

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

**SU DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE EK KLORLAMA
PLANLARININ SİMÜLASYON OPTİMİZASYON
MODELLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞERİFE GÖKÇE

DENİZLİ, ARALIK – 2014

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



**SU DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE EK KLORLAMA
PLANLARININ SİMÜLASYON OPTİMİZASYON
MODELLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞERİFE GÖKÇE

DENİZLİ, ARALIK - 2014

KABUL VE ONAY SAYFASI

Şerife GÖKÇE tarafından hazırlanan “Su Dağıtım Şebekelerinde Ek Klorlama Planlarının Simülasyon Optimizasyon Modelleri Kullanılarak Belirlenmesi” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 22.12.2014 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

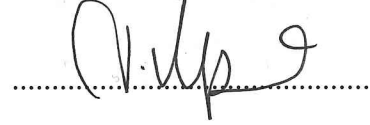
Jüri Başkanı, Üye

Prof. Dr. Habib MUHAMMETOĞLU
Akdeniz Üniversitesi



Danışman

Doç. Dr. Mustafa Tamer AYVAZ
Pamukkale Üniversitesi



Üye

Doç. Dr. Abdullah Cem KOÇ
Pamukkale Üniversitesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 31.12.2014 tarih ve ...49.16..... sayılı kararıyla onaylanmıştır..



Prof. Dr. Orhan KARABULUT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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.

ŞERİFE GÖKÇE



ÖZET

SU DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE EK KLORLAMA PLANLARININ SİMÜLASYON OPTİMİZASYON MODELLERİ KULLANILARAK

BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞERİFE GÖKÇE

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

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

DENİZLİ, ARALIK - 2014

Su dağıtım şebekelerinde dezenfeksiyon amacıyla klorlama işlemi yapılmaktadır. Bu işlemin etkin bir şekilde yapılabilmesi için şebeke boyunca her düğüm noktasındaki bakiye klor konsantrasyonlarının standartlarda belirtilen alt ve üst limit değerler arasında bulunması gerekmektedir. Pratikte klorlama işlemi genellikle depo veya arıtma tesisi gibi tek bir noktadan şebekeye klor eklenerek yapılmaktadır. Ancak, bu şekilde yapılan klorlama işlemi sonucunda klorun eklendiği nokta civarındaki klor konsantrasyonlarının yüksek olması, şebeke boyunca bu değerlerin giderek azalma eğilimine girmesi söz konusu olmaktadır. Bu durumun önüne geçebilmek için kullanılan en etkili yöntemlerden biri şebekeye tek bir noktadan klor enjekte etmek yerine ek klorlama istasyonlarının kurulmasıdır. Bu sayede şebeke boyunca daha uniform klor dağılımının elde edilmesi mümkün olmaktadır.

Bu çalışmanın amacı alt ve üst bakiye klor konsantrasyon limitlerini sağlayacak şekilde; su dağıtım şebekelerinde ek klorlama istasyonlarının yerlerinin ve şebekeye enjekte edilecek klor miktarlarının belirlenebildiği bir simülasyon-optimizasyon modeli geliştirmektir. Geliştirilen model simülasyon aşamasında düğüm noktalarında farklı ölçüm zamanlarındaki bakiye klor konsantrasyonlarını literatürde önerilmiş olan tepki matrisi yaklaşımı ile belirlemektedir. İlgili yaklaşımın kullanılabilmesi için gerekli tepki katsayıları incelenen su dağıtım şebekesinin hidrolik ve su kalitesi analizlerini yapılabildiği EPANET programı üzerinde modellenmesi ile belirlenmiştir. Geliştirilen simülasyon modeli ardından diferansiyel gelişim algoritmasına (DGA) dayanan bir optimizasyon modeline entegre edilerek farklı durumlar için ek klorlama planları belirlenmiştir. Ayrıca geliştirilen modelin farklı optimizasyon parametreleri ve mutasyon stratejileri bakımından performansının değerlendirildiği detaylı bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar geliştirilen model ile su dağıtım şebekelerinde ek klorlama istasyonlarının yerlerinin ve optimum klorlama planlarının etkin bir şekilde belirlenebildiğini göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Su Dağıtım Şebekeleri, Ek Klorlama İstasyonları, Simülasyon-Optimizasyon, Diferansiyel Gelişim Algoritması, EPANET

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE BOOSTER CHLORINATION PLANS IN WATER DISTRIBUTION NETWORKS USING SIMULATION OPTIMIZATION MODELS

MSC THESIS

ŞERİFE GÖKÇE

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING PROGRAM

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

DENİZLİ, DECEMBER - 2014

Disinfection of the water in distribution networks is usually performed by means of the chlorine injection. In order to perform this task efficiently, the residual chlorine concentrations for each consumer point must satisfy the residual chlorine limits specified in the standards. In practice, chlorination process is performed by means of the chlorine injection from a single point like the outlet of tank or treatment plants. However, such chlorination process results with high chlorine concentrations around the injection points whereas its value tends to gradually decrease towards the endpoints of the network. One of the most effective methods to prevent these effects is to establish the booster chlorination stations instead of chlorine injection at a single point. In this way, it is possible to obtain a more uniform chlorine distribution throughout the network.

The objective of this study is to develop a simulation-optimization model which can simultaneously determine the locations and chlorine injection rates of the booster stations by maintaining the lower and upper residual concentration limits. In the simulation part of the developed model, the residual chlorine concentrations at different junction points and times are calculated through the response matrix approach proposed in literature. In order to use this approach, the required response coefficients are determined by modeling the hydraulics and water quality processes of the network on EPANET model. The developed simulation model is then integrated to an optimization model in which Differential Evolution (DE) optimization algorithm is used to determine the chlorination for different conditions. Furthermore, a detailed sensitivity analysis is performed to evaluate the model performance for different optimization parameters and mutation strategies. Identified results indicated that the proposed model can be effectively used to determine the locations and chlorine injection rates of the booster stations in water distribution networks.

KEYWORDS: Water Distribution Networks, Booster Chlorination Stations, Simulation-Optimization, Differential Evolution Algorithm, EPANET.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Amaç ve Kapsam.....	1
1.2 Önceki Çalışmalar	3
1.3 Tezin Amacı	8
1.4 Tezin Organizasyonu.....	8
2. PROBLEMİN TANIMI	10
2.1 Giriş	10
2.2 Hidrolik Modelleme	10
2.3 Su Kalitesi Modellemesi	11
2.4 Alt ve Üst Limit Bakiye Klor Konsantrasyonları.....	13
2.5 Şebekeye Klor Ekleme Yöntemleri	13
2.5.1 Kütleli Enjeksiyon Yöntemi (Mass Booster).....	13
2.5.2 Bileşik Enjeksiyon Yöntemi (Flow Paced Booster)	14
2.5.3 Kontrollü Ekjeksiyon Yöntemi (Set - Point Booster).....	15
2.6 Doğrusal Süperpozisyon Prensipleri	16
2.6.1 Tepki Matrisinin Oluşturulması.....	17
3. MODEL GELİŞTİRİLMESİ	21
3.1 Giriş	21
3.2 Problem Formülasyonu	21
3.3 Optimizasyon Modeli	23
3.3.1 Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA).....	23
3.3.2 DGA için Farklı Mutasyon Stratejileri	26
3.4 Optimizasyon Modelinin Testi	29
4. MODEL UYGULAMASI	31
4.1 Giriş	31

4.2	Şebeke Bileşenleri	31
4.3	Şebekenin Hidrolik Davranışı	32
4.4	Enjeksiyon Zaman Adımı Sayısının 1 Olması Durumu için Çözüm .	37
4.5	Enjeksiyon Zaman Adımı Sayısının 4 Olması Durumu için Çözüm .	43
4.6	Sonuçların Karşılaştırılması	48
5.	DUYARLILIK ANALİZİ.....	50
5.1	Giriş	50
5.2	Farklı DGA Çözüm Parametreleri için Duyarlılık Analizi.....	50
5.3	Farklı Mutasyon Stratejileri İçin Duyarlılık Analizi	55
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	56
6.1	Sonuçlar.....	56
6.2	Öneriler.....	58
7.	KAYNAKLAR.....	59
8.	EKLER.....	65
	EK-A Doğrusal Süperpozisyon ile Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması.....	65
	EK-B De Jong'un 1. Test Fonksiyonu	71
	EK-C Rastrigin'in 6. Test Fonksiyonu	74
	EK-D Michalewicz'in 12. Test Fonksiyonu.....	77
	EK-E Goldstein-Price'in Test Fonksiyonu.....	81
	EK-F Schwefel'in 7. Test Fonksiyonu	84
	Ek-G Birim Konsantrasyon Değeri İçin Şebekenin Periyodik Yapısı	87
9.	ÖZGEÇMİŞ.....	108

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1: Kütlesel enjeksiyon yöntemi ile şebekeye klor ekleme (Propato, 2003).....	14
Şekil 2. 2: Bileşik enjeksiyon yöntemi ile klor ekleme (Propato, 2003).....	15
Şekil 2. 3: Cherry Hill-Brushy Plains su dağıtım şebekesi (Rossman, 2000) ...	18
Şekil 2. 4: Örnek durum için tepki katsayılarının hesaplanması; (a): 1 numaralı düğüm noktasından eklenen klor konsantrasyonu; (b): 22 numaralı düğüm noktasında ölçülen klor konsantrasyonu	19
Şekil 3. 1: Verilen bir optimizasyon probleminin DGA ile çözümü.....	27
Şekil 4. 1: Cherry Hill-Brushy Plains su dağıtım şebekesi bileşenleri	32
Şekil 4. 2: Şebekenin hidrolik davranışı	35
Şekil 4. 3: 7 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi.....	36
Şekil 4.4: Farklı ek klorlama istasyonu sayıları için elde edilen yakınsama grafikleri ($n_k = 1$)	38
Şekil 4. 5: (a): Birinci ve üçüncü altı saatlik zaman dilimi için akım yönleri; (b): İkinci ve dördüncü altı saatlik zaman dilimi için akım yönleri.....	42
Şekil 4. 6: Şebeke boyunca ortalama klor konsantrasyonlarının değişimi ($n_k = 1$)	43
Şekil 4. 7: Farklı ek klorlama istasyonu sayıları için elde edilen yakınsama grafikleri ($n_k = 4$)	44
Şekil 4. 8: Şebeke boyunca ortalama klor konsantrasyonlarının değişimi ($n_k = 4$)	48
Şekil 4. 9: $n_k = 1$ ve $n_k = 4$ için şebekeye eklenecek klor miktarlarının değişimi	49
Şekil 5. 1: Üretilen 30 veri seti için parametre değerlerinin değişimi	51
Şekil 5. 2: Duyarlılık analizi kapsamında tanımlanan CD değerinin hesaplanması	53

Şekil 5. 3: 30 parametre seti için hesaplanmış klor ağırlık merkezleri	53
Şekil 5. 4: 30 parametre seti için hesaplanan CD değerlerinin değişimi	54
Şekil B. 1: DE Jong'un 1. test fonksiyonu.....	71
Şekil B. 2: Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi	72
Şekil C. 1: Rastrigin'in 6. test fonksiyonu	74
Şekil C. 2: Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi	75
Şekil D. 1: Michalewicz'in 12. test fonksiyonu	77
Şekil D. 2: Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi.....	78
Şekil E. 1: Goldstein-Price'in test fonksiyonu	81
Şekil E. 2: Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi	82
Şekil F. 1: Schwefel'in 7. test fonksiyonu	84
Şekil F. 2: Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi	85
Şekil G. 1: 1 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	87
Şekil G. 2: 2 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	87
Şekil G. 3: 3 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	88
Şekil G. 4: 4 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	88
Şekil G. 5: 5 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	89
Şekil G. 6: 6 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	89
Şekil G. 7: 8 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	90
Şekil G. 8: 9 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	90
Şekil G. 9: 10 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	91
Şekil G. 10: 11 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	91
Şekil G. 11: 12 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	92

Şekil G. 12: 13 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	92
Şekil G. 13: 14 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	93
Şekil G. 14: 15 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	93
Şekil G. 15: 16 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	94
Şekil G. 16: 17 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	94
Şekil G. 17: 18 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	95
Şekil G. 18: 19 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	95
Şekil G. 19: 20 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	96
Şekil G. 20: 21 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	96
Şekil G. 21: 22 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	97
Şekil G. 22: 23 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	97
Şekil G. 23: 24 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	98
Şekil G. 24: 25 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	98
Şekil G. 25: Depo için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	99
Şekil G. 26: 27 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	99
Şekil G. 27: 28 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	100
Şekil G. 28: 29 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	100

Şekil G. 29: 30 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	101
Şekil G. 30: 31 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	101
Şekil G. 31: 32 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	102
Şekil G. 32: 33 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	102
Şekil G. 33: 34 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	103
Şekil G. 34:35 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	103
Şekil G. 35: 36 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	104
Şekil G. 36: A noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	104
Şekil G. 37: B noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	105
Şekil G. 38: C noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	105
Şekil G. 39: D noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	106
Şekil G. 40: E noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	106
Şekil G. 41: F noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi	107

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3. 1: Optimizasyon modelinin sonuçlarının değerlendirilmesi.....	30
Tablo 4. 1: Şebeke bileşenlerine ait veriler (Bocelli ve diğ., 1998).....	33
Tablo 4.2: Düğüm noktalarından çekilen debi miktarları (Bocelli ve diğ., 1998).....	34
Tablo 4.3: Düğüm noktalarına ve pompaya ait saatlik debi çarpanları (Bocelli ve diğ., 1998).....	35
Tablo 4. 4: $n_k = 1$ için belirlenen istasyon yerleri ve enjekte edilecek klor konsantrasyonları	39
Tablo 4. 5: Düğüm noktalarındaki bakiye klor konsantrasyonlarının istatistiksel özeti ve şebekeye eklenmesi gereken toplam klor miktarlarının karşılaştırılması ($n_k = 1$).....	41
Tablo 4. 6: $n_k = 4$ için belirlenen istasyon yerleri ve enjekte edilecek klor konsantrasyonları	45
Tablo 4. 7: Düğüm noktalarındaki bakiye klor konsantrasyonlarının istatistiksel özeti ve şebekeye eklenmesi gereken toplam klor miktarlarının karşılaştırılması ($n_k = 4$).....	47
Tablo 5. 1: Üretilen parametre değerlerinin istatistiksel özeti.....	51
Tablo 5. 2: Farklı mutasyon stratejileri için elde edilen sonuçlar	55
Tablo B. 1: Farklı DGA stratejileri için sonuçlar.....	73
Tablo C. 1: Farklı DGA stratejileri için elde edilen sonuçlar	76
Tablo D. 1: Farklı DGA stratejileri için elde edilen sonuçlar	79
Tablo E. 1: Farklı DGA stratejileri için elde edilen sonuçlar	83
Tablo F. 1: Farklı DGA stratejileri için elde edilen sonuçlar.....	86

SEMBOL LİSTESİ

N	:	Şebekedeki düğüm noktalarının sayısı
Q_{ij}	:	i ve j numaralı düğüm noktaları arasındaki akım debisi
D_i	:	i numaralı düğümünden çekilen akım debisi
H_i	:	i numaralı düğüm noktasının toplam enerji seviyesi
H_j	:	j numaralı düğüm noktasının toplam enerji seviyesi
h_{ij}	:	i ve j numaralı düğüm noktaları arasındaki toplam enerji kaybı
r	:	Direnç katsayısı
n'	:	hız/debi mertebesi
m	:	Yersel yük kayıp katsayısı
x	:	Mesafe
t	:	Zaman
C_i	:	i numaralı borudaki klor konsantrasyonu
v_i	:	i numaralı borudaki akım hızı
K_i	:	Reaksiyon terimi
k_b	:	Su kütlesi reaksiyon sabiti
k_w	:	Cidar reaksiyon sabiti
k_f	:	Kütle taşınım katsayısı
R_i	:	i numaralı borunun hidrolik yarıçapı
C_{out}	:	Düğüm noktasından çıkan bakiye klor konsantrasyon değeri
Q_i^{in}	:	i numaralı borudan düğüm noktasına giren akım debisi
C_i^{in}	:	i numaralı borudan düğüm noktasına giren bakiye klor konsantrasyon değeri
U	:	Ek klorlama istasyonundan birim zamanda şebekeye enjekte edilen klor miktarı
\hat{C}	:	Ek klorlama istasyonundan şebekeye eklenen klor konsantrasyonu

- C_s : Limit konsantrasyon değeri
- n_b : Ek klorlama istasyonlarının sayısı
- n_k : Ek klorlama istasyonlarından klor enjekte edilecek zaman adımı sayısı
- n_m : Bakiye klor konsantrasyonlarının kontrol edildiği düğüm noktalarının sayısı
- n_h : Konsantrasyon ölçümü yapılan zaman adımı sayısı
- k : Şebekeye klor enjeksiyonu yapılan zaman adımı sayısı
- m : Şebekeye klor enjeksiyonu yapılan zaman dilimi
- \hat{c}_i^k : i numaralı ek klorlama istasyonundan k numaralı zaman adımında şebekeye enjekte edilen klor konsantrasyonu
- $\alpha_{i,j}^{k,m}$: Tepki katsayısı
- \tilde{Q}_i^k : i numaralı ek klorlama istasyonunun bulunduğu düğüm noktasından k numaralı zaman adımında akış doğrultusu boyunca çıkan toplam akım debisini
- t_{ij} : i numaralı düğüm noktasından j numaralı düğüm noktasına suyun ulaşma süresi
- u_i^k : i numaralı düğüm noktasından k numaralı zaman adımında eklenen klor miktarı
- V_j^m : j numaralı düğüm noktasından m zaman diliminde çekilen toplam su hacmi
- V : Hidrolik çevrim süresince çekilen toplam su hacmi
- Q_j^m : j numaralı düğüm noktasından m zaman diliminde çekilen debi
- Δt : Zaman adımı uzunluğu
- c_j^{\min} : j numaralı düğüm noktası için müsaade edilebilir minimum klor konsantrasyonu
- c_j^{\max} : j numaralı düğüm noktası için müsaade edilebilir maksimum klor konsantrasyonu
- p : Popülasyon sayısı

C_r : Çaprazlama olasılığı
 F : Ölçek katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

- AA** : Armoni Araştırması
- DGA** : Diferansiyel Gelişim Algoritması
- DP** : Doğrusal Programlama
- GA** : Genetik Algoritma
- KKO** : Karınca Kolonisi Optimizasyonu
- PSO** : Parçacık Sürü Optimizasyonu
- TDP** : Tam Sayılı Doğrusal Programlama
- YBA** : Yapay Bağışıklık Algoritması
- YSA** : Yapay Sinir Ağları

ÖNSÖZ

Lisans ve 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 hoşgörüsünden dolayı tez danışmanım Doç. Dr. Mustafa Tamer AYVAZ'a,

Tez jürimde yer alan Prof. Dr. Habib MUHAMMETOĞLU'na ve Doç. Dr. Abdullah Cem KOÇ'a,

Her zaman yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

1.1 Amaç ve Kapsam

Su dağıtım şebekelerinde insan sağlığı göz önünde bulundurulduğunda kullanılan su kalitesinin mümkün olduğunca yüksek tutulması amaçlanmaktadır. Kalitenin artırılması suyun içindeki patojen mikroorganizmaların en alt seviyeye indirilmesi ile mümkündür. Bu nedenle, su kalitesini artırmaya yönelik klorlama, kloraminlerle dezenfeksiyon, ozonlama, ultraviyole ışınlarla dezenfeksiyon gibi farklı şekillerde dezenfeksiyon işlemleri uygulanmaktadır. Dezenfeksiyon süreci kendi içerisinde birincil ve ikincil dezenfeksiyon olarak iki aşamaya ayrılmaktadır. Birincil dezenfeksiyonun temel amacı su içerisindeki bakteri ve virüs gibi mikroorganizmaları yok etmektir. İkincil dezenfeksiyonda ise dezenfektan olarak kullanılan maddenin şebeke kapsamında tüm düğüm noktaları ve ölçüm zamanlarında yönetmeliklerde belirtilmiş olan alt ve üst limit değerler arasında kalmasının sağlanmasıdır. (Chlorine and Alternative Disinfectants Guidance Manual, 2005).

Dünyada ve ülkemizde su dağıtım şebekelerinde dezenfeksiyon yöntemleri arasında en yaygın olarak tercih edilen yöntemlerden biri klorlama ile dezenfeksiyon işlemidir. Klorun düşük maliyetli olması ve hem birincil hem de ikincil dezenfektan olarak kullanılabilmesi yaygın olarak tercih edilmesinin temel nedenini oluşturmaktadır. Klorlama ile dezenfeksiyon işleminin etkin bir şekilde yapılabilmesi için şebeke boyunca tüm düğüm noktalarındaki ve tüm ölçüm zamanlarındaki serbest bakiye klor konsantrasyonlarının standartlarda belirtilen alt ve üst limit değerler arasında bulunması ve şebeke boyunca mümkün olduğunca üniform bir klor dağılımının elde edilmesi gerekmektedir. Limit değerlerin altında bakiye klor konsantrasyonlarının bulunması halinde dezenfeksiyon işlemi tam olarak sağlanamamaktadır. Limit değerlerin üstündeki konsantrasyon değerlerinde ise klorun ana su kütlesi ile tepkimesinden açığa çıkan ve kanserojen etkiye sahip yan ürünler oluşmaktadır. Ayrıca klorun boru çeperindeki ince film tabakasıyla tepkimeye

girmesine bağlı olarak da çeşitli yan ürünler oluşabilmektedir (Bocelli ve diğ. 1998). Bununla beraber, şebeke boyunca farklılık gösteren konsantrasyon değerleri tat ve koku gibi kalite problemlerine de yol açabilmektedir. Bu nedenle şebeke içerisindeki bakiye klor konsantrasyonunun verilen limitler dahilinde bulunması ve mümkün olduğunca üniform dağılım göstermesi gerekmektedir.

Su dağıtım şebekelerinde klorlama işlemi genellikle depo veya arıtma tesisi gibi tek bir noktadan şebekeye klor eklenerek yapılmaktadır. Ancak, bu şekilde yapılan klorlama işlemi sonucunda enjeksiyon yapılan nokta civarındaki bakiye klor konsantrasyonlarının yüksek olması, buna karşın şebeke boyunca bu değerlerin giderek azalma eğilimine girmesi ve verilen limit değerlerin altına düşmesi söz konusu olmaktadır. Bu etkilerin önüne geçebilmek için kullanılan en etkili yöntem tek bir noktadan şebekeye klor enjekte etmek yerine şebekenin farklı noktalarına yerleştirilen ek klorlama istasyonları kullanılarak bu işlemin yapılmasıdır. Ek klorlama istasyonlarından şebekeye klor enjekte edilmesiyle, hem şebeke boyunca daha üniform klor dağılımının elde edilmesi mümkün olmakta hem de daha az klor ile verilen bakiye konsantrasyon koşullarının sağlanması mümkün olabilmektedir. Daha genel anlamda, ek klorlama istasyonları aşağıda verilen dört ana amacın sağlanması amacıyla kullanılmaktadır:

- i) şebekeye enjekte edilen toplam klor miktarının minimize edilmesi;
- ii) Aşırı klor eklenmesi sonucunda oluşan kanserojen nitelikteki yan ürünlerin miktarının minimize edilmesi;
- iii) Ek klorlama istasyonlarının toplam yatırım ve işletme maliyetinin minimize edilmesi;
- iv) Düğüm noktalarından yönetmeliklerde belirtilen konsantrasyon limitleri kapsamında temin edilen “kaliteli su” miktarının maksimize edilmesi.

Bu amaçlar doğrultusunda karar verici merciler tarafından cevaplanması gereken bazı teknik sorular bulunmaktadır. Bu sorular sırasıyla şu şekilde verilebilir:

- i) şebekeye toplam kaç adet ek klorlama istasyonu kurulmalıdır?
- ii) Bu istasyonlar şebekenin hangi bölgelerine yerleştirilmelidir?

- iii) Minimum klor miktarı ile verilen konsantrasyon sınırlarının sağlanacağı en iyi enjeksiyon planı ne olmalıdır?

Cevaplanması gereken bu teknik sorular kapsamında şebeke boyunca ek klorlama istasyonlarının, yerlerinin ve optimum klorlama planlarının belirlenmesi literatürde ve pratikte güncelliğini koruyan önemli bir konudur. Bu nedenle bu tez çalışması kapsamında belirtilen problemin çözümüne yönelik simülasyon-optimizasyon modellerine dayanan bir çözüm yaklaşımı geliştirilmesi amaçlanmıştır.

1.2 Önceki Çalışmalar

Literatürde ek klorlama istasyonlarının sayılarının, yerlerinin ve optimum klorlama planlarının optimizasyon teknikleri ile belirlenmesine yönelik çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda ilgili problemin çözümü yaygın olarak deterministik karakterdeki doğrusal programlama (DP) (Bocelli ve diğ., 1998; Sert, 2009), tamsayılı doğrusal programlama (TDP) (Tryby ve diğ., 2002), doğrusal en küçük kareler formülasyonu (Propato ve Uber, 2004^a) gibi çözüm yaklaşımları kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca, genetik algoritma (GA) (Munavalli ve Mohan Kumar, 2003; Ostfeld ve Salomons, 2010; Özdemir ve Uçaner, 2005; Pektürk, 2010; Ayvaz ve Kentel, 2014), yapay bağışıklık algoritması (YBA) (Chu ve diğ., 2008), karınca kolonisi optimizasyonu (KKO) (Wang ve Guo, 2010), parçacık-sürü optimizasyonu (PSO) (Wang ve diğ., 2010) gibi sezgisel optimizasyon teknikleri de ilgili problemin çözümünde kullanılmıştır.

Ek klorlama istasyonlarının optimizasyon modelleri ile çözümüne yönelik yapılmış çalışmalardan en önemlilerinden biri Bocelli ve diğ. (1998) tarafından gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışma kapsamında düğüm noktalarının tümünde verilen bakiye klor konsantrasyon limitlerinin sağlanması koşulu ile önceden belirlenmiş istasyon yerlerinden eklenen klor miktarının minimize edilebileceği bir DP modeli geliştirilmiştir. İlgili çalışmada ayrıca, klorun su ve boru cidarındaki ince film tabakası ile birinci mertebeden tepkimeye girmesi durumunda düğüm noktalarında hesaplanan bakiye klor konsantrasyonlarının, eklenen klor miktarı ile doğrusal bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu ilişki gereği, şebekeye her bir istasyondan belirli bir zaman diliminde enjekte edilen klor miktarı ile bu enjeksiyon işlemi

sonucunda düğüm noktalarında oluşan konsantrasyon değerleri arasındaki oran “tepki matrisi” adı verilen bir matris içinde saklanmakta ve farklı çözümler için doğrusal süperpozisyon prensibine göre değerlendirme yapılmaktadır. Bu sayede, eklenen klor miktarı için şebekenin su kalitesi tepkisi, konu ile ilgili diferansiyel denklemlerin şebeke boyunca çözümüne gerek kalmadan belirlenebilmektedir.

Bocelli ve diğ. (1998)’nin bir uzantısı olarak Tryby ve diğ. (2002) ise ek klorlama istasyonlarının yerlerini de tamsayılı karar değişkeni olarak tanımlamış ve bu istasyonlardan şebekeye eklenecek klor miktarları ile birlikte TDP tabanlı bir çözüm yaklaşımı ile belirlemiştir. İlgili çözüm kapsamında karar değişkenleri hem sürekli hem de ayrık nitelikte olduğu için problemin çözümünde dal-sınır (branch-and-bound) çözüm tekniği kullanılmış ve farklı istasyon sayıları için belirlenen klor miktarlarının değişimi belirlenmiştir.

Propato ve Uber (2004^a), Bocelli ve diğ. (1998) tarafından incelenen problemi bir doğrusal en küçük kareler problemi olarak ifade etmiş ve düğüm noktalarında ölçülen konsantrasyon değerlerinin standartlarda belirtilen seviyelerde tutacak şekilde DP ile ilgili problemin çözümünü gerçekleştirmiştir. Önerilen doğrusal en küçük kareler formülasyonu kapsamında geliştirilen DP modelindeki kısıt sayısı şebekedeki düğüm noktası sayısından bağımsız olduğu için büyük su dağıtım şebekelerinin optimizasyon modelleri kapsamında makul bilgi-işlem sürelerinde çözülebilmesi sağlanmıştır.

Propato ve Uber (2004^b)’de ise yine ilgili problem bir doğrusal en küçük kareler problemi olarak ifade edilmiş; ayrıca ek klorlama istasyonlarının yerleri tamsayılı karar değişkeni olarak tanımlanarak ilgili problem kuadratik programlamaya dayanan bir çözüm yaklaşımı ile çözülmüştür. Sonuç olarak farklı istasyon sayıları için şebekenin bakiye klor konsantrasyonları bakımından göstermiş olduğu tepki belirlenmiştir.

Sert (2009) tarafından ek klorlama planlarının belirlenmesine yönelik DP tabanlı bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiş ve şebeke içinde başlangıç klor konsantrasyonlarının sıfır olmaması durumu için doğrusal süperpozisyon prensibinin düzenlenmesi yapılmıştır.

Köker (2011) kapsamında ise Sert (2009) tarafından incelenen problemin olasılık sınırlamalı optimizasyon yaklaşımı kapsamında çözümü için bir DP modeli oluşturulmuştur. İlgili çalışma kapsamında, düğüm noktalarında ölçülen klor konsantrasyonlarıdaki rastgelelik çeşitli olasılık dağılım fonksiyonları ile ifade edilmiş ve verilen sınırlar dahilinde şebeke boyunca daha düzgün klor dağılımlarının elde edilmesi amaçlanmıştır.

Yukarıda verilen çalışmalarda ilgili problemin çözümü geleneksel optimizasyon modelleri kullanılarak yapılmıştır. Bu kapsamda klorun su ve boru cidarı üzerindeki ince film tabakası ile birinci mertebeden tepkimeye girdiği dikkate alınmış ve ilgili problem için global optimum çözümler etkin bir şekilde belirlenmiştir. Ancak, birinci mertebeden tepkime kabulünün geçerli olmaması durumunda ilgili problem doğrusal olarak ifade edilemeyeceği için problemin çözümünde doğrusal süperpozisyon yaklaşımının ve DP tabanlı geleneksel yöntemlerin kullanılması mümkün olamamaktadır. Bu kapsamda ilgili problemin çözümünde doğrusal olmayan optimizasyon teknikleri kullanılabilir. Ancak, bu yaklaşımlarla global optimum çözümün bulunması büyük oranda matematiksel çözüm uzayının şekline bağlı olduğundan özellikle konveks olmayan çözüm uzayları için elde edilen sonuçların kalitesi büyük oranda başlangıç çözümüne bağlı olmaktadır (Arora, 2004). Bu nedenle, son yıllarda sezgisel optimizasyon tekniklerinin su dağıtım şebekeleri ile ilgili problemlerin çözümü amacıyla kullanımı yaygınlık kazanmıştır. Sezgisel optimizasyon tekniklerinin en önemli avantajı özel bir başlangıç çözümüne ve herhangi bir gradyan bilgisine gerek kalmadan global ya da global optimuma yakın sonuçları elde edebilmesidir. Bu kapsamda sezgisel optimizasyon tekniklerinin su dağıtım şebekelerinin hidrodinamik ve su kalitesi tepkilerinin belirlenebildiği simülasyon modelleri ile entegre kullanımı yaygınlık kazanmıştır.

Literatürde sezgisel optimizasyon teknikleri ile su dağıtım şebekelerinde ek klorlama planlarının belirlenmesine yönelik bazı çalışmalar bulunmaktadır. Munavalli ve Mohan Kumar (2003) su dağıtım sistemlerinde ek klorlama planlarının belirlenmesi amacıyla GA tabanlı bir çözüm yaklaşımı geliştirmiştir. Geliştirilen yaklaşımda düğüm noktalarında ölçülen konsantrasyon değerleri ile müsaade edilebilir minimum konsantrasyon değeri arasındaki hataların karelerinin toplamı

amaç fonksiyonu olarak tanımlanmış ve üç farklı şebeke üzerinde model performansı test edilmiştir.

Prasad ve diğ. (2004)'de ek klorlama istasyonlarının yerlerinin ve enjeksiyon planlarının belirlenebildiği çok amaçlı bir GA modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen GA modelinin birinci amacı eklenen toplam klor miktarının minimize edilmesi iken ikinci amacı verilen konsantrasyon limitleri kapsamında temin edilen “kaliteli su” miktarının maksimize edilmesi olarak tanımlanmıştır. İlgili çalışma kapsamında farklı istasyon sayıları için problemin çözümü yapılmış ve her iki amacı sağlayan en iyi çözüm belirlenmeye çalışılmıştır.

Özdemir ve Uçaner (2005)'de ise Prasad ve diğ. (2004) kapsamında geliştirilen çok amaçlı optimizasyon probleminin klasik GA optimizasyon tekniği ile çözümü yapılmış ve toplam “kaliteli su” miktarı ile şebekeye verilen klor miktarı aynı amaç fonksiyonu içinde ele alınmıştır.

Ostfelt ve Solomons (2010)'da GA optimizasyon tekniğini kullanarak ek klorlama istasyonları ile ilgili iki farklı optimizasyon modeli formülize edilmiştir. Birinci modelin amacı şebekenin toplam pompaj maliyeti ile ek klorlama istasyonlarının yatırım ve işletme maliyetlerinin minimize edilmesi olarak tanımlanırken ikinci model düğüm noktalarında ölçülen klor konsantrasyonlarının müsaade edilebilir üst limite yaklaştırarak maksimum korunabilirliğin sağlanmasını amaçlamaktadır.

Pektürk (2010)'da ek klorlama istasyonlarının sayılarının, yerlerinin ve enjeksiyon planlarının belirlenebildiği iyileştirilmiş bir GA modeli önerilmiştir. Önerilen modelin performansı bazı sentetik şebekelerde ve Antalya ilinin Konyaaltı bölgesindeki gerçek bir şebeke üzerinde test edilmiş ve iyileştirilmiş GA ile klasik GA'dan daha iyi sonuçlar elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Soyupak ve diğ. (2011)'de yapay sinir ağlarına (YSA) dayanan bir çözüm yaklaşımı kullanılarak Antalya/Konyaaltı bölgesine ait su dağıtım şebekesi için serbest bakiye klor konsantrasyon değerlerinin belirlenebildiği bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir.

Behzadian ve diğ. (2012)'de ise çok amaçlı GA çözüm tekniği kullanılarak iki farklı optimizasyon probleminin çözümü yapılmıştır. Birinci problemin amacı verilen istasyon sayısı için tanımlanan kısıtlar dahilinde şebekeden temin edilen “kaliteli su” miktarını maksimize ve eklenen klor miktarını minimize edecek şekilde ek klorlama istasyonlarının yerlerinin belirlenmesidir. İkinci problemde ise birinci problem kapsamında belirlenen önemli istasyon yerleri için şebeke içindeki fazla klor miktarından dolayı kanserojen nitelikteki yan ürün olarak oluşan trihalometan’lı su miktarının minimize edilmesi ve verilen kısıtlar dahilinde şebekeden temin edilen “kaliteli su” miktarının maksimize edilmesi amaçlanmıştır.

Gokce ve Ayvaz (2014^a)’da sezgisel armoni araştırması (AA) optimizasyon tekniği kullanılarak verilen bir su dağıtım şebekesindeki “kaliteli su” miktarının maksimize edilmesi ve eş zamanlı olarak yerleri önceden bilinen ek klorlama istasyonlarından şebekeye enjekte edilen klor miktarlarının minimize edilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen çözüm yaklaşımının performansı farklı optimizasyon parametreleri kullanılarak test edilmiştir.

Gokce ve Ayvaz (2014^b) kapsamında diferansiyel gelişim algoritması (DGA) ile ek klorlama istasyonlarının yerlerinin bilinmemesi halinde istasyonlardan eklenmesi gereken klor miktarının müsaade edilebilir alt ve üst limitler arasında kalması sağlanacak şekilde minimize edilmesi ve aynı zamanda kaliteli su miktarının maksimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmanın bir devamı olarak Gökçe ve Ayvaz (2014^c)’da ise geliştirilen AA ve DGA tabanlı optimizasyon modellerinin ek klorlama optimizasyon problemlerinin çözümündeki performansı değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar detaylı olarak literatürde verilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Ayvaz ve Kentel (2014)’de ise hibrit GA-DP tabanlı bir optimizasyon yaklaşımı geliştirilmiş ve su dağıtım şebekelerinde ek klorlama istasyon sayılarının ve ilgili istasyonlardan şebekeye enjekte edilen klor miktarlarının eş zamanlı olarak minimize edilmesi amaçlanmıştır. İki farklı amacın aynı fonksiyonda ifade edilmesi aşamasında hangi çözümün daha iyi olduğunun belirlenmesi amacıyla ayrıca bulanık mantık tabanlı bir karar verme modeli geliştirilmiş ve farklı durumlar için model performansı detaylı olarak test edilmiştir.

Yukarıda verilen çalışmalar genel hatlarıyla incelendiğinde ilgili problemin çoğunlukla GA tabanlı optimizasyon modelleri ile çözülmüş olduğu görülmektedir. İlgili çalışmalar kapsamında ağırlıklı olarak GA'nın kullanılmasının nedeni diğer optimizasyon teknikleri ile karşılaştırıldığında global optimum ya da global optimuma yakın sonuçların GA ile etkin bir şekilde belirlenebilmesidir. Bu kapsamda GA'dan farklı ve onun kadar etkili optimizasyon tekniklerinden biri de ilk olarak Price ve Storn (1995) tarafından geliştirilen Diferansiyel Gelişim Algoritması'dır (DGA). GA gibi popülasyon tabanlı bir sezgisel optimizasyon tekniği olan DGA, rastgele seçilen bireylere GA'da olduğu gibi mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörleri uygulanarak yeni bireyler elde edilmesine dayanmaktadır. Günümüzde bilimin farklı alanlarını kapsayan pek çok problemin çözümünde kullanılmış olan DGA'nın bu çalışma kapsamında su dağıtım şebekeleri için ek klorlama planlarının belirlenmesine yönelik ilk kez kullanılması amaçlanmıştır.

1.3 Tezin Amacı

Bu çalışma kapsamında ek klorlama istasyonlarının şebeke üzerindeki yerlerinin ve her bir istasyondan enjekte edilecek toplam klor miktarlarının farklı istasyon sayıları için belirlenebildiği bir simülasyon-optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model, simülasyon aşamasında belirlenen klorlama planı için düğüm noktalarındaki bakiye klor konsantrasyon değerlerini Bocelli ve diğ. (1998) tarafından önerilen doğrusal süperpozisyon prensibi ile belirlemektedir. Bu ilişkinin kullanılabilmesi için gerekli tepki katsayıları ilgili şebekeye ait hidrolik ve su kalitesi süreçlerinin Amerikan Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından geliştirilen EPANET (Rossman, 2000) modelinde gerçekleştirilmesi ile elde edilmiştir. Elde edilen tepki matrisi ardından DGA tabanlı bir optimizasyon modeline entegre edilmiş ve farklı işletme senaryoları, istasyon sayıları, çözüm parametreleri ve optimizasyon stratejileri için geliştirilen modelin performansı test edilmiştir.

