

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İÇME SUYU ŞEBEKELERİNDE SEZGİSEL VE İSTATİSTİKSEL
YÖNTEMLERLE SIZINTI TESPİT MODELİNİN OLUŞTURULMASI**

DOKTORA TEZİ

Furkan BOZTAŞ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mahmut FIRAT

HAZİRAN-2023

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İÇME SUYU ŞEBEKELERİNDE SEZGİSEL VE İSTATİSTİKSEL
YÖNTEMLERLE SIZINTI TESPİT MODELİNİN OLUŞTURULMASI**

DOKTORA TEZİ

Furkan BOZTAŞ

36173621015

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mahmut FIRAT

HAZİRAN-2023

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında değerli bilgi ve tecrübeleriyle desteklerini esirgemeyen ve karşılaştığım güçlüklerin aşılmasında yön gösterici olan değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Mahmut FIRAT'a,

Tez çalışmalarında yardımlarını ve bilimsel katkılarını esirgemeyen hocalarım Prof. Dr. Mahmud GÜNGÖR'e, tezimin analiz kısmında katkılarını benden esirgemeyen ekip arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Salih YILMAZ'a,

Çalışma kapsamında gerekli veri ve teknik destek sağlayan Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi (MASKİ) Genel Müdürü Sayın Mehmet MERT'e, çalışma kapsamında gerekli olan teknik veriler oluşurken emek vermiş olan tüm MASKİ personeline,

Bu çalışmanın gerektirdiği ağır çalışma koşullarına benimle beraber katlanan ve her aşamasında desteklerini esirgemeyen eşim ve kendilerine ayrılması gereken vakitten fazlaca aldığım göz nuru evlatlarıma,

Bugüne kadar yetişmemde en büyük yükü çeken babam ve beni yetiştiren aynı zamanda bu çalışma boyunca gecenin geç saatlerine kadar süren çalışmalarım sırasında gözümü arkada bırakmayarak evlatlarımı gözetten anneme,

Bu tez çalışması İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, İÜ-BAP FDK-2020/2054 numaralı proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine,

teşekkür ederim.

ONUR SÖZÜ

Prof. Dr. Mahmut FIRAT'ın danışmanlığında doktora tezi olarak sunduğum “**İçme Suyu Şebekelerinde Sezgisel ve İstatistiksel Yöntemlerle Sızıntı Tespit Modelinin Oluşturulması**” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Furkan BOZTAŞ



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
3. İÇME SUYU DAĞITIM SİSTEMLERİNDE EPANET İLE DİNAMİK ANALİZ VE SU TALEP MODELİ	25
3.1. Giriş	25
3. 2. Tüketim Modeli: Teorik Altyapı	27
3.2.1. Hidrolik tasarımda tüketim modeli.....	28
3.2.2. Hidrolik modellemede tüketim modeli.....	28
3.3. Hidrolik Model için Tüketim Modelinin Oluşturulması	28
3.3.1. Miktar dağıtım	28
3.3.2. Mekansal dağıtım	33
3.3.3. Zamansal dağıtım	37
3.4. Sonuçlar	39
4. HİDROLİK MODELLEME VE KALİBRASYON	41
4.1. Giriş	41
4.2. Hidrolik Modelleme	42
4.3. Kalibrasyon.....	42

4.4. Saha Uygulaması: Malatya İçme Suyu Şebekesi Akpınar DMA Örneği.....	43
4.4.1. Şebeke geometrisi.....	44
4.4.2. Su kaynağı	46
4.4.3. Topoloji	46
4.4.4. Tüketim modeli	47
4.4.5. Saha ölçümleri	49
4.4.6. Kalibrasyon aşaması	52
4.5. Sonuçlar	67
5. SIZINTI TAHMİN MODELİ VE GENETİK ALGORİTMALAR YÖNTEMİ İLE SIZINTI TESPİTİ	68
5.1. Giriş	68
5.1.1. Teori	69
5.2. Sızıntı Tespit Yönteminin Oluşturulması Ön Tasarım Aşamaları	70
5.3. Sızıntı Tespiti için Önerilen Metodoloji	74
5.3.1. Kalibre edilmiş SDS modeli	76
5.3.2. Hidrolik analiz süreci ve sızıntı tespit modeli	77
5.3.3. Optimizasyon modeli.....	80
5.3.4. Genetik algoritmalar	81
5.4. Sızıntı Tespit Modelinin Deneysel Şebekede Uygulanması.....	82
5.4.1. Deneysel şebekede ölçüm noktalarının belirlenmesi.....	85
5.4.2. Sızıntı tespit analizi	88
5.5. Sızıntı Tespit Modelinin Hanoi Şebekesine Uygulanması	91
5.5.1. Hanoi şebekesi ölçüm noktalarının belirlenmesi.....	92
5.5.2. Hanoi şebekesi sızıntı tespit analizi.....	93
5.6. Sonuçlar	98
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	100

KAYNAKLAR.....	104
ÖZGEÇMİŞ	118



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 Akpınar DMA boru karakteristik özellikleri.....	46
Çizelge 4.2 Çalışma alanı abone bilgileri.....	48
Çizelge 4.3 Kalibrasyon için kullanılacak saha ve model noktaları.....	53
Çizelge 4.4 Akpınar DMA basınç için kalibrasyon istatistikleri.....	57
Çizelge 4.5 Akpınar DMA debi için kalibrasyon istatistikleri.....	58
Çizelge 4.6 Akpınar DMA kalibrasyon sonrası basınç kalibrasyon istatistikleri	65
Çizelge 4.7 Akpınar DMA kalibrasyon aşaması sonrası debi kalibrasyon istatistikleri	66
Çizelge 5.1 Deneysel şebekeye ait geometrik özellikler	84
Çizelge 5.2 Deneysel şebeke STM için standart sapma tablosu	86
Çizelge 5.3 Deneysel şebeke analiz sonuçları.....	89
Çizelge 5.4 Deneysel şebeke tek sızıntı kısıntı durumunda arama sonuçları.....	91
Çizelge 5.5 Hanoi şebekesi sızıntı araması sonuçları.....	95
Çizelge 5.6 Hanoi şebekesi tek sızıntı kısıntı durumunda arama sonuçları	97

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Matlab programında EPANET ve SCEM-UA bağlantısı.	7
Şekil 2.2 Sızıntı tespiti için Saldarriaga vd. (2006) tarafından uygulanan metodoloji.	8
Şekil 2.3 Sızıntı tespiti için Qu vd. (2009) tarafından uygulanan metodoloji.....	9
Şekil 2.4 Sızıntı tespiti için Yazdekhasi vd. (2018) tarafından uygulanan metodoloji.....	10
Şekil 2.5 Sızıntı tespiti için Creaco ve Pezzinga (2015) tarafından uygulanan metodoloji	12
Şekil 2.6 Genetik algoritma temel akış diyagramı (Emel ve Taskin, 2002)	20
Şekil 2.7 Yapay sinir ağları akış diyagramı (Keskenler ve Keskenler, 2017).....	21
Şekil 3.1 Debimetre Verisi ve Toplam Su Giriş Hacmi	30
Şekil 3.2 MNF Analizi	31
Şekil 3.3 Abone sayaç okuma verilerinin bir bölümüne ait ekran görüntüsü	32
Şekil 3.4 İçme suyu dağıtım şebekesi ve servis bağlantıları	34
Şekil 3.5 Hidrolik model üzerinde düğüm noktalarının tanımlanması	34
Şekil 3.6 CBS yardımı ile tüketim noktalarının belirlenmesi	35
Şekil 3.7 Tüketim debisinin dağıtılması (MASKİ Su Temini ve Rehabilitasyon Projesi, 2016).....	36
Şekil 3.8 Sızıntı debisinin düğüm noktalarına dağıtılması.....	37
Şekil 3.9 Sızıntı Debisine ait Zamansal Tüketim Deseni (EPANET).....	38
Şekil 3.10 Tüketim Debisine ait Zamansal Tüketim Deseni (EPANET).....	38
Şekil 4.1 Çalışma alanı (Akpınar DMA Bölgesi)	44
Şekil 4.2 Çalışma alanı uydu görüntüsü ve içme suyu şebeke haritası	45
Şekil 4.3 Akpınar DMA bölgesi içme suyu şebekesi, halihazır ve DTM haritaları.....	47
Şekil 4.4 Abone verilerinin bir bölümüne ait ekran görüntüsü	47
Şekil 4.5 Debi izlemeleri sonucu elde edilen çalışma alanı tüketim deseni.....	48
Şekil 4.6 Çalışma alanı ölçüm noktaları.....	49
Şekil 4.7 AKP-02 ölçüm noktası debi ölçüm verileri	50

Şekil 4.8 AKP-02 ölçüm noktası basınç verileri	50
Şekil 4.9 AKP-03 ölçüm noktası debi ölçüm verileri	51
Şekil 4.10 AKP-03 ölçüm noktası basınç verileri	51
Şekil 4.11 Akpınar DMA hidrolik modeli.....	52
Şekil 4.12 EPANET üzerinden kalibrasyona esas verilerin girilmesi.....	54
Şekil 4.13 23 no’lu düğüm noktası basınç verisi için saha-model karşılaştırması.....	55
Şekil 4.14 611 no’lu boruya ait debi verisi için saha-model karşılaştırması.....	55
Şekil 4.15 250 no’lu düğüm noktası basınç verisi için saha-model karşılaştırması.....	56
Şekil 4.16 751 no’lu boruya ait debi verisi için saha-model karşılaştırması.....	56
Şekil 4.17 Akpınar DMA hidrolik modeli basınç için korelasyon grafiği	57
Şekil 4.18 Akpınar DMA hidrolik modeli debi için korelasyon grafiği	58
Şekil 4.19 Akpınar DMA bölgesi için MNF analizi	60
Şekil 4.20 Akpınar DMA kalibrasyon aşamasında tespit edilen vana	61
Şekil 4.21 Akpınar DMA kalibrasyon aşamasında düzeltilen boru çapı bilgisi	62
Şekil 4.22 Kalibrasyon sonrası 23 no’lu düğüm noktası basınç verisi için saha-model karşılaştırması.....	63
Şekil 4.23 Kalibrasyon sonrası 611 no’lu boru debi verisi için saha-model karşılaştırması	63
Şekil 4.24 Kalibrasyon sonrası 250 no’lu düğüm noktası basınç verisi için saha-model karşılaştırması.....	64
Şekil 4.25 Kalibrasyon sonrası 751 no’lu boru debi verisi için saha-model karşılaştırması	64
Şekil 4.26 Kalibrasyon aşaması sonrası basınç için korelasyon grafiği.....	65
Şekil 4.27 Kalibrasyon aşaması sonrası debi için korelasyon grafiği	66
Şekil 5.1 Sızıntı tespiti ve yönetimi için Sousa vd. (2015) tarafından önerilen yaklaşım...	69
Şekil 5.2 İzole bir bölge için debi grafiği ve bileşenleri	71
Şekil 5.3 Çalışma şebekesi	73

