sistem maliyeti için (78,694 \$) optimizasyon modeli tarafından belirlenen sistem karakteristikleri Tablo 4.7'de sunulmuştur.

**Tablo 4.7:** Uygulama 2 için optimizasyon modeli tarafından belirlenen karakteristikler

Boru	Eğim	Çap	Hız	Doluluk Oranı	Dolgu Kalınlıkları	
	$S_k$ (m/m)	$d_k$ (mm)	$V_k$ (m/s)	$y_k/d_k$ (m/m)	$E_k^u$ (m)	$E_k^d$ (m)
1-4	0.0036	0.25	0.80	0.67	2.45	2.45
2-9	0.0032	0.30	0.89	0.82	2.45	2.62
3-15	0.0041	0.20	0.77	0.82	2.45	2.61
4-5	0.0034	0.25	0.80	0.73	2.45	2.45
5-6	0.0035	0.25	0.82	0.76	2.45	2.45
6-7	0.0045	0.25	0.91	0.72	2.45	2.45
7-8	0.0038	0.25	0.85	0.82	2.45	2.54
8-12	0.0042	0.25	0.90	0.82	2.54	3.28
9-10	0.0016	0.35	0.69	0.79	2.62	2.45
10-11	0.0036	0.30	0.94	0.82	2.45	2.67
11-12	0.0021	0.35	0.78	0.74	2.67	2.45
12-13	0.0023	0.40	0.90	0.80	2.45	2.45
13-14	0.0024	0.40	0.92	0.82	2.45	2.88
14-20	0.0052	0.35	1.24	0.82	2.88	4.23
15-16	0.0031	0.25	0.75	0.68	2.61	2.45
16-17	0.0037	0.25	0.83	0.69	2.45	2.45
17-18	0.0036	0.25	0.82	0.74	2.45	2.45
18-19	0.0018	0.30	0.65	0.82	2.45	2.45
19-20	0.0012	0.35	0.58	0.74	2.45	2.45
20-21	0.0029	0.25	0.73	0.73	2.45	2.45

Tablo 4.7’den görüleceği gibi, belirlenen eğim değerleri için ilgili problem kapsamında hesaplanan hız, doluluk oranı ve dolgu kalınlıkları kısıtlarının tümü sağlanmıştır. Her bir boruya ait çap değerleri ise problem kapsamında tanımlanan kesikli çözüm kümesi içerisinde seçilmiştir. Uygulama 1’de olduğu gibi bu sistemde literatürde farklı çözüm yaklaşımları kullanılarak çözülmüştür. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar Tablo 4.8’de karşılaştırılmıştır.

**Tablo 4.8:** Uygulama 2 için elde edilen sonuçların sistem maliyeti bakımından karşılaştırılması

	Toplam Maliyet (ABD \$)
Mansuri ve Khanjani (1999)	83,116
Setoodeh (2004 <sup>a</sup> )	82,732
Setoodeh (2004 <sup>b</sup> )	81,553
Afshar ve diğ. (2011)	80,879
Mevcut çalışma	78,694

Tablo 4.8’den görüleceği gibi mevcut çalışma için elde edilen sistem maliyeti (78,694 \$) literatürde verilen diğer çalışmalardan daha düşüktür. Bu çalışmalar incelendiğinde ilgili problem Mansuri ve Khanjani (1999) tarafından doğrusal olmayan programlama ile, Setoodeh (2004<sup>a</sup>) tarafından Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) yöntemi ile, Setoodeh (2004<sup>b</sup>) tarafından Fletcher-Reeves yöntemi ile, Afshar ve diğ. (2011) tarafından ise hücreli otomat yöntemi ile çözülmüştür.

Geliştirilen yaklaşım ile belirtilen amaç fonksiyonu değerine 417,750 amaç fonksiyonu hesabında ulaşılmış olup bu işlem MATLAB platformunda hazırlanmış bir program kullanılarak Intel Core i7 2.90 GHz işlemci ve 8.00 GB RAM özelliklerine sahip bir masaüstü bilgisayarda 1145.61 s zaman almıştır. Elde edilen bu sonuçlar geliştirilen DE tabanlı optimizasyon yaklaşımı ile literatürde verilen deterministik tabanlı optimizasyon yaklaşımlarına göre daha iyi sonuçların makul bilgi-işlem sürelerinde elde edilebileceğini göstermiştir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1 Sonuçlar

Atıksu sistemleri dünyada ve ülkemizde insan ve çevre sağlığı açısından büyük bir önem arz etmektedir. Ancak atıksu sistemlerinin planlanması, projelendirilmesi ve inşaatı, ilgili kurumların bütçe planlaması çerçevesinde gerçekleşmektedir. Bu sebeple atıksu sistemlerinin tasarımının ekonomik açıdan uygun olması oldukça önemlidir. Ancak en uygun maliyetli atıksu sisteminin tasarımında çok fazla seçenek bulunmaktadır. Tasarımcı açısından bu seçeneklerin her birinin denenmesi gerekliliği, uygulamada birtakım zorlukları da beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla atıksu sistemlerinin en uygun tasarımında optimizasyon yöntemlerinin kullanılması hem zaman hem de iş yükü açısından oldukça kullanışlıdır.