1.4 Tezin Organizasyonu

Bu çalışma kapsamında yapılan işlemler Bölüm 1 dışında beş farklı ana bölüm altında incelenmiştir.

Bölüm 2’de ilgili problemin tanımı yapılmış ve klorun hidrolik ve su kalitesi süreçlerinin modellenmesi kapsamında şebeke içerisindeki taşınımı hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca, düğüm noktalarında ölçülen bakiye klor konsantrasyonları ile ek klorlama istasyonlarından enjekte edilen klor miktarı arasındaki doğrusal ilişkinin tepki matrisi yaklaşımı ile nasıl belirlenebildiğinden bahsedilmiştir.

Bölüm 3’de tepki matrisi yaklaşımının geliştirilen simülasyon modeli kapsamında nasıl kullanıldığından bahsedilmiştir. Ayrıca optimizasyon modeli kapsamında kullanılan DGA hakkında detaylı bilgi verilmiş simülasyon modelinin DGA tabanlı optimizasyon modeline nasıl entegre edildiği detaylı olarak verilmiştir.

Bölüm 4’de geliştirilen simülasyon-optimizasyon modelinin uygulaması gerçek bir şebeke üzerinde yapılmış ve farklı durumlar ve ek klorlama istasyon sayıları için elde edilen sonuçlar literatürde verilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Bölüm 5’de farklı DGA çözüm parametrelerinin ve stratejilerinin sonuçların duyarlılığı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla detaylı bir duyarlılık analizi yapılmış ve modelin performansı test edilmiştir.

Son olarak Bölüm 6’da çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve gerekli öneriler sunulmuştur.

2. PROBLEMİN TANIMI

2.1 Giriş

Bu çalışma kapsamında geliştirilen simülasyon-optimizasyon modeli, hidrolik davranışı bilinen bir şebeke için en uygun klorlama planının çıkarılmasını ve şebekeye kurulması gereken ek klorlama istasyonlarının yerlerini belirlemeyi amaçlamaktadır. İlgili problemin bilgisayar ortamında modellenebilmesi için öncelikle şebekedeki hidrolik ve su kalitesi süreçlerinin benzeşiminin yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda aşağıdaki bölümlerde öncelikle ilgili süreçlerin matematiksel olarak nasıl ifade edildiğinden bahsedilmiş, ardından bu matematiksel süreçlerin EPANET modeli ile nasıl modellendiğine değinilmiştir. Son olarak, geliştirilen model kapsamında şebeke boyunca su kalitesi değişiminin “tepki matrisi” yaklaşımı ile nasıl belirlendiği detaylı olarak açıklanmıştır.

2.2 Hidrolik Modelleme

Hidrolik modelleme, verilen bir su dağıtım şebekesi için hidrodinamik akım sürecinin benzeşiminin şebeke bileşenlerine (düğüm noktaları, pompalar, depolama tankları, borular, vanalar, vb.) ait bilgiler kullanılarak yapılması olarak tanımlanmaktadır (Sert, 2009). Bu kapsamda ilgili benzeşimin yapılabilmesi için düğüm noktalarında süreklilik ve gözlerde enerji denklemlerinin çözülerek kütle ve enerjinin korunumu prensiplerinin şebeke boyunca sağlanması gerekmektedir. Bu kapsamda düğüm noktalarında sağlanması gereken süreklilik denklemi aşağıda verilmiştir (Rossman, 2000):

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.1)$$

burada N , şebekedeki düğüm noktalarının sayısını; Q_{ij} , i ve j numaralı düğüm noktaları arasındaki akım debisini; D_i ise i numaralı düğümünden çekilen akım

debisini göstermektedir. Akış kolu boyunca ardışık iki düğüm noktası arasında hesaplanan toplam yük kaybı ise aşağıdaki gibi verilmektedir (Rossman, 2000):

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^{n'} + mQ_{ij}^2 \quad (2.2)$$

burada H_i ve H_j sırasıyla i ve j numaralı düğüm noktaları için hesaplanan toplam hidrolik yük seviyelerini; h_{ij} , i ve j numaralı düğüm noktaları arasında hesaplanan toplam yük kaybını; r , sürekli yük kaybının hesaplanmasında kullanılan boru özelliklerini içeren direnç katsayısını; n' sürekli yük kaybının hesabında kullanılan hız/debi mertebesini; m ise yersel yük kayıp katsayısını ifade etmektedir. Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, bu çalışma kapsamında Denklem (2.1) ve (2.2)'nin şebeke boyunca el ile çözümünü yapmak yerine ilgili süreçlerin EPANET modeli kullanılarak benzeşimi yapılmış ve verilen zaman periyodu için şebekenin hidrodinamik tepkisi belirlenmiştir.

2.3 Su Kalitesi Modellemesi

Hidrolik modelleme sürecinin tamamlanmasının ardından dikkate alınması gereken diğer bir husus su kalitesindeki değişimin şebeke boyunca belirlenmesidir. Şebekelerde yaygın bir dezenfektan madde olarak kullanılan klor, bir düğüm noktasından diğerine doğru hidrolik modelleme sonucu belirlenmiş olan toplam yük seviyeleri ile ilişkili olacak şekilde taşınmaktadır. Şebeke hidroliğinin zaman içindeki değişimi ve klorun boru içinde çeşitli tepkimelere bağlı olarak bozulması sonucunda ilgili düğüm noktalarında hesaplanan bakiye klor konsantrasyonları zaman içinde değişim göstermektedir. Su dağıtım şebekelerinde boru uzunluğu boyunca taşınım süreci ağırlıklı olarak gözlendiğinden dolayı sadece advectif taşınım dikkate alınmakta ve dispersif taşınım süreci ihmal edilmektedir. Bu kapsamda herhangi bir zaman dilimi için şebeke içinde klorun taşınımı aşağıda verilen bir boyutlu adveksiyon-reaksiyon denkleminin bağı olarak gerçekleştirilmektedir (Rossman, 2000):

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -v_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + K_i C_i \quad (2.3)$$

burada x , boru uzunluğu boyunca ölçülen mesafeyi; t , zamanı; C_i , i numaralı boruda x mesafesi ve t zamanındaki bakiye klor konsantrasyonunu; v_i , i numaralı borudaki akım hızını; K_i ise toplam reaksiyon terimini ifade etmektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri klorun boru boyunca Denklem (2.3) kapsamında taşınırken hem şebeke içindeki ana su kütlesi ile hem de boru cidarı yakınında bulunan ve su içinde çözülmüş çeşitli maddelerin bulunduğu ince film tabakası ile tepkimeye girdiğidir. Bu kapsamda Denklem (2.3)'de verilen K_i terimi bu iki tepkime sürecini de aşağıda verildiği şekilde içermektedir (Rossman, 2000):

$$K_i = k_b + \frac{k_w k_f}{R_i (k_w + k_f)} \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'ün sağ tarafında bulunan birinci terim klorun boru içindeki ana su kütlesi; ikinci terim ise boru cidarındaki ince film tabakası ile girmiş olduğu tepkime süreçlerini göstermektedir. Bu terimlerde verilen k_b , ana su kütlesi reaksiyon sabitini; k_w , cidar reaksiyon sabitini; k_f , kütle taşınım katsayısını; R_i ise i numaralı borunun hidrolik yarıçapını göstermektedir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli nokta klorun su içinde ana su kütlesi ile girmiş olduğu reaksiyonun daha baskın bir şekilde gözlenmesinden dolayı k_b sabitinin daha baskın olduğudur. Bu değer şebekedeki ek klorlama istasyonu sayısının artmasına bağlı olarak azalsa da yapılan çözümlerde k_b değerinin sabit olduğu kabul edilmiştir. Denklem (2.3)'ün analitik veya sayısal olarak çözülmesiyle boru uzunluğu boyunca bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi belirlenebilmektedir. Şebekedeki düğüm noktalarındaki bakiye klor konsantrasyonları ise düğüm noktaları ile bağlantılı borularda hesaplanan klor konsantrasyonlarının borulardaki debilerle orantılı olarak paylaşılması şeklinde belirlenmektedir (Rossman, 2000).

2.4 Alt ve Üst Limit Bakiye Klor Konsantrasyonları

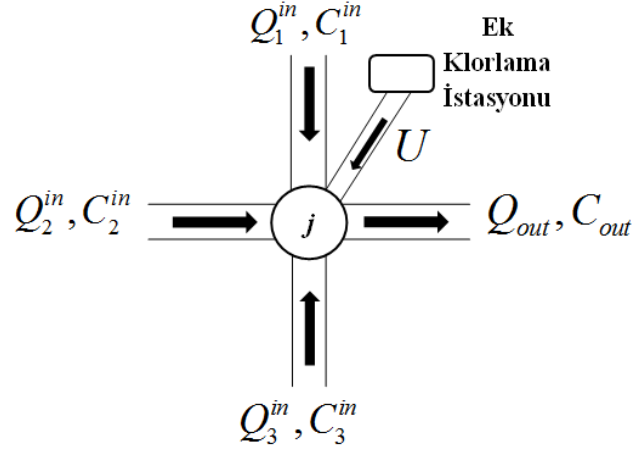
Klorun dezenfektan olarak etkili olabilmesi ve sağlık bakımından her hangi bir risk oluşturmaması için standartlar ile belirtilen alt ve üst limit konsantrasyon değerlerin şebeke boyunca sağlanması gereklidir. Dünya Sağlık Örgütü tarafından şebeke içinde klorun sahip olması gereken limit konsantrasyon değerleri 0.2 – 0.5 mg/L arasında olabileceği önerilmiştir. (World Health Organization, 2013). Ayrıca, içme ve kullanma sularının dezenfeksiyonunda klor kullanılması halinde su talep noktalarından alınan numunelerde serbest bakiye klor konsantrasyonunun 0.2-0.5 mg/L arasında olması gerektiği Resmi Gazete (2013)'de belirtilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde ise alt ve üst limit değerlerin Amerikan Çevre Koruma Ajansı tarafından önerilmiş olan 0.2 – 4 mg/L aralığında değişim gösterdiği görülmektedir (EPA, 2014) ve bu çalışma kapsamında da bu aralık yapılan tüm çözümlerde kullanılmıştır.

2.5 Şebekeye Klor Ekleme Yöntemleri

Su dağıtım şebekelerine ek klorlama istasyonlarından üç farklı besleme yöntemi kullanılarak şebekeye klor enjeksiyonu yapılmaktadır: kütleli enjeksiyon (mass booster), bileşik enjeksiyon (flow-paced booster), kontrollü enjeksiyon (set-point booster). Her bir besleme mekanizması detaylı olarak aşağıda açıklanmıştır:

2.5.1 Kütleli Enjeksiyon Yöntemi (Mass Booster)

Kütleli enjeksiyon yöntemi, sabit kütledeki klorun ilgili düğüm noktasındaki debi ve/veya klor konsantrasyon değerlerine bakılmaksızın şebekeye enjekte edilmesi şeklinde tanımlanmaktadır. Bu süreç Şekil 2.1'de gösterildiği şekilde olmaktadır (Propato, 2003):



Şekil 2. 1: Kütlesel enjeksiyon yöntemi ile şebekeye klor ekleme (Propato, 2003)

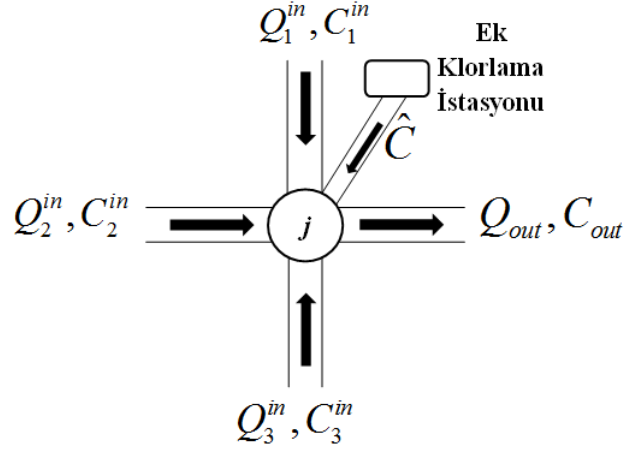
Ek klorlama istasyonunun bulunduğu düğüm noktasının çıkışındaki bakiye klor konsantrasyonu aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Sert, 2009):

$$C_{out} = \frac{\sum_i Q_i^{in} C_i^{in} + U}{\sum_i Q_i^{in}} \quad (2.5)$$

Burada C_{out} , düğüm noktasından çıkan bakiye klor konsantrasyon değerini [ML^{-3}]; Q_i^{in} , i numaralı borudan ilgili düğüm noktasına giren akım debisini [L^3T^{-1}]; C_i^{in} , i numaralı borudan ilgili düğüm noktasına giren bakiye klor konsantrasyon değerini [ML^{-3}]; U , ek klorlama istasyonundan birim zamanda şebekeye enjekte edilen klor miktarını [MT^{-1}] temsil etmektedir.

2.5.2 Bileşik Enjeksiyon Yöntemi (Flow Paced Booster)

Bileşik enjeksiyon yönteminde, klor ek klorlama istasyonundan şebekeye belli bir konsantrasyon değerine sahip bileşik şekilde eklenmektedir (Şekil 2.2). Bu durum için ek klorlama istasyonunun bulunduğu düğüm noktasından çıkan bakiye klor konsantrasyonu aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Sert, 2009):



Şekil 2. 2: Bileşik enjeksiyon yöntemi ile klor ekleme (Propato, 2003)

$$C_{out} = \frac{\sum_i Q_i^{in} C_i^{in}}{\sum_i Q_i^{in}} + \hat{C} \quad (2.6)$$

burada \hat{C} , ilgili ek klorlama istasyonundan şebekeye eklenen klor konsantrasyonunu $[ML^{-3}]$ göstermektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan tüm çözümlmelerde bileşik enjeksiyon yöntemi ile klorlama yapıldığı kabul edilmiştir.

2.5.3 Kontrollü Ekjeksiyon Yöntemi (Set - Point Booster)

Bu klor ekleme yönteminde bir kontrol mekanizması geliştirilerek klor enjeksiyonu gerçekleştirilir. Bu kapsamda ek klorlama istasyonunun bulunduğu düğüm noktasında ölçülen bakiye klor konsantrasyonu verilen bir limit değerden yüksek ise herhangi bir işlem yapılmamakta; buna karşın ilgili değerden daha düşükse şebekeye Denklem (2.7)'de belirtildiği şekilde klor enjekte edilmektedir (Sert, 2009).

$$C_{out} = \begin{cases} C_s & \text{eğer } C_m < C_s \\ C_m & \text{eğer } C_m \geq C_s \end{cases} \quad (2.7)$$

Burada $C_m = \sum Q_i^{in} C_i^{in} / \sum Q_i^{in}$ ilgili düğüm noktası için debi ağırlıklı olarak hesaplanmış bakiye klor konsantrasyon değerini $[ML^{-3}]$; C_s ise verilen limit konsantrasyon değerini $[ML^{-3}]$ ifade etmektedir.

2.6 Doğrusal Süperpozisyon Prensibi

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi bu çalışma kapsamında klor taşınım sürecinin modellenmesinde EPANET modeli kullanılmıştır. EPANET, Amerikan Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından basınçlı boru sistemleri için hidrolik ve su kalitesi simülasyonlarının gerçekleştirilmesi amacıyla geliştirilen bir bilgisayar programıdır. İlgili program kapsamında ayrıca “EPANET Programmer’s Toolkit” isimli bir geliştirme aracı da bulunmaktadır. Bu araç kullanılarak EPANET içerisindeki pek çok fonksiyona farklı programlama dillerinden ulaşılması ve optimizasyon modelleri ile EPANET’in entegre kullanımı mümkün olabilmektedir. İlgili modelleme işleminin EPANET kullanılarak yapılmasıyla herhangi bir düğüm noktasından herhangi bir zaman diliminde şebekeye enjekte edilen klor miktarı için düğüm noktalarında, verilen ölçüm zamanlarındaki bakiye klor konsantrasyonları belirlenebilmektedir. Ancak, geliştirilen simülasyon-optimizasyon modeli kapsamında optimizasyon modelinin her bir hesap adımında EPANET tabanlı simülasyon modelinin çağırılması ve belirlenen klorlama planı için şebekenin hidrolik ve su kalitesi tepkisinin belirlenmesi özellikle büyük şebekeler için zaman alıcı bir süreç olduğundan bu şekildeki bir modelleme yaklaşımı ile çözüme ulaşmak uzun bilgi işlem süreleri gerektirmektedir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında EPANET tabanlı simülasyon modelini doğrudan kullanmak yerine Bocelli ve diğ. (1998) tarafından ek klorlama planlarının belirlenmesi amacıyla önerilmiş olan tepki matrisi yaklaşımı kullanılmıştır. Daha önceden belirtildiği gibi Bocelli ve diğ. (1998) yapmış oldukları çalışmada; klorun su ile birinci mertebeden tepkimeye girmesi durumunda düğüm noktalarında ölçülen klor konsantrasyonları ile belli bir noktadan şebekeye verilen klor miktarları arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ve bu kapsamda doğrusal süperpozisyon prensibinin kullanılabilceğini belirtmiştir. Bu yaklaşıma göre, bileşik enjeksiyon yöntemi kullanılarak m numaralı zaman diliminde j numaralı düğüm noktasındaki bakiye klor konsantrasyon değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$c_j^m = \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{k=1}^{n_k} \hat{c}_i^k \alpha_{i,j}^{k,m} \quad j=1,2,3,\dots,n_m, \quad m=t,\dots,t+n_h-1 \quad (2.8)$$

burada n_b , ek klorlama istasyonlarının sayısını; n_k , ek klorlama istasyonlarından klor enjekte edilecek zaman adımı sayısını; n_m , bakiye klor konsantrasyonlarının kontrol edildiği düğüm noktalarının sayısını; n_h , konsantrasyon ölçümü yapılan zaman adımı sayısını; \hat{c}_i^k , i numaralı ek klorlama istasyonundan k numaralı zaman adımında şebekeye enjekte edilen klor konsantrasyonunu [ML^{-3}]; $\alpha_{i,j}^{k,m}$, $\alpha_{i,j}^{k,m} = \partial c_j^m / \partial \hat{c}_i^k$ bağıntısına göre hesaplanan tepki katsayısını ifade etmektedir. Bu kapsamda $\alpha_{i,j}^{k,m}$ tepki katsayıları EPANET ile belirlenen düğüm noktalarından eklenen klor miktarlarına bağlı olarak hesaplanmıştır.

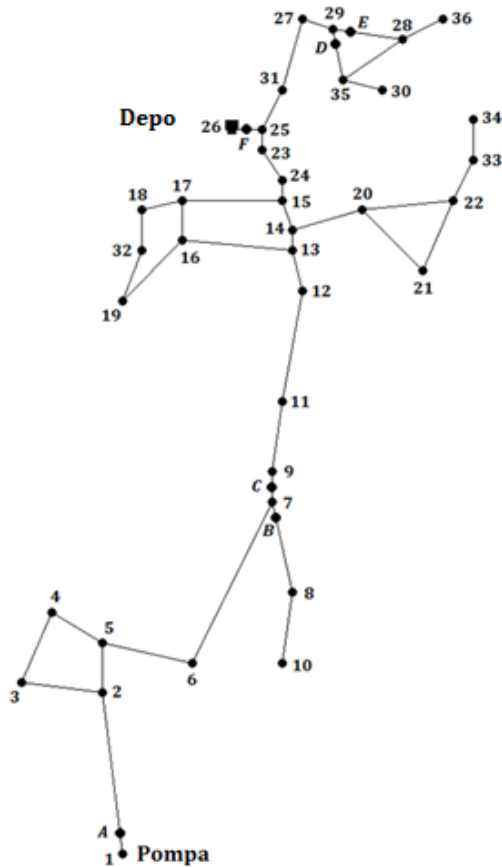
2.6.1 Tepki Matrisinin Oluşturulması

Denklem (2.8)'de i numaralı ek klorlama istasyonundan k numaralı zaman adımında şebekeye \hat{c}_i^k konsantrasyonunda klor eklenmesi durumunda j numaralı düğüm noktasında m numaralı ölçüm zamanı için bakiye klor konsantrasyonunun nasıl hesaplandığı gösterilmiştir. Örnek olarak, şebekeye iki ek klorlama istasyonundan ($n_b = 2$) 24 saatlik zaman periyodunun her 6 saattinde ($n_k = 4$) bileşik enjeksiyon yöntemi ile klor enjekte edildiği dikkate alındığında toplam klor enjeksiyon vektörü aşağıda verildiği şekilde ifade edilmektedir:

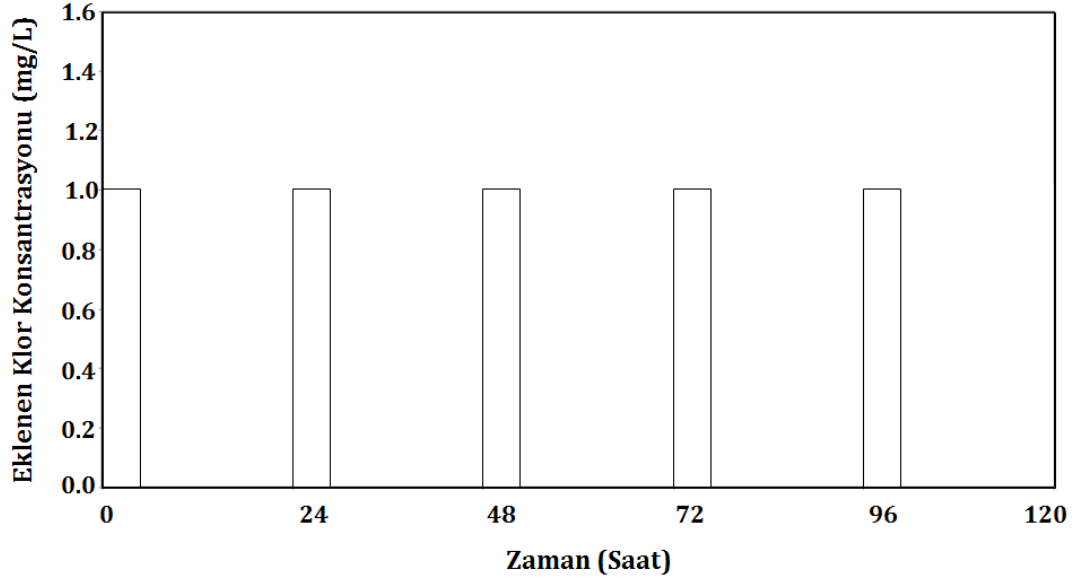
$$\hat{\mathbf{c}} = [\hat{c}_1^1, \hat{c}_1^2, \hat{c}_1^3, \hat{c}_1^4, \hat{c}_2^1, \hat{c}_2^2, \hat{c}_2^3, \hat{c}_2^4] \quad (2.9)$$

Toplam klor enjeksiyon vektörünün oluşturulmasının ardından $\hat{\mathbf{c}}$ vektörünün tüm bileşenlerine sıfır konsantrasyon değeri atanmaktadır. Ardından, 1 numaralı ek klorlama istasyonunun 1 numaralı zaman dilimi için $\hat{c}_1^1 = 1 \text{ mg/L}$ olacak şekilde bir konsantrasyon miktarı kabul edilmekte ve ilgili problemin EPANET üzerinde sayısal çözümü yapılmaktadır. Bu duruma örnek olarak çalışma kapsamında kullanılan ve

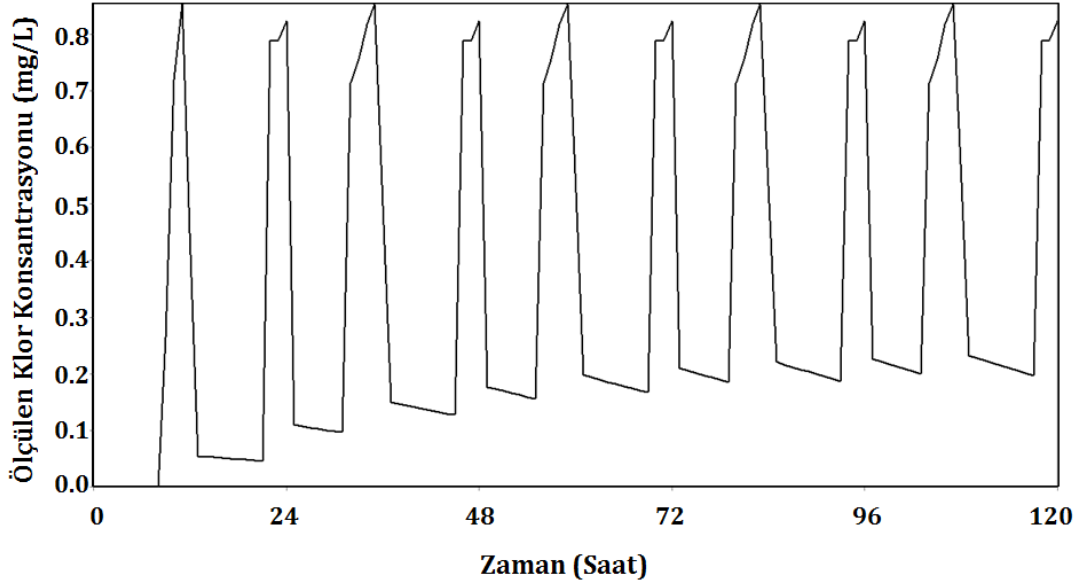
planı Şekil 2.3'te verilen şebeke için 120 saatlik simülasyon süresinde sisteme 1 numaralı düğüm noktasından enjekte edilen klor konsantrasyonu için 22 numaralı düğüm noktasında ölçülen bakiye klor konsantrasyonlarının değişimi Şekil 2.4'te verilmiştir. Şekil 2.4'den görüleceği gibi düğüm noktalarındaki bakiye klor konsantrasyon değerleri başlangıçta sıfır olarak kabul edilmiş ve yapılan enjeksiyonun etkisi yaklaşık olarak 10 saatlik zaman dilimi sonrasında kendini göstermiştir. Sistemin bakiye klor konsantrasyonu bakımından periyodik hale gelmesi ise yaklaşık olarak 60 saatlik zaman dilimi sonunda gözlenmiştir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri, Bocelli ve diğ. (1998)'de belirtildiği gibi tepki katsayılarının hesaplanmasında sistemin bakiye klor konsantrasyonları bakımından periyodik davranış göstermesi gerektiğidir. Ancak bu koşulun sağlanmasının ardından tepki matrisi yaklaşımı ile gerçekte karşılaşılan durumun benzeşimi yapılabilmektedir.



Şekil 2. 3: Cherry Hill-Brushy Plains su dağıtım şebekesi (Rossman, 2000)



(a)



(b)

Şekil 2. 4: Örnek durum için tepki katsayılarının hesaplanması; (a): 1 numaralı düğüm noktasından eklenen klor konsantrasyonu; (b): 22 numaralı düğüm noktasında ölçülen klor konsantrasyonu

Bu aşamadan sonra Denklem (2.9)'da verilen \hat{c} vektörünün diğer bileşenleri için de aynı işlemler yapılarak tüm durumlar için bakiye klor konsantrasyonları hesaplanmaktadır. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli nokta, ek klorlama istasyonlarından birim miktarda klor enjekte edildiği ve bunun sonucunda düğüm noktalarında bakiye klor konsantrasyon değerlerinin elde edildiğidir. Bu nedenle $\alpha_{i,j}^{k,m} = \partial c_j^m / \partial \hat{c}_i^k$ ilişkisi gereği elde edilen bakiye konsantrasyon değerleri doğrudan

ilgili durum için hesaplanmış olan tepki katsayılarına eşittir. Sonuç olarak yukarıda verilen örnek kapsamında şebekede $n_m = 36$ adet düğüm noktası olması ve 120 saatlik simülasyon süresinin son 24 saatlik ölçüm dilimi (97-120'nci saatler arası) dikkate alınması durumu için hesaplanan tepki katsayıları matris formunda aşağıda verildiği şekilde elde edilmektedir:

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1}^{1,97} & \alpha_{1,1}^{2,97} & \alpha_{1,1}^{3,97} & \alpha_{1,1}^{4,97} & \alpha_{2,1}^{1,97} & \alpha_{2,1}^{2,97} & \alpha_{2,1}^{3,97} & \alpha_{2,1}^{4,97} \\ \alpha_{1,1}^{1,98} & \alpha_{1,1}^{2,98} & \alpha_{1,1}^{3,98} & \alpha_{1,1}^{4,98} & \alpha_{2,1}^{1,98} & \alpha_{2,1}^{2,98} & \alpha_{2,1}^{3,98} & \alpha_{2,1}^{4,98} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{1,1}^{1,120} & \alpha_{1,1}^{2,120} & \alpha_{1,1}^{3,120} & \alpha_{1,1}^{4,120} & \alpha_{2,1}^{1,120} & \alpha_{2,1}^{2,120} & \alpha_{2,1}^{3,120} & \alpha_{2,1}^{4,120} \\ \alpha_{1,2}^{1,97} & \alpha_{1,2}^{2,97} & \alpha_{1,2}^{3,97} & \alpha_{1,2}^{4,97} & \alpha_{2,2}^{1,97} & \alpha_{2,2}^{2,97} & \alpha_{2,2}^{3,97} & \alpha_{2,2}^{4,97} \\ \alpha_{1,2}^{1,98} & \alpha_{1,2}^{2,98} & \alpha_{1,2}^{3,98} & \alpha_{1,2}^{4,98} & \alpha_{2,2}^{1,98} & \alpha_{2,2}^{2,98} & \alpha_{2,2}^{3,98} & \alpha_{2,2}^{4,98} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{1,2}^{1,120} & \alpha_{1,2}^{2,120} & \alpha_{1,2}^{3,120} & \alpha_{1,2}^{4,120} & \alpha_{2,2}^{1,120} & \alpha_{2,2}^{2,120} & \alpha_{2,2}^{3,120} & \alpha_{2,2}^{4,120} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{1,36}^{1,97} & \alpha_{1,36}^{2,97} & \alpha_{1,36}^{3,97} & \alpha_{1,36}^{4,97} & \alpha_{2,36}^{1,97} & \alpha_{2,36}^{2,97} & \alpha_{2,36}^{3,97} & \alpha_{2,36}^{4,97} \\ \alpha_{1,36}^{1,98} & \alpha_{1,36}^{2,98} & \alpha_{1,36}^{3,98} & \alpha_{1,36}^{4,98} & \alpha_{2,36}^{1,98} & \alpha_{2,36}^{2,98} & \alpha_{2,36}^{3,98} & \alpha_{2,36}^{4,98} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{1,36}^{1,120} & \alpha_{1,36}^{2,120} & \alpha_{1,36}^{3,120} & \alpha_{1,36}^{4,120} & \alpha_{2,36}^{1,120} & \alpha_{2,36}^{2,120} & \alpha_{2,36}^{3,120} & \alpha_{2,36}^{4,120} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Denklem (2.10)'da verilen tepki matrisinin elde edilmesinden sonra herhangi bir düğüm noktası ve ölçüm zamanı için bakiye klor konsantrasyonu Denklem (2.8) kullanılarak hesaplanabilmektedir. Örnek olarak 2 numaralı düğüm noktasında 120'nci saat için bakiye klor konsantrasyonu aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$c_2^{120} = \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^4 \hat{c}_i^k \alpha_{i,2}^{k,120} \quad (2.11)$$

İncelenen bu örnek uygulama kapsamında Bocelli ve diğ. (1998) tarafından önerilen doğrusal süperpozisyon (tepki matrisi) prensibinin verdiği sonuçlarla aynı problemin doğrudan EPANET ile çözülmesiyle elde edilen sonuçlar Ek-A'da karşılaştırılmıştır.

3. MODEL GELİŞTİRİLMESİ

3.1 Giriş

Bu bölümde öncelikle geliştirilen simülasyon-optimizasyon modeli kapsamında kullanılan matematiksel formülasyon açıklanmış ardından optimizasyon modeli kapsamında kullanılan DGA hakkında bilgi verilmiştir. Son olarak optimizasyon modelinin performansı farklı test fonksiyonları üzerinde test edilmiş ve sonuçlar detaylı olarak değerlendirilmiştir.

3.2 Problem Formülasyonu

Su dağıtım şebekelerinde zaman içerisinde düğüm noktalarından çekilen su miktarının farklı olması ve klorun su içinde ayrışmasından dolayı standartların sağlanması amacıyla şebekeye verilen klor miktarı sürekli olarak değişim göstermektedir. Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, ek klorlama istasyonlarının kurulmasının amacı şebekeye eklenmesi gereken klor miktarını minimum düzeyde tutarak limit değerler sağlanacak şekilde mümkün olduğunca üniform bir klor dağılımı elde etmektir. Bu nedenle şebekeye eklenecek klor miktarının minimize edilerek belirlenmesinin yanında klorun şebekeye ekleneceği zaman dilimlerinin de belirlenerek uygun klorlama planının oluşturulması gerekmektedir. Bu problemin çözümü bütün bu amaçların aynı matematiksel formülasyon kapsamında ifade edilmesi ile mümkündür.

Su dağıtım şebekelerinde ek klorlama istasyonlarının yerlerinin ve klorlama planlarının belirlenmesi problemi matematiksel olarak bir optimizasyon modeli kurularak çözülebilmektedir. Geliştirilen optimizasyon modelinin amacı yukarıda belirtildiği gibi şebekeye klor enjeksiyonu yapılacak olan potansiyel ek klorlama istasyonlarının yerlerinin belirlenerek, belli zaman dilimlerinde şebekeye eklenecek klor miktarının verilen alt ve üst limitler dahilinde olacak şekilde mümkün olduğunca

minimize edilmesidir. Bu problem matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir: (Gokce ve Ayvaz, 2014^a, Gokce ve Ayvaz, 2014^b)

$$z = \max(\omega_1 f_1 - \omega_2 f_2) \quad (3.1)$$

$$f_1 = \frac{\sum_{m=t}^{t+n_h-1} \sum_{j=1}^{n_m} V_j^m}{V} \times 100 \quad (3.2)$$

$$V_j^m = \begin{cases} Q_j^m \Delta t & \text{eğer } c_j^{\min} \leq c_j^m \leq c_j^{\max} \text{ ise} \\ 0 & \text{aksi halde} \end{cases} \quad j = 1, 2, 3, \dots, n_m \quad m = t, \dots, t + n_h - 1 \quad (3.3)$$

$$f_2 = \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{k=1}^{n_k} \hat{c}_i^k \tilde{Q}_i^k \quad (3.4)$$

burada V_j^m , j numaralı düğüm noktasından m zaman diliminde çekilen toplam su hacmini; V , bir hidrolik çevrim süresince çekilen toplam su hacmini; Q_j^m , j numaralı düğüm noktasından m zaman diliminde çekilen debiyi; Δt , zaman adımı uzunluğunu; \tilde{Q}_i^k , i numaralı ek klorlama istasyonunun bulunduğu düğüm noktasından k numaralı zaman adımında akış doğrultusu boyunca çıkan toplam akım debisini [$L^3 T^{-1}$]; c_j^{\min} ve c_j^{\max} j numaralı düğüm noktası için müsaade edilebilir minimum ve maksimum klor konsantrasyon değerlerini [ML^{-3}] ifade etmektedir.

Denklem (3.1)'den görüleceği gibi maksimize edilecek amaç fonksiyonu değeri (z) iki alt fonksiyon değerinden (f_1 ve f_2) oluşmaktadır. Birinci fonksiyon olarak tanımlanan f_1 , verilen konsantrasyon limitlerini sağlayacak şekilde şebekeden çekilecek toplam “kaliteli su” hacminin şebekeden çekilen toplam su hacmine oranı olarak tanımlanmış ve yüzdelik olarak hesaplanan bu değer maksimize edilmesi amaçlanmıştır. İkinci fonksiyon olarak tanımlanan f_2 ise ek klorlama istasyonlarından şebekeye enjekte edilen toplam klor miktarının zamanla değişimini

[MT^{-1}] göstermekte olup optimizasyon modeli kapsamında bu değerin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Bu iki amaç fonksiyonu doğası gereği birbirinden farklı olduğu için matematiksel ağırlıklarını yaklaşık olarak dengeleyebilmek için her iki fonksiyon ω_1 ve ω_2 ağırlık katsayıları ile çarpılmışlardır. Yapılan denemeler sonucunda her iki fonksiyonun yaklaşık olarak aynı mertebeye sahip olabilmeleri amacıyla tüm çözümlerde $\omega_1 = 1$ ve $\omega_2 = 0.01$ olarak alınmıştır. Bu aşamadan sonra Denklem (2.8)'de verilen tepki matrisi yaklaşımı ile Denklem (3.3)'de verilen konsantrasyon değerlerinin hesaplanıp verilen limit konsantrasyon değerleri ile karşılaştırılması sonucu ilgili problemin çözümü mümkün olabilmektedir.