Şekil 5.4 Çalışma şebekesi hidrolik modeli	74
Şekil 5.5 Sızıntı tespiti için tez kapsamında önerilen metodolojiye ait akış şeması	75
Şekil 5.6 Sızıntı tespit modelinin (STM) bir alt matrisinin görünümü	77
Şekil 5.7 Bir SDŞ için günlük debi grafiği ve Lmax değeri.....	79
Şekil 5.8 Önerilen metodolojide 3-Boyutlu sızıntı tespit modeli (STM) matrisi.....	79
Şekil 5.9 Genetik algoritmalar akış şeması	82
Şekil 5.10 Sızıntı Tespiti için Geliştirilen Deneysel Şebeke Geometrisi	83
Şekil 5.11 Deneysel Şebeke Düğüm Noktaları Standart Sapmaları Isı Haritası ve Seçilmiş Ölçüm Noktaları	87
Şekil 5.12 Sızıntı Tespit Modelinin Test Edilmesinde Kullanılan Hanoi Şebekesi Hidrolik Modeli.....	92
Şekil 5.13 Hanoi Şebekesi Düğüm Noktaları Standart Sapmaları Isı Haritası ve Seçilmiş Ölçüm Noktaları	93
Şekil 5.14 Sızıntı Araması Sonucunda En Düşük Skora Sahip Olan Potansiyel Sızıntı Noktalarına ait Sızıntı Tahmin Isı Haritaları	96

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

L	: Sızıntı debisi
H	: Hidrolik yükseklik
p	: Basınç
Q, q	: Debi
t	: Zaman
V	: Hacim
ACP	: Asbestos Cement Water Pipe
ANN	: Artificial Neural Network
BABE	: Background and Burst Estimates
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemi
DF	: Duktıl Font
DMA	: District Metering Area
DN	: Diameter Nominal
DSSA	: Düğüm Standart Sapma Analizi
DTM	: Digital Terrain Model
EPS	: Extended Period Simulation
GA	: Genetic Algorithms
GGs	: Gelir Getirmeyen Su
GPS	: Global Positioning System
IWA	: International Water Association
MNF	: Minimum Night Flow
NHS	: Number of Hydraulic Simulations
PVC	: Polyvinyl Chloride
SDŞ	: Su Dağıtım Şebekesi
STM	: Sızıntı Tahmin Modeli
UARL	: Unavoidable Annual Real Losses

ÖZET

Doktora Tezi

İÇME SUYU ŞEBEKELERİNDE SEZGİSEL VE İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLERLE SIZINTI TESPİT MODELİNİN OLUŞTURULMASI

FURKAN BOZTAŞ

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

119+XII sayfa

2023

Danışman: Prof. Dr. Mahmut FIRAT

İçme suyu dağıtım sistemlerinde meydana gelen sızıntıların önemli bir kısmı çeşitli fakörlere bağlı olarak yüzeye çıkmamaktadır. Bu sızıntıların farkına varma süresi arttıkça kaybolan su hacmi de artmaktadır. Bu nedenle sistemde meydana gelen ve yüzeye çıkmayan bu sızıntıların sürdürülebilir bir şekilde belirlenmesi ve sistemin izlenmesi gerekir. Bu çalışmada içme suyu dağıtım sistemlerinde yüzeye çıkmayan sızıntıların tespit edilmesi amacıyla optimizasyon algoritması esas alınarak özgün bir sızıntı tespit modeli ve metodolojisi geliştirilmiştir. Çalışmada hidrolik model üzerinde hesaplanan ve sahada ölçülen basınç değerleri arasındaki farkları kullanan bir optimizasyon algoritması ile sızıntı tespit problemine çözüm önerilmiştir. Bu çalışmanın dayandığı teori şebeke üzerinde oluşan sızıntı kaynaklı basınç düşüş verilerini kullanılarak sızıntının yerinin tespit etmek üzeredir. Önerilen metodolojinin ihtiyaç duyduğu kaynaklar, sınırları belirlenmiş olan bir su dağıtım şebekesi, kalibrasyonu tamamlanmış bir hidrolik model, su şebekesi üzerinde giriş debisi ölçümleri, dağıtım şebekesi üzerinden basınç ölçümleri, hidrolik analiz yazılımı ve optimizasyon algoritması yazılımıdır. Bu çalışmada hidrolik analizler için EPANET yazılımı ve optimizasyon algoritması için MATLAB yazılımı kullanılmış olup, çalışmada kullanılan EPANET-MATLAB araç seti çözüm sürelerini kısaltan aynı zamanda iş yükünü azaltan faydalı bir araç olmuştur. Geliştirilen model öncelikle deneysel şebekeler üzerinde test edilmiştir. Daha sonra literatürde yaygın bir şekilde referans alınan Hanoi şebekesi modelin test edilmesinde dikkate alınmıştır. Analiz sonuçlarına göre algoritma 25 düğüm noktasına sahip deneysel şebekede, 12 adet düğüm noktası için %100 oranında doğru sonuç verdiğini ve her defasında doğru sızıntı noktasını tahmin edebildiğini göstermektedir. Şebekenin tamamı için ise kümülatif doğru tahmin edilme oranı %92 olmaktadır. Toplamda 31 adet düğüm noktası bulunan Hanoi şebekesinde, sızıntı aramasında 21 adet (%67.7) düğüm noktası için her defasında algoritma tarafından belirlenen en yüksek sızıntı debisi doğru sonuca aittir. Geriye kalan 11 düğüm noktasından 6 adedi için doğru sonuç algoritma tarafından %50'nin üzerinde bir oranla tespit edilebilmiştir. Toplamda 27 adet (%87.1) düğüm noktası için aramalarda tam sonuç bulma oranı %50'nin üzerinde gerçekleşmiştir.

Anahtar Kelimeler: İçme suyu şebekesi, Sızıntı tespiti, Optimizasyon, Hanoi şebekesi, Hidrolik Modelleme, Kalibrasyon

ABSTRACT

Phd. Thesis

CREATING A LEAKAGE DETECTION MODEL FOR WATER DISTRIBUTION NETWORKS BY USING HEURISTIC AND STATISTICAL METHODS

FURKAN BOZTAŞ

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

119+XII sayfa

2023

Supervisor: Prof. Dr. Mahmut FIRAT

A significant part of the leaks that occur in drinking water distribution systems do not come to the surface due to various factors. As the time to become aware of these leaks increases, the volume of water lost also increases. For this reason, these leaks that occur in the system and do not come to the surface should be determined in a sustainable way and the system should be monitored. In this study, a unique leak detection model and methodology has been developed based on the optimization algorithm in order to detect non-surface leaks in drinking water distribution systems. In the study, a solution to the leak detection problem was proposed with an optimization algorithm using the differences between the pressure values calculated on the hydraulic model and measured in the field. The theory on which this study is based is about to determine the location of the leak by using the data of pressure differences. The resources required by the proposed methodology are a well defined water distribution network, a calibrated hydraulic model, inlet flow measurements on the water network, pressure measurements over the distribution network, hydraulic analysis software and optimization algorithm software. In this study, EPANET software was used for hydraulic analysis and MATLAB software was used for the optimization algorithm, and the EPANET-MATLAB toolkit used in the study was a useful tool that shortened the solution times and also reduced the workload. The developed model was first tested on an experimental network. Later, proposed methodology tested on Hanoi network which is widely referenced in the literature. According to the results of the analysis, the algorithm shows that in the experimental network with 25 nodes, it gives 100% correct results for 12 nodes and can predict the correct leakage point each time. The cumulative correct prediction rate for the entire network is 92%. In the Hanoi network which has 31 nodes in total; for 21 nodes (67.7%) the algorithm marked correct leakage node. The correct result for 6 of the remaining 11 nodes was determined by the algorithm with a rate of over 50%. For a total of 27 (87.1%) nodes, the rate of finding exact results in searches was over 50%.

Keywords: Water network, Leakage detection, Optimization, Hanoi network, Hydraulic modeling, Calibration

1. GİRİŞ

Su dağıtım şebekelerinde (SDŞ) çeşitli faktörlere bağlı olarak meydana gelen arıza ve sızıntılar, sisteme verilen suyun abonelere iletilmeden kaybolmasına neden olmakta ve fiziki kayıp hacmini oluşturmaktadır (Pearson, 2019; Bozkurt, 2022). Fiziki kayıplar, hacimsel olarak toplam Gelir Getirmeyen Su (GGS) oranının önemli bir kısmını oluşturmakta ve bu hacmin artması veya azalması özellikle rapor edilmeyen sızıntıların farkına varılması, yerinin tespit edilmesine veya aktif kaçak kontrolü stratejisine bağlı olarak değişmektedir.

En basit haliyle GGS oranı, gelir getirmeyen su hacminin giriş hacmine oranı şeklinde elde edilmektedir. Ancak, su kayıp miktarının ve oranının belirli bir standartta belirlenmesi ve değişiminin izlenmesi amacıyla uygulanan en temel araçlardan biri International Water Association ve American Water Works Association (IWA/AWWA) tarafından önerilen “*standart su dengesi*” gösterilebilir. Ancak, bu tablodaki alt bileşenlere ait oranların doğru bir şekilde doldurulması için, sayaç hata oranlarının sahada alınacak örneklemeler ile düzenli bir şekilde belirlenmesi ve izlenmesi, kaçak kullanım ve yasal olmayan tüketim oranları için benzer şekilde saha incelemesi ve denetimlerinin yapılması, depodaki sızıntıların belirlenmesi için giriş çıkış debilerinin ve seviye değişimlerinin düzenli izlenmesi, dağıtım sisteminde alt bileşenlere ait sızıntıların belirlenmesi ve izlenmesi için düzenli denetimlerin yanı sıra cihaz ve ekipmanlar yerleştirilerek izlenmesi gerekmektedir. Ancak mevcut teknik, teknolojik, ekonomik ve personel alt yapısının iyi olmadığı İdarelerde su dengesinin alt bileşenlerinin gerçek saha verilerine göre doğru, sürekli ve sürdürülebilir bir şekilde doldurulması ve izlenmesi oldukça güçtür.