Bu çalışma kapsamında kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımının yapılabilmesi için problem öncelikle matematiksel olarak ifade edilmiştir. Bu model aşamasında, sistem maliyetinin minimize edilmesinde boru çap, eğim gibi etkenlerin en uygununu belirleme işlemleri problem açısından oldukça önemlidir. Bu etkenlerin aynı anda en uygununu belirleme işlemleri oldukça zor görünmektedir. Bu durumda değişken değerleri için boru çap ve eğimlerinin birbiri ile sıkı bir etkileşim halinde olduğu görülmektedir. Örnek olarak boru eğiminin artırılması aynı debinin daha küçük çaplı bir boru ile iletilmesine imkan sağlarken kazı maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Boru eğimlerinin azaltılması durumunda ise tam tersi olarak daha büyük çaplı ve dolayısıyla daha maliyetli boruların kullanılması gerekmektedir. Bu kapsamda ilgili değişkenler arasındaki en uygun dengenin (trade-off) optimizasyon modelleri kullanılarak belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Burada önemli hususlardan diğeri ise, sistem maliyetini minimize edilebilmesi aşamasında optimizasyon modelinde karar değişkeni belirlenmesinde birbiri ile sıkı etkileşim olan boru çap ve eğim faktörlerinin seçimi aşamasıdır. Bu aşamada optimizasyon modeli kapsamında karar değişkeni olarak her bir boru ait eğim değeri kullanılmıştır. Literatürde belirtildiği gibi sadece boru çapının veya çap ve eğimin birlikte karar değişkeni olarak kullanılması optimizasyon çalışmasında uygun

görülmemektedir. Kanalizasyon sistemlerinde boru çap ve eğim faktörlerinin en uygun dengenin optimizasyon modelleri ile belirlenebileceği amaçlanmıştır.

Geliştirilen yaklaşımda kanalizasyon sistemlerinde hidrolik tasarım aşamasından sonra belirtilen kısıtların, alt ve üst sınır değerleri arasında kalması sağlanmıştır. Bu yaklaşımla her bir boruya ait eğim değerleri optimizasyon modelinde karar değişkeni olarak belirlenmiş ve toplam sistem maliyetini minimize etmek amacıyla boru çapları, belirlenen piyasa çapları içerisinde seçilmiştir. Kanalizasyon sistemlerinin tasarımı aşamasında dikkate alınan fiziksel ve yönetsel kısıtların tümü amaç fonksiyonuna penaltı fonksiyonu yaklaşımı ile entegre edilerek sağlanmıştır.

Geliştirilen yaklaşımın performansı literatürde başka çözüm yaklaşımları kullanılarak çözülmüş iki adet örnek uygulama üzerinde test edilmiştir. Bu uygulamaların çözümü farklı DE parametrelerinin ve farklı rastgele sayı üreticilerinin sonuçlar üzerinde belirlenebildiği iki farklı senaryo için yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, DE tabanlı optimizasyon yaklaşımı kullanılarak literatürde verilen sonuçlarla karşılaştırılmış, uyumlu ve daha iyi sonuçların makul bilgi-işlem sürelerinde elde edilebileceğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında DE tabanlı optimizasyon yaklaşımı ile kanalizasyon sisteminde eğim, çap, hız, doluluk oranı, dolgu kalınlığının belirlenebildiği ve optimum maliyette tasarım yapılabildiği görülmüştür.

## 5.2 Öneriler

Dünyada ve ülkemizde kanalizasyon sistemlerine olan gereksinim giderek artmaktadır. Bu durumda çevre ve insan sağlığı dikkate alındığında kanalizasyon sistemlerine duyulan ihtiyaç giderek artacaktır. Artan talep durumunda bu sistemlerinin ekonomik olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında iki örnek model üzerinde uygulama ve çözüm yapılarak optimum maliyette kanalizasyon sistem tasarımı yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen optimizasyon modeli, iki örnek model üzerinde geliştirilmiş olsa da başka kanalizasyon sistemleri için de kullanılabilir. Bunun yanı sıra kanalizasyon sistemine pompa istasyonları da dahil edilerek maliyet

optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilebilir. Bu tez çalışmasında, amaç fonksiyonun hesaplanabilmesi aşamasında iki örnek uygulama için iki farklı sistem maliyet fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyonların kullanılmasının nedeni geliştirilen yaklaşım kapsamında elde edilen sonuçların literatürde başka yaklaşımlar kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmasıdır. Elbette ki pratikte bu şekilde önerilmiş fonksiyonlar bulunmamaktadır. Bu kapsamda sistem maliyetinin hesaplanması aşamasında birim boru maliyeti, menhol maliyeti ve hafriyat maliyeti gibi kalemlerin tümünün dikkate alınması suretiyle amaç fonksiyonu değerlerinin hesaplanması gereklidir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen DE tabanlı optimizasyon modeli pratikte karşılaşılabilecek problemlerin çözümü amacıyla daha da geliştirilerek bir yazılım haline dönüştürülebilir. Bu yazılım kapsamında DE dışında farklı optimizasyon yaklaşımları da kullanılabilir. Bununla birlikte farklı DE mutasyon/çaprazlama stratejileri ve zamanla değişen akım durumları için geliştirilen yaklaşımının genişletilmesi önerilmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

Afshar, M., “Application of a genetic algorithm to storm sewer network optimization”, *Scientia Iranica*, 13 (3), 234-244, (2006).

Afshar, M., “Partially constrained ant colony optimization algorithm for the solution of constrained optimization problems: Application to storm water network design”, *Advances in Water Resources*, 30, 954-965, (2007).

Afshar, M., “Rebirthing genetic algorithm for storm sewer network design”, *Scientia Iranica*, 19 (1), 11-19, (2012).

Afshar, M. H., “Improving the efficiency of ant algorithms using adaptive refinement: Application to storm water network design”, *Advances in Water Resources*, 29, 1371-1382, (2006).

Afshar, M. H., “Rebirthing particle swarm optimization algorithm: application to storm water network design”, *Can. J. Civ. Eng.*, 35, 1120-1127, (2008).

Afshar, M. and Rohani, M., “Optimal design of sewer networks using cellular automata-based hybrid methods: Discrete and continuous approaches”, *Engineering Optimization*, 44 (1), 1-22, (2012).

Afshar, M., Shahidi, M., Rohani, M. and Sargolzaei, M., “Application of cellular automata to sewer network optimization problems”, *Scientia Iranica*, 18 (3), 304-312, (2011).

Afshar, M., Zaheri, M. and Kimb, J., “Improving the efficiency of cellular automata for sewer network design optimization problems using adaptive refinement”, *Procedia Engineering*, 154, 1439-1447, (2016).

Ayvaz, M. T., “Application of harmony search algorithm to the solution of groundwater management models”, *Adv. Water Resour.*, 32, 916-924, (2009).

Ayvaz, M. T., “A linked simulation-optimization model for solving the unknown groundwater pollution source identification problems”, *Journal of Contaminant Hydrology*, 117, 46-59, (2010).

Çetin, T., “Kentsel yağmur suyu ve kanalizasyon sistemlerinin optimizasyonu”, Doktora tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, (2014).

Çevre ve Orman Bakanlığı, “Kentsel atıksu arıtımı yönetmeliği”, (2006).

Elimam, A. A., Charalambous, C. and Ghobrial F. H., “Optimum design of large sewer networks”, *Journal of Environmental Engineering*, 115 (6), 1171-1190, (1989).

Haghighi, A. and Bakhshipour, A. E., “Optimization of sewer networks using an adaptive genetic algorithm”, *Water Resour. Manage.*, 26 (12), 3441-3456, (2012).

Haghighi, A. and Bakhshipour, A. E., “Deterministic integrated optimization model for sewage collection networks using tabu search”, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 141 (1), 1-11, (2014).

İller Bankası, “Atıksu projelendirme esasları”, (2011).

İller Bankası, “Atıksu toplama ve uzaklaştırma sistemleri hakkında yönetmelik”, (2017).

Karovic, O. and Mays, L. W., “Sewer system design using simulated annealing in excel”, *Water Resour. Manage.*, 28 (13), 4551-4565, (2014).

Keskintürk, T., “Diferansiyel gelişim algoritması”, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5 (9), 85-99, (2006).

Kulkarni, V. S. and Khanna, P., “Pumped wastewater collection systems optimization”, *Journal of Environmental Engineering*, 111, 589-601, (1985).

Kumar, S., Navin, P. K. and Mathur, Y. P., “Optimization of sewerage system using simulated annealing”, *International Journal of Engineering Research and Technology*, 6 (11) 1-6, (2018).