3.3 Optimizasyon Modeli

3.3.1 Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA)

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, bu çalışma kapsamında su dağıtım şebekelerinde ek klorlama planlarının belirlenmesinde DGA tabanlı bir optimizasyon modeli kullanılmıştır. Storn ve Price (1995) tarafından geliştirilen DGA, genel işleyiş ve hesaplama mantığı bakımından GA ile büyük benzerlikler taşımasına rağmen DGA'nın GA'dan en büyük farkı ilgili problemin ikilik sayı dizileri yerine onluk sayı dizileri ile kodlanarak çözülebilmesidir. GA'da kullanılan mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörleri DGA'da da kullanılmaktadır. Ancak, GA'dan farklı olarak popülasyondaki tüm bireyler (kromozom) bu operatörler tarafından işlem görmektedir (Keskintürk, 2006). Bu amaçla her bir birey, rastgele olarak seçilen başka üç bireye sırasıyla mutasyon ve çaprazlama operatörü uygulanarak elde edilen yeni birey ile karşılaştırılmakta ve amaç fonksiyonu değerleri bakımından daha iyi olan birey seçim operatörü kullanılarak bir sonraki jenerasyona aktarılmaktadır. Bu işlemin verilen durma koşulu sağlanıncaya kadar uygulanmasıyla global optimum bakımından etkin sonuçlar elde edilebilmektedir. Diğer sezgisel optimizasyon teknikleri ile karşılaştırıldığında DGA'nın en büyük avantajları yerel optimum çözümlere yakalanma olasılığının düşük olması ve programlanabilirliğinin kolay olmasıdır. Matematiksel olarak DGA ile bir optimizasyon probleminin çözümü aşağıdaki hesap adımlarına göre yapılmaktadır:

p popülasyondaki birey (çözüm vektörü) sayısını, n karar değişkeni sayısını, $\mathbf{x}_i = \left[x_{ij} \right]_{i=1}^p \left| \right|_{j=1}^n$ optimizasyon modeli ile belirlenecek n boyutlu çözüm vektörünü, G jenerasyon indisini, $\mathbf{x}_{i,G} = \left[x_{i,G}^j \right]_{i=1}^p \left| \right|_{j=1}^n$ belirlenecek karar değişkeni değerlerini içeren çözüm vektörünü, $\mathbf{x}_{\min} = \left\{ x_{\min}^j \right\}_{j=1}^n$ ve $\mathbf{x}_{\max} = \left\{ x_{\max}^j \right\}_{j=1}^n$ sırasıyla karar değişkenlerinin alt ve üst sınırlarını içeren çözüm vektörlerini göstermek üzere i numaralı aday çözüm içinde bulunan j numaralı karar değişkeninin $G=0$ numaralı iterasyondaki başlangıç değeri aşağıdaki eşitliğe bağlı olarak üretilmektedir:

$$x_{i,0}^j = x_{\min}^j + r(0,1) \times (x_{\max}^j - x_{\min}^j) \quad (3.5)$$

burada $r(0,1)$ değeri 0 ile 1 arasında değişen üniform rastgele sayıyı göstermektedir. Bu aşamadan sonra, mutasyon operatörü kullanılarak $\mathbf{x}_{i,G}$ vektöründen yeni bir çözüm vektörü $\mathbf{v}_{i,G} = \left[v_{i,G}^j \right]_{i=1}^p \left| \right|_{j=1}^n$ üretilir. Mutasyon işlemi popülasyonda benzer bireylerin artışı önlemek, çeşitliliği artırmak ve bir sonraki nesile daha güçlü bireylerin aktarılmasını sağlamak amacıyla uygulanır. Bu bağlamda popülasyondaki kromozomları oluşturan genler değişikliğe uğratılır. Optimizasyon algoritmasında ise bu işlem problemin yerel minimum veya yerel maksimum takılmasının önüne geçerek problemin istenilen amaç doğrultusunda en iyi çözüme gitmesini sağlamak amacıyla uygulanmaktadır. Optimizasyon algoritmasında daha güçlü bireyi temsilen, uygunluk değeri en iyi olan kromozomun (vektör) ağırlıklı olarak bir sonraki popülasyona aktarılma olasılığı daha yüksek olmaktadır. Literatürde, $\mathbf{v}_{i,G}$ vektörünün üretilmesi için önerilen çeşitli farklı mutasyon stratejileri bulunmaktadır. Bu stratejiler arasından en yaygın kullanılanlardan biri (DE/rand/1) stratejisi olup, bu strateji kullanılarak $\mathbf{v}_{i,G}$ vektörü aşağıdaki şekilde üretilir:

$$\mathbf{v}_{i,G} = \mathbf{x}_{r_1^i,G} + F \left(\mathbf{x}_{r_2^i,G} - \mathbf{x}_{r_3^i,G} \right) \quad (3.6)$$

burada r_k^i ($k=1,2,3$) değerleri $[1, p]$ çözüm aralığında rastgele üretilmiş tamsayıları; F ise değeri 0 ile 1 arasında değişen ölçek katsayısını göstermektedir. Denklem 3.6'dan görüldüğü gibi popülasyondan rastgele seçilmiş olan r_1 , r_2 ve r_3 kromozomlarından rastgele ikisinin farkı alınmakta bu fark kromozomu F ölçek katsayısı ile çarpılmaktadır. Daha sonra ölçek katsayısıyla çarpılmış olan fark kromozomu yine rastgele seçilmiş olan üçüncü bir kromozomla toplanarak yeni bir birey oluşturulmakta ve bu birey $\mathbf{v}_{i,G}$ vektörü olarak ifade edilmektedir. Bu aşamadan sonra, başlangıçta üretilen $\mathbf{x}_{i,G}$ ve mutasyon sonucu üretilen $\mathbf{v}_{i,G}$ vektörleri kullanılarak çaprazlama operatörü ile $\mathbf{u}_{i,G} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{u}_{i,G}^j & \mathbf{v}_{i,G}^j \\ \hline \mathbf{x}_{i,G}^j & \mathbf{v}_{i,G}^j \end{array} \right]_{i=1}^p \Big|_{j=1}^n$ vektörü aşağıdaki gibi üretilir:

$$\mathbf{u}_{i,G}^j = \begin{cases} \mathbf{v}_{i,G}^j & \text{eğer } r_j(0,1) \leq C_r \text{ veya } j = j_{rand} \\ \mathbf{x}_{i,G}^j & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (3.7)$$

burada C_r , çaprazlama oranını; j_r ise popülasyon içinden rastgele seçilen bir bireyi göstermektedir. Denklem (3.7)'ye göre, n adet uniform rastgele sayı üretilmekte ve bu sayıların değerleri C_r olasılık değeri ile karşılaştırılmaktadır. $r_j(0,1) \leq C_r$ ($j=1,2,3,\dots,n$) koşulunun sağlanması durumunda $\mathbf{u}_{i,G}$ vektörünün j numaralı elemanı $\mathbf{v}_{i,G}$ vektöründen, aksi halde ise $\mathbf{x}_{i,G}$ vektöründen seçilmektedir. $j = j_r$ koşulu en az bir tane değer üretilen yeni kromozomdan seçilmesini garanti etmek amacıyla konulmuştur (Keskintürk, 2006). Bu aşamadan sonra bir sonraki jenerasyona hangi kromozomun aktarılacağına karar verilmesi gerekmektedir. Bu işlem seçim operatörü ile amaç fonksiyonu değerlerine bağlı olarak aşağıdaki şekilde yapılmaktadır:

$$\mathbf{x}_{i,G+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_{i,G} & \text{eğer } f(\mathbf{u}_{i,G}) \leq f(\mathbf{x}_{i,G}) \\ \mathbf{x}_{i,G} & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (3.8)$$

Denklem (3.8)'de $f(\mathbf{u}_{i,G})$ ve $f(\mathbf{x}_{i,G})$ sırasıyla $\mathbf{u}_{i,G}$ ve $\mathbf{x}_{i,G}$ çözüm vektörleri için hesaplanan amaç fonksiyonu değerlerini göstermektedir. Görüleceği gibi, amaç

fonksiyonu değeri bakımından daha iyi olan birey bir sonraki jenerasyona aktarılmakta ve bu sayede de çözümün kalitesi arttırılmaktadır. Böylece mevcut ebeveynlerin bir sonraki nesile doğrudan aktarılmasının önüne geçilmiş olup bir sonraki nesile iyi (baskın) özelliklerinin aktarılması sağlanmaktadır. Bu da istenilen amaç doğrultusunda çeşitliliğin artmasını sağlamaktadır. DGA kullanılarak Denklem (3.6) ile (3.8) arasında verilen çözüm yaklaşımının kullanıcı tarafından önceden seçilmiş olan durma koşulu sağlanıncaya kadar tekrar edilmesiyle global optimum bakımından etkin çözümler elde edilebilmektedir.

DGA kullanılarak verilen örnek bir optimizasyon probleminin adım adım nasıl çözüldüğü Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Schmidt ve Thierauf (2005)’dan uyarlanan ve Şekil 3.1’de verilen bu çözüm $f(x) = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5$ fonksiyonunun $x_i \in [0,1]$ ($i=1,2,\dots,5$) çözüm aralığı dikkate alınarak çözülmesiyle elde edilmiştir. Görüleceği gibi optimizasyon döngüsü sırasında yeni popülasyon havuzu Denklem (3.6) ile (3.8) arasında verilen genetik süreçler kapsamında oluşturulmaktadır.

3.3.2 DGA için Farklı Mutasyon Stratejileri

Literatürde, yukarıda bahsedilen DE/rand/1 stratejisinin dışında tanımlanmış olan pek çok mutasyon stratejisi bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanlar aşağıdaki özetlenmiştir:

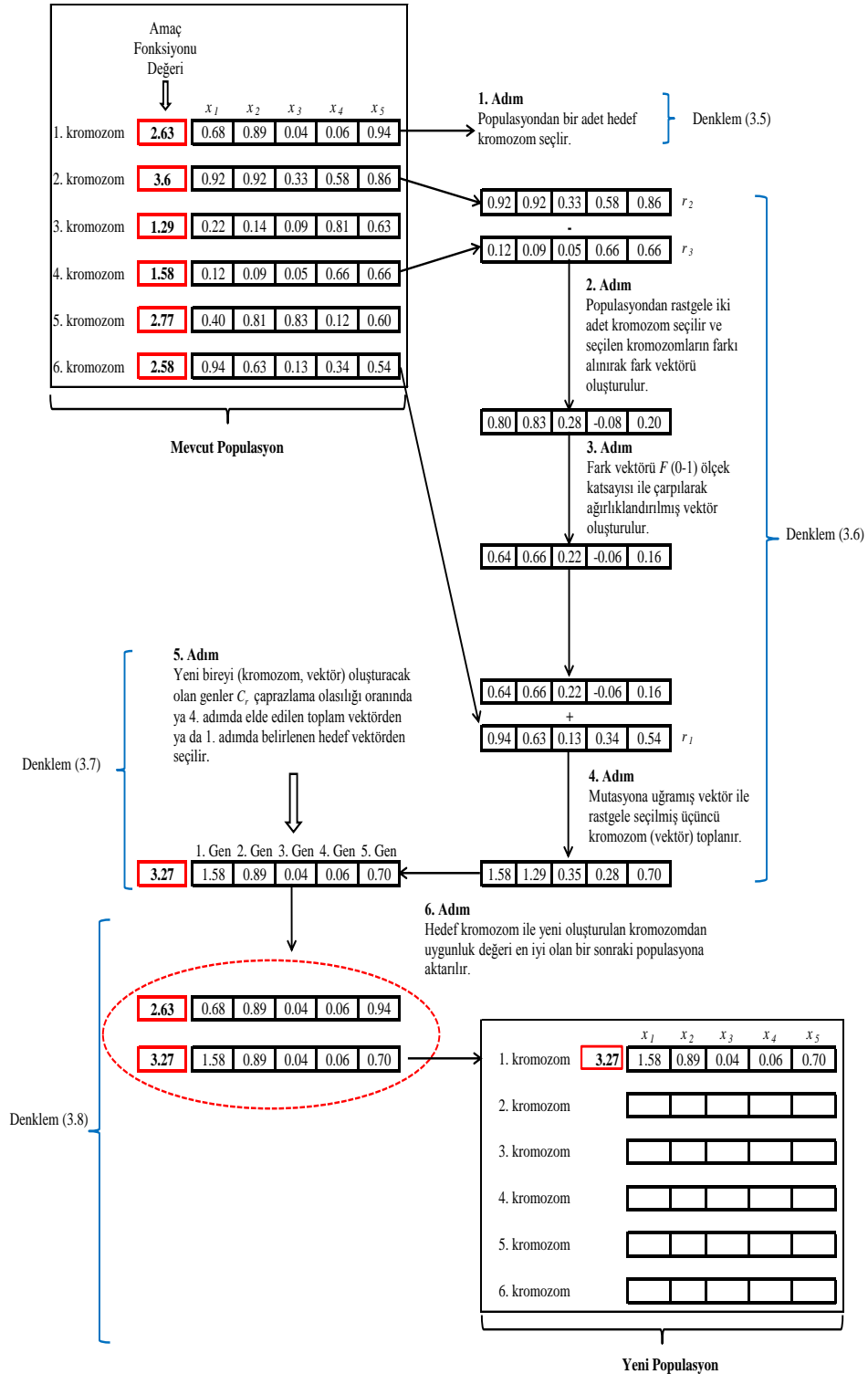
DE/rand/2 stratejisi:

$$\mathbf{v}_{i,G} = \mathbf{x}_{r_1^i,G} + F \left(\mathbf{x}_{r_2^i,G} - \mathbf{x}_{r_3^i,G} + \mathbf{x}_{r_4^i,G} - \mathbf{x}_{r_5^i,G} \right) \quad (3.9)$$

DE/rand/2 stratejisinde $\mathbf{v}_{i,G}$ vektörü DE/rand/1 stratejisine çok benzer bir şekilde üretilmektedir. DE/rand/1’den farklı olarak burada daha fazla rastgele üretilmiş vektör kullanılarak mutasyon işlemi gerçekleştirilmektedir.

DE/best/1 stratejisi:

$$\mathbf{v}_{i,G} = \mathbf{x}_{best,G} + F(\mathbf{x}_{r_1^i,G} - \mathbf{x}_{r_2^i,G}) \quad (3.10)$$



Şekil 3. 1: Verilen bir optimizasyon probleminin DGA ile çözümü

(Schmidt ve Thierauf, 2005)

Bu strateji de temel olarak DE/rand/1 stratejisine çok benzemektedir. Ancak burada $\mathbf{v}_{i,G}$ vektörünün üretilmesi aşamasında rastgele üretilen vektörler ile birlikte en iyi uygunluk değerine sahip vektör de ($\mathbf{x}_{best,G}$) işlem görmektedir (Storn, 1996).

DE/best/2 stratejisi:

$$\mathbf{v}_{i,G} = \mathbf{x}_{best,G} + F \left(\mathbf{x}_{r_1^i,G} + \mathbf{x}_{r_2^i,G} - \mathbf{x}_{r_3^i,G} - \mathbf{x}_{r_4^i,G} \right) \quad (3.11)$$

DE/best/1 stratejisinde olduğu gibi burada da uygunluk değeri en iyi olan vektör işleme katılarak $\mathbf{v}_{i,G}$ üretilmektedir. DE/best/1'den farklı olarak daha fazla rastgele üretilmiş vektöre ihtiyaç duyulmaktadır.

DE/rand-to-best/1 stratejisi:

$$\mathbf{v}_{i,G} = \mathbf{x}_{i,G} + \lambda \left(\mathbf{x}_{best,G} - \mathbf{x}_{i,G} \right) + F \left(\mathbf{x}_{r_1^i,G} - \mathbf{x}_{r_2^i,G} \right) \quad (3.12)$$

$\mathbf{v}_{i,G}$ vektörünün üretilmesi aşamasında $\mathbf{x}_{best,G}$ ve başlangıç vektörü $\mathbf{x}_{i,G}$ birlikte işlem görmektedir. Burada λ kontrol amaçlı bir katsayı olmakla birlikte genellikle kontrol edilen değişken sayısını azaltmak için $\lambda=F$ alınmaktadır (Storn, 1996).

DE/rand-to-best/2 stratejisi:

$$\mathbf{v}_{i,G} = \mathbf{x}_{i,G} + \lambda \left(\mathbf{x}_{best,G} - \mathbf{x}_{i,G} \right) + F \left(\mathbf{x}_{r_1^i,G} - \mathbf{x}_{r_2^i,G} + \mathbf{x}_{r_3^i,G} - \mathbf{x}_{r_4^i,G} \right) \quad (3.13)$$

DE/rand-to-best/1 stratejisine çok benzer olan DE/rand-to-best/2'de farklı olarak daha fazla sayıda rastgele üretilmiş vektör ile mutasyona uğramış $\mathbf{v}_{i,G}$ vektörünün üretilmesi gerçekleştirilir.

DE/current-to-rand/2 stratejisi:

$$\mathbf{v}_{i,G} = \mathbf{x}_{i,G} + \lambda \left(\mathbf{x}_{r_1^i,G} - \mathbf{x}_{i,G} \right) + F \left(\mathbf{x}_{r_2^i,G} - \mathbf{x}_{r_3^i,G} \right) \quad (3.14)$$

Bu strateji ile $\mathbf{v}_{i,G}$ vektörü üretilirken başlangıçta üretilen $\mathbf{x}_{i,G}$ vektörü ile birlikte rastgele üretilen vektörler birlikte işlem görmektedir. Burada yine kontrol katsayısı (λ) ile ölçek katsayısı (F) birbirine eşit alınmaktadır (Mallipeddi ve diğ., 2011).

Yukarıda verilenler dışında literatürde tanımlanmış daha farklı mutasyon stratejileri de mevcuttur. Ancak bu çalışma kapsamında en yaygın olarak kullanılanlarına değinilmiştir.

3.4 Optimizasyon Modelinin Testi

Bu bölümde, geliştirilen DGA tabanlı optimizasyon modelinin performansı literatürde verilen 5 test fonksiyonu (De Jong 1975, Rastrigin 1974, Michalewicz 1992, Goldstein ve Price 1971, Schwefel 1981) üzerinde test edilmiştir. Test fonksiyonlarının çözümü yukarıda tanımlanmış olan mutasyon stratejileri ve aşağıda verilen DGA çözüm parametreleri kullanılarak yapılmıştır:

Popülasyon Sayısı (p) : 20

Çaprazlama olasılığı (C_r) : 0.80

Ölçek katsayısı (F) : 0.80

Jenerasyon Sayısı : 10000

Her bir test fonksiyonunun yapısı, global optimum çözümleri ve optimizasyon modeli ile elde edilen sonuçlar detaylı olarak Ek-B ile Ek-F arasında verilmiştir. Geliştirilen optimizasyon modeli ile elde edilen sonuçlar Tablo 3.1’de özetlenmiştir. Tablo 3.1’den görüleceği gibi, 5 test fonksiyonu için de optimizasyon modelinin verdiği sonuçlarla global optimum sonuçlar iyi uyum içindedir.

Tablo 3. 1: Optimizasyon modelinin sonuçlarının değerlendirilmesi

Ek	Fonksiyon	Global Optimum		Bulunan Sonuçlar		
		$f(x)$	x_i	DGA Stratejisi*	$f(x)$	x_i
2	De Jong 1	0	$x_1 = 0$ $x_2 = 0$	DE/current-to-rand/1	0	$x_1 = -1.390 \times 10^{-32}$ $x_2 = -4.766 \times 10^{-31}$
3	Rastrigin 6	0	$x_1 = 0$ $x_2 = 0$	DE/best/2	0	$x_1 = -1.799 \times 10^{-9}$ $x_2 = 1.585 \times 10^{-9}$
4	Michalewicz 12	-4.68732	—	DE/rand/2	-4.68765	$x_1 = 2.202$ $x_2 = 1.570$ $x_3 = 1.284$ $x_4 = 1.923$ $x_5 = 1.720$
5	Goldstein-Price	3	$x_1 = 0$ $x_2 = -1$	DE/rand-to-best/1	3	$x_1 = 0$ $x_2 = -1$
6	Schwefel 7	-837.96584	$x_1 = 420.96872$ $x_2 = 420.96872$	DE/rand/1	-837.96577	$x_1 = 420.96874$ $x_2 = 420.96874$

* Farklı mutasyon stratejileri için yapılan çözümlerden amaç fonksiyonu bakımından en iyi sonuç verenler listelenmiştir.

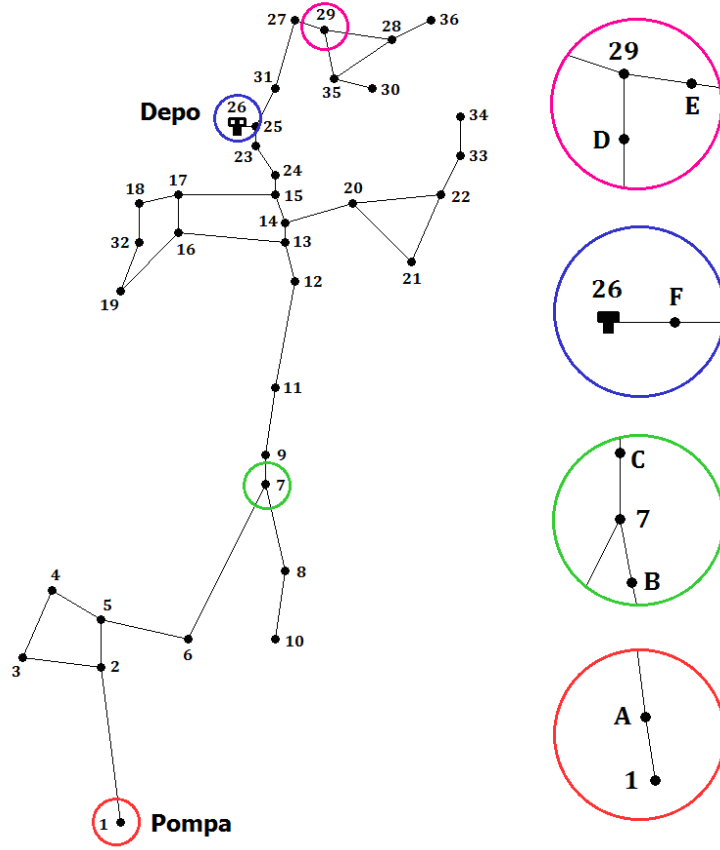
4. MODEL UYGULAMASI

4.1 Giriş

Bu çalışma kapsamında geliştirilen simülasyon-optimizasyon modelinin performansı Amerika Birleşik Devletleri'nin Connecticut eyaletinde bulunan Cherry Hill-Brushy Plains su dağıtım şebekesi üzerinde test edilmiştir. İlgili şebeke literatürde ek klorlama istasyonları ile alakalı pek çok çalışmada kullanılmış olup (Bocelli ve diğ. 1998; Munavalli ve Mohan Kumar 2003; Propato ve Uber 2004^a, 2004^b; Sert 2009; Köker 2011; Gokce ve Ayvaz 2014^a; Gokce ve Ayvaz 2014^b; Ayvaz ve Kentel 2014) model sonuçlarının daha önce elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilmesi amacıyla özellikle seçilmiştir.

4.2 Şebeke Bileşenleri

Cherry Hill-Brushy Plains su dağıtım şebekesine ait şebeke bileşenleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şebeke 1 adet pompa istasyonu (1 numaralı düğüm noktası), 1 adet depo (26 numaralı düğüm noktası), 34 tanesinden su tüketimi yapılan toplam 36 adet düğüm noktası ve yaklaşık uzunluğu 11.26 km olan 47 adet borudan oluşmaktadır. Şekil 4.1'den görüleceği gibi literatürde daha önce yapılan çalışmalar kapsamında (Bocelli ve diğ. 1998; Munavalli ve Mohan Kumar 2003; Propato ve Uber 2004^a, 2004^b; Sert 2009; Köker 2011; Gokce ve Ayvaz 2014^a; Gokce ve Ayvaz 2014^b) ek klorlama istasyonlarının yerleştirilmesi amacıyla şebekeye bazı fiktif düğüm noktaları (A-F) eklenmiş ve bu çalışma kapsamında bu noktalarda dikkate alınmıştır. Şebekedeki 47 adet boruya ait başlangıç – bitiş düğüm noktaları, boru uzunlukları, boru çapları ve Williams – Hazen pürüzlülük katsayıları Tablo 4.1'de verilmiştir. Bu çalışma kapsamında optimizasyon modeli tarafından ek klorlama istasyonlarının yerleri belirlenirken 42 adet düğüm noktasının tümü (34 düğüm noktası + 1 depo + 1 pompa istasyonu + 6 fiktif nokta) potansiyel istasyon yeri olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 4. 1: Cherry Hill-Brushy Plains su dağıtım şebekesi bileşenleri

4.3 Şebekenin Hidrolik Davranışı

Şekil 4.1’de verilen şebeke kapsamında her bir düğüm noktasından çekilen debi değerleri Tablo 4.2’de, 24 saatlik zaman periyodu için tüketim debi çarpanları ise Tablo 4.3’de verilmiştir. 1 numaralı düğüm noktasında bulunan pompadan şebekeye 694.4 GPM (43.81 L/s) büyüklüğünde debi ile su yine Tablo 4.3’de verilen debi çarpanları doğrultusunda basılmaktadır. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, herhangi bir zaman diliminde pompadan şebekeye basılan veya bir düğüm noktasından çekilen debi hesaplanmak istendiğinde ilgili debi değeri ile hesaplaması yapılmak istenen saatteki debi çarpanının (Tablo 4.3) çarpılması gerektiğidir. Bu kapsamda Tablo 4.3’te verilen pompa istasyonuna ait debi çarpanları incelendiğinde günün birinci ve üçüncü 6 saatlik zaman dilimlerinde pompanın aktif olduğu, buna karşın ikinci ve dördüncü zaman dilimlerinde ise inaktif olduğu açıkça görülmektedir. Kullanılan bu veriler ile EPANET modelinin çalıştırılması sonucunda şebekenin hidrolik davranışı Şekil 4.2’de verildiği gibi elde edilmiştir.

Tablo 4. 1: Şebeke bileşenlerine ait veriler (Bocelli ve diğ., 1998)

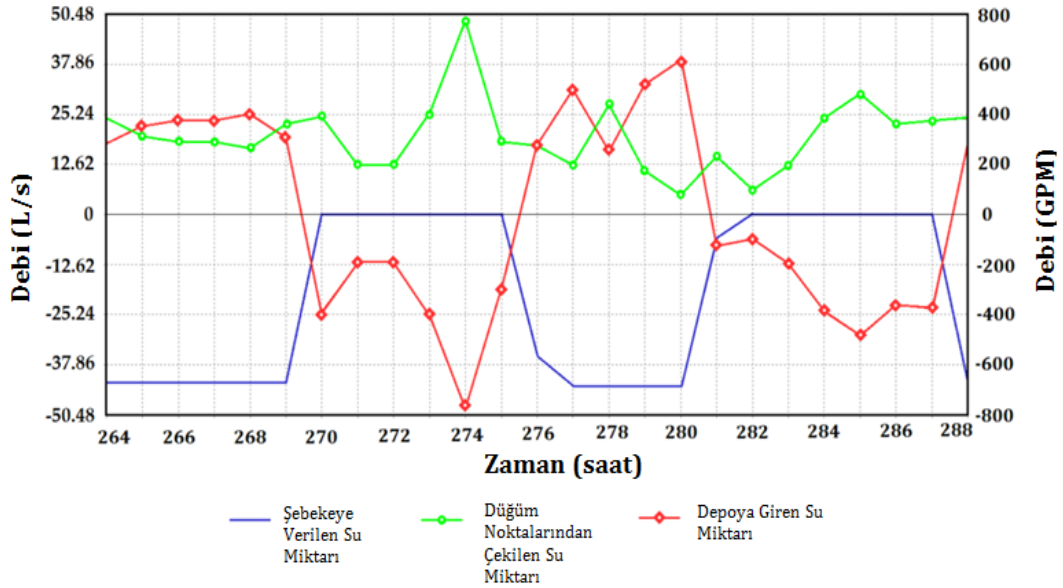
Başlangıç Düğümü	Bitiş Düğümü	Uzunluk [ft (m)]	Boru Çapı [inç (m)]	Pürüzlülük Katsayısı
1	A	1 (0.30)	12 (0.30)	100
2	5	800 (243.84)	12 (0.30)	100
2	3	1300 (396.24)	8 (0.20)	100
3	4	1200 (365.76)	8 (0.20)	100
4	5	1000 (304.80)	12 (0.30)	100
5	6	1200 (365.76)	12 (0.30)	100
6	7	2700 (822.96)	12 (0.30)	100
7	B	1 (0.30)	12 (0.30)	140
7	C	1 (0.30)	12 (0.30)	100
8	10	1000 (304.80)	8 (0.20)	140
9	11	700 (213.36)	12 (0.30)	100
11	12	1900 (579.12)	12 (0.30)	100
12	13	600 (182.88)	12 (0.30)	100
13	14	400 (121.92)	12 (0.30)	100
14	15	300 (91.44)	12 (0.30)	100
13	16	1500 (457.20)	8 (0.20)	100
15	17	1500 (457.20)	8 (0.20)	100
16	17	600 (182.88)	8 (0.20)	100
17	18	700 (213.36)	12 (0.30)	100
18	32	350 (106.68)	12 (0.30)	100
16	19	1400 (426.72)	8 (0.20)	100
14	20	1100 (335.28)	12 (0.30)	100
20	21	1300 (396.24)	8 (0.20)	100
21	22	1300 (396.24)	8 (0.20)	100
20	22	1300 (396.24)	8 (0.20)	100
24	23	600 (182.88)	12 (0.30)	100
15	24	250 (76.20)	12 (0.30)	100
23	25	300 (91.44)	12 (0.30)	100
25	F	99 (30.18)	12 (0.30)	100
25	31	600 (182.88)	12 (0.30)	100
31	27	400 (121.92)	8 (0.20)	100
27	29	400 (121.92)	8 (0.20)	100
22	33	1000 (304.80)	8 (0.20)	100
33	34	400 (121.92)	8 (0.20)	100
32	19	500 (152.40)	8 (0.20)	100
29	D	1 (0.30)	8 (0.20)	100
35	30	1000 (304.80)	8 (0.20)	100
28	35	700 (213.36)	8 (0.20)	100
28	36	300 (91.44)	8 (0.20)	100
A	2	2399 (731.22)	12 (0.30)	100
29	E	1 (0.30)	8 (0.20)	100
B	8	1199 (365.46)	12 (0.30)	140
C	9	399 (121.62)	12 (0.30)	100
E	28	699 (213.06)	8 (0.20)	100
D	35	499 (152.10)	8 (0.20)	100
F	26	1 (0.30)	12 (0.30)	100

Tablo 4.2: Dügüm noktalarından çekilen debi miktarları (Bocelli ve diğ., 1998)

Dügüm Noktası	Dügüm Noktasından Çekilen Debi [gpm (L/s)]
1	-694.4 (-43.81)
2	8 (0.50)
3	14 (0.88)
4	8 (0.50)
5	8 (0.50)
6	5 (0.32)
7	4 (0.25)
8	9 (0.57)
9	14 (0.88)
10	5 (0.32)
11	34.8 (2.20)
12	16 (1.01)
13	2 (0.13)
14	2 (0.13)
15	2 (0.13)
16	20 (1.26)
17	20 (1.26)
18	20 (1.26)
19	5 (0.32)
20	19 (1.20)
21	16 (1.01)
22	10 (0.63)
23	8 (0.50)
24	11 (0.69)
25	6 (0.38)
27	8 (0.50)
28	0 (0)
29	7 (0.44)
30	3 (0.19)
31	17 (1.07)
32	17 (1.07)
33	1.5 (0.09)
34	1.5 (0.09)
35	0 (0)
36	1 (0.06)

Tablo 4.3: Düğüm noktalarına ve pompaya ait saatlik debi çarpanları (Bocelli ve diğ., 1998)

Zaman (Saat)	Debi Çarpanları	Pompa Debi Çarpanları
1	1.19	0.96
2	0.97	0.96
3	0.90	0.96
4	0.90	0.96
5	0.82	0.96
6	1.12	0.96
7	1.21	0
8	0.60	0
9	0.60	0
10	1.27	0
11	2.39	0
12	0.90	0
13	0.85	0.80
14	0.61	1
15	1.36	1
16	0.54	1
17	0.24	1
18	0.71	0.15
19	0.30	0
20	0.60	0
21	1.19	0
22	1.49	0
23	1.12	0
24	1.16	0

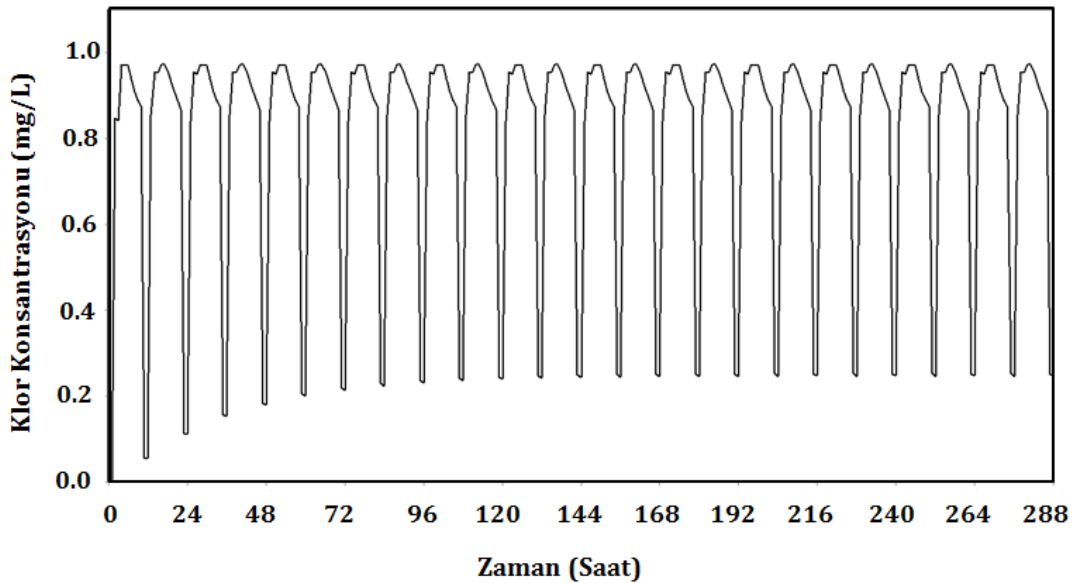


Şekil 4. 2: Şebekenin hidrolik davranışı

Şekil 4.2'den görüleceği gibi, Tablo 4.3'de verilen pompa çarpanları doğrultusunda şebeke günün birinci ve üçüncü 6 saatlik diliminde pompadan, geri

kalan zaman dilimlerinde ise 26 numaralı düğüm noktasında bulunan depodan beslenmektedir. Şebeke hidroliğindeki bu farklılıktan dolayı borular içindeki akım yönleri 6 saatlik zaman dilimleri kapsamında değişim göstermektedir.

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, bu çalışma kapsamında Bocelli ve diğ. (1998) tarafından önerilen doğrusal süperpozisyon prensibi (tepki matrisi yaklaşımı) ile şebekenin su kalitesi bakımından göstereceği tepki belirlenmiştir. Bu yaklaşım kullanılarak elde edilen bakiye klor konsantrasyon değerlerinin gerçek değerlere yakın olabilmesi için şebeke hidrolik davranışının periyodik bir yapıda olması gerekmektedir (Bocelli ve diğ., 1998; Tryby ve diğ. 2002). Bu nedenle sistem davranışının tam olarak periyodik hale gelmesi amacıyla ilgili şebeke için simülasyon süresi 288 saat olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılabilmesi amacıyla ana su kütlesi reaksiyon sabiti $k_b = 0.5$ 1/gün olarak alınmış ve boru cidarı reaksiyon sabiti ihmal edilerek ilgili çözümler gerçekleştirilmiştir. 288 saatlik simülasyon sonucunda Şekil 4.1’de verilen şebekedeki 7 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonunun zamanla değişimi Şekil 4.3’de verilmiştir. Şekil 4.3’den görüleceği gibi, yaklaşık olarak 144’ncü saatten sonra hidrolik açıdan periyodik davranış gözlenmiştir. 288 saatlik simülasyon süresi sonunda şebekedeki diğer düğüm noktaları için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi EK-G’de verilmiştir.

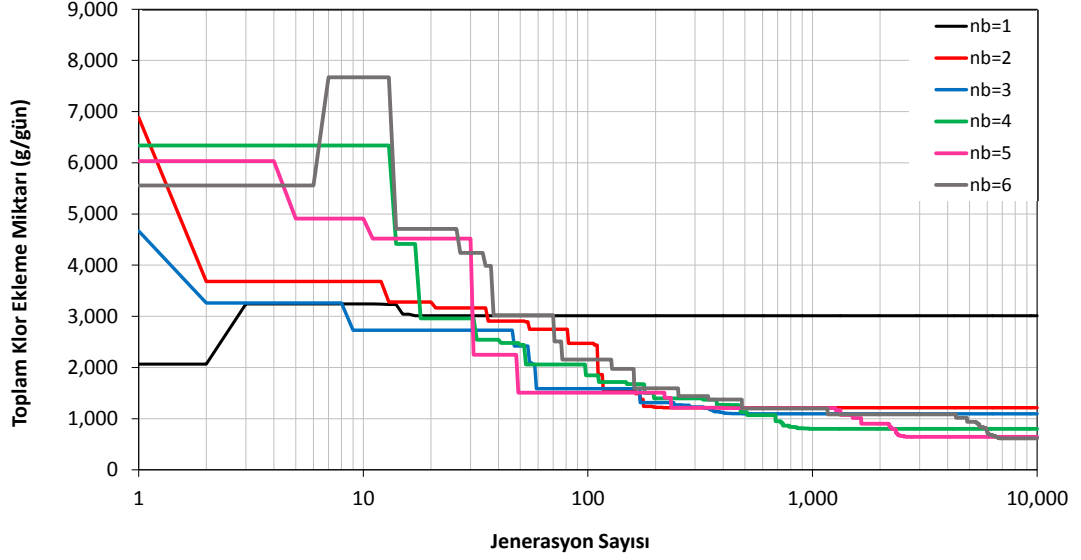


Şekil 4. 3: 7 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi

Bu aşamadan su kalitesi bakımından şebekenin tepkisini belirlemek amacıyla α_{ij}^{km} tepki katsayıları hesaplanmıştır. Bu amaçla, her bir düğüm noktasından ilgili enjeksiyon zaman periyodunda bileşik enjeksiyon yöntemi (flow paced booster) kullanılarak şebekeye verilen birim klor konsantrasyon değerinin düğüm noktalarında oluşturduğu tepki 288 saatlik simülasyon süresi için EPANET modeli çalıştırılarak belirlenmiştir. Her bir durum için EPANET modelinin çalıştırılmasının ardından 288 saatlik sürenin son 24 saatlik ölçüm periyodu için elde edilen bakiye klor konsantrasyon değerleri kullanılarak α_{ij}^{km} tepki katsayıları belirlenmiştir. Ardından, geliştirilen simülasyon-optimizasyon modeli farklı ek klorlama istasyon sayıları için klor enjeksiyon zaman adımı sayısı sırasıyla $n_k = 1$ ve $n_k = 4$ olacak şekilde çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, $n_k = 1$ olması durumunda 24 saatlik zaman periyodu boyunca ilgili ek klorlama istasyonundan sisteme sabit miktarda klor enjekte edildiği kabul edilmektedir. $n_k = 4$ olması durumunda ise 24 saatlik zaman periyodu 6'şar saatlik 4 zaman dilimine ayrılmakta ve her bir zaman diliminde farklı miktarda klorun sisteme enjekte edildiği kabul edilmektedir. Elde edilen çözümlerin karşılaştırılması sonucunda şebeke işletimi için en uygun klorlama planının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan çözümlerin tümünde su tüketimi yapılan 34 düğüm noktasında son 24 saatlik zaman periyodu için hesaplanan toplam 816 konsantrasyon değerinin müsaade edilebilir sınır değerleri aşıp aşmadığı kontrol edilmiştir. Literatürde verilen çalışmalarla uyumlu olarak bu sınır değerler $c_j^{\min} = 0.20$ mg/L ve $c_j^{\max} = 4.00$ mg/L ($j = 1, 2, 3, \dots, 34$) olarak alınmıştır. DGA ile ilgili problemin çözümü için popülasyon sayısı $p = 20$, çaprazlama oranı $C_r = 0.8$ ve mutasyon oranı $F = 0.8$ olarak seçilmiş ve arama sürecinin 10.000 DGA jenerasyonu sonucunda tamamlanması sağlanmıştır.