SDŞ’lerde sızıntılar oluşma şekillerine göre; rapor edilen sızıntılar (yüzeye çıkan sızıntılar), rapor edilmeyen sızıntılar (yüzeye çıkmayan) ve belirsiz ya da kaçınılmaz sızıntılar (yüzeye çıkmayan) şeklinde sınıflandırılmaktadır (Farley vd., 2008). Rapor edilen sızıntılar genelde arıza boru üst yüzeyinde ve daha büyük çatlak çaplarında görülmekte ve basınç etkisiyle yüzeye çıkmaktadır. Ancak rapor edilmeyen sızıntılar ve belirsiz sızıntılar yüzeye çıkmadığı için, aktif kaçak kontrolü uygulanmadığı veya diğer otomasyon ve analiz sistemleri ile izlenmediği sürece farkına varılması ve yerinin tespit edilip onarılması

mümkün olmamaktadır (Lambert vd., 1999). Arızaların oluşmasında veya mevcut arızalarda birim zamanda kaybolan su miktarının artmasında en temel faktörlerden biri basınç gösterilebilir (May, 1994). Literatürde yapılan çalışmalarda, gerek sistemin otomasyon sistemleri ile izlenmesinde gerekse de tahmin ve hidrolik modellerin kurulmasında en temel parametre olarak basıncın kullanıldığı görülmektedir (Karadirek vd., 2012; Rathnayaka vd., 2016). Bu nedenle, ekipmanlarla saha denetiminin yapılması, hidrolik parametrelerin izlenmesi ve sızıntının tahmin edilmesi çalışmaları kayıp oranının düşürülmesinde oldukça önemlidir.

SDŞ'lerde oluşan sızıntılar idareler için, yeni kaynak arayışı ve pompa çalışma sürelerinin artmasına bağlı olarak su ve enerji kaynaklarının verimsiz kullanılmasına sebep olmaktadır (Feldman, 2009). Bunun yanı sıra, artan arıza ve sızıntı oranlarına bağlı işletme ve bakım maliyetlerinin artması sürekli su kesintileri yaşanmasına bağlı olarak hizmet kalitesinin düşmesi, abone şikâyetlerinin artması teknik olarak sistemin işletilemez hale gelmesi, arıza yoğunluğuna bağlı olarak su kalitesinin değişmesi gibi oldukça geniş çerçevede olumsuz etkiler meydana getirmektedir (Morais ve de Almeida, 2007; Vilanova ve Balestieri, 2014; Al Qahtani vd., 2020; Mu vd., 2021).

Rapor edilmeyen sızıntılar ile mücadele şebekenin mevcut koşulları, İdarenin teknik-ekonomik ve personel alt yapısına bağlı olarak, sızıntıların farkına varılması, miktarının saha ölçümlerine göre belirlenmesi veya matematiksel olarak yaklaşık hesaplanması, sızıntı yerinin tespit edilmesi farklı özelliklere ve maliyete sahip ekipmanlarla tespit edilmesi veya matematiksel-istatistiksel veya optimizasyon tabanlı yöntemlerle tahmin edilmesi vb. oldukça karmaşık-zor ve maliyetli süreçler içerebilmektedir (Moslehi vd., 2021).

Literatürde sızıntı miktarının analiz edilmesi, sızıntının farkına varılması, sızıntıların tespit edilmesi ve kontrol edilmesi amacıyla çeşitli araştırmacılar ve kuruluşlar (IWA, AWWA) tarafından farklı zamanlarda çeşitli yöntemler önerilmiştir (Hunaidi vd., 2000; Awwa Water Loss Control Committee, 2003; Zhou vd., 2018). Bu önerilen çalışmalara bakıldığında temel olarak bahsedilen konu başlıklarından genelde birine odaklandığı söylenebilir (Gupta ve Kulat, 2018).

Son yıllarda önceki bölümlerde verilen yöntemlerin yanı sıra, matematiksel-istatistiksel ve optimizasyon tabanlı yöntemler, sızıntıların tespit edilmesi, önlenmesi, kontrol altına alınması ve yönetilmesi amacıyla uygulanmaktadır (Alvisi ve Franchini, 2009; Sophocleous vd., 2019; Diao vd., 2020; Hu vd., 2021). Yapılan çalışmalarda sızıntı hidroliği ve etkili faktörlerin davranışı dikkate alınarak, sızıntı miktarının veya sızıntı üzerinde oldukça etkili olduğu bilinen işletme basıncının minimum yapılması amaçlanmaktadır. Bu tür yöntemlerin uygulanmasında, hidrolik model tabanlı yaklaşımda olduğu gibi debi ve basınç izlenmesi ve kıyaslanması gereken bir veri olarak dikkate alınmaktadır. İncelenen problem karakteristiğinin zor olması ve birçok faktöre bağlı olarak davranış göstermesinden dolayı modelden elde edilen sonuçların saha ölçümleri ile kıyaslanması gerekmektedir. Bu tür yaklaşımların uygulanmasında en önemli zorluk veya kısıt, saha verilerine ait bilgilerdeki (şebeke geometrisi, tüketim verileri, basınç ölçümleri, vb.) eksiklikler veya belirsizlikler ile kalibrasyon aşamasındaki zorluklar gösterilebilir (Bello vd., 2019).

Bu çalışmanın amacı; SDŞ'lerde rapor edilmeyen sızıntıların tespiti için hidrolik modelleme ve optimizasyon algoritmaları tabanlı bir yöntem önermektir. Bu amaç doğrultusunda öncelikle yönetim süreçlerinde kullanılabilmesi açısından uygun bir hidrolik model oluşturma sürecinin başlangıç noktası olan ve saha koşullarını en gerçekçi şekilde yansıtmayı hedefleyen bir tüketim modeli çalışılacaktır. Çalışmaya konu olan tüketim modeli oluşturma aşamaları gerçek saha verilerinin kullanıldığı pilot bir SDŞ üzerinde uygulanacaktır. Tüketim modeli oluştururken gerekli olan bilgiler pilot SDŞ üzerinden analiz edilerek elde edilen bilginin farklı seviyelerde olması durumlarına göre önerilerde bulunulması hedeflenmektedir.

Çalışmanın sonraki aşamasında, sızıntı tespit modeli oluşturmak için gerekli olan tüketim modeli uygulamasına konu olan SDŞ için hidrolik model oluşturulup, kalibrasyon sürecinde izlenecek stratejiler belirlenecektir. Hidrolik modelin kurulması; SDŞ'lerde mevcut koşulların (mevcutta hizmet veren boruların topolojisi, çapı, malzeme türü, pürüzlülük katsayısı, abone tüketim karakteristiği, vb.) göz önüne alınarak hidrolik analizin gerçekleştirilmesini ve saha kalibrasyonu ile de hidrolik parametrelerin (debi ve basınç gibi) izlenmesi çalışmaları aşamalarını kapsamaktadır (Lansey vd., 2002). Genelde bu yaklaşımın uygulanmasında model sonuçlarını doğrudan etkileyen, abone tüketim karakteristiğine bağlı olarak düğüm noktalarında debilerin tanımlanması, mevcut şebeke plan ve karakteristiğinin tanımlanması, boru pürüzlülüklerinin gerçek koşulları temsil edecek şekilde belirlenmesi vb. önemli çalışmaların yapılması gerekmektedir (Sarisen vd., 2022). Hidrolik model tabanlı

sızıntı tespit çalışmalarında, modelde hesaplanan basınçlar ile şebekede referans noktalarda ölçülen basınçların kıyaslanması yoluna gidilmekte ve aradaki farka göre değerlendirme yapılmaktadır. Ancak, model ve gerçek ölçüm sonuçları arasındaki fark esas alınarak sızıntı tespiti yapılabilmesi için, modelde mevcut koşulları temsil eden verilerin doğru girilmiş olması oldukça önemlidir (Walski, 2017). Çalışmada, pilot SDŞ için modele girilen verilerin saha ölçümleri ile karşılaştırılması planlanmakta ve girdi verileri kalibre edilerek saha ölçümleri ile model sonuçları arasındaki fark asgari düzeye indirilmesi amaçlanmaktadır.

Çalışmanın nihai hedefi SDŞ'ler için rapor edilmeyen sızıntıların tespitine uygun bir çözüm önermektir. SDŞ'lerde oluşan sızıntılar basınç parametresinde düşüşlere sebep olur ve SDŞ'de yeni bir sızıntı olduğunda basınçlar takip edilerek sızıntı farkındalığına sahip olunabilir. SDŞ'de oluşacak bir sızıntının herhangi bir ölçüm noktasında oluşturacağı basınç düşüşünün büyüklüğü ise ilgili sızıntının şebeke üzerinde ölçüm noktasına göre olan uzaklığı ve sızıntının miktarı ile ilişkili olup söz konusu ilişki doğrusal bir ilişki değildir. Bundan dolayı sızıntı tespit problemine geleneksel yöntemlerle çözüm getirmek mümkün değildir. Sızıntı tespit probleminin çözümü için optimizasyon tekniklerine başvurulmaktadır (Perez vd., 2009; Chan vd., 2018; Kammoun vd., 2022). Bu çalışmada sızıntı tespit problemi için iki aşamalı bir çözüm önerilmesi amaçlanmıştır. Birinci aşamada, bir dizi hidrolik simülasyonlar yapılarak bir sızıntı tespit modeli (STM) oluşturulacaktır. İkinci aşamada ise sızıntı tespit problemi STM tabanlı bir çözüme uygun olarak tanımlanıp genetik algoritmalar (GA) tabanlı optimizasyon ile SDŞ'lerde noktasal sızıntı tespitini benzerlerine göre daha hızlı ve noktasal olarak yapacak bir yöntem önerilmesi düşünülmektedir. Önerilen yöntem bu çalışma için tasarlanmış bir deneysel şebeke ile literatürde sızıntı tespit problemi başta olmak üzere birçok hidrolik modelleme ve optimizasyon çalışmasına konu olmuş referans şebekelerden olan Hanoi şebekesi üzerinde test edilecektir (Suribabu ve Neelakantan, 2006; Zheng vd.; 2012; Sheikholeslami vd., 2014; Bi vd., 2015). Önerilen yöntemin su yönetimi çalışmaları yapan ve şebekelerini görüntüleyip takip eden idareler için sızıntı tespiti konusunda tespit ve farkındalık sürelerini kısaltarak sızıntı kaynaklı ekonomik kayıpları azaltacağı ve kısıtlı su kaynaklarının korunmasına katkı sunması hedeflenmektedir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Temiz su, insanlık için çok değerli bir kaynaktır. Dünya yüzeyinin %70'i sularla kaplı olmasına rağmen yeryüzündeki toplam suların ancak %2,5'i temiz su kaynaklarıdır (Mohamed, 2011). Dünyadaki temiz su kaynaklarının çok büyük bir kısmının da kutuplardaki buzullarda olduğu düşünülünce insanlar için ulaşılabilir temiz su kaynaklarının oranı %0,3 olmaktadır (Thu, 2010). Bu açıdan kısıtlı erişime sahip olunan bir kaynağın işletmesinin verimli bir şekilde yapılması çok önemli hale gelmektedir. Su dağıtım şebekelerinde, ilgili işletmeciler nihai tüketicilere temiz su temin ederek, temin edilen su miktarını tüketici sayaçlarından ölçmek suretiyle faturalandırır. Fakat üretilen ve şebekeye verilen temiz suyun bir miktarı, nihai tüketicilere ulaşmadan şebekede kayıplara uğramaktadır (Lambert, 2002).