Li, G. and Matthew, R. G. S., “New approach for optimization of urban drainage systems”, *Journal of Environmental Engineering*, 116 (5), 927-944, (1990).

Liang, L. Y., Thompson, R. G. and Young, D. M., “Optimising the design of sewer networks using genetic algorithms and tabu search”, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 11 (2), 101-112, (2004).

Liu, C., Han, H., Wang, C. and Qiao, J., “An adaptive differential evolution algorithm for sewer networks design” *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Shenyang, 3577-3583, (2014).



- Mansuri, M. R. and Khanjani, M. J., "Optimization of sewer networks using nonlinear method", *Journal of Water and Wastewater*, 20-30, (1999).
- Mayer, D., Kinghorn, B. and Archer, A., "Differential evolution - an easy and efficient evolutionary algorithm for model optimisation", *Agricultural Systems*, 83, 315-328, (2005).
- Mays, L. W. and Wenzel, H. G., "Optimal design of multilevel branching sewer systems", *Water Resources Research*, 12 (5), 913-917, (1976).
- Meredith, D. D., "Dynamic programming with case study on planning and design of urban water facilities", *Treatise on Urban Water Systems*, Colorado State University, Fort Collins, (1972).
- Miles, S. W. and Heaney, J. P., "Better than optimal method for designing drainage systems", *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 114 (5), 477-499, (1988).
- Moeini, R. and Afshar, M., "Layout and size optimization of sanitary sewer network using intelligent ants", *Advances in Engineering Software*, 51, 49-62, (2012).
- Moeini, R. and Afshar, M., "Arc based ant colony optimization algorithm for optimal design of gravitational sewer networks", *Ain Shams Engineering j.*, 8 (2), 207-223, (2016).
- Navin, P. K. and Mathur, Y. P., "Layout and component size optimization of sewer network using spanning tree and modified pso algorithm", *Water Resour Manage*, 30 (10), 3627-3643, (2016).
- Pan, T.-C. and Kao, J.-J., "GA-QP model to optimize sewer system design", *Journal of Environmental Engineering*, 135 (1), 17-24, (2009).
- Price, R. K., "Design of storm water sewers for minimum construction cost", *Proc. 1st International Conference on Urban Storm Drainage*, Southampton, United Kingdom, 636-647, (1978).
- Robinson, D. K. and Labadie, J. W., "Optimal design of urban storm water drainage system", *Int. Symposium on Urban Hydrology, Hydraulics and Sediment Control*, University of Kentucky, Lexington, KY, USA, 145-156, (1981).
- Samsunlu, A., *Su Getirme ve Kanalizasyon Yapılarının Projelendirilmesi*, İstanbul: Birsen Yayınevi, 6-90, (2012).

Setoodeh, M., "Optimal design of sewer networks", Master thesis, *Iran University of Science and Technology*, Iran, (2004).

Storn, R. and Price, K., "Differential evolution: A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces, *International Computer Science Institute*, Technical Report Tr-95-012, Berkeley, (1995).

Storn, R., "On the usage of differential evolution for function optimization ", *Biennial Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS)*, IEEE, 519-523, Berkeley, (1996).

Swamee, P. K. and Sharma, A. K., "Optimal design of a sewer line using linear programming", *Applied Mathematical Modelling*, 37 (6), 4430-4439, (2013).

Swamee, P. K., "Design of sewer line", *Journal of Environmental Engineering*, 127 (9), 776-781, (2001).

Villiers, N. d., Rooyen, G. C. and Middendorf, M., "Sewer network design: heuristic algorithm for hydraulic optimisation", *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 59 (3) 48-56, (2017).

Weng, H. T. and Liaw, S. L., "A sewer system optimization hydraulic design model", *Journal of Environmental Informatics*, 7 (2), 66-74, (2006).

Yeh, S.-F., Chu, C.-W., Chang, Y.-J. and Lin, M.-D., "Applying tabu search and simulated annealing to the optimal design of sewer networks", *Engineering Optimization*, 43 (2), 159-174, (2011).

## 7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Erhan TAN

Doğum Yeri ve Tarihi : Çine / 01.01.1991

Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta : erhan091@hotmail.com

İletişim Adresi : Zafer Mahallesi 137 Sokak No:6 Kat:3  
Efeler/AYDIN

### **Yayın Listesi :**

• Tan, E., Sadak, D., Ayvaz, M.T., “Kanalizasyon sistemlerinin diferansiyel evrim algoritması kullanılarak optimum tasarımı”, *Teknik Dergi*, 31 (5), 10229-10250, (2020).

• Tan, E., Sadak, D., Ayvaz, M.T., “Optimum design of storm sewer systems by using harmony search optimization approach”, *38<sup>th</sup> International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR) World Congress*, Panama, (2019).