4.4 Enjeksiyon Zaman Adımı Sayısının 1 Olması Durumu için Çözüm

Yukarıda verilen çözüm parametreleri kullanılarak $n_k = 1$ olması durumunda farklı ek klorlama istasyon sayıları için yapılan çözümlere ait yakınsama grafikleri



Şekil 4.4: Farklı ek klorlama istasyonu sayıları için elde edilen yakınsama grafikleri ($n_k = 1$)

Şekil 4.4’de verilmiştir. Görüleceği gibi, her bir çözüm arama sürecine farklı başlangıç noktasından başlamakta ve ek klorlama istasyonu sayısı arttıkça şebekeye eklenmesi gereken klor miktarında önemli ölçüde azalma gözlenmektedir. Şekil 4.4’de verilen çözümler için elde edilen istasyon yerleri ve her bir istasyondan enjekte edilecek klor konsantrasyonlarının değişimi Tablo 4.4’de verilmiştir. Tablo 4.4’de ayrıca Propato ve Uber (2004^b) tarafından elde edilen sonuçlar verilmiş olup her iki çözüm yaklaşımının sonuçları detaylı olarak karşılaştırılmıştır. Birinci bölümde belirtildiği gibi, Propato ve Uber (2004^b) ek klorlama optimizasyon problemini bir doğrusal en küçük kareler problemi olarak ifade etmiş ve ek klorlama istasyon yerlerini tamsayı karar değişkeni olarak tanımlayarak ilgili problemi kuadratik programlamaya dayanan bir çözüm yaklaşımı ile çözmüştür.

Tablo 4. 4: $n_k = 1$ için belirlenen istasyon yerleri ve enjekte edilecek klor konsantrasyonları

n_b	Eklenen Klor Konsantrasyonları (mg/L) < Ek Klorlama İstasyonlarının Yerleri >											
	Propato ve Uber (2004 ^b)						Mevcut Çalışma					
1	1.84	-	-	-	-	-	1.78	-	-	-	-	-
	< A >						< 2 >					
2	0.53	0.36	-	-	-	-	0.52	0.35	-	-	-	-
	< 1 >	< 26 >					< 2 >	< 26 >				
3	0.49	0.73	0.41	-	-	-	0.43	0.37	0.05	-	-	-
	< 1 >	< 26 >	< 29 >				< 2 >	< 26 >	< 29 >			
4	0.36	0.70	0.43	0.44	-	-	0.35	0.21	0.14	0.08	-	-
	< 1 >	< 26 >	< 29 >	< 33 >			< 2 >	< 26 >	< 29 >	< 33 >		
5	0.36	0.71	0.43	0.43	0.68	-	0.28	0.05	0.22	0.16	0.20	-
	< 1 >	< 26 >	< 33 >	< 35 >	< E >		< 2 >	< 8 >	< 22 >	< 26 >	< 29 >	
6	0.30	0.07	0.19	0.12	0.12	0.19	0.26	0.07	0.66	0.16	0.21	0.02
	< 1 >	< 8 >	< 26 >	< 33 >	< 35 >	< E >	< 2 >	< 8 >	< 22 >	< 26 >	< 29 >	< 32 >

Tablo 4.4'den görüleceği gibi, $n_b = 1$ için yapılan çözüm kapsamında şebekede sadece 1 adet klorlama istasyonunun aktif olduğu kabul edilmiş ve ilgili istasyondan 24 saat boyunca sabit konsantrasyonda klor eklendiği kabul edilmiştir. Bu durum için geliştirilen model kapsamında 2 numaralı düğüm noktası istasyon yeri olarak belirlenmiş ve bu noktadan 1.78 mg/L konsantrasyonda klorun şebekeye enjekte edildiği kabul edilmiştir. Propato ve Uber (2004^b) ise aynı durum için ilgili problemi çözdüğünde A noktasını istasyon yeri olarak belirlemiş ve bu noktadan şebekeye enjekte edilecek klor konsantrasyonunu ise 1.84 mg/L olarak bulmuştur. 2 numaralı düğüm noktasının klorlama istasyonu olarak belirlenmesi sonucunda şebekenin hidrolik davranışı gereği 1 ve 2 numaralı düğüm noktaları arasında kalan bölgeye klorlanmış su ulaşamayacaktır. Dolayısıyla, bu bölgede yerleşimin ve su kullanımının fazla olmaması kabulüyle belirlenen istasyon yeri klorlama istasyonu olarak kullanılabilir.

Şebekeye ikinci ek klorlama istasyonu ($n_b = 2$) eklenerek ilgili problem çözüldüğünde istasyonların yerleştirileceği düğüm noktaları sırasıyla 2 ve 26 numaralı düğüm noktaları olarak belirlenirken, Propato ve Uber (2004^b) kapsamında bu noktalar sırasıyla 1 ve 26 numaralı düğüm noktaları olarak bulunmuştur. Her iki çözüm yönteminde de ikinci ek klorlama istasyonunun yeri 26 numaralı düğüm noktası olarak yani deponun bulunduğu düğüm noktası olarak belirlenmiştir. Önceki bölümlerde belirtildiği gibi pompa istasyonu günün ikinci ve dördüncü 6 saatlik periyodunda aktif olmadığı için bu zaman dilimlerinde şebeke depo tarafından

beslenmektedir. Bu kapsamda ikinci ek klorlama istasyonu bu zaman dilimlerinde şebekenin klor ihtiyacının karşılanmasında kullanılmaktadır.

Ek klorlama istasyonu sayısı $n_b = 3$ 'e çıkarılarak çözüm yapıldığında geliştirilen çözüm yaklaşımı ile istasyon yerleri sırasıyla 2, 26 ve 29 numaralı düğüm noktaları, bu noktalardan eklenmesi gereken klor konsantrasyonları ise sırasıyla 0.43 mg/L, 0.37 mg/L, 0.05 mg/L olarak belirlenmiştir. Aynı problemin Propato ve Uber (2004^b) tarafından çözülmesiyle ek klorlama istasyonlarının yerleri sırasıyla 1, 26 ve 29 numaralı düğüm noktaları, eklenmesi gereken klor miktarları ise 0.49 mg/L, 0.73 mg/L ve 0.41 mg/L olarak belirlenmiştir.

$n_b = 4$ alınarak çözüm yapıldığında hem geliştirilen model kapsamında hem de Propato ve Uber (2004^b) tarafından yapılan çözümde $n_b = 3$ için yapılan çözüme ilave olarak 33 numaralı düğüm noktasının ek klorlama istasyonu olarak belirlendiği, diğer ek klorlama istasyonlarından eklenmesi gereken klor miktarının bir önceki duruma göre daha az olduğu görülmektedir.

$n_b = 5$ olması halinde bir önceki durumdan ($n_b = 4$) farklı olarak DGA çözümünde 33 numaralı düğüm noktasının ek klorlama istasyonu olarak yer almadığı yerine 22 numaralı düğüm noktasının ek klorlama istasyonu olarak belirlendiği ve beşinci ek klorlama istasyonu olarak 8 numaralı düğüm noktasının belirlendiği görülmektedir. Propato ve Uber (2004^b) tarafından yapılan çözümde ise önceki duruma kıyasla 29 numaralı düğüm noktası yerine E'nin belirlendiği beşinci ek klorlama istasyonunun yerinin de 35 numaralı düğüm noktası olması gerektiği görülmektedir. Her iki çözüm yönteminin de birbirine paralel şekilde sonuçlar ürettiği görülmektedir.

Son olarak, $n_b = 6$ için yapılan çözümler incelendiğinde hem geliştirilen modelde hem de Propato ve Uber (2004^b) tarafından yapılan çözümde elde edilen sonuçların $n_b = 5$ için yapılan çözüme benzer olduğu görülmektedir. Mevcut durum için geliştirilen model ile altıncı ek klorlama istasyonunun yeri bir önceki duruma ek olarak 32 numaralı düğüm noktası, Propato ve Uber (2004^b) tarafından yapılan çözümde ise bir önceki duruma ek olarak 8 numaralı düğüm noktasının belirlenmiş olduğu görülmektedir.

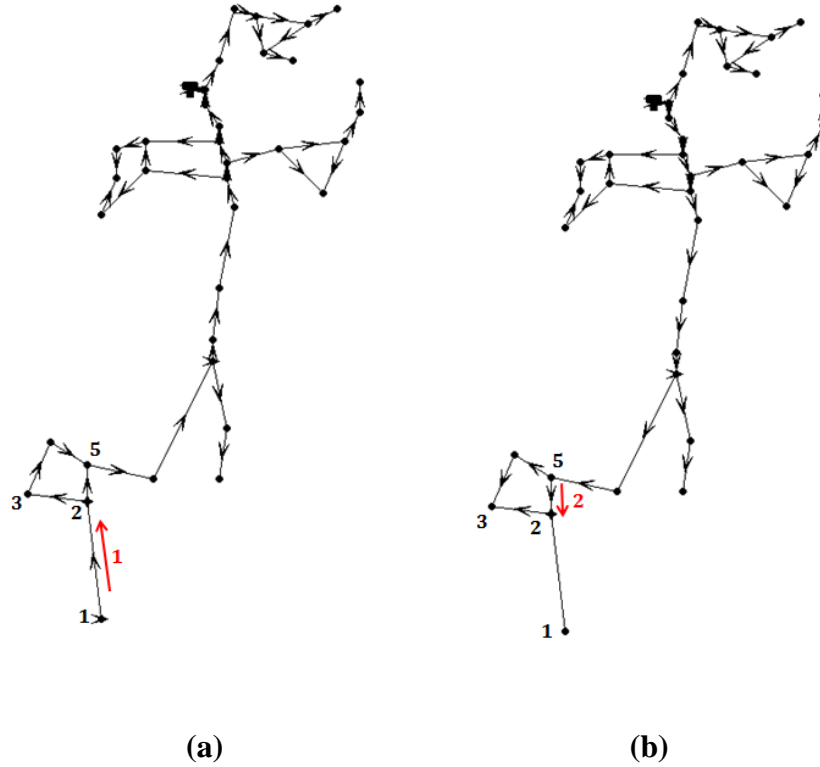
Farklı ek klorlama istasyon sayıları için düğüm noktalarındaki bakiye klor konsantrasyonlarının istatistiksel özeti ve şebekeye eklenmesi gereken toplam klor miktarlarının karşılaştırılması Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4. 5: Düğüm noktalarındaki bakiye klor konsantrasyonlarının istatistiksel özeti ve şebekeye eklenmesi gereken toplam klor miktarlarının karşılaştırılması ($n_k = 1$)

n_b	Propato ve Uber (2004 ^b)				Mevcut Çalışma			
	Klor Konsantrasyonları (mg/L)			Klor Ekleme Oranı (g/gün)	Klor Konsantrasyonları (mg/L)			Klor Ekleme Oranı (g/gün)
	Ortalama	Minimum	Maksimum		Ortalama	Minimum	Maksimum	
1	1.06	0.20	3.29	3,116	1.07	0.20	3.52	3,010
2	0.45	0.20	0.55	1,260	0.45	0.20	1.02	1,213
3	0.42	0.20	0.63	1,155	0.41	0.20	0.86	1,094
4	0.31	0.20	0.46	835	0.31	0.20	0.69	799
5	0.31	0.20	0.38	830	0.27	0.20	0.56	645
6	0.27	0.20	0.32	703	0.29	0.20	0.89	614

Tablo 4.5 incelendiğinde şebekede 1 adet klorlama istasyonu bulunması halinde istasyonu yeri olarak belirlenen 2 numaralı düğüm noktasından şebekeye eklenecek klor konsantrasyonu 1.78 mg/L (Tablo 4.4) olarak belirlenirken ölçülen maksimum konsantrasyon değerinin 3.52 mg/L olarak belirlenmiştir. Propato ve Uber (2004^b) tarafından da benzer şekilde elde edilen bu sonuç, seçilen istasyon yerine ve şebeke hidrolik davranışına bağlı olarak şu şekilde açıklanmaktadır: Önceki bölümlerde belirtildiği gibi 1 numaralı düğüm noktasında bulunan pompa günün birinci ve üçüncü altı saatlik zaman diliminde şebekeye su basmaktadır. İkinci ve dördüncü altı saatlik zaman diliminde ise şebeke 26 numaralı düğüm noktasında bulunan depodan beslenmektedir. Bu kapsamda birinci altı saatlik zaman diliminde Şekil 4.5 (a)’da verilen 1 numaralı ok yönünde 2 numaralı düğüm noktasına gelen suya ilgili noktadan 1.78 mg/L konsantrasyonunda klor enjekte edilmekte ve akım yönlerine bağlı olarak 3 ve 5 numaralı düğüm noktalarına doğru klorlanmış su gitmektedir. İkinci altı saatlik zaman dilimine gelindiğinde ise pompanın kapanmasıyla şebekedeki akım yönü Şekil 4.5 (b)’de verildiği gibi 2 numaralı ok yönünde olmakta ve bir önceki zaman adımında 2 numaralı noktadan 5 numaralı noktaya gelen klorlanmış su tekrar 2 numaralı düğüm noktasına geri dönmektedir. Bu zaman diliminde zaten bir önceki altı saatlik dilimde klorlanmış olan suya tekrar 1.78 mg/L konsantrasyonunda klor enjekte edildiği için Propato ve Uber (2004^b)’de de belirtildiği gibi enjekte edilen klor konsantrasyonundan daha yüksek olan 3.52 mg/L değerine ulaşılmaktadır. Bu durum tamamen şebekenin hidrolik davranışı ile

ilgili olup 2 numaralı noktanın ek klorlama istasyonu olarak seçildiği tüm çözümlerde benzer durum söz konusudur.

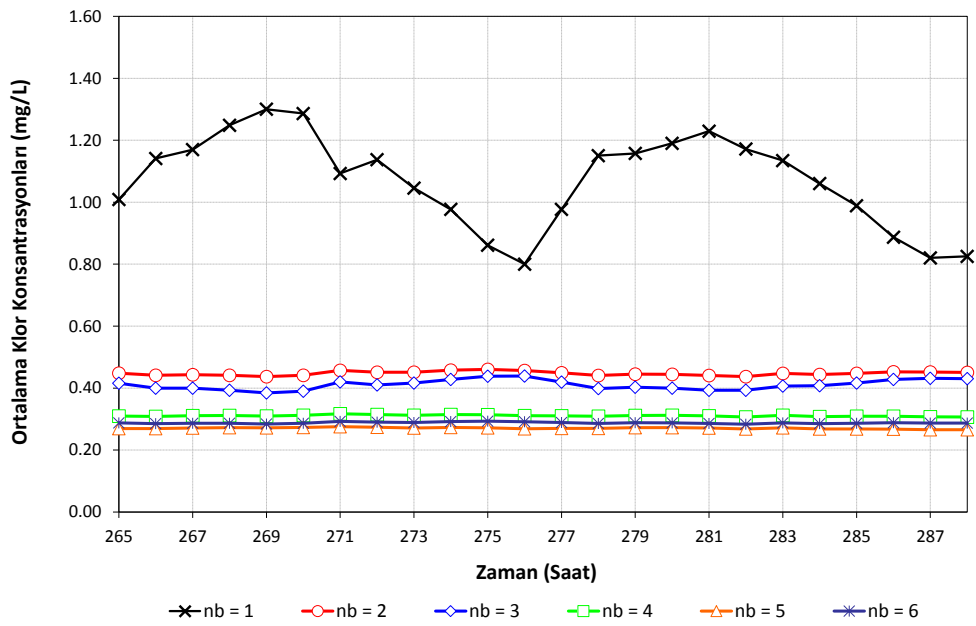


Şekil 4. 5: (a): Birinci ve üçüncü altı saatlik zaman dilimi için akım yönleri;
(b): İkinci ve dördüncü altı saatlik zaman dilimi için akım yönleri

Tablo 4.5 kapsamında dikkat çeken bir diğer husus ise ek klorlama istasyon sayısının $n_b = 5$ 'den $n_b = 6$ 'ya çıkması durumunda maksimum bakiye klor konsantrasyonlarının azalma yerine artma davranışı göstermesidir. Bu artışın nedeni ilgili maksimum klor konsantrasyonunun ek klorlama istasyon yeri olarak belirlenen 22 numaralı düğüm noktasında gözlenmiş olmasıdır. 22 numaralı düğüm noktası su çekilen bir talep noktası olduğundan ve bu noktadan 0.66 mg/L konsantrasyonunda klor enjekte edildiğinden dolayı maksimum konsantrasyon değerinin hesabında bu değer de dikkate alınmaktadır. Benzer durum Propato ve Uber (2004^b) kapsamında ek klorlama istasyon sayısının $n_b = 2$ 'den $n_b = 3$ 'e çıkması durumunda da gözlenmiş olup bu hususa ilgili çalışmada da değinilmiştir.

Verilen sonuçlardan görüleceği gibi, geliştirilen model kapsamında şebekeye enjekte edilecek toplam klor miktarları tüm çözümler için Propato ve Uber (2004^b) tarafından elde edilen değerlerden daha küçüktür. Ayrıca çözümlerin tümünde

minimum (0.20 mg/L) ve maksimum (4.00 mg/L) bakiye klor konsantrasyon limitlerinin sağlanmış olduğu açıkça görülmektedir. Şebekedeki tüm noktaları için ortalama bakiye klor konsantrasyon değerlerinin değişimi Şekil 4.6’da verilmiştir. Görüleceği gibi, ek klorlama istasyon sayısının artması ile klor konsantrasyon değerleri hem azalmakta hem de şebeke boyunca daha üniform duruma gelmektedir. Elde edilen sonuçlardan $n_b = 1$ için yapılan çözüm konsantrasyon miktarları bakımından diğer çözümlere göre daha çalkantılı gibi görünse de verilen konsantrasyon limitlerinin sağlanmış olduğu açıkça görülmektedir.

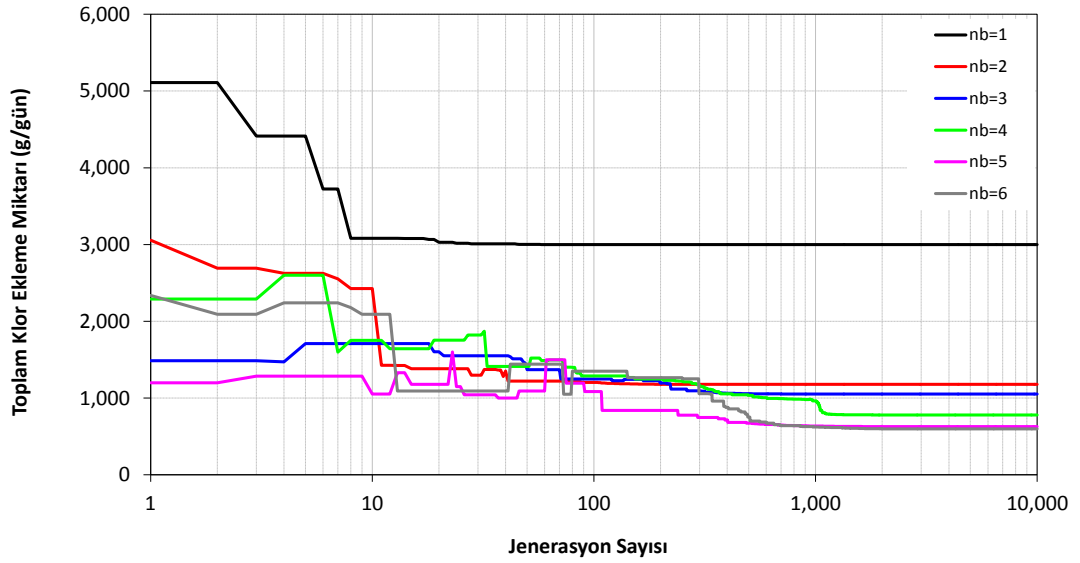


Şekil 4. 6: Şebeke boyunca ortalama klor konsantrasyonlarının değişimi ($n_k = 1$)

4.5 Enjeksiyon Zaman Adımı Sayısının 4 Olması Durumu için Çözüm

Bu bölümde ek klorlama optimizasyon probleminin çözümü 24 saatlik zaman diliminin 6’şar saatlik 4 farklı zaman dilimi ($n_k = 4$) olacak şekilde şebekeye klor eklenmesi dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. İlgili problemin çözümü yine farklı ek klorlama istasyon sayıları için yapılmış ve elde edilen sonuçlar Propato ve Uber (2004^a) tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. $n_k = 4$ durumu dikkate

alınarak farklı ek klorlama istasyon sayıları için yapılan çözümlere ait yakınsama grafikleri Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4. 7: Farklı ek klorlama istasyonu sayıları için elde edilen yakınsama grafikleri ($n_k = 4$)

Şekil 4.7’den görüleceği gibi, bir önceki çözümle benzer şekilde optimizasyon süreci tüm çözümlerde farklı başlangıç noktasından başlamış ve ek klorlama istasyonu sayısının artması ile birlikte şebekeye eklenmesi gereken klor miktarında önemli ölçüde azalma gözlenmiştir. Yapılan çözümler sonucu belirlenen ek klorlama istasyon yerleri ile her bir istasyondan şebekeye enjekte edilmesi gereken klor konsantrasyonları Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4. 6: $n_k = 4$ için belirlenen istasyon yerleri ve enjekte edilecek klor konsantrasyonları

n_b	n_k	Klor Konsantrasyonları (mg/L) < Ek Klorlama İstasyonlarının Yerleri >						
1	1	2.08						
	2	0.00						
	3	1.46	-	-	-	-	-	-
	4	0.00						
	< 2 >							
2	1	0.52	0.56					
	2	0.00	0.35					
	3	0.53	0.24	-	-	-	-	-
	4	0.00	0.29					
	< 2 >		< 26 >					
3	1	0.42	0.60	0.02				
	2	0.00	0.40	0.11				
	3	0.46	0.24	0.14	-	-	-	-
	4	0.00	0.27	0.34				
	< 2 >		< 26 >	< 28 >				
4	1	0.34	0.60	0.14	0.06			
	2	0.00	0.21	0.13	0.10			
	3	0.35	0.16	0.13	0.10	-	-	-
	4	0.00	0.20	0.14	0.10			
	< 2 >		< 26 >	< 29 >	< 33 >			
5	1	0.28	0.03	0.34	0.61	0.20		
	2	0.00	0.06	0.16	0.16	0.19		
	3	0.27	0.03	0.37	0.29	0.22	-	
	4	0.00	0.06	0.16	0.15	0.20		
	< 2 >		< 8 >	< 22 >	< 26 >	< 29 >		
6	1	0.25	0.07	0.31	0.85	0.19	0.02	
	2	0.00	0.08	0.16	0.16	0.20	0.02	
	3	0.26	0.08	0.61	0.16	0.20	0.01	
	4	0.00	0.08	0.17	0.16	0.22	0.02	
	< 2 >		< 8 >	< 22 >	< 26 >	< 29 >	< 32 >	

Tablo 4.6'dan görüleceği gibi, şebekede sadece 1 adet ($n_b = 1$) klorlama istasyonu bulunması durumunda istasyon yeri olarak 2 numaralı düğüm noktası, her 6 saatte bir eklenecek klor konsantrasyonları ise sırasıyla 2.08 mg/L, 0 mg/L, 1.46 mg/L, 0 mg/L olarak bulunmuştur. Burada dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri, şebekede 1 adet klorlama istasyonu bulunması durumunda $n_k = 1$ için yapılan çözümle aynı olacak şekilde 2 numaralı düğüm noktası istasyon yeri olarak seçilmiştir. Ayrıca, bu istasyondan şebekeye enjekte edilecek klor konsantrasyonlarının pompanın çalışmadığı ikinci ve dördüncü 6 saatlik zaman dilimlerinde sıfır değerini almış olduğu açıkça görülmektedir. Bu nedenle bir önceki uygulama kapsamında gözlenmiş olan klorlanmış suyun tekrar klorlama işlemine tabi tutulması bu çözüm kapsamında gözlenmemiştir.

$n_b = 2$ için ilgili problem çözüldüğünde ek klorlama istasyonlarının yerleri önceki çözümle benzer şekilde 2 ve 26 numaralı düğüm noktaları olarak belirlenirken

2 numaralı düğüm noktasından şebekeye enjekte edilecek klor konsantrasyonlarının $n_b = 1$ için yapılan çözüme kıyasla daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir.

$n_b = 3$ için ek klorlama istasyonlarının yerleri 2, 26 ve 28 numaralı düğüm noktaları olarak bulunmuş ve her bir zaman diliminde şebekeye eklenmesi gereken klor konsantrasyonlarının istasyon sayısının artması ile genellikle azalma eğilimine girdiği gözlenmiştir. Benzer durum $n_b = 4$ ve $n_b = 5$ için yapılan çözümlerde de gözlenmiş ve istasyon sayısının artması ile şebeke genelinde sisteme enjekte edilecek klor konsantrasyonlarında genel olarak azalmalar gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan görüleceği gibi, yapılan tüm çözümler kapsamında 2 numaralı düğüm noktası ile deponun bulunduğu 26 numaralı düğüm noktası ek klorlama istasyon yeri olarak seçilmiştir. Bu sayede şebekenin hidrolik davranışı ile ilişkili olacak şekilde pompa istasyonunun ve deponun aktif olduğu zaman dilimlerinde şebekenin ihtiyaç duyduğu klor miktarına sahip olması sağlanmaktadır.

Farklı ek klorlama istasyonları dikkate alınarak yapılan çözümler için elde edilen bakiye klor konsantrasyon değerlerinin istatistiksel özeti ve şebekeye enjekte edilen toplam klor miktarlarının değişimi Tablo 4.7’de verilmiştir. Tablo 4.7’den görüleceği gibi, yapılan çözümlerin tümünde şebeke boyunca minimum bakiye klor konsantrasyonu optimizasyon modeli kapsamında alt limit olarak tanımlanmış olan 0.20 mg/L olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde çözümlerin tümü için maksimum bakiye klor konsantrasyon değeri üst limit olarak tanımlanmış olan 4 mg/L değerinden daha düşük olarak elde edilmiştir. Ancak, ek klorlama istasyon sayısının artmasıyla $n_k = 1$ için yapılan çözümde olduğu gibi maksimum bakiye klor konsantrasyon değerlerinde azalma yerine artma durumu söz konusu olabilmektedir. Bu durumun da $n_k = 1$ için yapılan çözümde olduğu gibi maksimum konsantrasyon değerlerinin yapılan çözümler kapsamında belirlenen istasyon yerlerinde gözlenmiş olması ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4. 7: Düğüm noktalarındaki bakiye klor konsantrasyonlarının istatistiksel özeti ve şebekeye eklenmesi gereken toplam klor miktarlarının karşılaştırılması ($n_k = 4$)

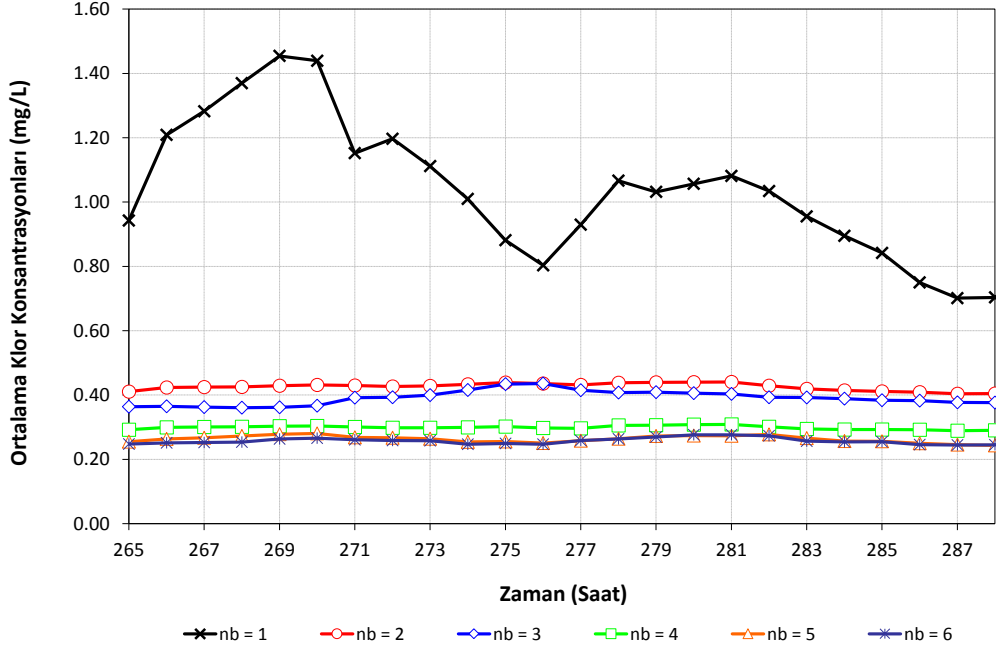
n_b	Klor Konsantrasyonları (mg/L)			Klor Ekleme Miktarı (g/gün)	
	Ortalama	Minimum	Maksimum	Mevcut Çalışma	Propato ve Uber (2004 ^a)
1	1.04	0.20	2.08	2,998	2,925 ¹
2	0.43	0.20	0.53	1,178	1,321 ²
3	0.39	0.20	0.60	1,052	-
4	0.30	0.20	0.44	780	-
5	0.26	0.20	0.60	628	-
6	0.26	0.20	0.84	597	1,100 ³

¹ A noktasından klor enjeksiyonu yapılmıştır.

² A ve F noktalarından klor enjeksiyonu yapılmıştır.

³ A – F arası 6 noktadan klor enjeksiyonu yapılmıştır.

Tablo 4.7’de ayrıca farklı sayıdaki ek klorlama istasyonları için şebekeye enjekte edilecek klor miktarlarının değişimi Propato ve Uber (2004^a) tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri, geliştirilen simülasyon-optimizasyon modeli kapsamında şebekedeki her bir düğüm noktasının birer potansiyel ek klorlama istasyonu olarak kabul edilerek istasyon yerlerinin ve her bir istasyondan şebekeye enjekte edilecek klor konsantrasyonlarının belirlendiğidir. Propato ve Uber (2004^a)’de ise ilgili problemin çözümü ek klorlama istasyonlarının yerleri sabit kabul edilerek (A – F arası düğüm noktaları) çözülmüş ve bu noktalardan şebekeye enjekte edilecek klor miktarlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. İstasyon yerlerinin değişken kabul edilmesi sonucunda ilgili problemin çözüm uzayı büyüdüğünden dolayı geliştirilen model kapsamında $n_b = 1$ ve $n_b = 2$ olması durumlarında, Propato ve Uber (2004^a) tarafından elde edilen klor enjeksiyon miktarlarından daha yüksek enjeksiyon miktarları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar kendi içlerinde karşılaştırıldığında ise ek klorlama istasyon sayısının artması ile şebekeye toplamda enjekte edilecek klor miktarında azalma gözleendiği ve buna paralel olarak şebeke boyunca ortalama bakiye klor konsantrasyon değerlerinin de azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Geliştirilen model kapsamında farklı istasyon sayıları kullanılarak yapılan çözümler için ortalama klor konsantrasyonları değişimi Şekil 4.8’de verilmiştir.

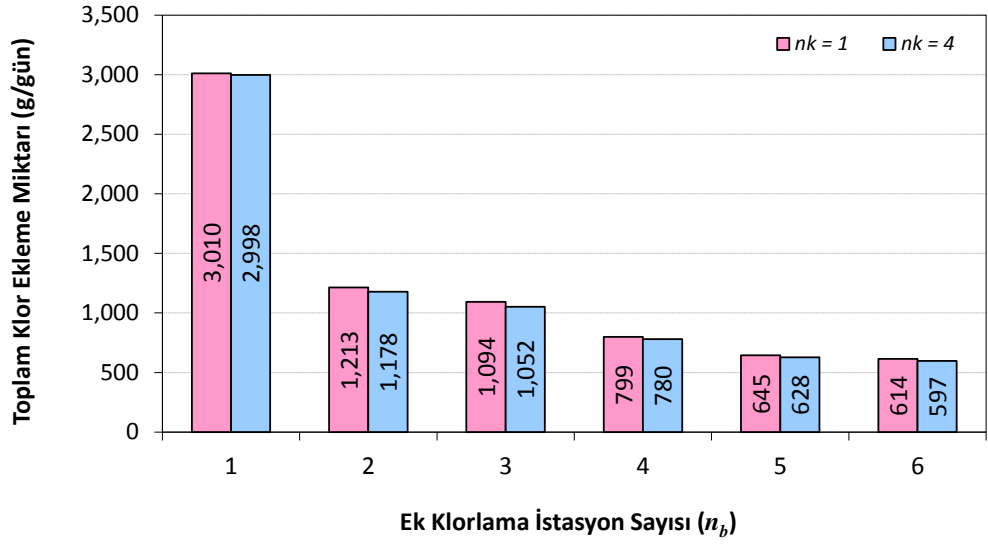


Şekil 4. 8: Şebeke boyunca ortalama klor konsantrasyonlarının değişimi ($n_k = 4$)

Görüleceği gibi, ek klorlama istasyon sayısının artması ile ortalama klor konsantrasyonlarındaki değişimler giderek azalma eğilimine girmekte ve şebeke boyunca daha üniform bir klor dağılımı elde edilmektedir.

4.6 Sonuçların Karşılaştırılması

Yukarıda elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında farklı istasyon sayıları için ilgili problemin çözümünde enjeksiyon zaman adımı sayısının $n_k = 1$ 'den $n_k = 4$ 'e çıkması ile ek klorlama istasyon yerlerinin önemli bir değişime uğramadığı ve her iki durumda da büyük oranda aynı istasyon yerlerinin geliştirilen simülasyon-optimizasyon modeli kapsamında belirlendiği açıkça görülmektedir. Her iki çözüm için elde edilen sonuçlardan şebekeye enjekte edilecek klor miktarlarının değişimi ise Şekil 4.9'da verilmiştir. Görüleceği gibi, enjeksiyon zaman adımı sayısının artması ile şebekeye toplamda enjekte edilecek klor miktarında azalma gözlenmiştir. Ancak bu azalma miktarının merite olarak çok fazla olmadığı ve ilk durumunda çözüm olarak benimsenebileceği açıkça görülmektedir.



Şekil 4. 9: $n_k = 1$ ve $n_k = 4$ için şebekeye eklenecek klor miktarlarının değişimi

5. DUYARLILIK ANALİZİ

5.1 Giriş

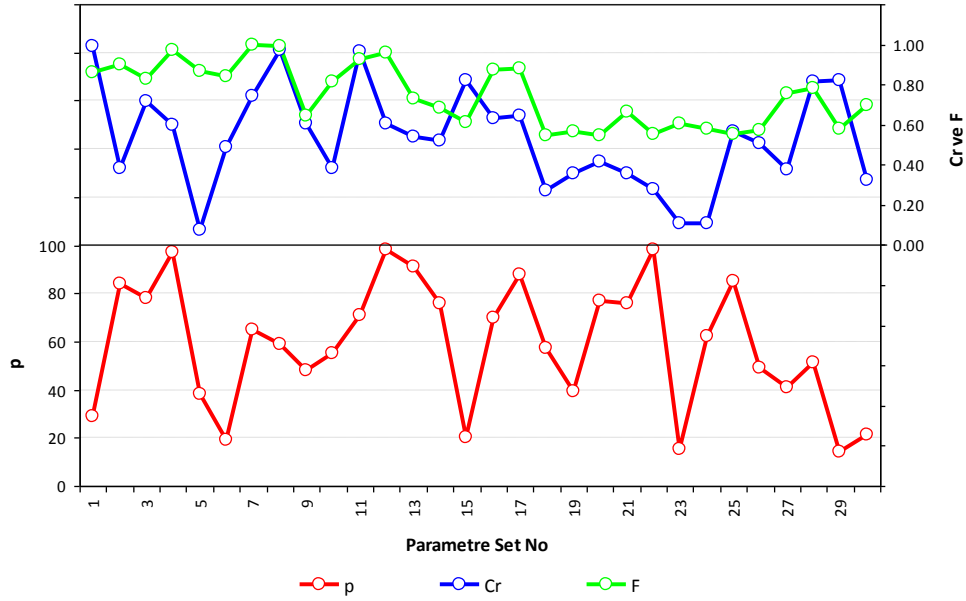
Bu bölümde geliştirilen simülasyon-optimizasyon modelinin farklı DGA optimizasyon parametreleri ve mutasyon stratejileri için performansını test etmek amacıyla detaylı bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Yapılan çözümlerin tümünde klor enjeksiyon zaman adımı sayısı $n_k = 1$ ve ek klorlama istasyon sayısı $n_b = 6$ kabul edilmiş ve bu değerler için Tablo 4.4 ve 4.5’de verilen çözüm “temel çözüm” olarak kabul edilerek duyarlılık analizi sonuçları temel çözüm ile karşılaştırılmıştır.

5.2 Farklı DGA Çözüm Parametreleri için Duyarlılık Analizi

Bu bölümde farklı DGA optimizasyon parametrelerinin çözüm üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Literatürde yapılan duyarlılık analizlerinde genellikle ilgili çözüm parametrelerinin değerleri teker teker değiştirilerek çözüm üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Ancak, bu şekilde yapılan analizlerin parametre duyarlılıklarını tam olarak yansıtmadığı (Saltelli ve Annoni, 2010) gerekçesiyle ilgili çözüm parametrelerinin tümünün eş zamanlı olarak değişim gösterdiği kabul edilmiştir.

Yapılan analiz kapsamında kullanılacak optimizasyon parametreleri popülasyon sayısı (p), çaprazlama olasılığı (C_r) ve ölçek katsayısıdır (F). Bu parametrelerden p popülasyon sayısını yani çözüm havuzu içinde kaç adet kromozom olduğunu belirtirken C_r ve F çaprazlama ve mutasyon işlemlerinin ne sıklıkta yapılacağını belirlemede kullanılmaktadır. DGA ile ilgili literatürde önerilmiş olan parametre değerleri ile geçmiş tecrübelerle dayanarak ilgili çözüm parametreleri için $10 \leq p \leq 100$, $0 \leq C_r \leq 1$ ve $0.5 \leq F \leq 1$ sınırları kullanılmıştır. Bu parametre sınırları için MS Excel® ortamında çalışan NTRAND (Numerical Technologies, 2012) eklentisi kullanılarak eş zamanlı değişim gösteren ve üniform dağılıma sahip 30 veri seti üretilmiştir. Üretilen 30 veri setinin değişimi Şekil 5.1’de, istatistiksel özeti ise Tablo 5.1’de verilmiştir. Tablo

5.1'den görüleceği gibi üniform dağılım gereği tüm parametreler için ortalama ve medyan değerleri birbirine çok yakın çıkmıştır.