İçme suyu şebekelerinde sızıntıların tespit edilmesi ve su kayıplarının azaltılması dünyada ve ülkemizde güncel çalışma konularından biridir. O zamanki adıyla Orman ve Su İşleri Bakanlığı şimdiki adıyla Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından su kayıplarının kontrolü için 8 Mayıs 2014 tarihinde "İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerindeki Su kayıplarının Kontrolü" yönetmeliği yayınlanmıştır. Bu yönetmeliğe göre, idareler su kayıp oranlarını yönetmeliğin yayınlandığı tarihten itibaren, büyükşehir ve il belediyelerinde 5 yıl içerisinde en fazla %30, takip eden 4 yıl içerisinde ise en fazla %25 düzeyine, diğer belediyelerde ise 9 yıl içerisinde en fazla %30, takip eden 5 yıl içerisinde ise en fazla %25 düzeyine indirmekle yükümlüdürler (28994 sayılı Resmi Gazete). Ayrıca, ülkemizde Su kayıplarının takibi ve değerlendirmesi için, 2014 yılında yayınlanan "İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerindeki Su kayıplarının Kontrolü" yönetmeliği ile idarelerden standart su dengesi formlarının hazırlanması istenmiştir.

Su kayıplarının azaltılması için içme suyu şebekelerinde sızıntıların zamanında tespit edilmesi en önemli unsurlardan bir tanesidir. Bu bölümde içme suyu şebekelerindeki su kayıpları, sızıntılar ve bunların tespit edilmesi alanında yapılmış olan çalışmalar incelenmiş ve çalışmalar genel hatlarıyla aşağıda açıklanmıştır.

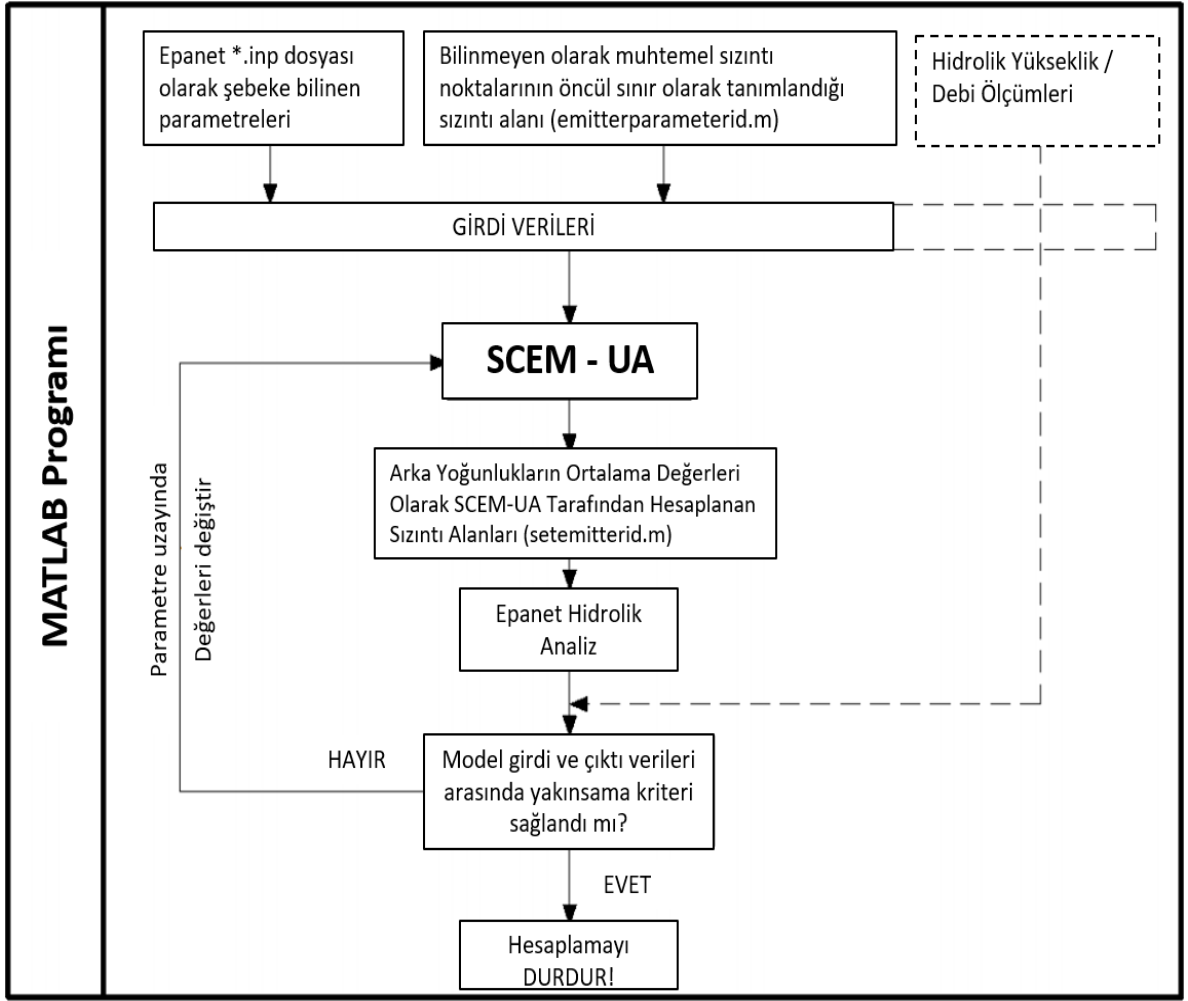
Su kaynaklarının ve su dağıtım sistemlerine verilen suyun verimli kullanılması adına su şebekelerindeki sızıntıların tespiti ve zamanında müdahale edilerek önlenmesi güncel bir konu olup gün geçtikçe önemi daha da artmaktadır. Son yıllarda konunun dikkat çekmesinde en büyük pay artan nüfus ve artan su talebi karşısında çevresel faktörlerden dolayı azalan su kaynaklarıdır. Sızıntı tespiti alanında literatürdeki çalışmalarda hidrolik yöntemlerin kullanılması son zamanlarda sıklıkla başvurulmuş bir yöntemdir.

Su dağıtım sistemlerini, verimli ve sürdürülebilir kılmak amacıyla yapılan çeşitli çalışmalar ve sahada uygulanan birçok metot olsa da burada temel motivasyon şebekedeki sızıntıları azaltmak üzerinedir. Su yönetim planlarında sızıntı odaklı yapılan çalışmalar, sızıntıya yaklaşım şekline göre 2 başlık altında incelenebilir; *“noktasal sızıntı yer tespiti için yapılan çalışmalar”* ve *“sızıntı azaltma stratejileri ile izlenen çalışmalar”*.

Noktasal sızıntı tespiti için yapılan çalışmalarda, sızıntı noktasal olarak tespit edilip var olan sızıntıların giderilmesi üzerine planlamalar yapılır. Noktasal sızıntı tespiti için kullanılan yöntemlerde, geleneksel olarak akustik yöntemlerin büyük bir ağırlığı varken, son yıllarda hidrolik model ve optimizasyon teknikleri kullanılarak yapılan çalışmalar ağırlık kazanmıştır.

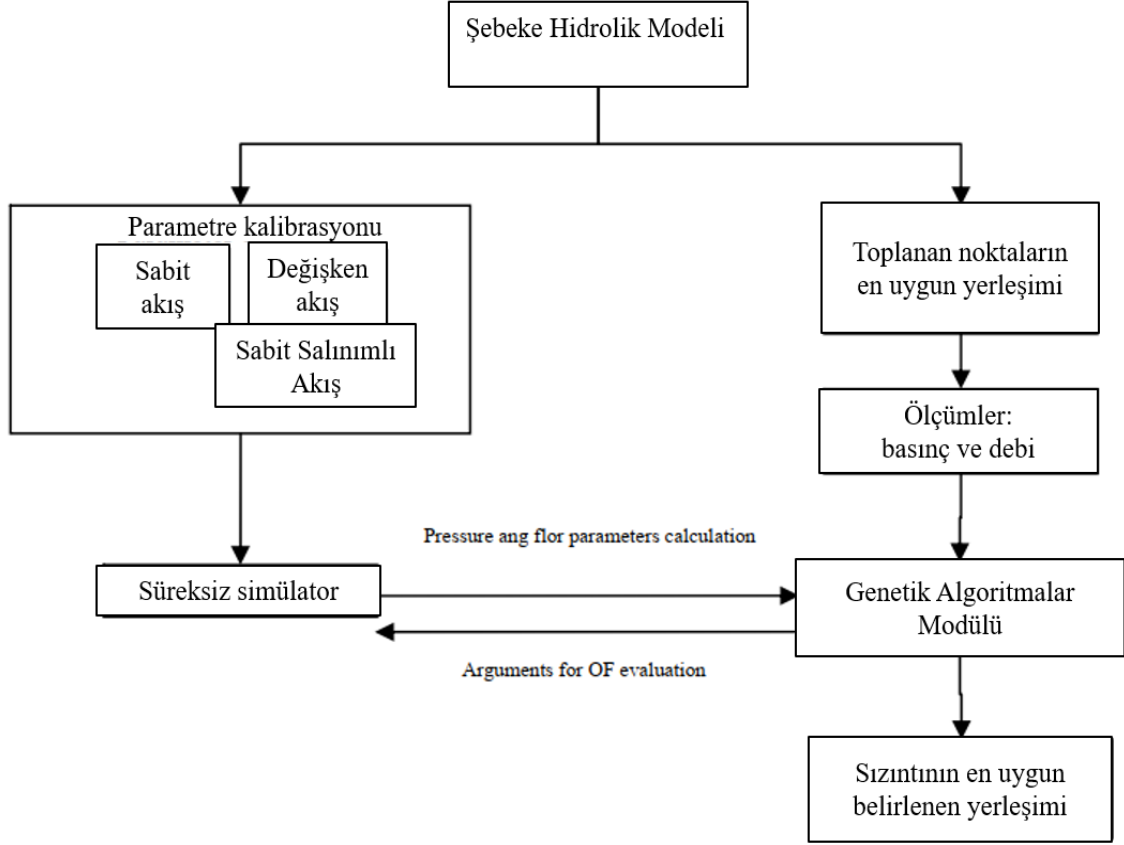
Xu vd. (2014); kentsel sistemlerin devamlılığı için gerekli olan birincil koşul su sağlamaktır. Su dağıtım sistemlerinde meydana gelen sızıntılardan dolayı büyük miktarda sızıntılar meydana gelirken, hızlı kentleşme ve su azlığından dolayı birçok şehir için sağlıklı suyu düzenli bir şekilde sağlayabilmek bir zorluk haline gelmiştir. Sızıntılar sadece su kaynaklarını israf etmekle kalmayıp büyük sosyo-ekonomik maliyetler ortaya çıkarmaktadırlar. Çalışmada, sızıntı kontrol yöntemleri ve çevresel korumaya katkıları incelenmiştir. Buna göre, sızıntı kontrolü için şebeke monitörizasyonu ve sızıntı tahmin modellerinin yanı sıra, boru bakım stratejileri optimizasyonu ve kalıcı basınç düzenleme yöntemlerinin uygulanması önerilmiştir.