Şekil 5. 1: Üretilen 30 veri seti için parametre değerlerinin değişimi

Tablo 5. 1: Üretilen parametre değerlerinin istatistiksel özeti

	C_r	F	p
Minimum	0.075	0.549	14
Maksimum	0.990	0.996	98
Ortalama	0.532	0.746	59.033
Medyan	0.531	0.742	60.500
St. Sapma	0.252	0.154	26.341

30 farklı parametre seti için elde edilen çözümlerin temel çözüm sonucuyla karşılaştırılması amacıyla ilk olarak Ayvaz ve Elçi (2013) kapsamında tanımlanmış ve ardından Ayvaz ve Kentel (2014) kapsamında su dağıtım şebekelerine uyarlanmış olan Merkez Uzaklığı (Centroid Distance - CD) adı verilen bir ölçüt kullanılmıştır. CD ölçütü matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Ayvaz ve Kentel, 2014):

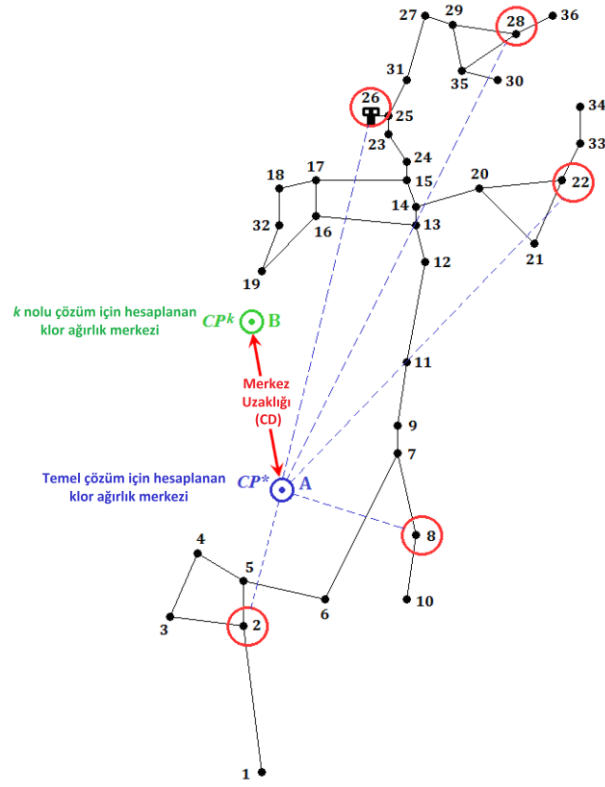
CP^* , temel çözüm için belirlenen klor ağırlık merkezini (Şekil 5.2’de A noktası); CP^k , k numaralı veri seti için yapılan çözüm sonucu elde edilmiş olan klor ağırlık merkezini (Şekil 5.2’de B noktası) ($k = 1, 2, 3, \dots, 30$); \tilde{x}_i^* ve \tilde{y}_i^* temel çözüm için belirlenmiş ek klorlama istasyon koordinatlarını ($i = 1, 2, 3, \dots, 6$); \tilde{x}_{cp}^* ve \tilde{y}_{cp}^* temel çözüm için belirlenmiş olan klor ağırlık merkezinin koordinatlarını; \tilde{x}_i^k ve \tilde{y}_i^k k numaralı veri seti için belirlenmiş ek klorlama istasyon koordinatlarını; \tilde{x}_{cp}^k ve \tilde{y}_{cp}^k ise k numaralı veri seti için belirlenmiş olan klor ağırlık merkezinin koordinatlarını göstermek üzere her iki durum için şebeke boyunca klor ağırlık merkez koordinatları aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$\tilde{x}_{cp}^{\kappa} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} \sum_{k=1}^{n_k} \hat{c}_i^{k,\kappa} \tilde{Q}_i^{k,\kappa} \tilde{x}_i^{\kappa}}{\sum_{i=1}^{n_b} \sum_{k=1}^{n_k} \hat{c}_i^{k,\kappa} \tilde{Q}_i^{k,\kappa}} \quad (5.1)$$

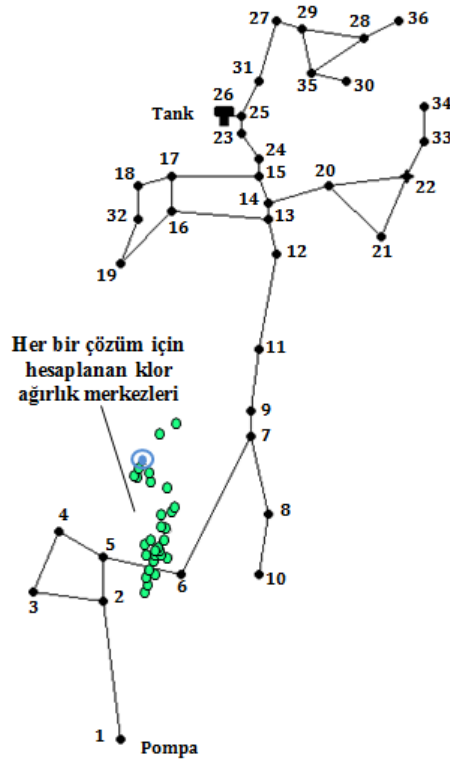
$$\tilde{y}_{cp}^{\kappa} = \frac{\sum_{i=1}^{n_b} \sum_{k=1}^{n_k} \hat{c}_i^{k,\kappa} \tilde{Q}_i^{k,\kappa} \tilde{y}_i^{\kappa}}{\sum_{i=1}^{n_b} \sum_{k=1}^{n_k} \hat{c}_i^{k,\kappa} \tilde{Q}_i^{k,\kappa}} \quad (5.2)$$

$$\kappa = \begin{cases} * & \text{Temel çözüm için belirlenmiş klor ağırlık merkezi} \\ k & k \text{ numaralı parametre seti için belirlenmiş klor ağırlık merkezi} \end{cases} \quad (5.3)$$

Denklem (5.1) – (5.3)’den görüleceği gibi klor ağırlık merkezleri; belirlenen istasyonlardan şebekeye eklenecek klor miktarlarının istasyon koordinatlarına göre ağırlıklı ortalaması alınarak belirlenmektedir. Bu işlemin 30 farklı parametre seti için tekrar edilmesi sonucu hesaplanan klor ağırlık merkezleri Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5. 2: Duyarlılık analizi kapsamında tanımlanan CD değerinin hesaplanması

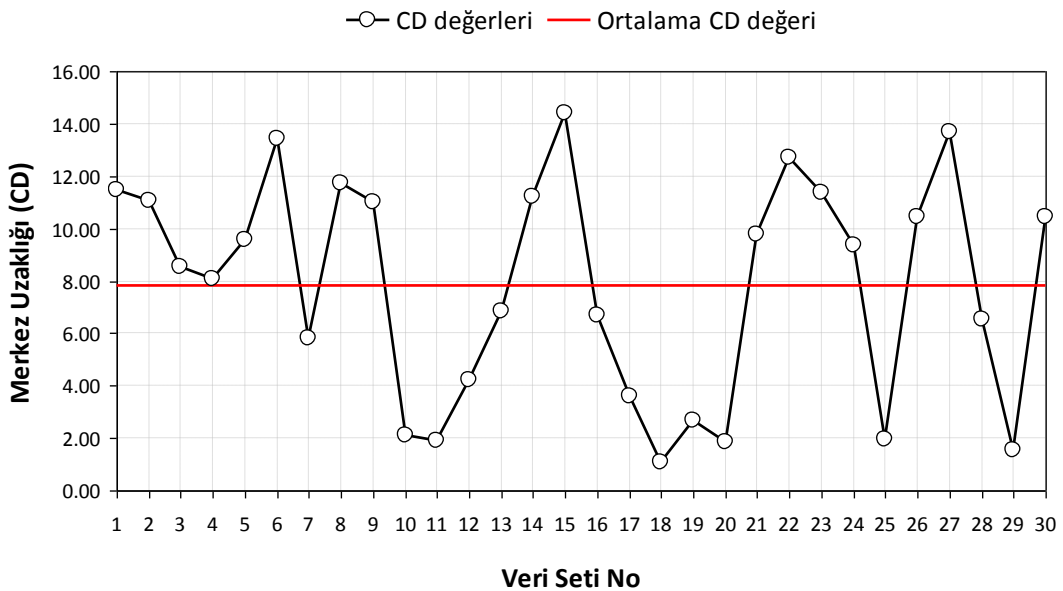


Şekil 5. 3: 30 parametre seti için hesaplanmış klor ağırlık merkezleri

Şekil 5.3'den görüleceği gibi, her bir çözüm için elde edilen klor ağırlık merkezleri temel çözüm için elde edilen ağırlık merkezine yakın olarak elde edilmiştir. Bu aşamadan sonra k numaralı çözüm ile temel çözümün ağırlık merkezleri arasındaki mesafe CD ölçütü kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$CD^k = \left\{ \left(\tilde{x}_{cp}^k - \tilde{x}_{cp}^* \right)^2 + \left(\tilde{y}_{cp}^k - \tilde{y}_{cp}^* \right)^2 \right\}^{1/2}; \quad k = 1, 2, 3, \dots, 20 \quad (5.4)$$

Burada dikkat edilmesi gereken önemli nokta, Denklem (5.4) kullanılarak hesaplanan CD değerinin sıfır olmasının, duyarlılık analizi kapsamında elde edilen çözümlerin temel çözümle aynı olması anlamını taşıdığıdır. CD ölçütünün tanımlanmasının ardından model 30 farklı parametre seti için çalıştırılmış ve Şekil 5.4'de verilen sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 5.4'den görüleceği gibi, 30 farklı çözüm için elde edilmiş olan CD değerleri 1.08 ile 14.39 arasında değişim göstermektedir. Hesaplanan ortalama CD değerinin 7.83 olduğu ve Şekil 5.3'de elde edilen klor ağırlık merkezlerinin bir çoğunun temel çözüme çok yakın olduğu düşünüldüğünde, geliştirilen DGA tabanlı çözüm yaklaşımının optimizasyon parametreleri değişse bile bir çok durumda yaklaşık olarak benzer çözümler verdiğini göstermektedir. Bu ise çözüm yaklaşımının güvenilir sonuçlar vermesi bakımından oldukça önemli bir sonuçtur.



Şekil 5. 4: 30 parametre seti için hesaplanan CD değerlerinin değişimi

5.3 Farklı Mutasyon Stratejileri İçin Duyarlılık Analizi

Bu analiz kapsamında Bölüm 3’de verilen farklı mutasyon stratejileri için DGA tabanlı optimizasyon modelinin performansı temel çözüm kapsamında kullanılmış olan DE/rand/1 mutasyon stratejisi ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma işlemi her bir strateji için ilgili problemin aynı p , C_r ve F kullanılarak çözülmesiyle yapılmış olup elde edilen sonuçlar Tablo 5.2’de verilmiştir. Tablo 5.2’den görüleceği gibi, gerek optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen amaç fonksiyonu değerine gerekse şebekeye enjekte edilen klor miktarına göre en iyi strateji temel çözüm kapsamında kullanılmış olan DE/rand/1 stratejisidir. Analiz kapsamında kullanılan diğer stratejilerin sonuçları incelendiğinde ise amaç fonksiyonu değeri ve şebekeye enjekte edilen toplam klor miktarı bakımından temel çözümden sonra en iyi sonucun DE/rand-to-best/1 stratejisi kapsamında elde edilmiş olduğu açıkça görülmektedir.

Tablo 5. 2: Farklı mutasyon stratejileri için elde edilen sonuçlar

Strateji	Amaç Fonksiyonu Değeri	Eklenen Toplam Klor Miktarı (g/gün)
DE/rand/1	93.862	613.79
DE/rand/2	91.332	866.81
DE/best/1	91.988	801.25
DE/best/2	91.530	846.96
DE/rand-to-best/1	93.501	649.92
DE/rand-to-best/2	91.078	892.15
DE/current-to-rand/1	91.506	849.37

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında su dağıtım şebekelerine dezenfeksiyon amaçlı kurulan ek klorlama istasyonlarından eklenmesi gereken klor miktarının belirlenen alt ve üst limitler arasında kalması sağlanarak; şebekeye eklenmesi gereken klor miktarı minimum olacak şekilde su kalitesinin artırılması, istasyon yerlerinin bilinmemesi halinde ek klorlama istasyonlarının şebekede hangi düğüm noktalarına yerleştirilmesi gerektiği, şebekeye klor enjeksiyon işleminin ne kadar sürede ve ne sıklıkta yapılması gerektiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda ek klorlama istasyonlarının yerlerinin ve şebekeye eklenecek klor miktarlarının belirlenebildiği bir simülasyon optimizasyon modeli geliştirilerek farklı durumlar için ilgili problemin çözümü yapılmıştır.

Simülasyon aşamasında, kullanılan suyun kalitesinin artırılarak klor konsantrasyonu dağılımı bakımından üniform bir sistem oluşturmak için problem öncelikle matematiksel olarak ifade edilmiştir. Burada şebekeye eklenmesi gereken klor miktarının minimize edilmesi, klor miktarının belirtilen limitler arasında olmadığı durumlarda insan sağlığı bakımından zararlı etkilerinin ortaya çıkmasından ve büyük su dağıtım şebekelerinde harcanan klor miktarını azaltarak en ekonomik klorlama planının oluşturulması açısından önemlidir. Ek klorlama istasyonları kurulmadan yapılan dezenfeksiyon işlemlerinde, depo veya pompa istasyonu gibi şebeke bileşenlerinin olduğu noktalardan klor enjeksiyonunun, bu noktalar civarında yüksek, uç noktalara doğru ise düşük klor konsantrasyonlarının gözlenmesine neden olmaktadır. Bu şekildeki bir dezenfeksiyon yaklaşımı ise şebeke kapsamında klor konsantrasyonlarının olması gereken alt limitten daha düşük veya üst limitten daha yüksek olması gibi durumların oluşmasına neden olmaktadır. Bu etkilerin önüne geçebilmek için şebekeye ek klorlama istasyonlarının kurulması ve bu ek klorlama istasyonlarından eklenen klor miktarının minimize edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Şebekede ek klorlama istasyonlarının yerlerinin belirlenmesi de bu çalışma kapsamında ele alınan problemin amaçlarından biridir. Burada ek klorlama istasyonlarının sayısının yeterli sayıda olması ve şebeke üzerinde doğru noktalara yerleştirilmesi gerekmektedir. Az sayıda ek klorlama istasyonu olduğunda üniform klor dağılımından uzaklaşmakta ve dezenfeksiyon işleminin tamamen gerçekleşememesi durumu ortaya çıkmaktadır. Fazla ek klorlama istasyonlarının kullanılması durumunda ise yatırım, işletme ve bakım maliyetleri artacaktır. Bu nedenle, optimum istasyon sayısının ne olması gerektiği karar vericiler tarafından cevaplanması gereken önemli bir konudur.

Bu çalışma kapsamında problemin çözümü aşamasındaki bir diğer amaç ise ek klorlama istasyonlarından şebekeye ne sıklıkta klor eklenmesi gerektiğini belirlemektir. Eklenen klorun şebekede ne kadar süre alt ve üst limit değerler arasında kalacağını belirlemek için ne kadar sürede ne kadar debi ile su çekildiğinin, kısaca şebekenin hidrolik davranışının bilinmesi gerekmektedir.

Bütün bu amaçlar doğrultusunda problem ele alındığında sırasıyla, düğüm noktalarındaki konsantrasyon değerleri belirlenirken doğrusal süperpozisyon prensibinden yararlanılmıştır. Doğrusal süperpozisyon ilişkisini kullanarak şebekeye ait tepki matrisinin belirlenebilmesi için şebekenin hidrolik ve madde taşınım süreçlerinin birlikte modellenildiği EPANET modeli kullanılmıştır. Elde edilen tepki matrisi DGA tabanlı bir optimizasyon modeline entegre edilerek farklı ek klorlama istasyonu sayıları için optimum istasyon yerleri ve klor enjeksiyon miktarları belirlenmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, yapılan çalışma kapsamında ek klorlama istasyonlarının yerleri bilinmeyen olarak ele alındığından şebekedeki her bir düğüm noktasının ek klorlama istasyonu olabileceği varsayımdır. Geliştirilen optimizasyon modeli kapsamında farklı sayıdaki ek klorlama istasyonları için problemin çözümü gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon modeli kapsamında şebekeye klor ekleme işleminin ne kadar sürede ve ne sıklıkta yapılmasının en uygun çözüm olacağı araştırılmıştır. Bütün bu işlemlerin uygulaması gerçek bir şebeke üzerinde yapılmış ve elde edilen sonuçlar literatürde verilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı DGA parametrelerinin ve farklı çözüm stratejilerinin çözüm üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla detaylı bir duyarlılık analizi yapılarak modelin güvenilirliği test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar şebekede ek klorlama istasyonu sayısı arttıkça eklenmesi gereken klor miktarının

çoğunlukla azalma eğiliminde olduğunu göstermiştir. DGA tabanlı çözüm yaklaşımı ile su dağıtım şebekelerinde ek klorlama istasyonlarının sayılarının, yerlerinin ve optimum klorlama planlarının belirlenebildiğini görülmüştür.

6.2 Öneriler

Dünyada ve ülkemizde nüfus artışına bağlı olarak içme ve kullanma suyuna duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu duruma paralel olarak daha büyük su dağıtım şebekelerine duyulan ihtiyaç artacaktır. Daha büyük şebekelerde daha fazla ek klorlama istasyonuna ihtiyaç duyulması durumunda bu istasyonların kurulumu da bir ekonomi problemi olacaktır. Bu tez çalışması kapsamında özellikleri bilinen gerçek bir şebeke üzerinde uygulama ve çözüm yapılarak optimum klorlama planları belirlenmiştir. Bu çalışma daha büyük su dağıtım şebekeleri için insan sağlığı açısından kaliteli su tüketimi sağlanması doğrultusunda geliştirilebilir. Büyük bir su dağıtım şebekesinde potansiyel ek klorlama istasyon yerlerinin sayısı artacağından optimizasyon problemindeki değişken sayısı da artmakta ve sonuç olarak çözüme ulaşmak daha da zorlaşmaktadır. Şebekedeki her düğüm noktası potansiyel istasyon noktası olarak ele alınmadığında ise matematiksel çözüm uzayı tam olarak araştırılamamaktadır. Bu kapsamda, geliştirilen model farklı optimizasyon formülasyonları kullanılarak bu zorluğun üstesinden gelebilecek şekilde yeniden düzenlenebilir. Ayrıca, ek klorlama istasyon sayılarının ne olması gerektiği probleminin çözümü detaylı olarak incelenmeli ve farklı alternatifler arasından en iyisinin seçilebildiği karar verme modelleri üzerinde çalışılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

7. KAYNAKLAR

Arora, J. S., "Introduction to optimum design", *Elsevier Academic Press*, San Diego CA, (2004).

Ayvaz, M. T. ve Elçi, A., 2013. "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*, doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.11.045, (2013).

Ayvaz, M. T. ve Kentel, E., "Identification of the best booster station network for a water distribution system", *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000473, (2014).

Babayan, A. V., Savic, D. A., Walters G. A., Kapelan, Z., "Robust least-cost design of water distribution networks using redundancy and integration based methodologies", *Journal of Water Resources, Planning and Management-ASCE*, 133(1), 67-77, (2007).

Behzadian, K., Alimohammadnejad, M., Ardeshir A., Jalilsani F., Vasheghani H., "A novel approach for water quality management in water distribution systems by multi-objective booster chlorination" *International Journal of Civil Engineering*, 10(1), 51-60, (2012).

Bocelli, D. L., Tryby, M. E., Uber, J. G., Rossman, L. A., Zierolf, M. L., Polycarpou, M. M., "Optimal scheduling of booster disinfection in water distribution system", *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*, 124(2), 99-111, (1998).

Broad, D. R., Dandy, G. C., Maier, H. R., "Water distribution system optimization using metamodels", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(3), 172-180, (2005).

Chu, C. W., Lin, M. D., Tsai, K. T., “Optimal scheduling of booster chlorination with immune algorithm”, *Proceedings of the Third International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology (ICCIT'08)*, Volume 2, 1226-1232, (2008).

De Jong, K. D., “An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems”, Doktora Tezi, *Department of Computer and Communication Sciences University of Michigan*, Ann Arbor, Michigan, USA, (1975).

Earth Tech (Canada) Inc., “*Chlorine and alternative disinfectants guidance manual*”, Prepared for office of drinking water, prepared by Earth Tech ,Canada IncCanada.: Manitoba, (March 2005).

EPA, U.S. Environmental Protection Agency, Basic Information about Disinfectants in Drinking Water Chloramine, Chlorine and Chlorine Dioxide [online], (24.12.2014), <http://water.epa.gov/drink/contaminants/basicinformation/disinfectants.cfm> , (2014)

Gokce, S. ve Ayvaz, M. T., “A simulation-optimization model for optimal estimation of the numbers, locations and chlorine injection rates of the booster stations in water distribution networks”, *11th International Conference on Hydroinformatics (HIC2014)*, New York, USA, (2014).

Gokce, S. ve Ayvaz, M. T., “Application of Harmony Search Algorithm for Solving the Booster Station Optimization Problems in Water Distribution Networks”, *International Civil Engineering & Architecture Symposium for Academicians (ICESA2014)*, Side, Turkey, 42-50, (2014).

Goldstein, A. A. ve Price, I. F., “On descent from local minima”, *Mathematics Computation*, 25(115), 569-574, (1971).

Gökçe, Ş. ve Ayvaz, M. T., “Evaluation of harmony search and differential evolution optimization algorithms on solving the booster station optimization problems in water distribution networks”, (ed. Xin-She Yang), *Recent Advances in Swarm Intelligence and*

Evolutionary Computation, Studies in Computational Intelligence Series, Springer: Berlin/Heidelberg, (in press) (2014).

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

Köker, E., “Chance constrained optimization of booster disinfection in water distribution networks”, Yüksek Lisans Tezi, *İnşaat Mühendisliği Bölümü Orta Doğu Teknik Üniversitesi*, Ankara, (2011).

Mallipeddi R., Suganthan P. N., Pan Q. K., Tasgetiren M. F., “Differential evolution algorithm with ensemble of parameters and mutation strategies”, *Applied Soft Computing*, 1679-1696, (2011).

Michalewicz, Z., “Genetic algorithm + data structure = evolution programs”, *Springer-Verlag*, New York, (1992).

Munavalli, G. R. ve Kumar, M. S., “Optimal scheduling of multiple chlorine sources in water distribution systems”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(6), 493-504, (2003).

Ostfeld, A. ve Salomons, E., “Conjunctive optimal scheduling of pumping and booster chlorine injections in water distribution systems”, *Engineering Optimization*, 38(3), 337-352, doi: 10.1080/03052150500478007, (2010).

Özdemir, O. N. ve Uçaner, M. E., “Success of booster chlorination for water supply networks with genetic algorithms”, *Journal of Hydraulic Research*, 43(3), 267-275, (2005).

Pektürk K., “A domain aware genetic algorithm for optimum booster chlorination in water distribution systems”, Yüksek Lisans Tezi, *Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Atılım Üniversitesi*, Ankara (2010).

Prasad, T. D., Walters, G. A., Savic, D. A., “Booster disinfection of water supply networks: multiobjective approach”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(5), 367-376, (2004).

Propato, M. ve Uber, J. G., “Booster system design using mixed-integer quadratic programming”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(4), 348-352, (2004^b).

Propato, M. ve Uber, J. G., “Linear least-squares formulation for operation of booster disinfection systems”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(1), 53-62, (2004^a).

Rastrigin, L. A., “Extremal control systems”, *In Theoretical Foundations of Engineering Cybernetics Series*, Moscow, Russia, (1974).

Rossmann, L. A., Clark, R. M., Grayman, W. M., “Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems”, *Journal of Environmental Engineering ASCE*, 120(4), 803-820, New York, (1994).

Saltelli A. ve Annoni P., “How to avoid a perfunctory sensitivity analysis” *Environmental Modelling and Software*, doi: 1508-1517. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.04.012, 25(12), (2010).

Schmidt, H. ve Thierauf, G., “A combined heuristic optimization technique”, *Advances in Engineering Software*, 36, 11-19, (2005).

Schwefel, H. P., *Numerical optimization of computer models*, Chichester: Wiley & Sons, (1981).

Sert, Ç., “Booster disinfection in water distribution networks”, Yüksek Lisans Tezi, *İnşaat Mühendisliği Bölümü Orta Doğu Teknik Üniversitesi*, Ankara, (2009).

Soyupak, S., Kilic, H., Karadirek, I. E., ve Muhammetoglu H., “On the usage of artificial neural networks in chlorine control applications for water distribution networks

with high quality water.”, *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 60(1), 51-60, (2011).

Storn, R. ve 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, Berkeley, 519–523, (1996).

Tryby, M. E., Bocelli, D. L., Uber, J. G. Rossman, L. A., “Facility location model for booster disinfection of water supply networks”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128(5), 322-333, (2002).

Wang, H., Guo, W., “Ant colony optimization for booster chlorination stations of water distribution systems”, *Proceedings of the 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICASM)*, Volume 1, 166-170, (2010).

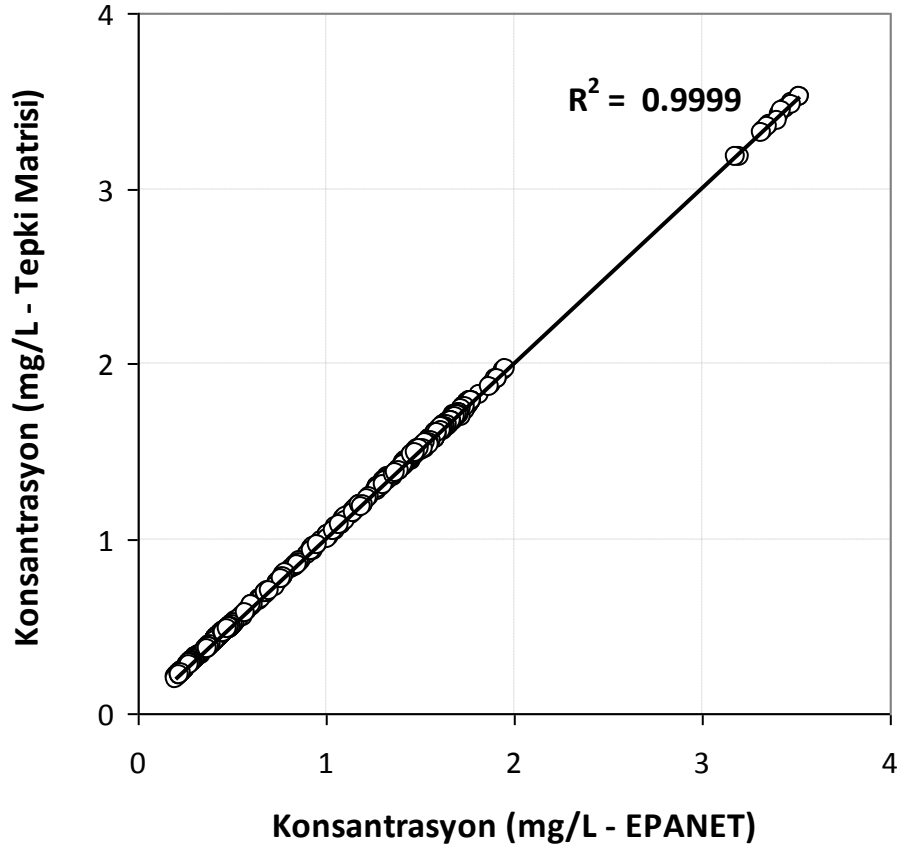
Wang, H., Guo, W., Xu, J., Gu, H., “A hybrid PSO for optimizing locations of booster chlorination stations in water distribution systems”, *Proceedings of the 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, Volume 1, 126-129, (2010).

World Health Organization, *Guidelines for drinking-water quality*, 2nd edition, Volume 2, Health criteria and other supporting information, Geneva, (1996).

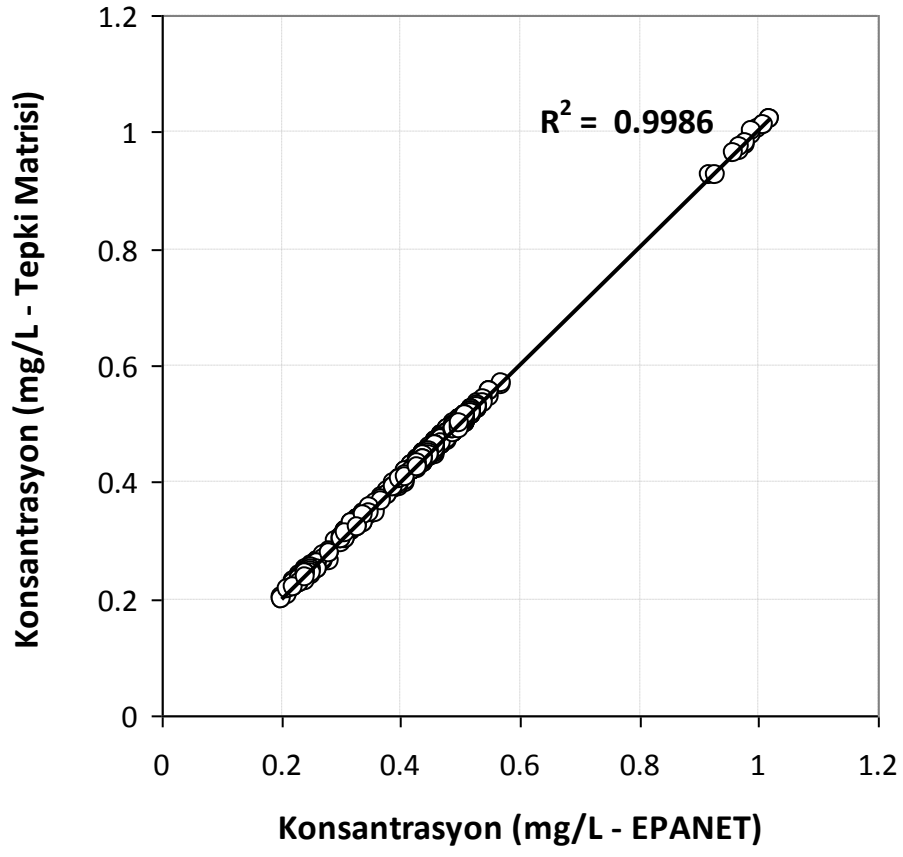
EKLER

8. EKLER

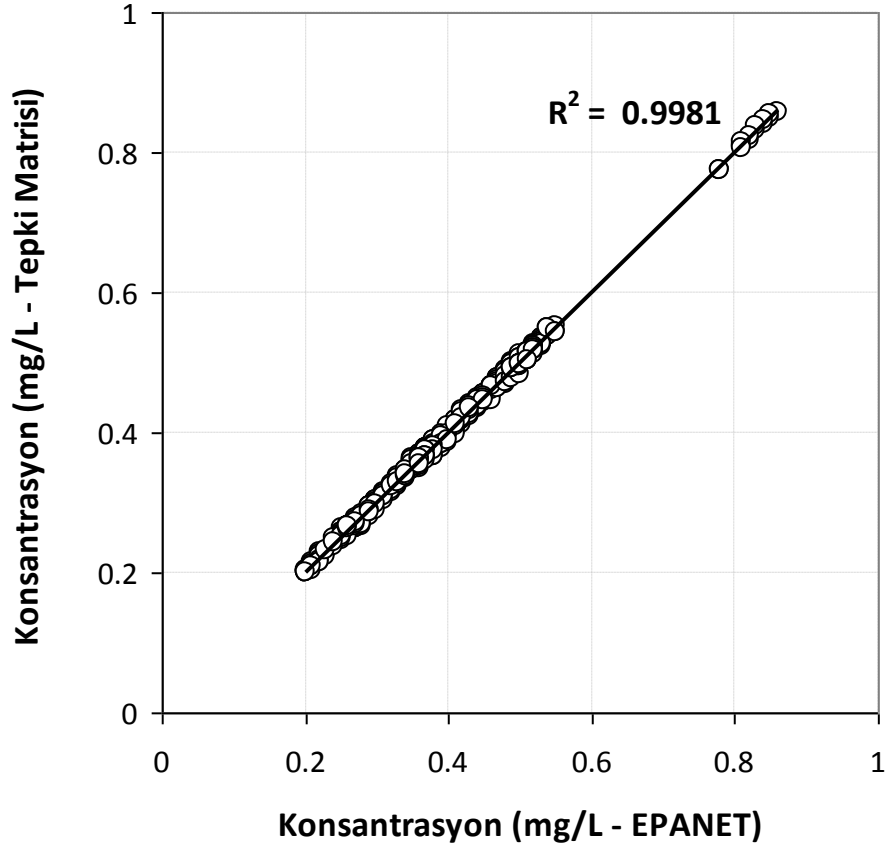
EK-A Doğrusal Süperpozisyon ile Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması



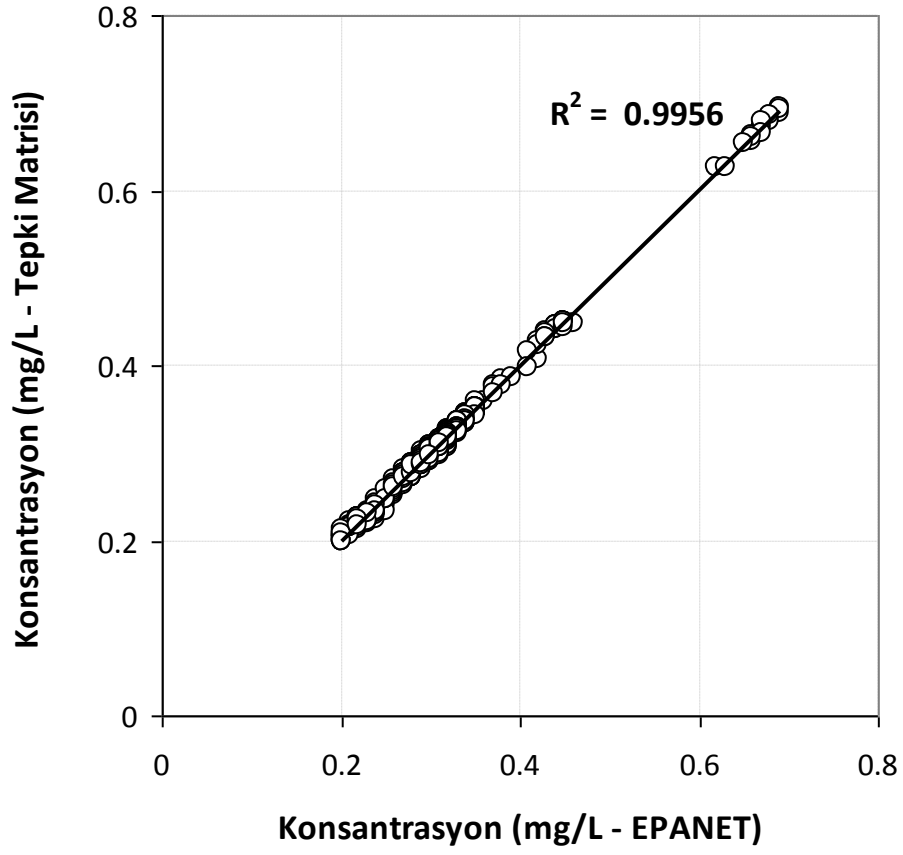
Şekil A. 1: $n_b = 1$ için doğrusal süperpozisyon ile EPANET sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil A. 2: $n_b = 2$ için doğrusal süperpozisyon ile EPANET sonuçlarının karşılaştırılması

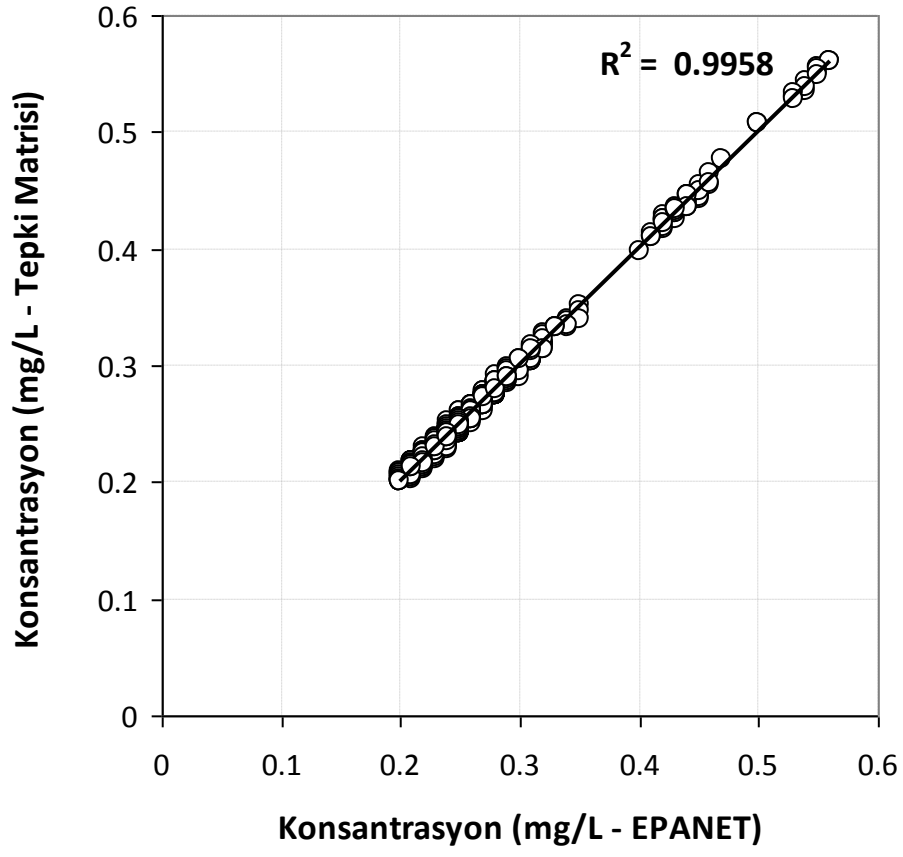


Şekil A. 3: $n_b = 3$ için doğrusal süperpozisyon ile EPANET sonuçlarının karşılaştırılması