Puust vd. (2007) çalışmalarında su şebekelerinde noktasal sızıntı tespiti için ağırlıklı olarak basınç ölçümlerini kullanan bir optimizasyon yöntemini uygulamışlardır. Çalışmalarında Shuffled Complex Evolution Metropolis (SCEM-UA) algoritmasını kullanmışlardır (Şekil 2.1). Hidrolik şebeke modeli için EPANET2 programı kullanılırken, optimizasyon için bu model, Matlab programı ile SCEM-UA yazılımına ilişkilendirilmiştir. Metodoloji literatürdeki iki örnek çalışma ile test edilmiştir.



Şekil 2.1 Matlab programında EPANET ve SCEM-UA bağlantısı.

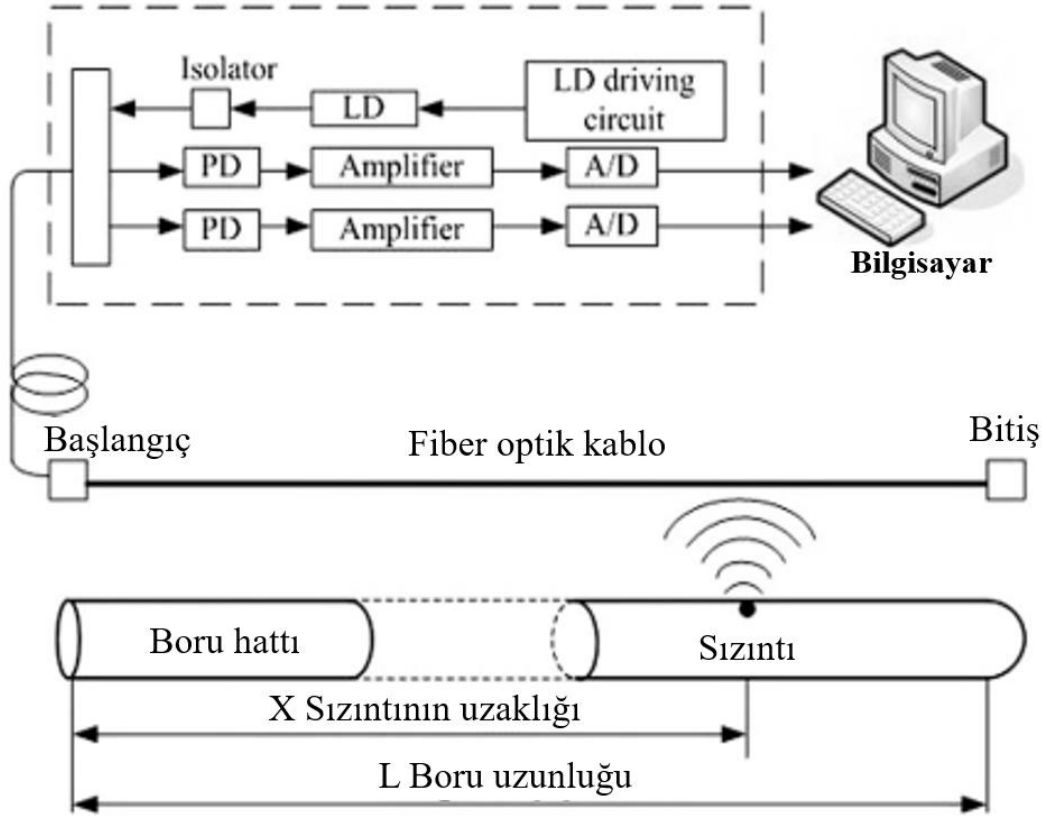
Saldarriaga vd. (2008) çalışmalarında içme suyu şebekelerinde sızıntıları tespit etmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla yaygın kullanımı olan inverse transient metot ve genetik algoritmalar yöntemlerini kullanmışlardır (Şekil 2.2). Çalışma; Bogota-Kolombiya yakınlarındaki Chia kenti içme suyu şebekesinde test edilmiştir. Bu şebekenin seçilmesinin sebebi, göreceli olarak küçük ölçekli bir şebeke olmasının yanı sıra boru malzemesi kullanımında (PVC) homojen bir dağılıma sahip olmasıdır. Şebeke üzerinde testler yapılmış ve elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre su şebekelerinde noktasal sızıntı tespiti hem değişken akış (su darbesi) hem de sabit salınımlı akış yöntemleri ile mümkün olabilmektedir.



Şekil 2.2 Sızıntı tespiti için Saldarriaga vd. (2008) tarafından uygulanan metodoloji.

Akkaya ve Talu, (2017) SDŞ'ler için sızıntıları tespit ederek gelir kaybını azaltmak amacıyla GPS sistemine ihtiyaç duymadan çalışabilecek bir sızıntı tespit prototipi çalışmışlardır. Boru içerisindeki hidrolik kuvvetlerin etkisi ile hareket eden robot konum tahmini için 9-dof IMU sensör (3D-ivme, 3D-jiroskop ve 3d-manyetometre) verilerinin Genişletilmiş Kalman Filtresi içerisinde kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalar 118 metre arama alanında sızıntı tahmininde konum hatasının yaklaşık 0,25 metre olduğunu göstermektedir.

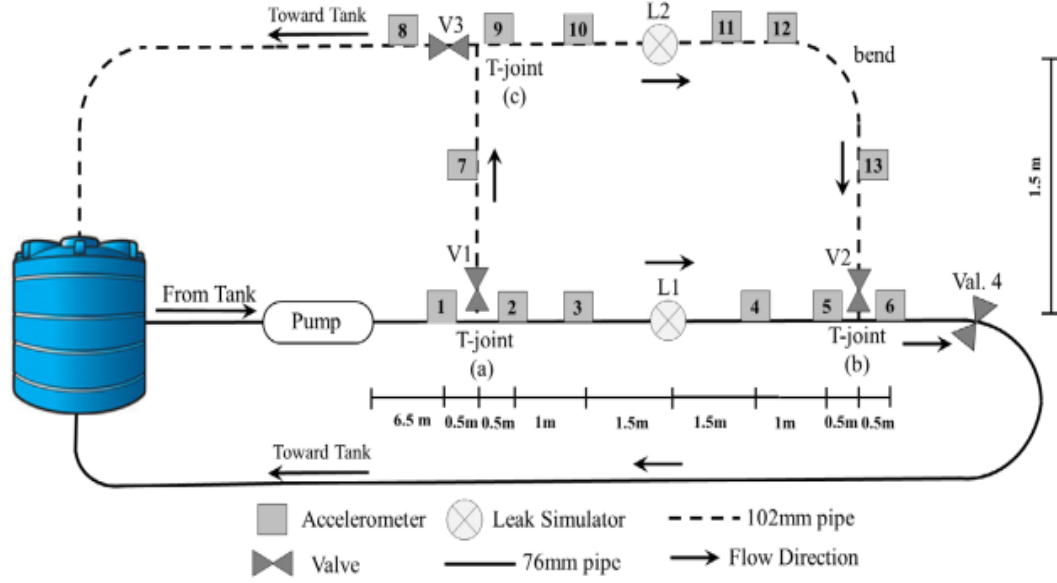
Qu vd. (2010) su şebekelerinde sızıntıları tespit edebilmek ve raporlamak amacıyla Support Vector Machine (SVM) temelli bir sistem geliştirmişlerdir. Bu amaçla optik bir kablo boru hattı boyunca uzatılmış ve kablonun içinde titreşim sensörünü oluşturan üç adet tekil mod fiberoptik yerleştirilmiştir (Şekil 2.3). Sensör, Mach-Zender fiberoptik interferometer temelli çalışmakta ve şebekede oluşan sızıntıları anlık olarak tespit edebilmektedir. Titreşim sinyallerine ait öz vektörler dalgacık paket ayrıştırmasına dayalı "energy-pattern" yöntemiyle oluşturulmuştur. Yapılan çalışmalar sistemin yüksek doğruluk oranı ile çalıştığını ve şebekede oluşan sızıntıları haber vermek adına yararlı bir yöntem olduğunu göstermiştir.



Şekil 2.3 Sızıntı tespiti için Qu vd. (2009) tarafından uygulanan metodoloji

Ahadi ve Bakhtiar (2010), tarafından su dolu plastik borularda sızıntı tespiti için önerilen yeni metoda göre, alandaki sızıntılara ait sinyal öncelikle Acoustic Emission (AE) sinyallerinin Short Time Fourier Transforms (STFT) yöntemi ile görüntülenmesi yolu ile elde edilmektedir. Sahada yapılan çalışmalar, bu deneysel düzenin sızıntılara ait sinyalleri diğer karışan sinyallerden (arka plan, boru doğal frekansı, doğal su sesleri ve çevresel sesler) ayırma konusunda başarılı olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Yazdekhasi vd. (2018) su şebekelerinde geleneksel yöntemler ile sızıntı tespit çalışmaları yapmak genellikle yüksek maliyet ve fazla iş gücü gerektirdiğini vurgulamıştır. Bu çalışmada önerilen yeni teknikte, yüzey titreşimlerinin cross-spectral yoğunlukları boru hattı boyunca ölçülmektedir (Şekil 2.4). Önerilen teknik, düğüm noktaları, dirsekler, çap değişimleri gibi birçok karmaşıklığa sahip olarak laboratuvar ortamında tasarlanmış bir şebekede test edilmiştir. Sonuçlar tekniğin sızıntı tespiti açısından potansiyel oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 2.4 Sızıntı tespiti için Yazdekhesti vd. (2018) tarafından uygulanan metodoloji

Wang ve Ghidaoui (2018) su şebekelerinde sızıntı tespiti için, transient-based bir matched-field (MFP) tertibi formüle etmişler ve uygulamışlardır. Metodun verimli ve güçlü bir metot olduğu ve benzersiz bir çözüm sunduğu görülmüştür. Metot, çözümü arayışını çiftleyerek hem sızıntı lokasyonunu hem de sızıntı büyüklüğünü aramaktadır. Metot ses sinyalleri işlemekte, belirsizliği yüksek olan akışkan-boru dalga hızına rağmen iyi sonuçlar vermekte ve rezonant durum frekansı tanımlamasına gerek olmaksızın çalışabilmektedir. Boru üzerinde birden çok sızıntı olan durumlarda sistem, sızıntıların birbirine göre pozisyonlayabilmektedir.