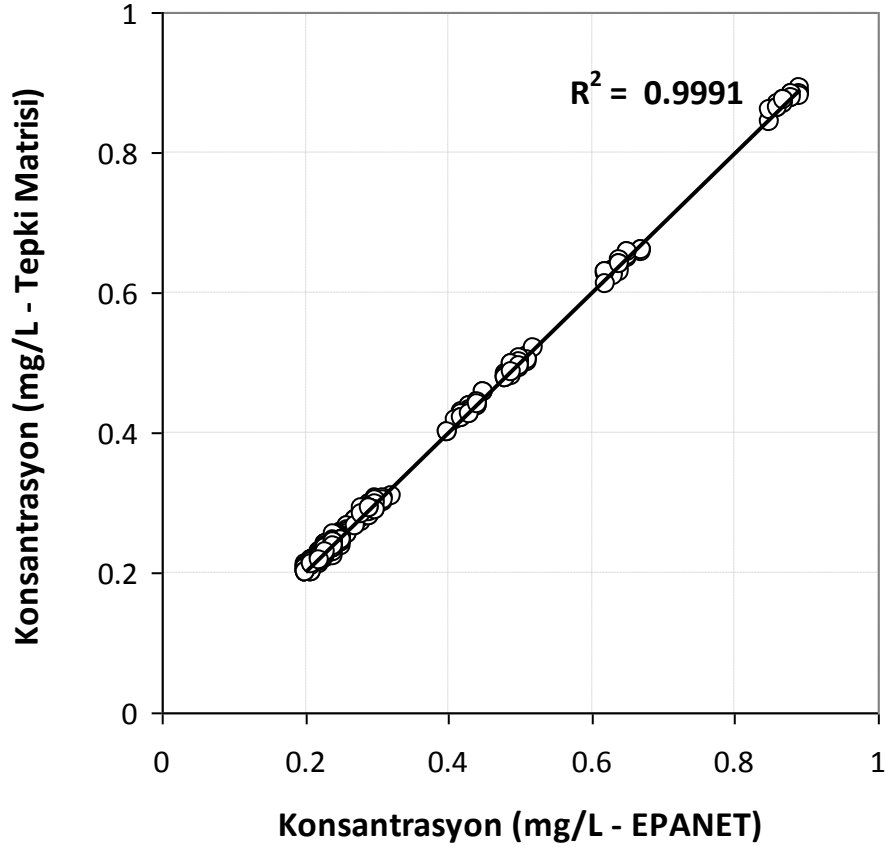


Şekil A. 4: $n_b = 4$ için doğrusal süperpozisyon ile EPANET sonuçlarının karşılaştırılması

Ek-A.1: $n_b = 4$ için doğrusal süperpozisyon ile EPANET sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil A. 5: $n_b = 5$ için doğrusal süperpozisyon ile EPANET sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil A. 6: $n_b = 6$ için doğrusal süperpozisyon ile EPANET sonuçlarının karşılaştırılması

EK-B De Jong'un 1. Test Fonksiyonu

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

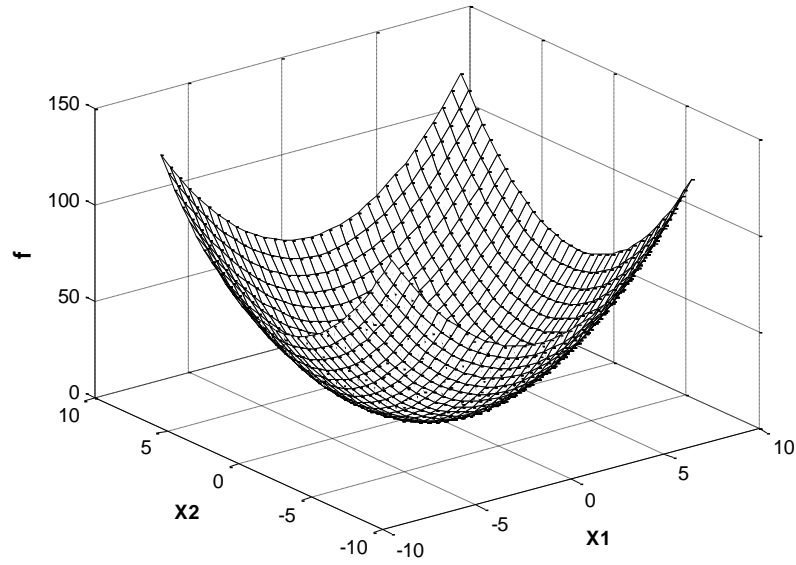
$$\text{Amaç Fonksiyonu} : f(x) = \min \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 \right]$$

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

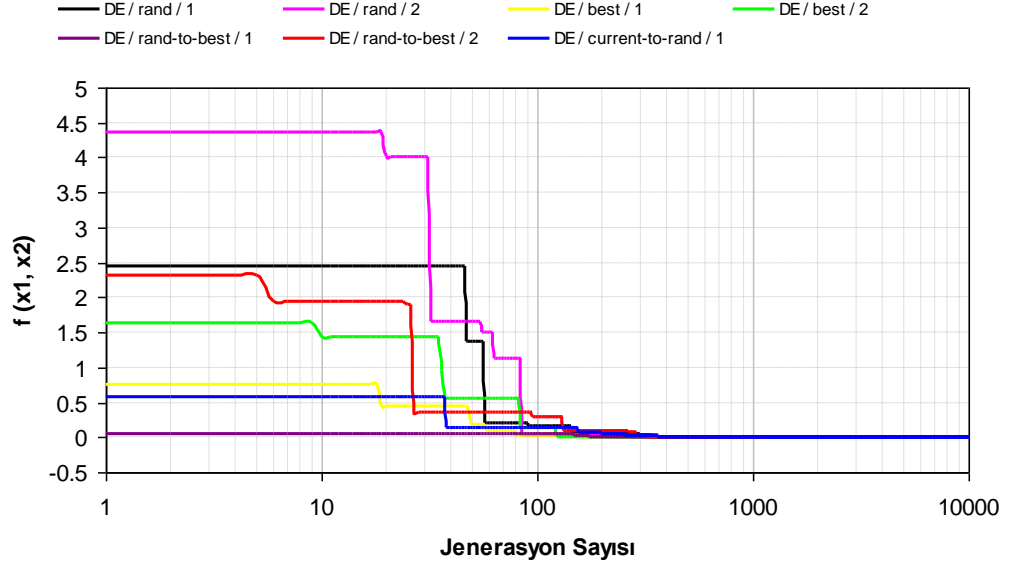
$$\text{Global Optimum} : f(x) = 0$$

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

Değişken sayısının $n = 2$ olması durumunda fonksiyonun grafiği Şekil B.1'de, amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi ise Şekil B.2'de verilmiştir.



Şekil B. 1: DE Jong'un 1. test fonksiyonu



Şekil B. 2: Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi

10000 jenerasyon sonucunda en iyi sonucu veren *DE/current-to-rand/1* stratejisi ile bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

Fonksiyon Değeri : $f(x) = 0$

Çözüm : $x_1 = -1.390 \times 10^{-32}$ $x_2 = -4.766 \times 10^{-31}$

Farklı DGA stratejileri ile elde edilen sonuçlar Tablo B.1'deki gibidir;

Tablo B. 1: Farklı DGA stratejileri için sonuçlar

DGA Stratejisi	Bulunan Sonuçlar	
	$f(x)$	x_i
DE/rand/1	0	$x_1 = 5.86077 \times 10^{-41}$ $x_2 = -1.35811 \times 10^{-40}$
DE/rand/2	0	$x_1 = 1.70386 \times 10^{-29}$ $x_2 = 3.07951 \times 10^{-29}$
DE/best/1	0	$x_1 = 1.15365 \times 10^{-63}$ $x_2 = -7.22457 \times 10^{-63}$
DE/best/2	0	$x_1 = -1.27156 \times 10^{-35}$ $x_2 = -3.28031 \times 10^{-35}$
DE/rand-to-best/1	0	$x_1 = 1.78088 \times 10^{-57}$ $x_2 = -3.70515 \times 10^{-57}$
DE/rand-to-best/2	0	$x_1 = 6.37234 \times 10^{-35}$ $x_2 = -1.33137 \times 10^{-34}$
DE/current-to-rand/1	0	$x_1 = -1.390 \times 10^{-32}$ $x_2 = -4.766 \times 10^{-31}$

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

EK-C Rastrigin'in 6. Test Fonksiyonu

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

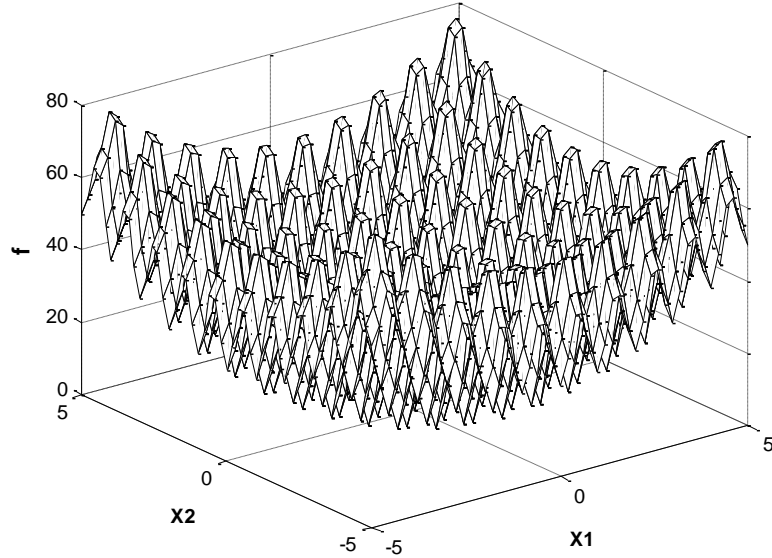
$$\text{Amaç Fonksiyonu} : f(x) = \min \left[10n + \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)) \right]$$

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

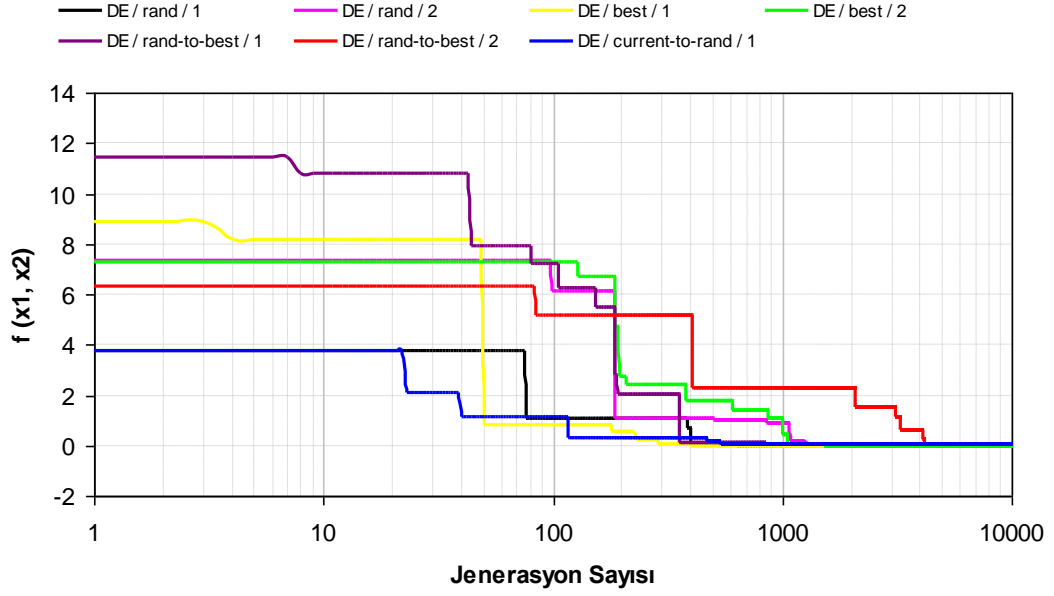
$$\text{Global Optimum} : f(x) = 0$$

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

Değişken sayısının $n = 2$ olması durumunda fonksiyonun grafiği Şekil C.1'deki gibidir;



Şekil C. 1: Rastrigin'in 6. test fonksiyonu



Şekil C. 2: Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi

10000 jenerasyon sonucunda en iyi sonucu veren *DE/best/2* stratejisi ile bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

Fonksiyon Değeri : $f(x) = 0$

Çözüm : $x_1 = -1.79941 \times 10^{-9}$ $x_2 = 1.58594 \times 10^{-9}$

Farklı mutasyon stratejileri ile 10000 jenerasyon sonucu elde edilen çözümler Tablo C.1’de, amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi ise Şekil C.2’de verilmiştir;

Tablo C. 1: Farklı DGA stratejileri için elde edilen sonuçlar

DGA Stratejisi	Bulunan Sonuçlar	
	$f(x)$	x_i
DE/rand/1	0	$x_1 = -1.32801 \times 10^{-9}$ $x_2 = 2.78021 \times 10^{-10}$
DE/rand/2	0	$x_1 = 2.98541 \times 10^{-9}$ $x_2 = 6.38015 \times 10^{-10}$
DE/best/1	0	$x_1 = 6.34875 \times 10^{-10}$ $x_2 = -9.37393 \times 10^{-10}$
DE/best/2	0	$x_1 = -1.79941 \times 10^{-9}$ $x_2 = 1.58594 \times 10^{-9}$
DE/rand-to-best/1	0	$x_1 = -0.01693$ $x_2 = -3.05252 \times 10^{-9}$
DE/rand-to-best/2	0	$x_1 = -1.20192 \times 10^{-8}$ $x_2 = 0.01805$
DE/current-to-rand/1	0	$x_1 = -9.82448 \times 10^{-10}$ $x_2 = -0.01269$

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

EK-D Michalewicz'in 12. Test Fonksiyonu

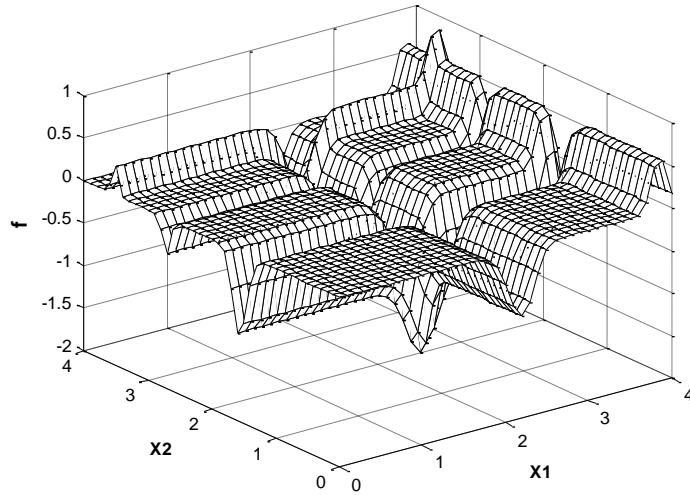
Michalewicz'in 12. test fonksiyonu (Michalewicz 1992), değişken sayısının faktöriyeli kadar ($n!$) lokal minimum içeren bir fonksiyondur. Fonksiyondaki m parametresi çözüm yüzeyindeki vadi şekillerinin dikliğini temsil etmektedir ve büyük m değerleri global minimum çözüme ulaşılmasını zorlaştırmaktadır.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

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

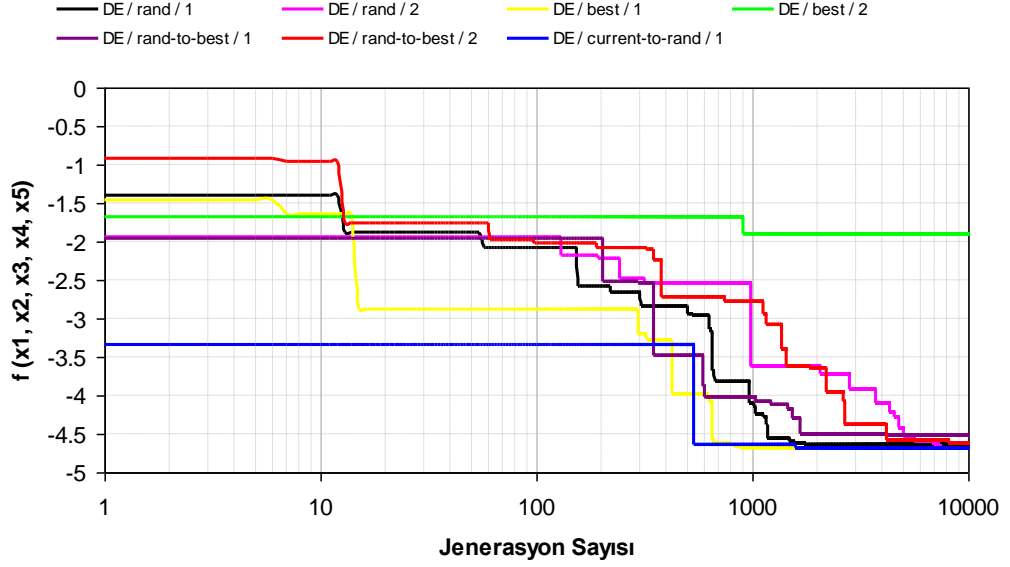
$$\text{Çözüm Uzayı} \quad : \quad x_i \in [0, \pi]$$

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

Değişken sayısının $n=2$ kabul edildiği durumda fonksiyonun yapısı Şekil D.1'de ve $n=5$ olması durumunda amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi ise Şekil D.2'de görülmektedir.



Şekil D. 1: Michalewicz'in 12. test fonksiyonu



Şekil D. 2: Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi

$n = 5$ için 10000 jenerasyon sonucunda *DE/rand/2* stratejisi ile bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir;

Fonksiyon Değeri : $f(x) = -4.68765$

Çözüm : $x_1 = 2.20266$ $x_2 = 1.57088$ $x_3 = 1.28490$
 $x_4 = 1.92313$ $x_5 = 1.72047$

Farklı mutasyon stratejileri ile elde edilen sonuçlar Tablo D.1'deki gibidir.;

Tablo D. 1: Farklı DGA stratejileri için elde edilen sonuçlar

DGA Stratejisi	Bulunan Sonuçlar	
	$f(x)$	x_i
DE/rand/1	-4.64589	$x_1 = 2.20291$ $x_2 = 1.57080$ $x_3 = 1.28499$ $x_4 = 1.11378$ $x_5 = 1.72047$
DE/rand/2	-4.68765	$x_1 = 2.20266$ $x_2 = 1.57088$ $x_3 = 1.28490$ $x_4 = 1.92313$ $x_5 = 1.72047$
DE/best/1	-4.68765	$x_1 = 2.20291$ $x_2 = 1.57080$ $x_3 = 1.28499$ $x_4 = 1.92306$ $x_5 = 1.72047$
DE/best/2	-1.89007	$x_1 = 2.17044$ $x_2 = 3.14159$ $x_3 = 3.14159$ $x_4 = 2.48670$ $x_5 = 2.25094$
DE/rand-to-best/1	-4.51067	$x_1 = 2.20288$ $x_2 = 1.57078$ $x_3 = 2.21934$ $x_4 = 1.92305$ $x_5 = 1.72740$
DE/rand-to-best/2	-4.61648	$x_1 = 2.19323$ $x_2 = 1.60686$ $x_3 = 1.29118$ $x_4 = 1.93097$ $x_5 = 1.72216$
DE/current-to-rand/1	-4.68765	$x_1 = 2.202091$ $x_2 = 1.57080$ $x_3 = 1.28499$ $x_4 = 1.92306$ $x_5 = 1.72047$

Yukarıdaki sonuçlardan görüleceği gibi, optimizasyon modelinin bulduğu sonuç ile iyi uyum içindedir.

EK-E Goldstein-Price'in Test Fonksiyonu

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

Amaç Fonksiyonu :

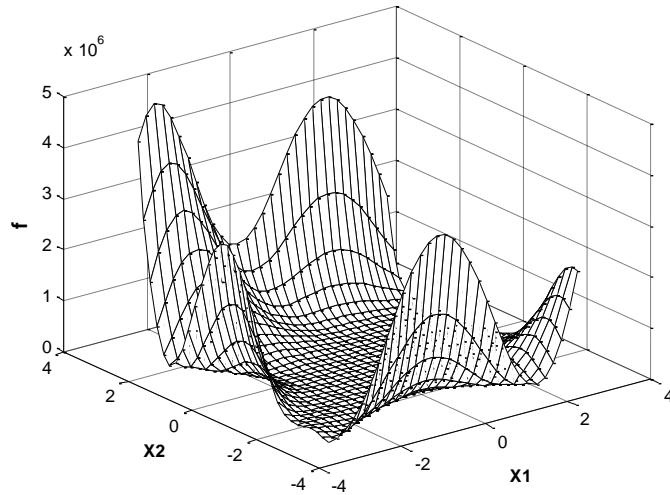
$$f(x) = \min \left[\begin{array}{l} \left[1 + (x_1 + x_2 + 1)^2 \times \begin{pmatrix} 19 - 14x_1 + 3x_1^2 \\ -14x_2 + 6x_1x_2 + 3x_2^2 \end{pmatrix} \right] \times \\ \left[30 + (2x_1 - 3x_2)^2 \times \begin{pmatrix} 18 - 32x_1 + 12x_1^2 \\ +48x_2 - 36x_1x_2 + 27x_2^2 \end{pmatrix} \right] \end{array}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

Çözüm Uzayı : $x_i \in [-2, 2]$

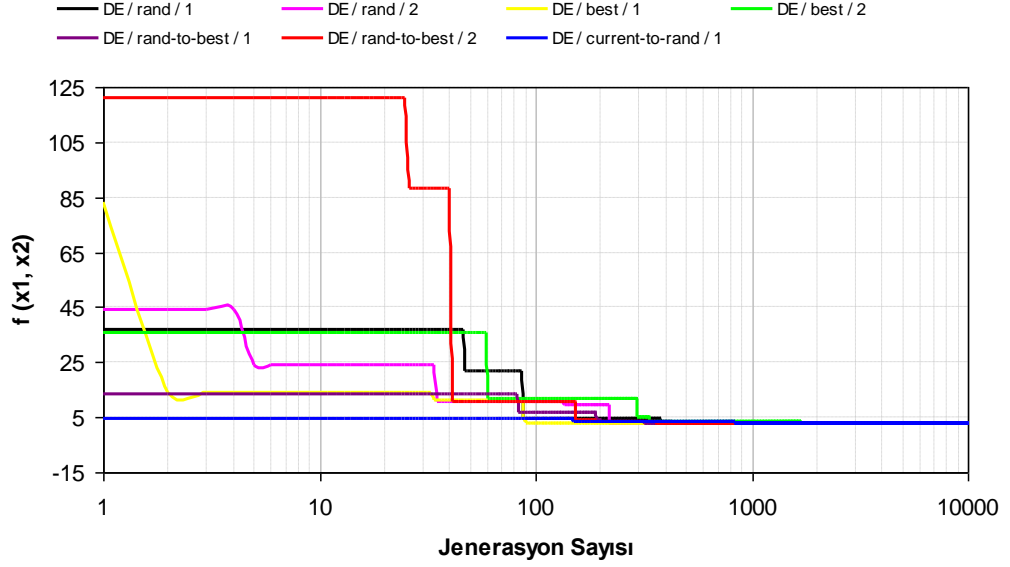
Global Optimum : $f(x) = 3$

Optimum Çözüm : $x_1 = 0 \quad x_2 = -1$

Fonksiyonun yapısı Şekil E.1'de, amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi ise Şekil E.2'de verilmiştir.



Şekil E. 1: Goldstein-Price'in test fonksiyonu



Şekil E. 2: Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi

10000 jenerasyon sonucunda *DE/rand-to-best/1* stratejisi ile bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

Fonksiyon Değeri : $f(x) = 3.00000$

Çözüm : $x_1 = 0.00000$ $x_2 = -1.00000$

Farklı DGA stratejileri için 10000 jenerasyon sonucunda elde edilen çözümler Tablo E.1’de verilmiştir. Görüleceği gibi bir çok strateji de global optimum çözüm yakalanmıştır.

Tablo E. 1: Farklı DGA stratejileri için elde edilen sonuçlar

DGA Stratejisi	Bulunan Sonuçlar	
	$f(x)$	x_i
DE/rand/1	3	$x_1 = 0$ $x_2 = -1$
DE/rand/2	3	$x_1 = 0$ $x_2 = -1$
DE/best/1	3	$x_1 = 0$ $x_2 = -1$
DE/best/2	3	$x_1 = 0$ $x_2 = -1$
DE/rand-to-best/1	3	$x_1 = 0$ $x_2 = -1$
DE/rand-to-best/2	3	$x_1 = 0$ $x_2 = -1$
DE/current-to-rand/1	3	$x_1 = 0$ $x_2 = -1$

EK-F Schwefel'in 7. Test Fonksiyonu

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

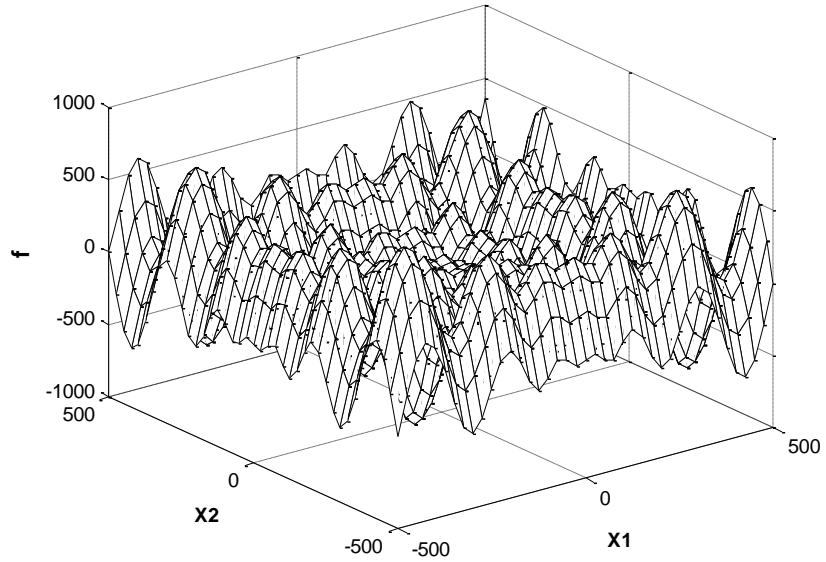
$$\text{Amaç Fonksiyonu} : f(x) = \min \left[\sum_{i=1}^n -x_i \cdot \sin(\sqrt{|x_i|}) \right]$$

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

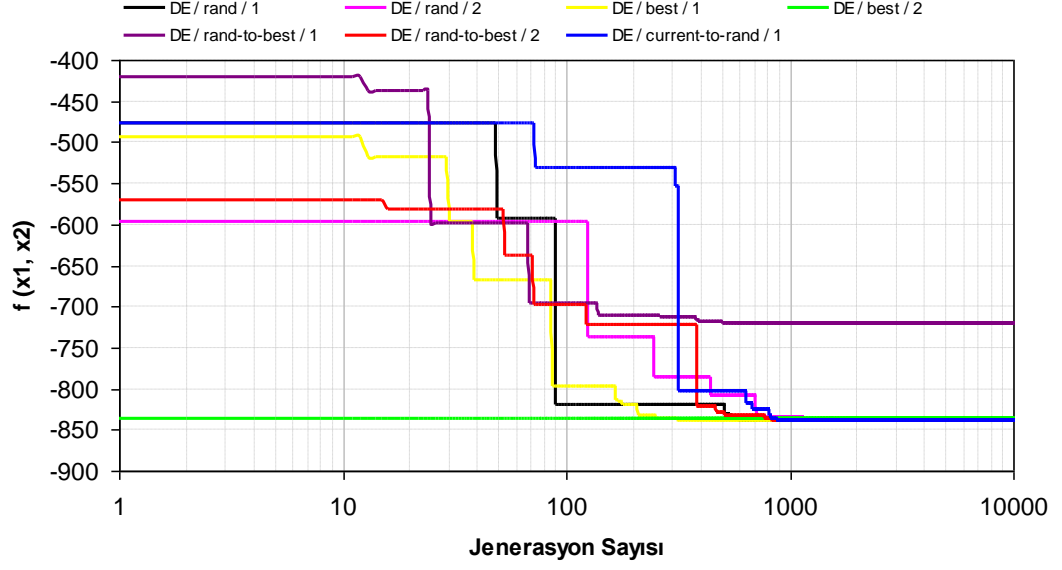
$$\text{Global Optimum} : f(x) = -n \cdot 418.98292$$

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

Değişken sayısının $n=2$ kabul edilmesi durumunda fonksiyonun yapısı Şekil F.1'de, amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi ise Şekil F.2'de verilmiştir.



Şekil F. 1: Schwefel'in 7. test fonksiyonu



Şekil F. 2: Amaç fonksiyonunun jenerasyon sayısı ile değişimi

$n = 2$ için 10000 jenerasyon sonucunda *DE/rand/1* stratejisi ile bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

Fonksiyon Değeri : $f(x) = -837.96577$

Çözüm : $x_1 = 420.96874$ $x_2 = 420.96874$

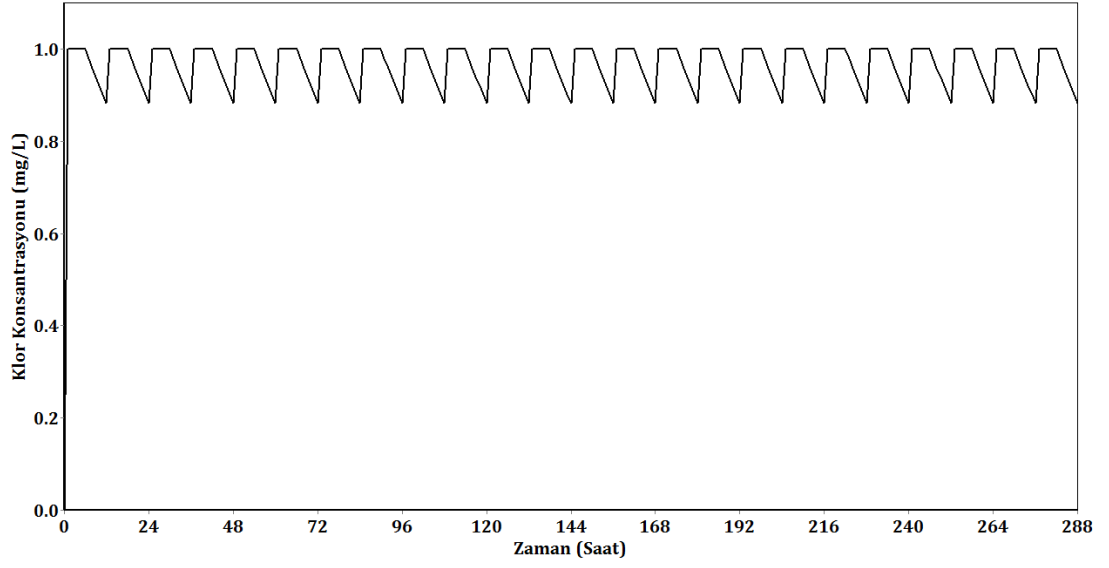
Farklı DGA stratejileri için 10000 jenerasyon sonucunda elde edilen çözümler Tablo F.1'deki gibidir;

Tablo F. 1: Farklı DGA stratejileri için elde edilen sonuçlar

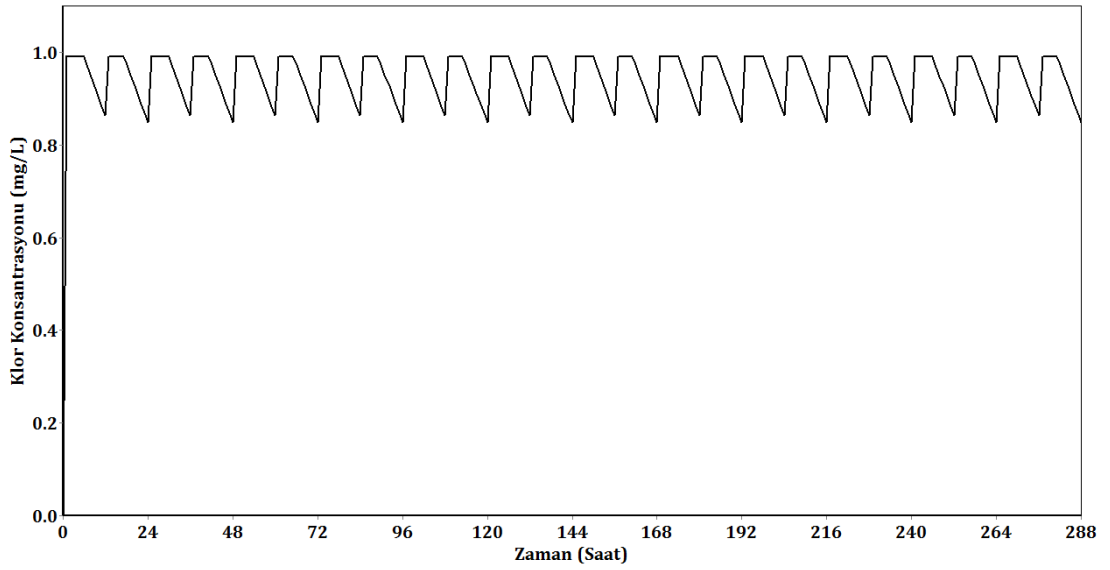
DGA Stratejisi	Bulunan Sonuçlar	
	$f(x)$	x_i
DE/rand/1	-837.96577	$x_1 = 420.96874$ $x_2 = 420.96874$
DE/rand/2	-837.96577	$x_1 = 420.96875$ $x_2 = 420.96875$
DE/best/1	-837.96577	$x_1 = 420.96875$ $x_2 = 420.96875$
DE/best/2	-835.8040	$x_1 = 416.82529$ $x_2 = 420.89194$
DE/rand-to-best/1	-719.52743	$x_1 = -302.52494$ $x_2 = 420.96875$
DE/rand-to-best/2	-837.96577	$x_1 = 420.96875$ $x_2 = 420.96875$
DE/current-to-rand/1	-837.96577	$x_1 = 420.96875$ $x_2 = 420.96875$

Tablo F.1 ve Şekil F.1'den görüleceği gibi, bu uygulama için de elde edilen sonuçlar global optimuma yakındır.

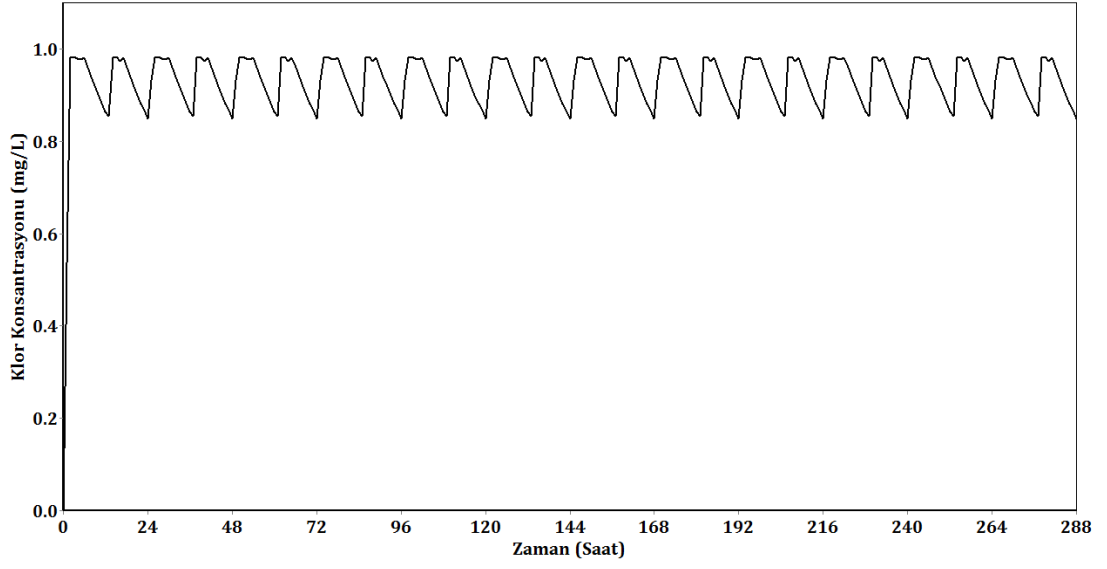
Ek-G Birim Konsantrasyon Değeri İçin Şebekenin Periyodik Yapısı



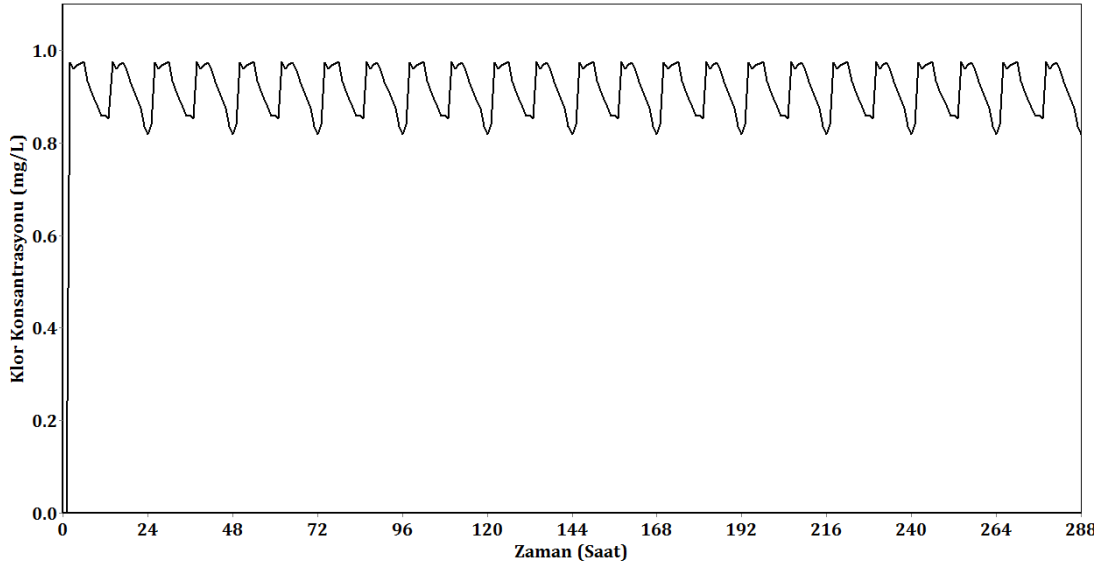
Şekil G. 1: 1 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



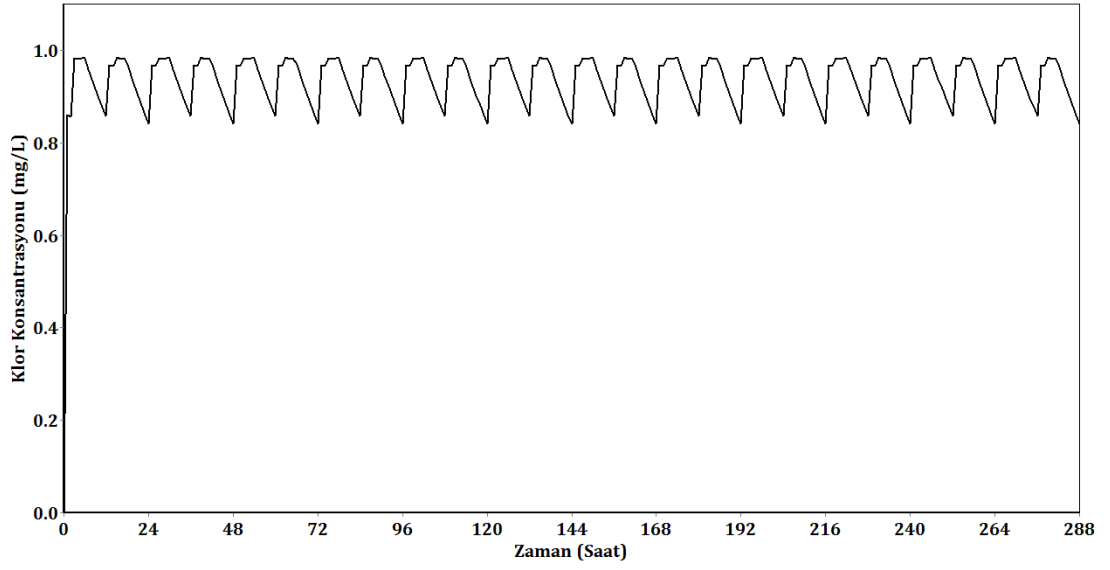
Şekil G. 2: 2 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



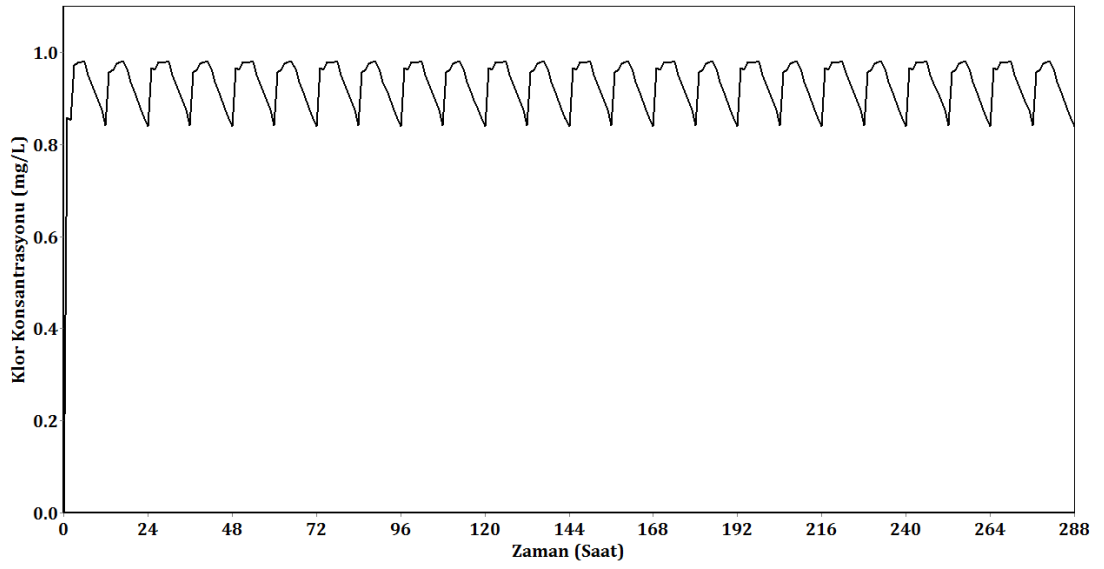
Şekil G. 3: 3 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



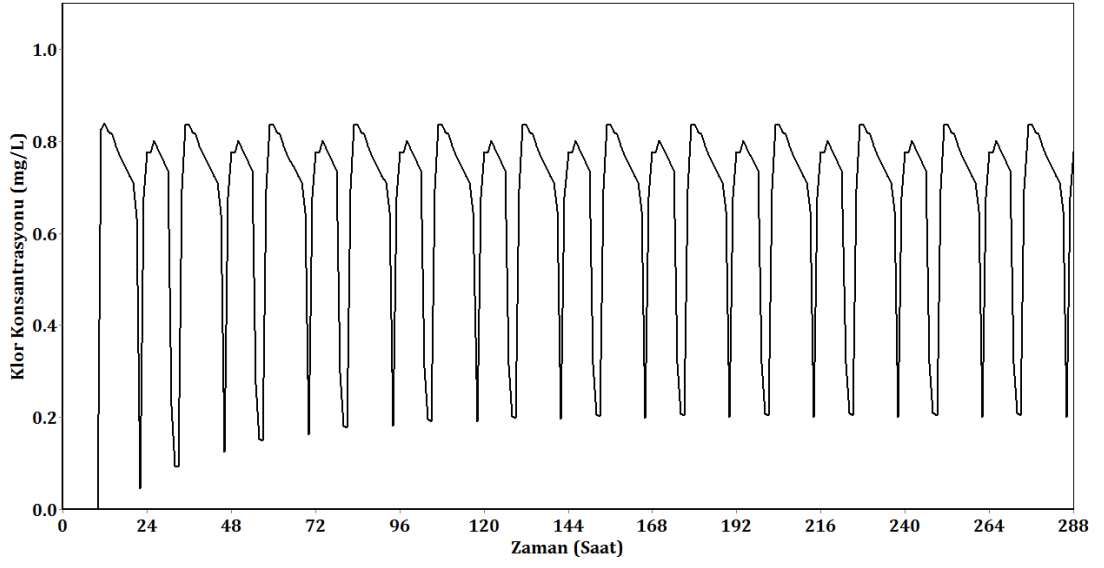
Şekil G. 4: 4 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



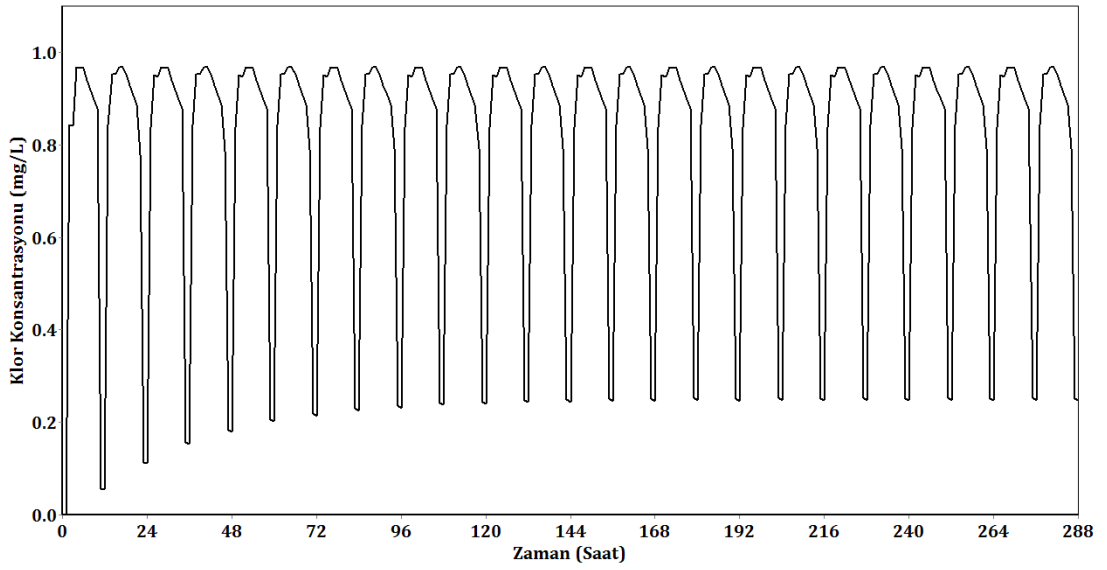
Şekil G. 5: 5 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



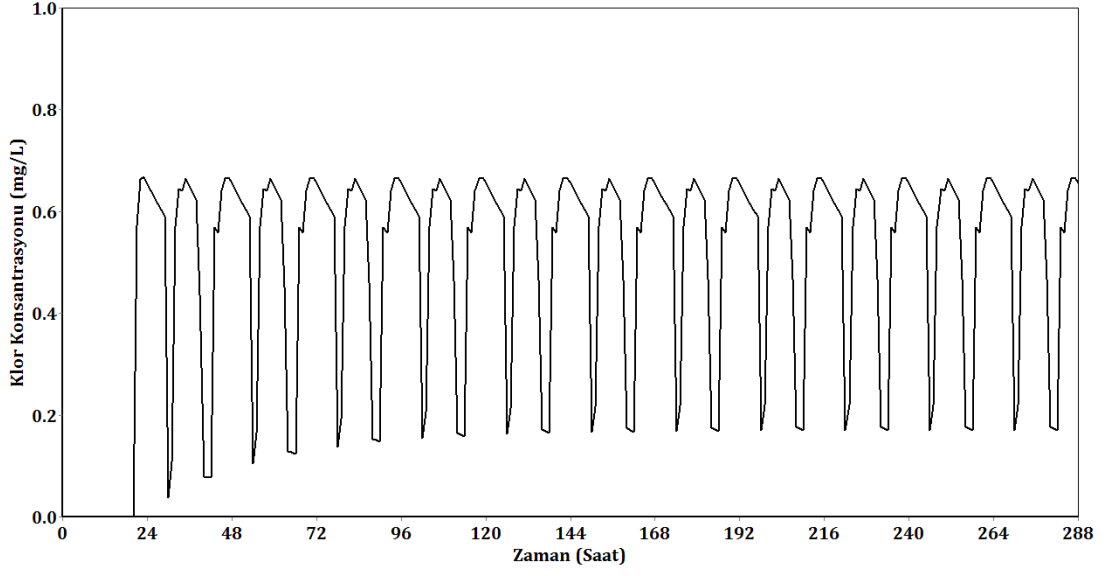
Şekil G. 6: 6 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



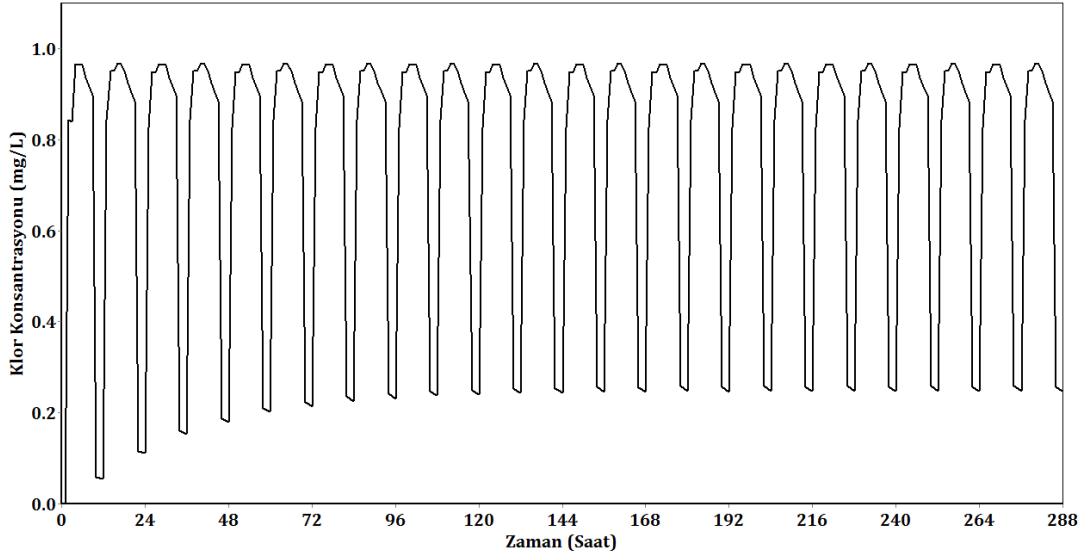
Şekil G. 7: 8 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



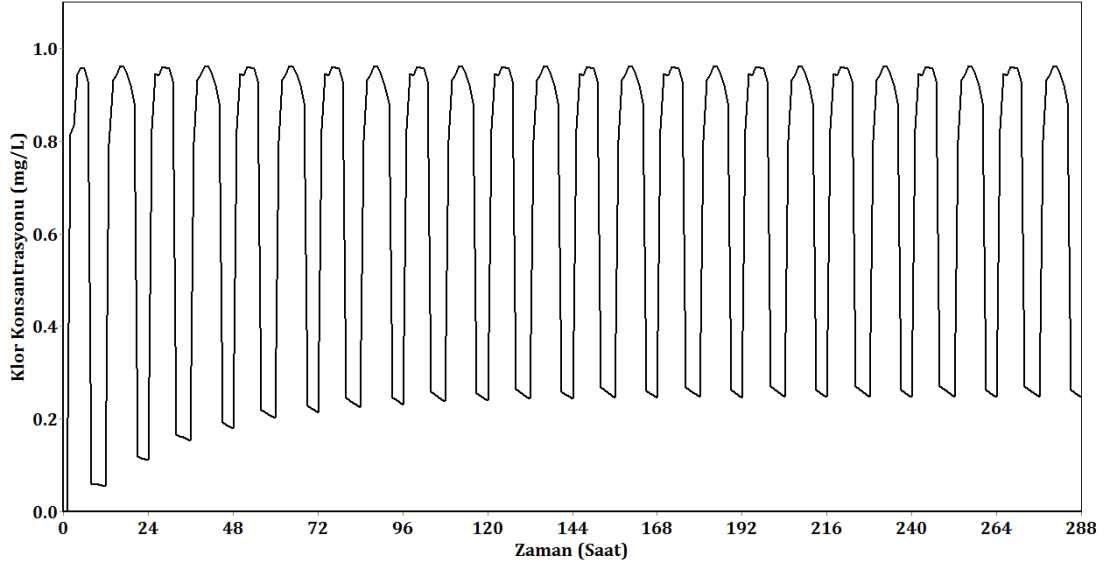
Şekil G. 8: 9 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



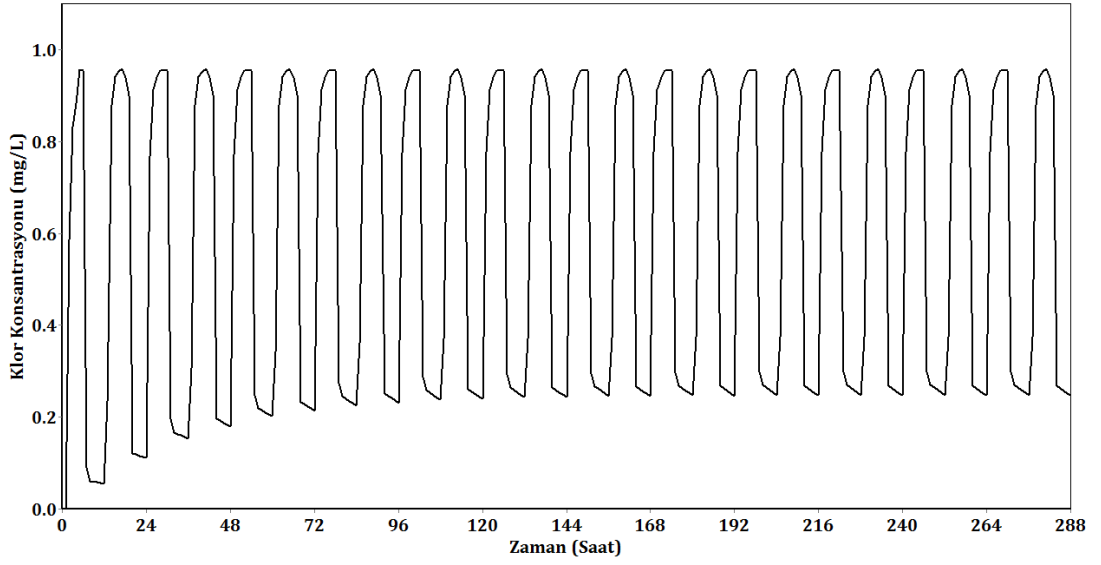
Şekil G. 9: 10 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



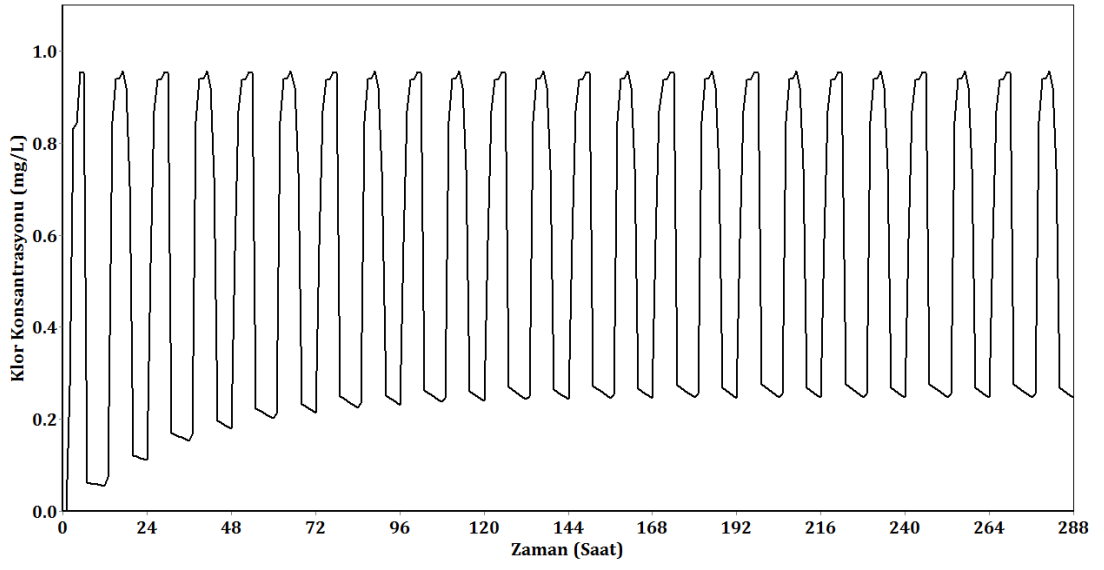
Şekil G. 10: 11 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



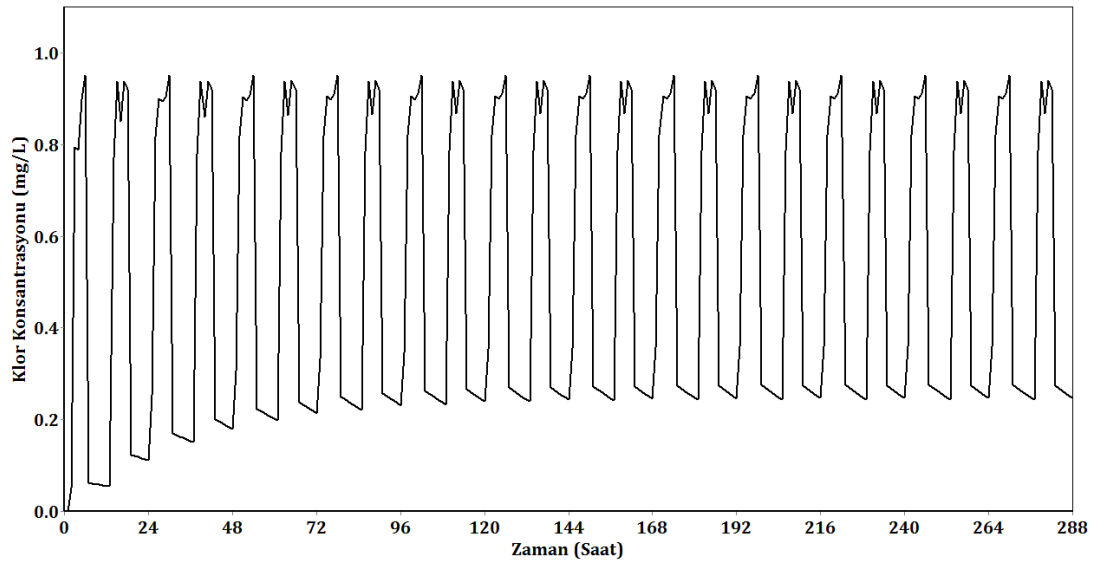
Şekil G. 11: 12 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



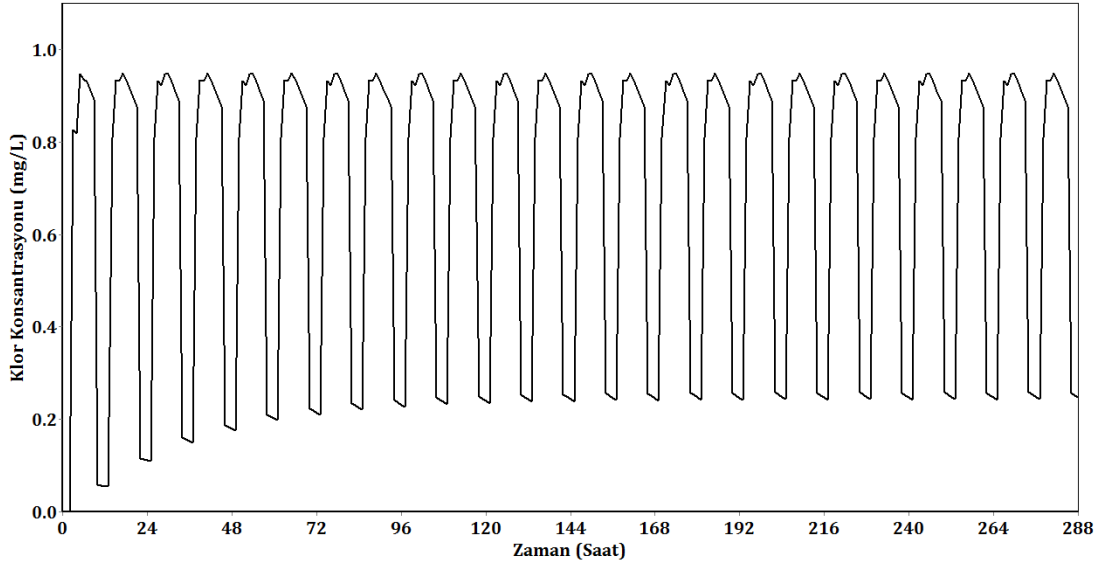
Şekil G. 12: 13 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



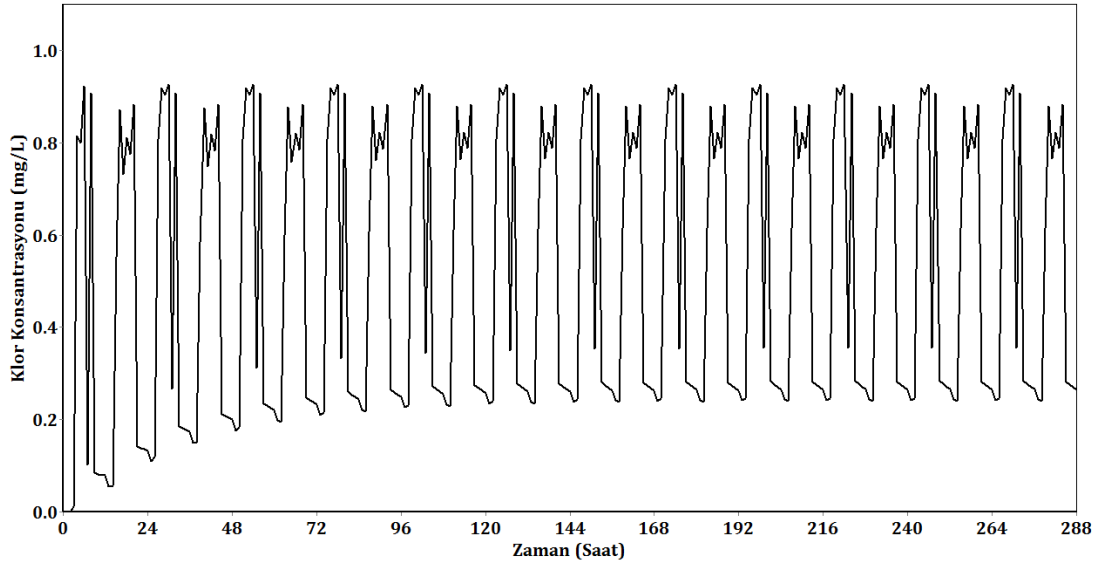
Şekil G. 13: 14 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



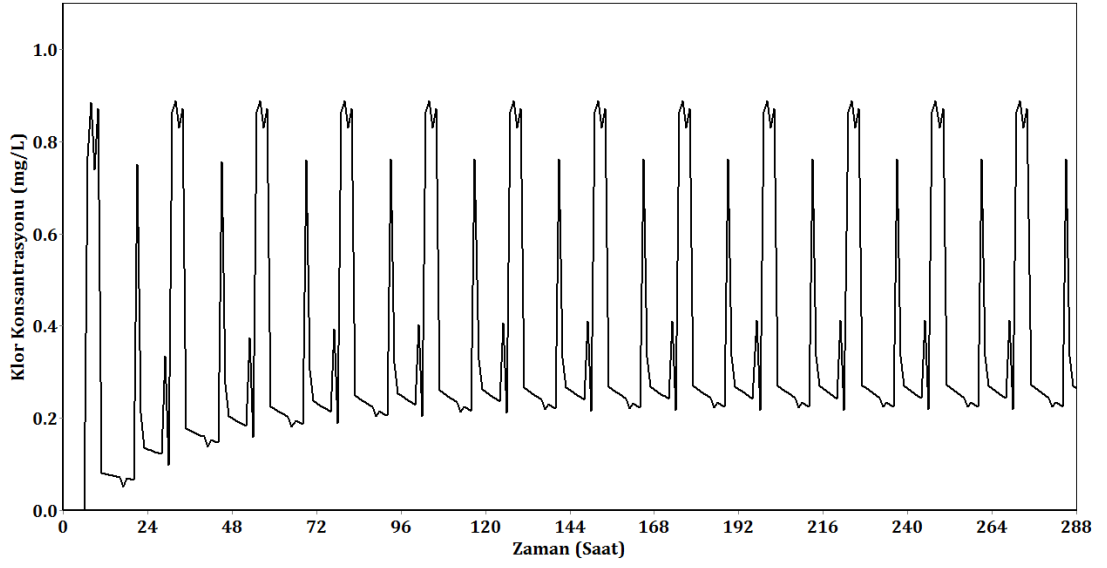
Şekil G. 14: 15 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



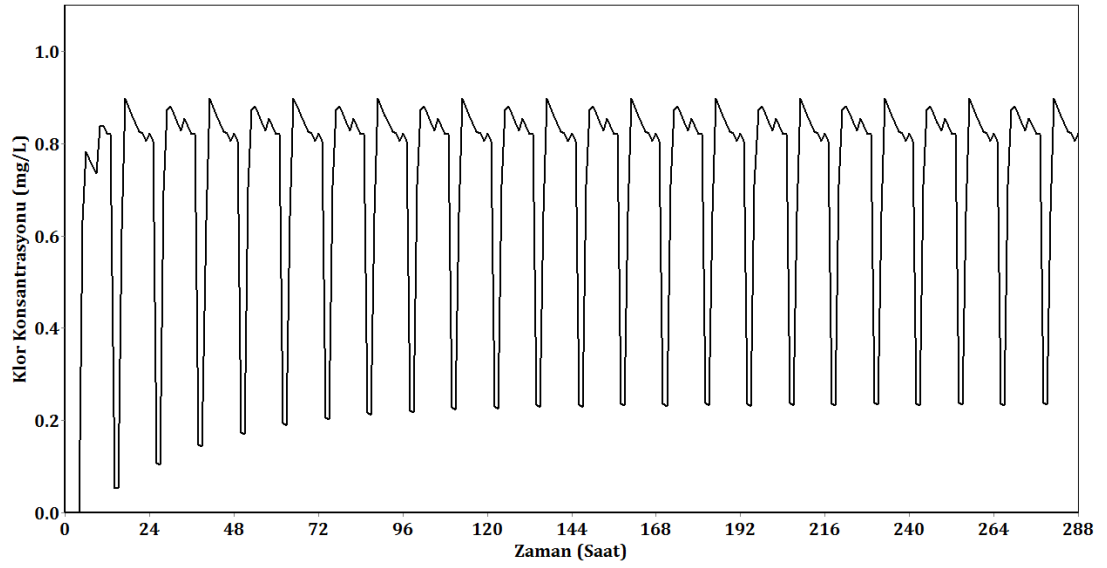
Şekil G. 15: 16 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



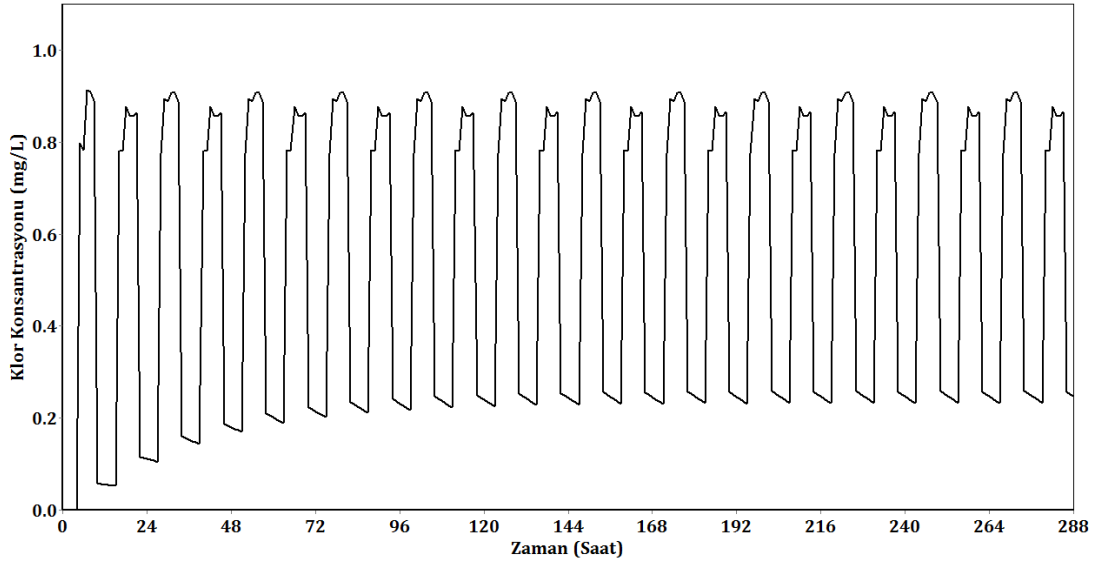
Şekil G. 16: 17 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



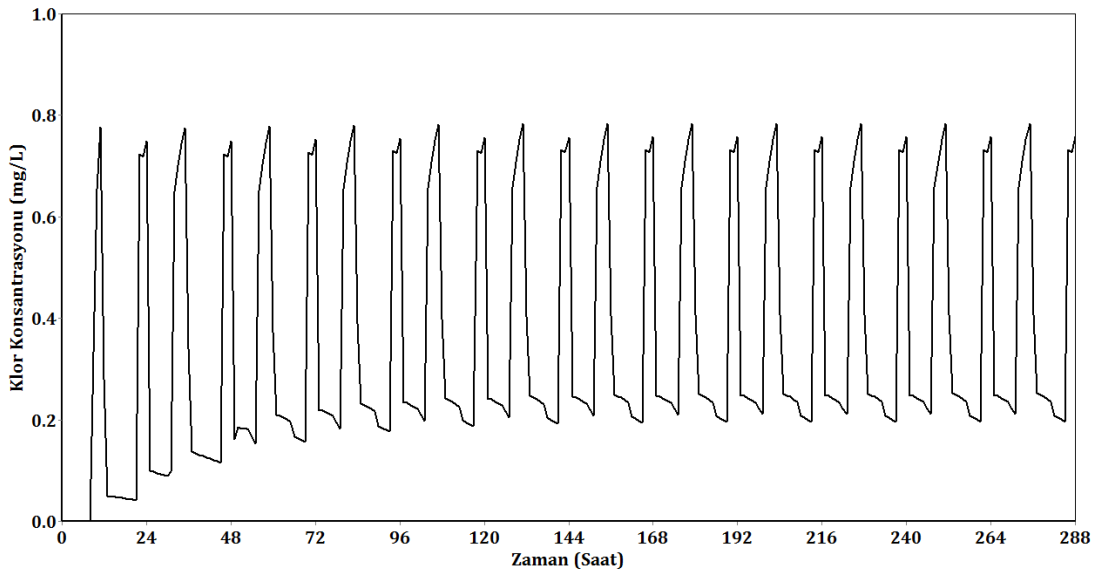
Şekil G. 17: 18 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



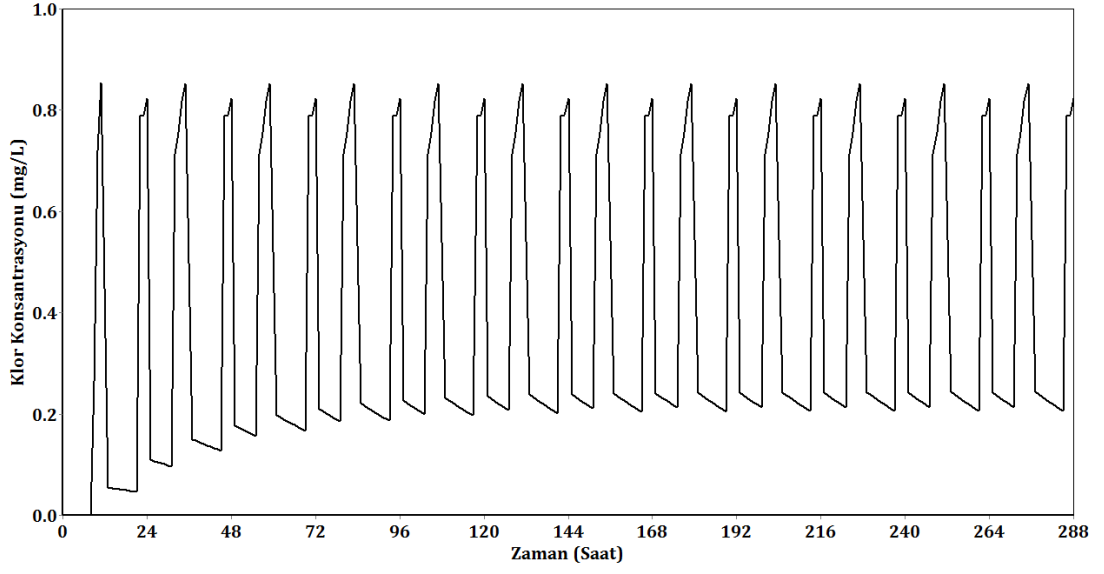
Şekil G. 18: 19 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



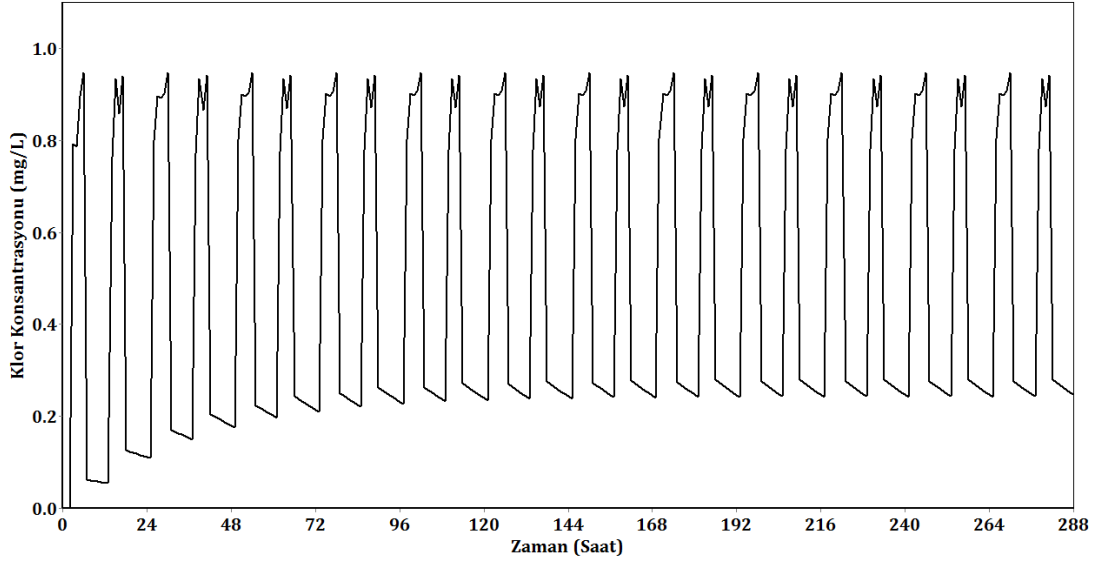
Şekil G. 19: 20 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



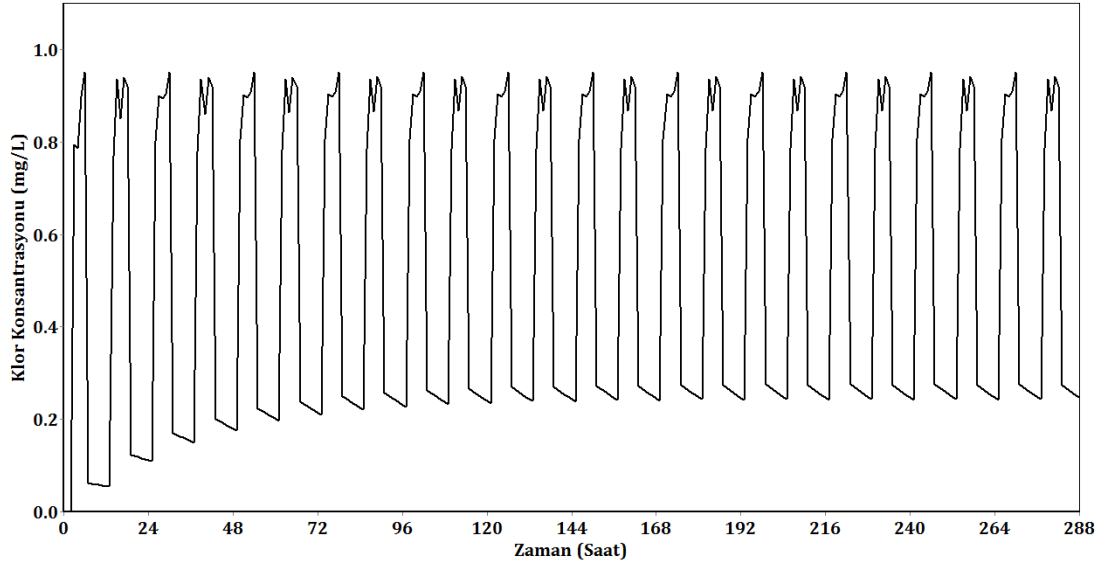
Şekil G. 20: 21 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