Su şebekelerinin verimliliğini artırmak amacıyla yapılan çalışmalarda, sızıntıları lokal olarak tespit eden yöntemlerin yanı sıra, şebekedeki sızıntılara bütüncül bir bakış açısıyla yaklaşp, makro ölçekte sızıntıları azaltmaya dayalı stratejilerin de önemli bir yer tuttuğu görülmektedir. Bu çalışmalarda, su dağıtım şebekesindeki sızıntıların varlığı veya miktarı tespit edilerek, buna göre çeşitli yöntemlerle bütüncül sızıntı azaltma stratejilerinin oluşturulmasına odaklanılmaktadır. Basınç yönetimi, izole ölçüm bölgesi (DMA) metodolojisi, minimum gece debisi (MNF) takibi bu tür çalışmalarda sıklıkla başvurulan yöntemlerdir. Literatürde, çok kullanılan bu yöntemleri, optimizasyon yöntemleri veya farklı matematiksel yöntemlerle beraber uygulayarak sonuca gitmeyi amaçlayan çeşitli çalışmalar mevcuttur.

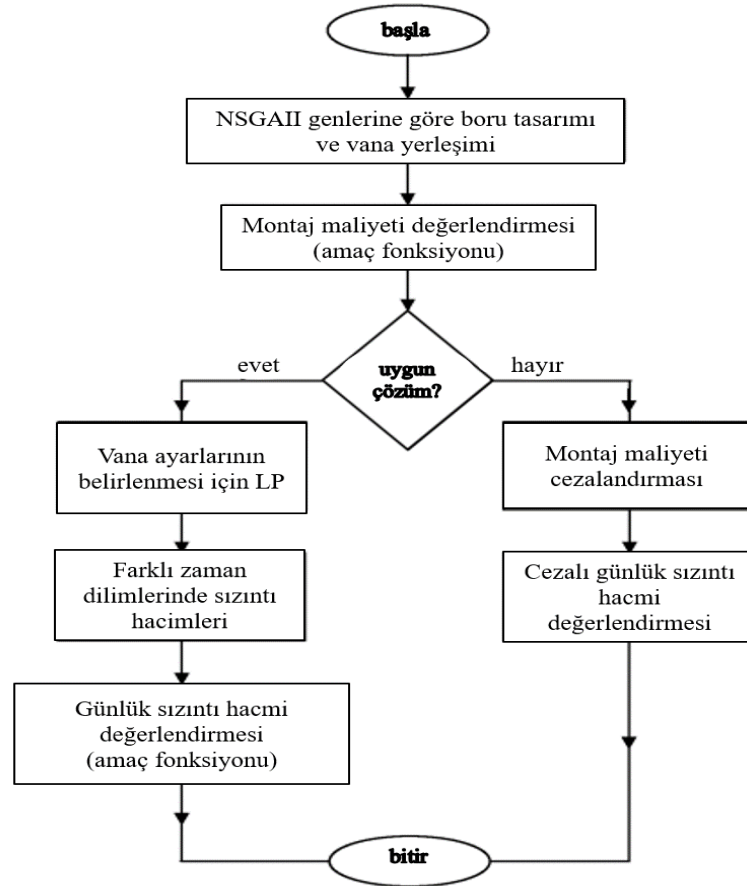
Fuchs ve Riehle (1991) su şebekelerinde sızıntı tespiti için akustik teknik temelli LOKAL adını verdikleri bir teknik geliştirmişlerdir. Almanya’da çalışılan su şebekelerinde

su kayıplarının yıllık ortalama $1000 \text{ m}^3/\text{km}$ 'den $500 \text{ m}^3/\text{km}$ 'ye düşürülmesi sağlanmıştır. Park S. (2004) çalışmasında, borularda patlaklara sebep olan faktörleri belirlemeye çalışmıştır. Bu amaçla oluşturulan orantılı riskler modeli örnek bir boru arıza veri tabanına uygulanmıştır. Uygulanan metodoloji çevresel faktörleri de göz önüne alarak daha koruyucu bir rehabilitasyon sağlamaya ve boru değişim kararlarının ne zaman alınması gerektiğine dair karar vermeye yardım etmektedir.

Adachi vd. (2015) su temin ve dağıtım sistemlerinin sürdürülebilir yönetiminde sızıntı tespitinin dikkatleri çeken bir konu olduğunu vurgulamıştır. Çalışmada sızıntı bölgesini tahmin eden bir yöntem önerilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Buna göre gerçek bir su dağıtım sisteminde, sızıntıları temsil etmesi amacıyla yangın hidrantları açılarak toplam debinin %3,5'i kadar bir sızıntı debisi eklenmiştir. Sızıntı bölgesindeki sızıntıların simüle edildiği ve edilmediği durumlar karşılaştırılmış ve yöntemin sızıntı tahmin sonucundaki hata payının ortalama debinin %2'si kadar olduğu belirlenmiştir.

Aboelnga vd. (2019) Ürdün'de su güvenliği açısından gelir getirmeyen suyun önemli bir zorluk olduğunu ifade etmiştir. Kesintili su temini sistemlerinde kayıp miktarının ve sızıntı yerinin belirlenmesi oldukça zor görevlerdir. Çalışmada, Madaba kenti su dağıtım şebekesi için su kayıpları hacmini ve bileşenlerini belirlemeyi amaçlamaktadır. BABE (burst and background estimates) yaklaşımı ile saha arıza kayıtları kullanılarak alt bileşenler analiz edilmiştir. Madaba'da toplam su kaybının %37,2'sini oluşturan rapor edilen arızalardan dolayı oluşan sızıntıların, müdahale politikaları ve varlık yönetimi geliştirilerek iyileştirilebileceği önerilirken, rapor edilmeyen sızıntıların ise aktif sızıntı yöntemi ve basınç yönetimi ile azaltılabileceği önerilmiştir.

Eliades ve Polycarpou (2012) yaptıkları çalışmada alt ölçüm bölgelerinde (DMA) borularda oluşan sızıntıları oluştukları andan itibaren tahmin etmeyi amaçlamışlardır. DMA bölgelerine giren debi verileri mevsimlik etkiler saf dışı edilerek kümülatif toplam (CUSUM) metodolojisi kullanılarak analiz edilmiştir. Creaco ve Pezzinga (2015) çalışmalarında su şebekelerinde sızıntıları azaltmak için boru yenileme ve kontrol vanası montajı optimizasyonu yapmışlardır. Şebeke boru çapları yanı sıra şebekedeki vanaların pozisyonları ve ayarlarını içeren çok amaçlı hibrit algoritma geliştirilmiştir (Şekil 2.5). Çalışmanın sonuçları oluşturulan algoritmanın su sızıntılarını azaltmada başarılı olduğunu ve literatürde çok kullanılan çok amaçlı genetik algoritma tekniğinden daha etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.5 Sızıntı tespiti için Creaco ve Pezzinga (2015) tarafından uygulanan metodoloji

Hidrolik model oluşturma bugünlerde kentsel su yönetiminin en önemli unsurlarından biri olmuştur. 2014 yılında yayınlanan su kayıpları yönetmeliğinde, Türkiye’de belediyelere su kayıplarını kademeli olarak %25’in altına indirilmesi zorunlu tutulmuştur (28994 sayılı Resmi Gazete). Su kayıplarını indirmek amacıyla alınacak tedbirler arasında “şebekenin hidrolik modellemesinin ve kalibrasyonunun yapılması” önemli başlıklardan birisidir (Dilcan vd., 2018).

Su dağıtım sistemini işleten birimler tarafından şebekeye verilen suyun takibi amacıyla kullanılan su dengesi tablosu bileşenlerinin daha hassas bir şekilde belirlenebilmesi, hidrolik modelleme yöntemi ile mümkün olabilmektedir. Almandoz vd. (2005) su kayıplarının iki bileşeni olan fiziki kayıpları (boru ve servis bağlantılarında oluşan kayıplar) ve idari kayıpları (kullanılan fakat herhangi bir sayaç tarafından ölçülmeyen su) çalışmada değerlendirmiştir. Çalışmada boru hattı ve servis bağlantıları üzerinde oluşan fiziki kayıplar basınca bağlı bir fonksiyon olarak tanımlanmışken, idari kayıplar olarak adlandırılan ve sayaçtan geçmeyen fakat kullanılan su miktarını temsil eden kısım ise tüketim paternine bağlı bir fonksiyon olarak tanımlanmıştır. Bir su şebekesinde uzatılmış

zaman simülasyonu (extended period simulation) analizi yapılarak su denge tablosunda önemli yer tutan bu iki kayıp bileşeni belirlenmeye çalışılmıştır.

Su dağıtım şebekelerinde sızıntı tespiti konusunda yapılan çalışmalar arasında, hidrolik modele dayalı birçok çalışma mevcuttur. Su dağıtım sistemlerini temsil eden modeller doğrusal olmayan ve iteratif çözüm gerektiren bir yapıda olduklarından dolayı, problemin bir dizi lineer denklemin çözümüne indirgenmesi, problemin çözümünde kolaylık sağlar. Bu açıdan, Newton-Raphson tekniğinin uygulamasına dayalı hibrit yöntem veya gradient metot en etkili çözüm yöntemlerindendir (Hammam and Brameller 1971; Todini 1979; Todini and Pilati 1987).

Problemin Lineerleştirilmesi:

Düğüm Noktası Basınç Güncellemesi:

$$H^{(k+1)} = -(A_{21}G^{-1}A_{12})^{-1} [A_{21}G^{-1}(A_{11}Q^{(k)} + A_{10}H_0) - (A_{21}Q^{(k)} - q)] \quad (2.1)$$

Boru Akış Güncellemesi:

$$Q^{(k+1)} = (I - G^{-1}A_{11})Q^{(k)} - G^{-1} (A_{12}H^{(k+1)} + A_{10}H_0) \quad (2.2)$$

k; gradyan yöntem iterasyon sayısı, H; NN-NS elemanlarının piyezometrik yükseklik değer, NN; toplam düğüm sayısı, NS; kaynak noktalarının toplam sayısı (depo ve su kaynağı), H_0 ; kaynak noktasının piyezometrik yüksekliği, Q; NP elemanlarının debisi (akış oranı), NP; şebeke bağlantılarının sayısı (borular, vanalar, pompalar), q; NN-NS elemanlarının bilinen düğüm noktası tüketim değeri, A_{12} ; kaynak olmayan düğüme bağlantı matrisi (NPxNH), NH; kaynak olmayan düğümlerin sayısı (NN-NS), A_{21} ; A_{12} matrisinin transpozesi (A_{12}^T), A_{10} ; kaynak olan düğüme bağlantı matrisi (NPxNS), A_{11} = diyagonal matris ($\alpha_i |Q_i^{k_i|^{n-1}} + \beta_i / Q_i^k$), (NPxNP), α_i ve β_i =i bağlantısının bilinen karakteristik parametreleri, n; yük kaybı üs parametresi, G; diyagonal matris (NA'_{11} ; N= diag(n), (NPxNP)), A'_{11} ; diyagonal matris (diag($\alpha_i |Q_i^{k_i|^{n-1}}$), (NPxNP)), I; tanım matrisi.

Denklem 2.1, bilinmeyen piezometrik yüksekliklere ait bir dizi NH denkleminde oluşan lineer sistemi temsil etmektedir. Bu denklem, lineer sisteme ait standart format içinde gösterilebilir.

$$(A_{21}G^{-1}A_{12})H^{(k+1)} = -A_{21}G^{-1}(A_{11}Q^{(k)} + A_{10}H_0) + (A_{21}Q^{(k)} - q) \quad (2.3)$$

Denklem 2.3 artık $Ax=b$ şeklindeki lineer bir problemidir.

Alonso vd. (2000) çalışmalarında paralel hesaplama tabanlı yazılım aracını su şebekelerinin simülasyonu ve sızıntı tespitleri için kullanmışlardır. Uygulama EPANET üzerinden paralel hesaplama kullanarak 3 farklı problemi ele almaktadır. Birincisi, hidrolik problemin gradyan metodun ortalamaları ile çözülmesidir. Buradaki anahtar nokta, metodun paralelizasyonu multifrontal Choleski metodu ile çözülen lineer sistemlerin çözümüdür. İkinci olarak, su kalitesi simülasyonu sağlanmıştır. Burada kullanılan metod ayrık hacimsel eleman metodudur. Son olarak, basınç kırıcı vanalar yardımı ile sızıntı minimizasyonu sağlanmıştır. Buradaki alt-problemlerin her birinin birbirinden bağımsız olması kilit noktadır ve bu sayede hepsi için paralel çözüm sağlanabilmektedir.

Wu vd. (2010) yaptıkları çalışmada şebeke işletme basıncı ve basınç ile ilişkili olarak değişen tüketim değerlerini modelleyerek sızıntı tespit modeli oluşturmuşlardır. Sızıntı tespit metodu, düğüm noktalarındaki sızıntıların ve onlarla alakalı tüketim katsayılarının optimizasyonu yapılarak formüle edilmesine ve elde edilen veriler ile saha ölçüm verilerinin arasındaki farkların minimize edilmesine dayanmaktadır. Candelieri vd. (2014) su şebekelerinde sızıntı yönetimini geliştirmek amacıyla bir grafik temelli analiz yöntemi önermişlerdir. Çalışmaya şebeke hidrolik modelinden başlanmış ve sızıntı senaryoları oluşturulmuştur. Sızıntı senaryoları bir grafiğe ait düğüm noktaları olarak düşünülmüş ve grafiğin kenarları sızıntı kaynaklı basınç ve debi dağılımına dayalı olarak ağırlıklandırılmıştır. Sonrasında oluşturulan grafik kendine ait normalize laplasyen matrisinin özuzayında analiz edilmiştir. Adedeji vd. (2017) su idareleri için işletme esnasında karşılaşılan büyük sorunlardan birinin su kayıpları olduğundan bahsetmişlerdir. Su kayıplarının güçlü bir şekilde ekonomik kayıplar, çevresel etkiler ve su kaynaklarının korunması ile ilişkisi vardır. Etkili bir sızıntı tespiti için şebeke hidrolik karakteristiklerine ait hidrolik analizler önemli bir gerekliliktir. Çalışmada, hidrolik model ile bir sızıntı tespit algoritması entegre edilmiştir. Çalışmanın ayırt edici yanlarından biri şebeke borularındaki

zamana bağılı yıpranmaların algoritmada dikkate alınmış olmasıdır. Literatürdeki, sınırlandırılmış su şebeke alanlarına işaret eden alt ölçüm bölgelerinde sonuçlar veren sızıntı tespit yöntemlerinin aksine, önerilen yöntemin daha büyük ölçekli şebeke bölümlerinde de daha doğru sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

Literatürde, hidrolik modelleme aracı olarak EPANET programının yoğun bir kullanım durumu mevcuttur. Santos-Ruiz vd. (2020) basınç değişimlerini girdi verisi olarak kullanarak, su şebekelerinde sızıntı yerini tespit etmeye yarayan bir yaklaşımı çalışmışlardır. Yaklaşım, doğrusal olmayan bir dönüşüm uygulamasına dayanmaktadır. Ölçülen basınçların artanları tarafından yayılan alt uzaydaki yön kosinüsleri dönüşümün temelini oluşturmaktadır. Önerilen yöntem, EPANET üzerinden modellenen Hanoi su şebekesinde test edilmiştir. Bu sayede, sızıntı yeri tespitinde yapılan hatalarda %97 oranında azalma sağlanabilmiştir. Li vd. (2021) su şebekelerinde çok noktalı sızıntıları tespit edebilmek amacıyla bir basınç sensörü yerleştirme stratejisi sunmaktadırlar. Önerilen yeni etiket alanı boyut indirgeme ortak karşılıklı bilgi yöntemi (LSDR-JMI), bir filtre çoklu etiket öznetelik seçim algoritmasına dayanmaktadır. Önerilen yöntemin etkinliğini ve avantajlarını gösterebilmek için, yöntem EPANET üzerinden modellenen iki hidrolik şebekeye uygulanmıştır.

Model, en temel tanımıyla, gerçek dünyadaki bir olayın veya sistemin basitleştirilmesi, soyutlaştırılması başka bir deyişle simüle edilmesidir. Hidrolik model de, bir şebekenin hidrolik özelliklerinin simüle edilmesidir. Mühendisliğin ve bütün bilim dallarının kullandığı modeller de olduğu gibi hidrolik modeller de simüle ettikleri gerçek sistemleri tam anlamıyla yansıtmamakta ve aralarında mutlaka bir fark oluşmaktadır. İşte bu noktada kalibrasyon kavramı devreye girmektedir. Kalibrasyon ise temel olarak, bir model ile temsil ettiği sistem arasındaki farkları minimuma indirme işidir.

Wu vd. (2006) su şebekelerinde sızıntı tespiti için genetik algoritma optimizasyonuna dayanan hidrolik model kalibrasyonunu kullanmışlardır. Şebekedeki sızıntıların model kalibrasyonunun bir parçası olarak ele alınması sızıntı tespiti için verimli sonuçlar verdiği görülmüştür. Amaç fonksiyonu saha ölçümleri ile model sonuçlarının arasındaki farkı minimize etmeyi amaçlamaktadır. Saha verilerindeki kalitenin artması ve model granüleritesinin artması sızıntı tespitlerindeki başarıyı artırdığı gözlenmiştir.

Kapelan vd. (2003) su şebekelerinde sızıntı tespiti ve hidrolik model kalibrasyonunun önemine vurgu yaptıkları çalışmalarında, ağırlıklı olarak sızıntı tespiti için

kullanılacak inverse transient metot temelli bir yöntem geliştirmişlerdir. Çalışmanın ilk kısmında; Genetik Algoritmalar (GA) ve Levenberg-Marquardt (LM) teknikleri test edilmiş ve ikisini melezleyen Hibrit Genetik Algoritma (HGA) yöntemini belirledikleri şebekelerde sızıntı tespiti amacıyla kullanmışlardır. Sonuçlar incelendiği zaman, önerilen metotun (HGA), LM-temelli optimizasyona göre daha stabil olduğu ve GA optimizasyonuna göre de daha doğru ve hızlı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Kalibre edilmiş bir tasarım modelinin su dağıtım şebekesinin sahadaki hidrolik davranış şeklini temsil eden ve farklı yönetim senaryoları ile değiştirilebilen gelişmiş bir hidrolik model olduğu söylenebilir (Berardi ve Guistolisi, 2021). Bu açıdan, sızıntı azaltma stratejilerini uygularken; farklı sızıntı senaryolarını ve şebekenin hidrolik davranışlarını temsil edebilmek için kalibrasyonun ne kadar önemli olduğunu gösteren çalışmalar mevcuttur. Bosco vd., (2020) tarafından yapılan çalışmada, güney İtalya'daki bir su dağıtım şebekesi'nde sızıntıları azaltmak için, aktif basınç yönetimi ve rehabilitasyon programı stratejilerini hidrolik modellemeye bağlı olarak çalışmışlardır. Analizler, EPANET-MATLAB araç seti kullanılarak yapılmıştır. Model, şebekenin iki bölgesinde sahadan elde edilen basınç ve akış ölçümlerine dayalı olarak ön kalibre edilmiştir. (i) boru rehabilitasyonu (senaryo S1), (ii) basınç lokal kontrolünün uygulanması (S2) ve (iii) uzaktan gerçek zamanlı basınç kontrolünün (RTC) devreye alınması (S3) dahil olmak üzere üç farklı sızıntı azaltma senaryosu simüle edilmiş ve mevcut ağ operasyonu senaryosu (S0) ile karşılaştırılmıştır. Simülasyonların sonuçları, kullanılan stratejilerin bir kombinasyonunun, su sızıntısını önemli ölçüde azaltarak ağ performansını iyileştirebileceğini ortaya koydu. Spesifik olarak, S1, S2 ve S3 senaryoları altında, (S0 senaryosuna göre) sırasıyla %16,7, %35,0 ve %37,5 oranında sızıntıların azaldığı tespit edilmiştir.