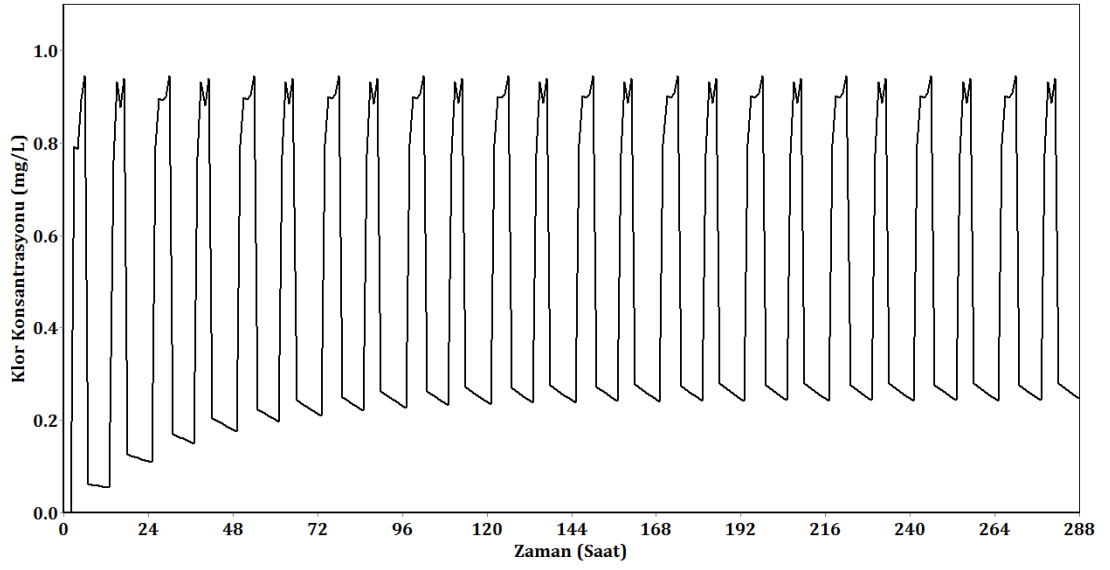
Şekil G. 21: 22 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



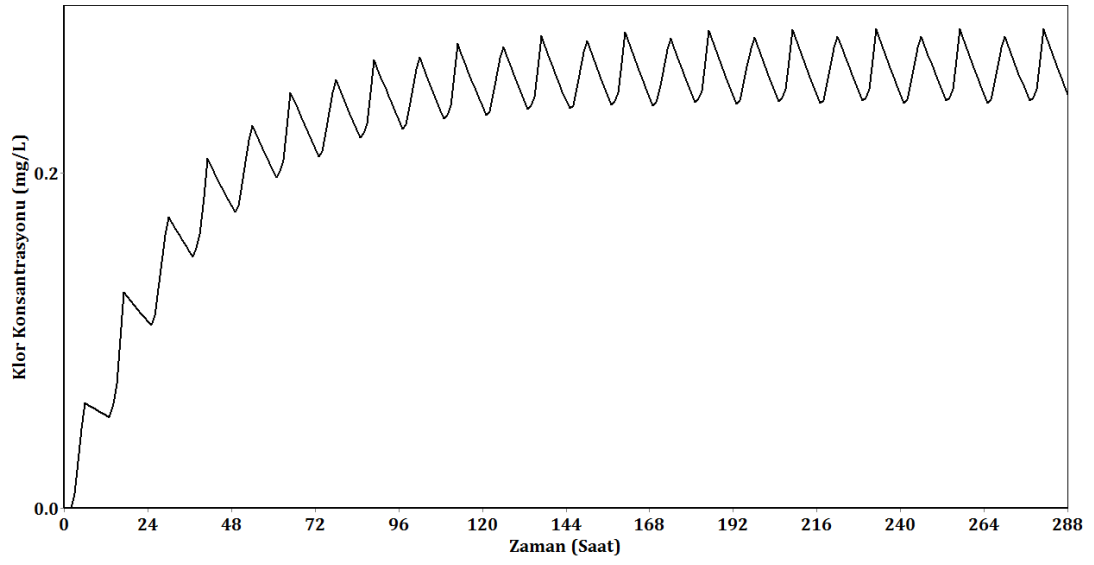
Şekil G. 22: 23 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



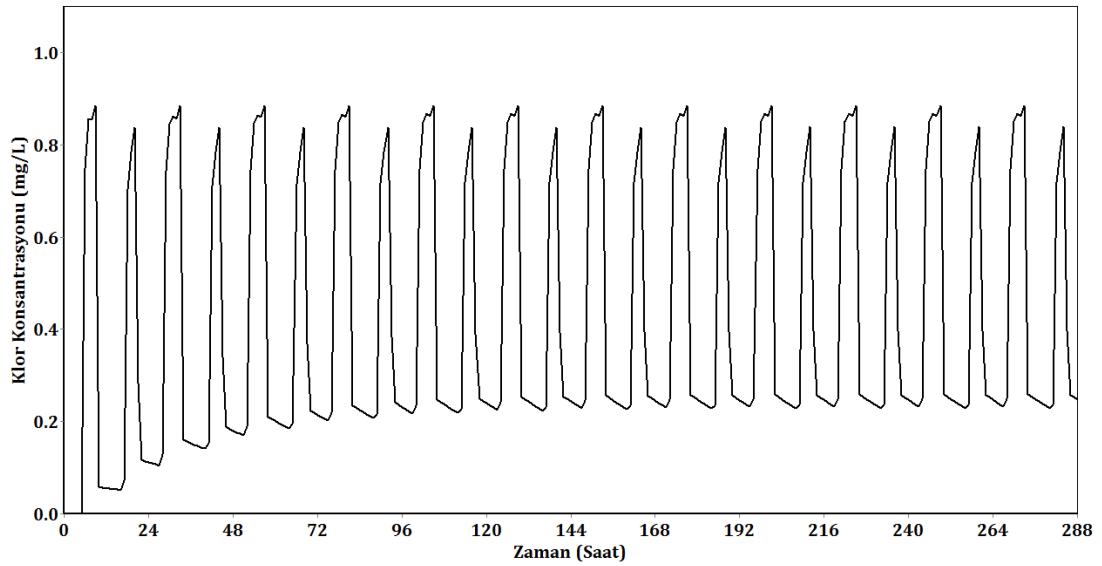
Şekil G. 23: 24 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



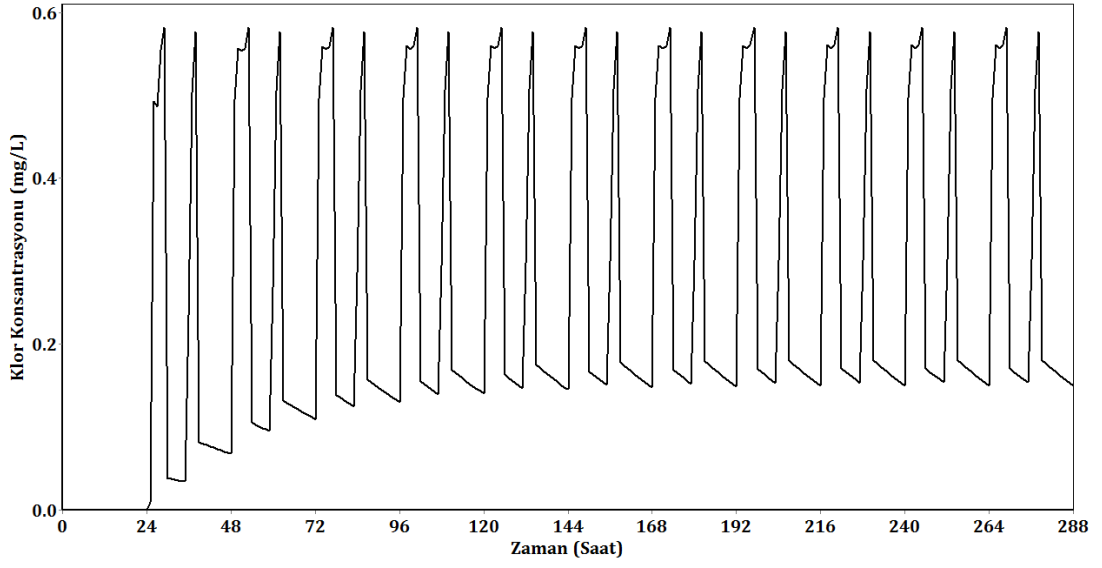
Şekil G. 24: 25 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



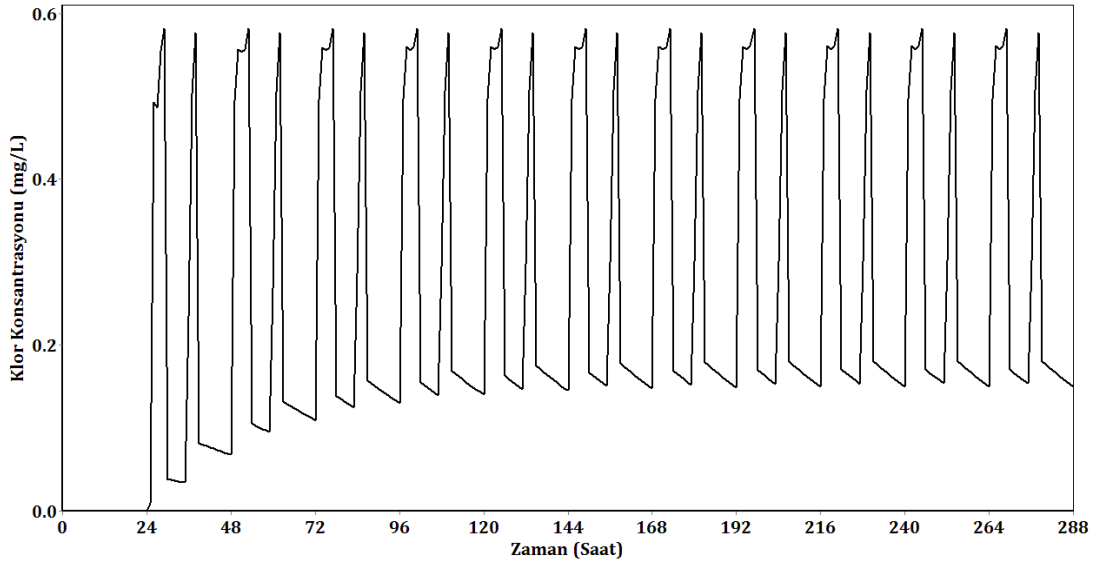
Şekil G. 25: Depo için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



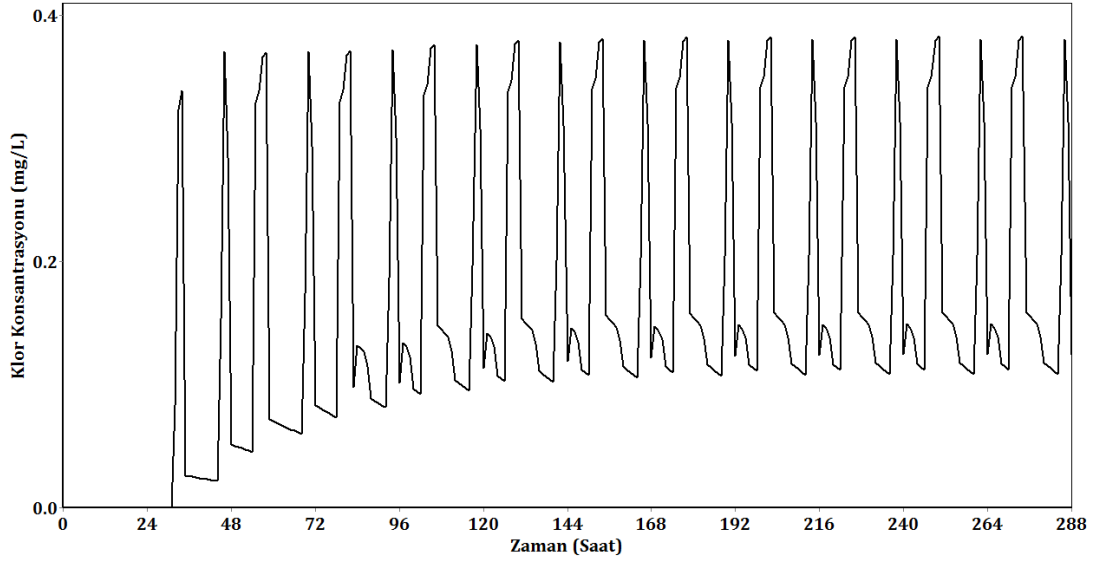
Şekil G. 26: 27 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



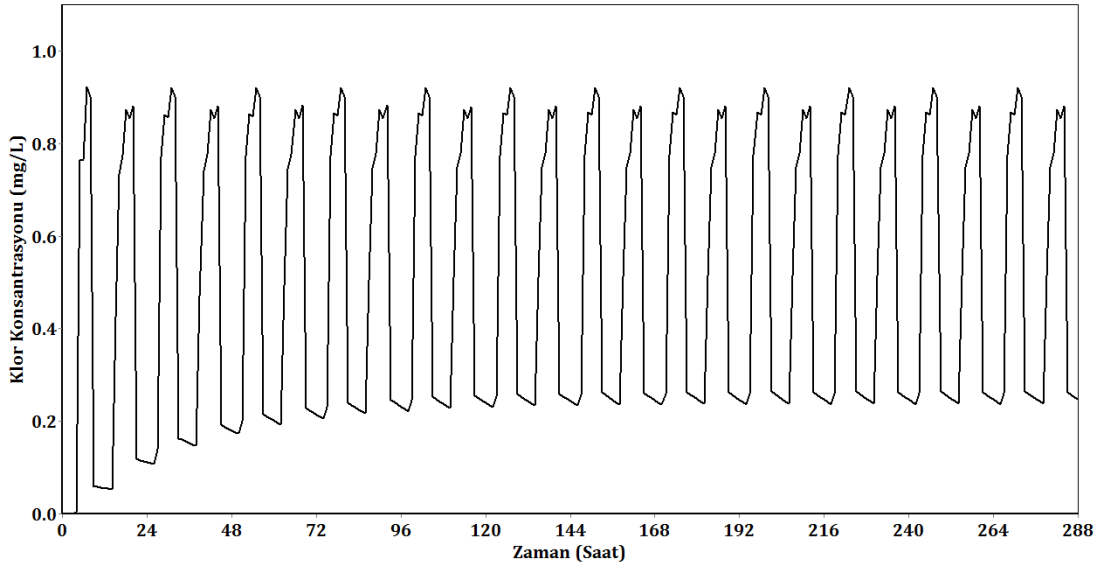
Şekil G. 27: 28 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



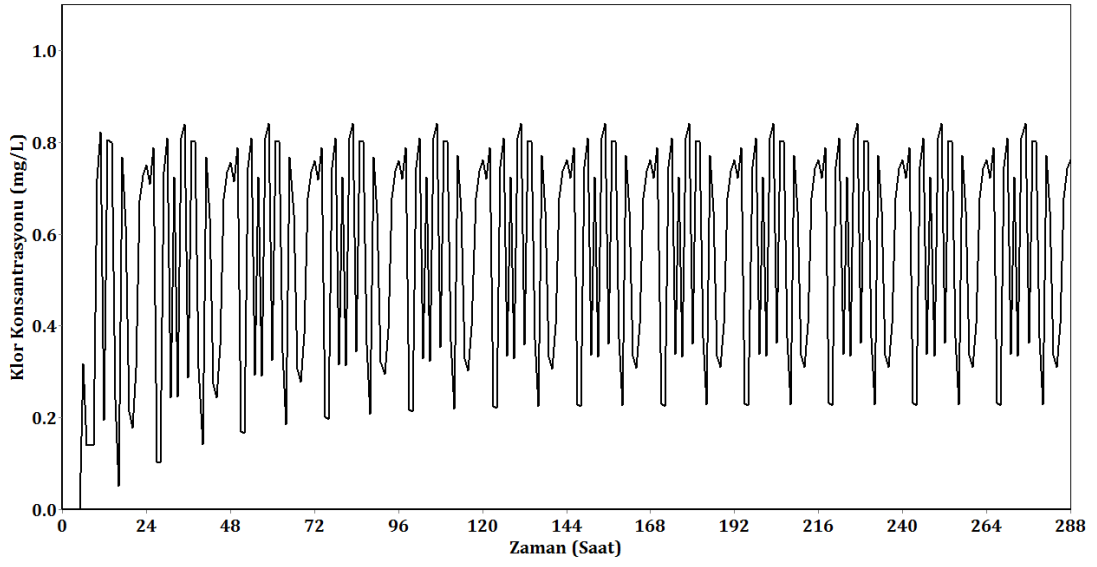
Şekil G. 28: 29 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



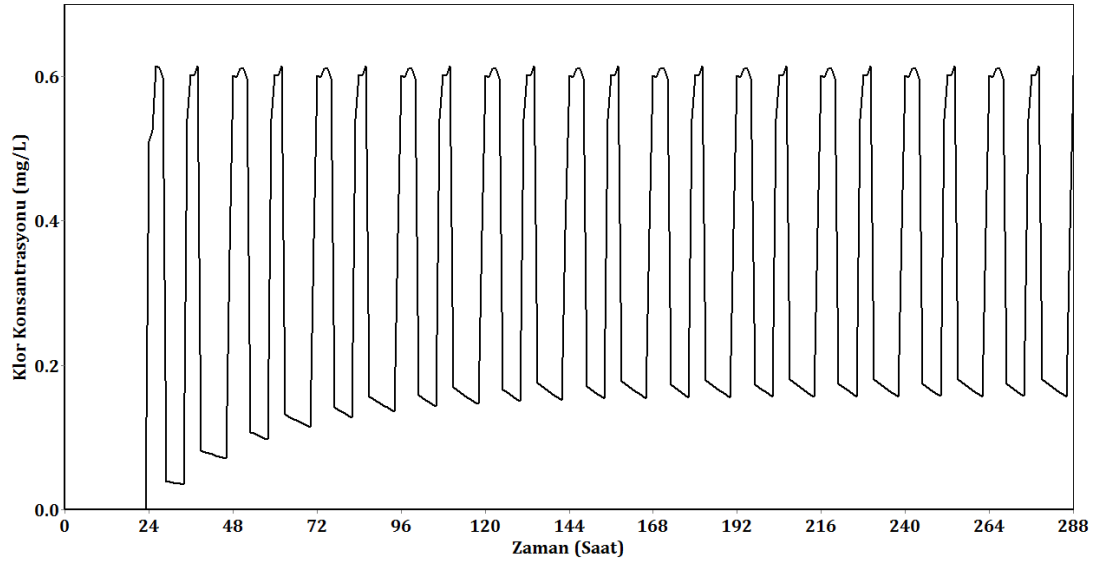
Şekil G. 29: 30 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



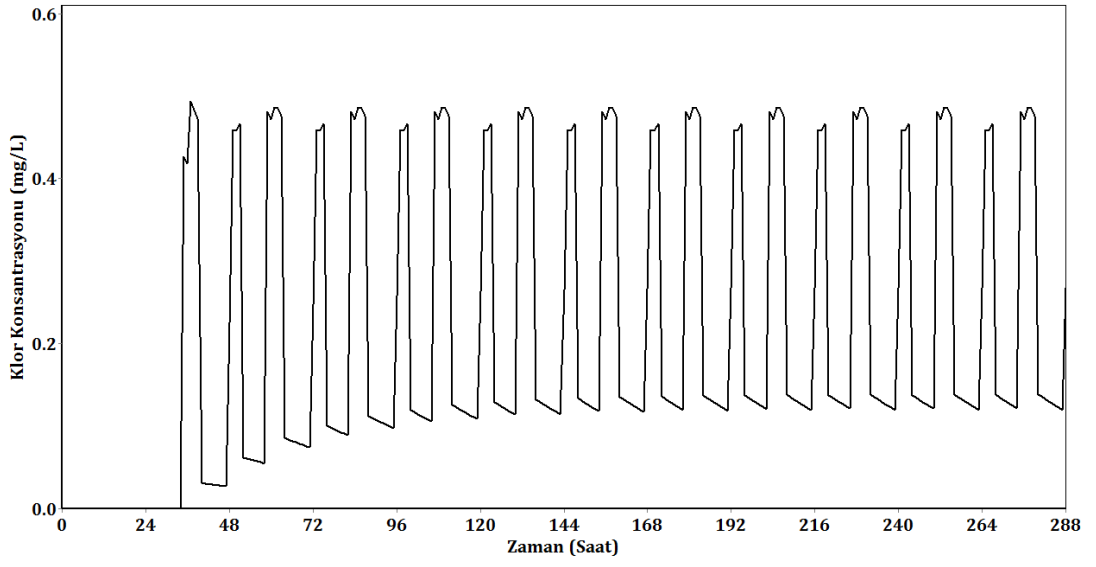
Şekil G. 30: 31 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



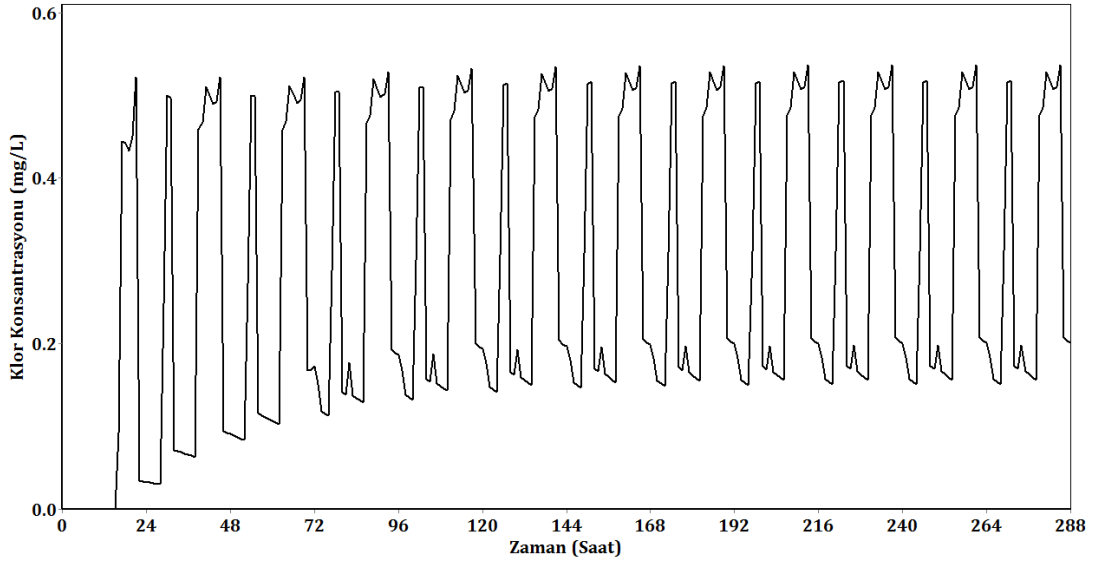
Şekil G. 31: 32 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



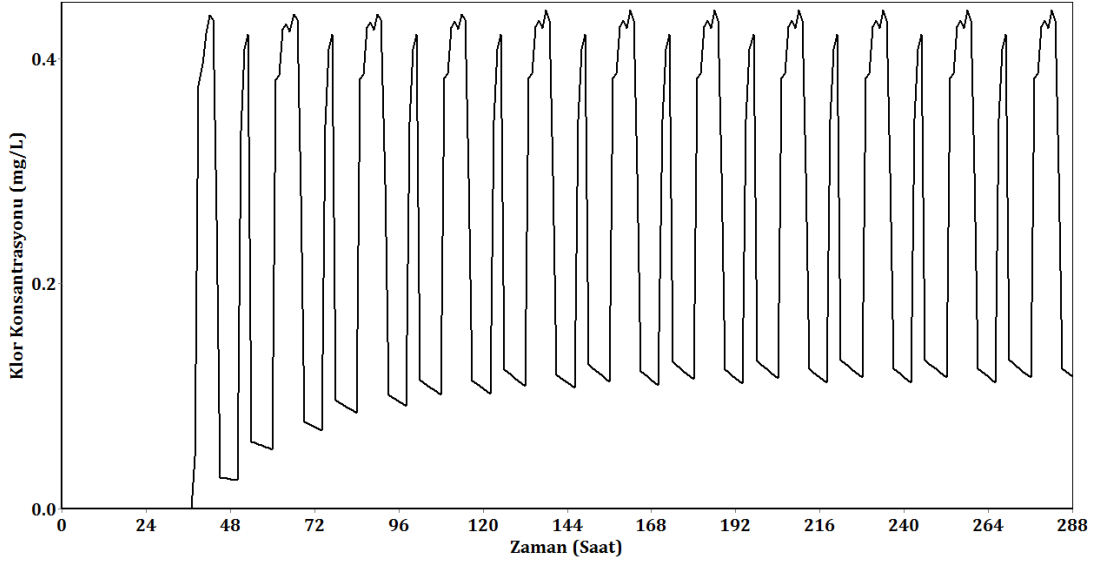
Şekil G. 32: 33 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



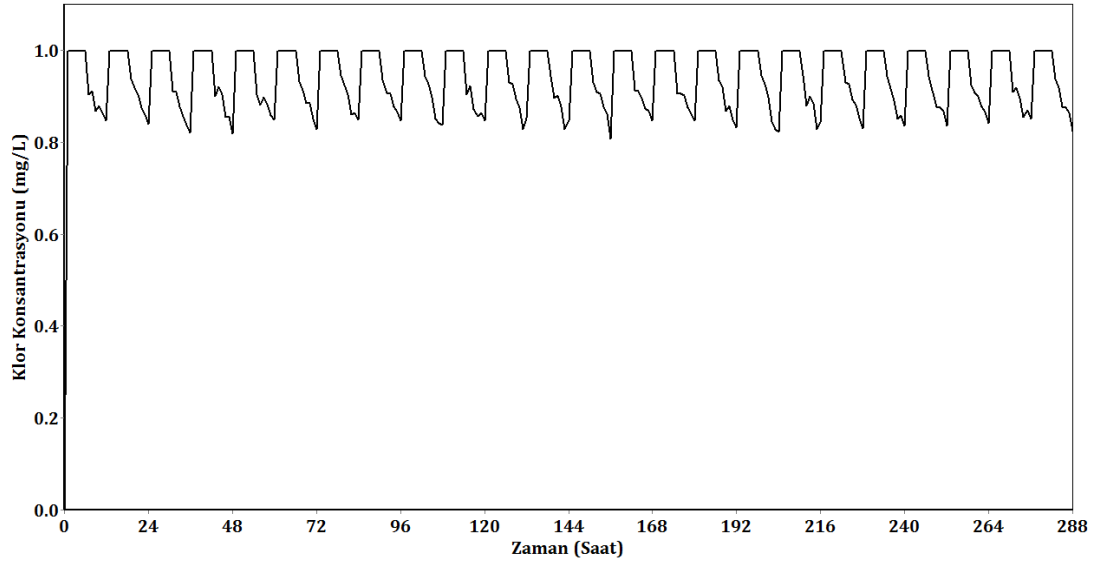
Şekil G. 33: 34 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



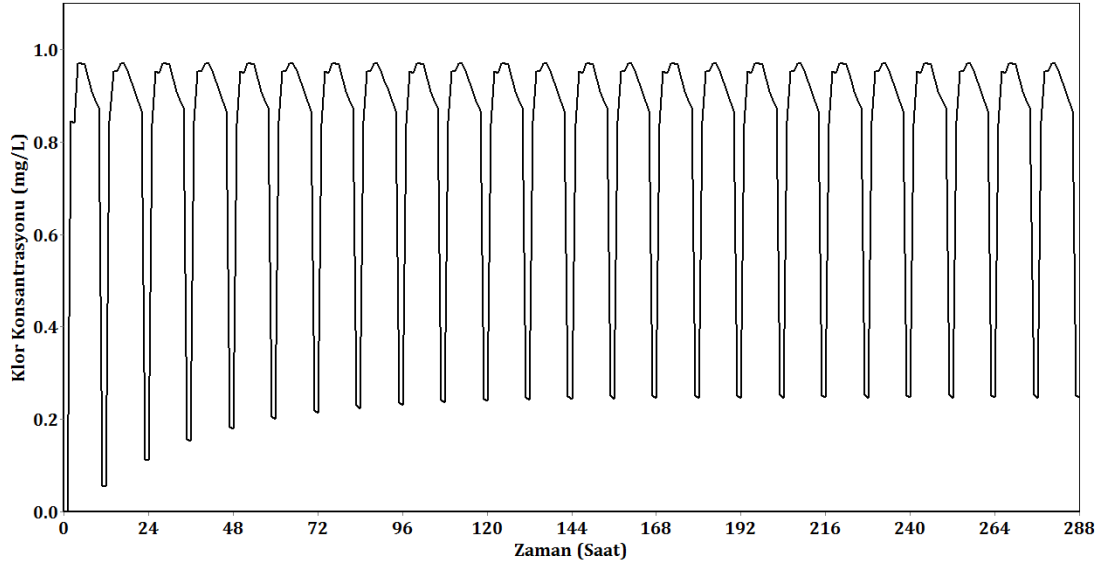
Şekil G. 34: 35 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



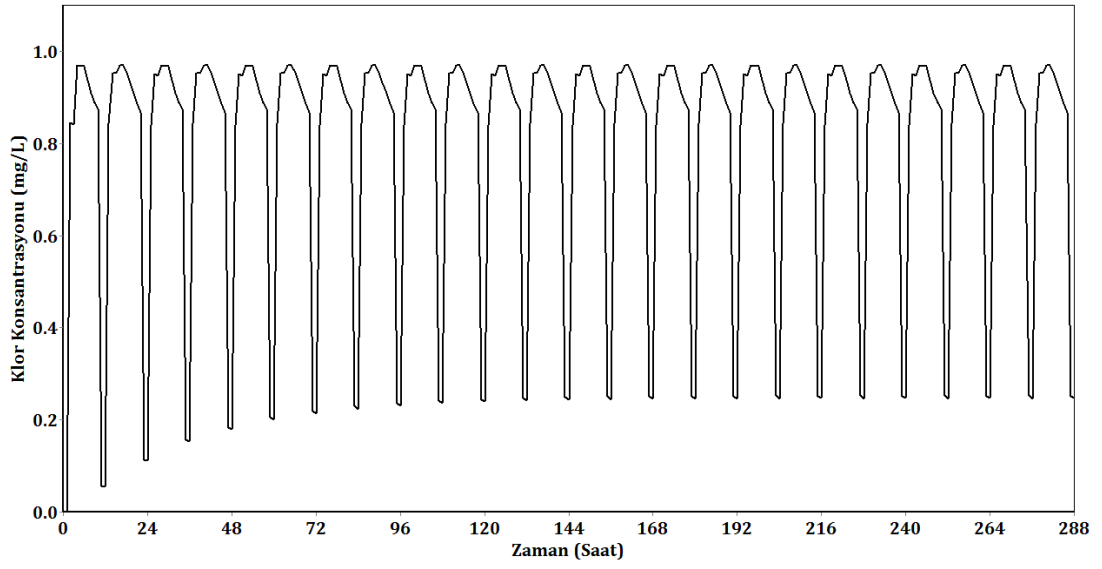
Şekil G. 35: 36 numaralı düğüm noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



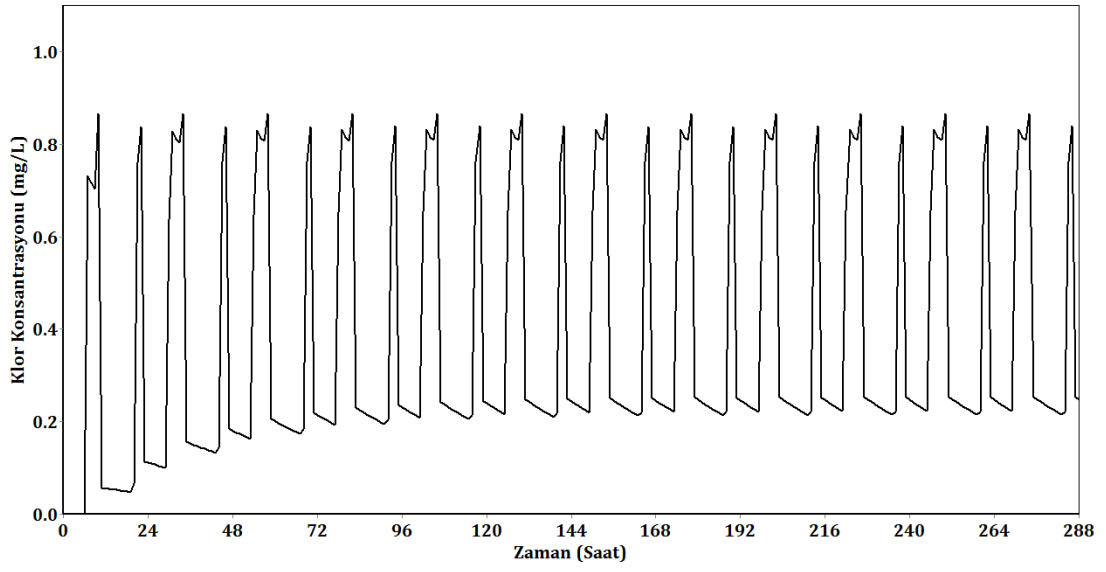
Şekil G. 36: A noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



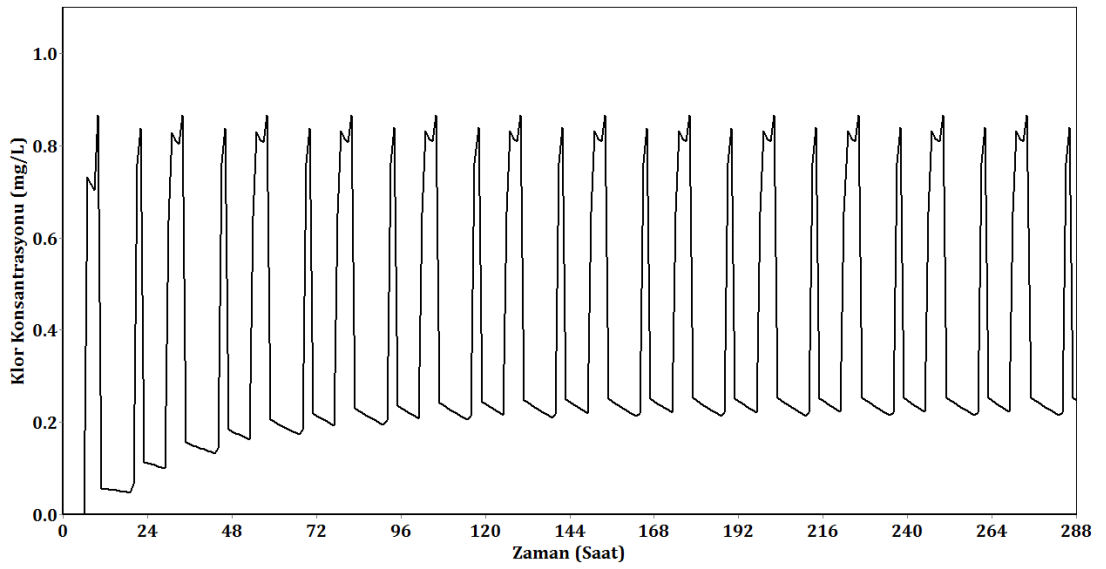
Şekil G. 37: B noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



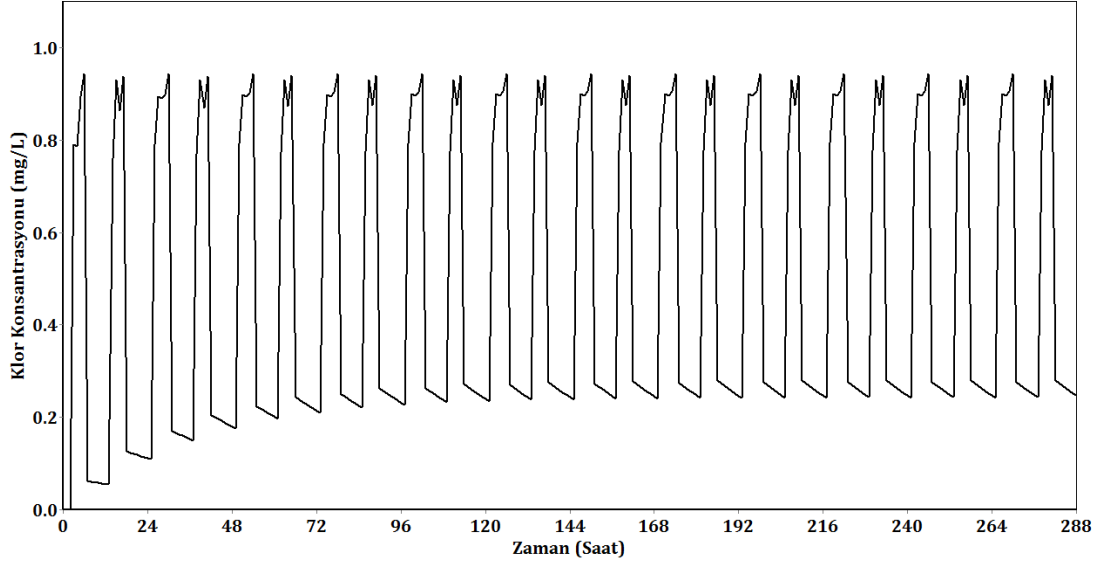
Şekil G. 38: C noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



Şekil G. 39: D noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



Şekil G. 40: E noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi



Şekil G. 41: F noktası için bakiye klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi

9. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Şerife GÖKÇE

Doğum Yeri ve Tarihi : Ereğli / 09.04.1988

Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi

Elektronik posta : sgokce@aku.edu.tr

İletişim Adresi : Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

Tez Kapsamında Yapılan Yayınlar:

- Gökçe, Ş. and Ayvaz, M.T., “Evaluation of Harmony Search and Differential Evolution Optimization Algorithms on Solving the Booster Station Optimization Problems in Water Distribution Networks”, *In: Recent Advances in Swarm Intelligence and Evolutionary Computation, Studies in Computational Intelligence Series*, Edited by Xin-She Yang, Springer: Berlin/Heidelberg, 2014 (In Press).
- Gokce, S. and Ayvaz, M.T., “A Simulation-Optimization Model for Optimal Estimation of the Numbers, Locations and Chlorine Injection Rates of the Booster Stations in Water Distribution Networks”, *11th International Conference on Hydroinformatics (HIC2014)*, August 17-21, 2014, New York, USA.
- Gokce, S. and Ayvaz, M.T., “Application of Harmony Search Algorithm for Solving the Booster Station Optimization Problems in Water Distribution Networks”, *International Civil Engineering & Architecture Symposium for Academicians (ICESA2014)*, May 17-20, 2014, Side, Turkey.

Diğer Yayınlar:

- Gökçe, Ş., Ayvaz, M.T., Genç, Ö., Koç, A.C., “Taşkın Alanlarının Coğrafi Bilgi Sistemi ve Hidrolik Modelleme Teknikleri ile Belirlenmesi: Pamukkale Üniversitesi Kınıklı Yerleşkesi İçin Bir Uygulama”, Taşkın ve Heyelan Sempozyumu, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 24-26 Ekim 2013, Trabzon.