Nasirian vd. (2013) su şebekelerinde sızıntı tespitinin geleneksel yöntemler ile pahalı ve zaman harcayan bir süreç olduğundan bahsederek, sızıntı tespiti için simülasyon ve kalibrasyon temelli bir yöntem önermişlerdir. Bu amaçla "step-by-step elimination method (SSEM)" (adım adım eleme yöntemi) ve genetik algoritma (GA) yöntemleri kombine edilerek çalışılmıştır. Metot, öncelikle şüpheli düğüm noktalarını belirleyerek belirlenen parametreler ışığında öncelikle düğüm noktalarını adım adım elemektedir. Sonrasında şebeke yeniden kalibre edilerek süreç tekrarlanmaktadır. Sonuçlar, sızıntı lokasyon ve büyüklük tespiti amacıyla yöntemin yeteneklerini ortaya çıkarmıştır.

Su dağıtım sistemlerinde, sızıntı tespiti yapmak amacıyla, geleneksel (deterministik) metotların yanı sıra, sezgisel (heuristic) yöntemlerin de kullanıldığı söylenebilir.

Deterministik yöntemler, amaç fonksiyonu gradyanı ve/veya fonksiyon değerlendirmelerinin hesaplanmasına dayalı olarak yapılır. Su dağıtım şebekelerinin optimizasyonunda en çok kullanılanlar, doğrusal programlama (LP), doğrusal olmayan programlama (NLP), tam sayılı doğrusal programlama (ILP), tam sayılı doğrusal olmayan programlama (INLP) ve dinamik programlama (DP) yöntemleridir (Sarbu, 2021). Su şebekelerinde optimum işletme senaryosu oluşturmak amacıyla doğrusal programlama (LP) yöntemini kullanıldığı zaman önerilen algoritma daha kısa çözüm sürelerine sahip olmaktadır (Price ve Ostfeld, 2014).

Su dağıtım sistemlerinin minimum maliyetle tasarımını sağlamayı hedefleyen LP modelinin minimizasyon fonksiyonu denklem 2.4 ile gösterilmiştir (Alperovits and Shamir, 1977);

$$F = \sum_{i=1}^{np} \sum_{j=1}^{np} C(D_j) L_{ij} \quad (2.4)$$

$C(D_j)$; J boru çaplı bir borunun birim uzunluğu için maliyet (\$/m), L_{ij} ; i bağlantısında J boru çaplı bir borunun uzunluğu.

Su dağıtım sistemlerinde sızıntı miktarını tespit etmek amacıyla Mpesha vd., (2001) çalışmalarında; frekans tepki yöntemini (frequency response method) kullanmışlardır. Bir vananın periyodik olarak açılıp kapanması ile elde edilen sabit salınımlı bir akım frekans tepki diyagramında transfer matris metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Sızıntılara sahip olan bir şebekede, bu diyagram ek tepki basınç genliği pik noktalarına (ikincil basınç genliği pikleri) sahiptir. Farklı boru sistemlerinde metod başarılı ile test edilmiştir ve ortalama debinin % 0,5'ine kadar olan sızıntılar tespit edilmiştir. Metodun sadece bir noktada basınç ve debi ölçümü gerektiriyor olması farklı akışkana sahip boru sistemlerinde de kullanabilmesine olanak sağlamaktadır.

Buchberger ve Nadimpalli, (2004) çalışmalarında küçük yerleşim birimleri için (1000 konuttan daha az) su şebekesinde oluşacak sızıntıları tespit edebilmek amacıyla istatistiki yöntemler geliştirmişlerdir. Buna göre içme suyu şebekesi ana isale hattı üzerinde sürekli ölçüm yapan debimetrelerin yerleştirilmesi uygun görülmüş ve ölçüm sonuçları grafiğe dökülmüştür. Ayrıca oluşturulan grafiklerin türevleri de oluşturulmuş ve oluşacak yeni sızıntılarda grafiklerdeki sapmaları algılayarak sızıntı olduğu anda bilgi sahibi olunması amaçlanmıştır.

Aksela vd. (2009) yaptıkları çalışmada, su şebekelerinde sızıntıları tespit etmek için self organizasyon haritasına dayalı bir yöntem sunmuşlardır. Yöntemde kullanılan veriler debimetre okumalarının vektörleri ve sızıntı konumlarının bilgileridir. Sunulan deneylerin sonuçları, debi verileri üzerinden şekillenen modelin tanımlanmış bir dağıtım şebekesi alanındaki sızıntıları tespit edebildiğini göstermektedir. Aamo (2015) çalışmasında bir sızıntı tespit sistemi tasarlamıştır. Sızıntı tespit sistemi, akışkanlar dinamiği kökenli uyarlanabilir gözlemci temelli tek boyutlu hiperbolik kısmi diferansiyel denklemleri içermektedir. Ölçümlerin boru giriş ve çıkışlarında yapılabildiği varsayılmıştır. Yakınsama özelliklerine bakıldığında, sızıntı tahmin problemi, sızıntının boru üzerinde dağılımından bağımsız olarak ele alınmıştır. Simülasyonlar, sistemin sızıntıları tespit etme yeteneklerini doğrulamaktadır.

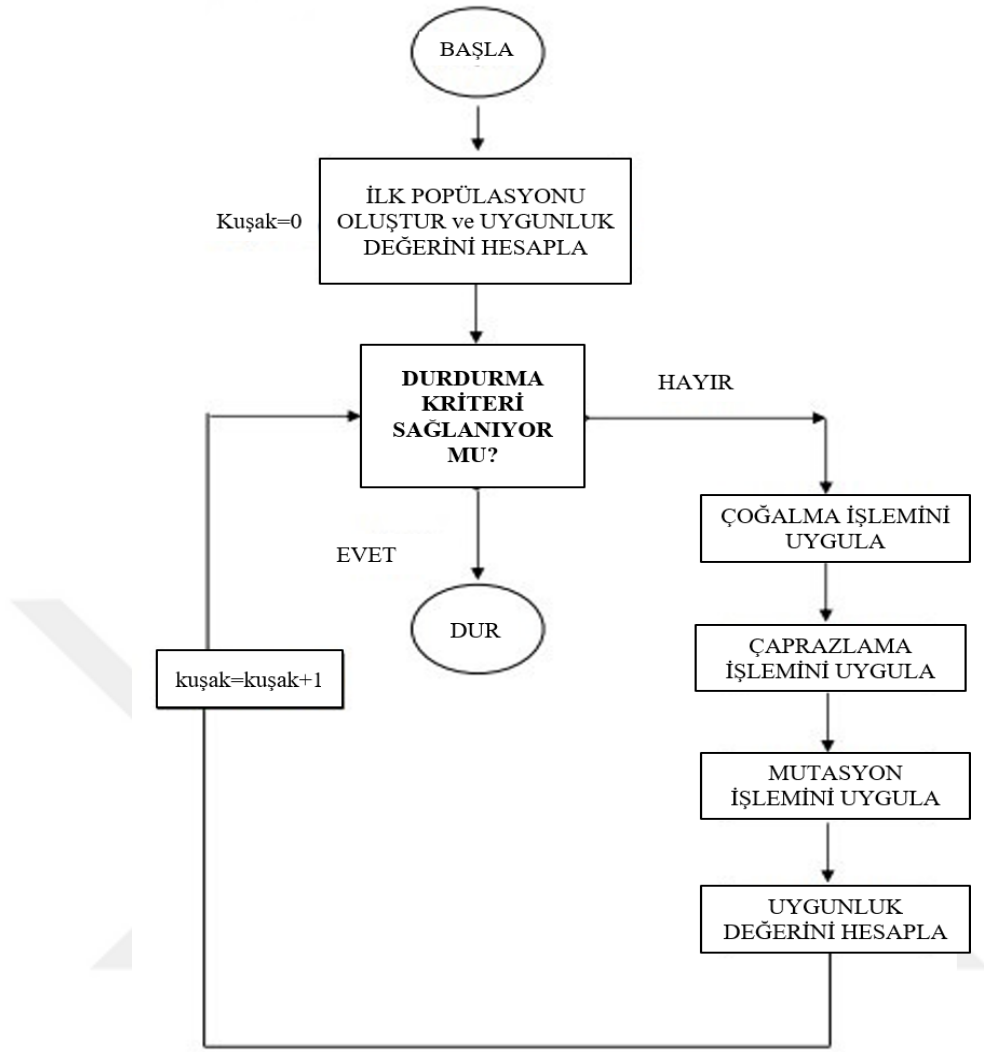
Kayaalp vd. (2017) su iletim hatlarında karşılaşılan en büyük sorunlardan birinin su kaybına sebebiyet veren sızıntılar olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada, sızıntı tespit amacıyla su şebekesi üzerine sensörler yerleştirilmiş ve basınç verileri takip edilmiştir. Sızıntının tespiti ve yerinin belirlenmesi amacıyla çok katmanlı sınıflayıcılar temelli metotlar kullanılmış ve sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılınca, RAKELd metotunun %98 doğruluk oranı ile en iyi sonuçları verdiği tespit edilmiştir. Shao vd. (2019), su şebekelerindeki sızıntılar büyük maddi kayıpların yanı sıra su kaynakları kıtlığının oluşmasına sebep olduğunu vurgulamaktadır. Çalışmada, sızıntıları tespit edebilmek amacıyla, şebeke üzerine yerleştirilmiş olan sensörlerden gelen basınç verileri kullanılmıştır. Önerilen yaklaşıma göre, basınç sensörlerinden gelen veriler arasında zamansal olarak değişen korelasyon kullanılmakta buna göre eşik değerlerini zaman içinde güncellenmekte ve belirli bir tarama zaman aralığı penceresine göre birçok kez taranmaktadır. Önerilen yaklaşım, gerçek bir su şebekesi üzerinde saha çalışması yapılarak test edilmiştir ve sonuçlara göre tarama zaman aralığı penceresi 3 saat ve 6 saat aralığında daha iyi sonuçlar vermektedir.

Deterministik yöntemler, çok amaçlı olsun veya olmasın optimizasyon problemlerinin çözümünde başarılı sonuçlar veriyor olmalarına rağmen, problemin karmaşıklığı ile orantılı olarak yüksek zaman ve kaynak tüketimine sebebiyet verebilirler. Bu noktada evrimsel algoritmalar, deterministik olarak modellenemeyen veya modellenen fakat yüksek zaman kaybına zaman olan problemlerin çözümünde çok daha başarılı sonuçlar verebilmektedir (Dogan and Sag, 2021). Evrimsel algoritmalar, global optimuma ulaşmayı garanti etmese de, çok fazla zaman ve kaynak kaybına mahal vermeden kabul edilebilir bir çözüme ulaşabilmektedirler. Savic ve Walters, (1994) basınç düzenlemesi ile sızıntıların

azaltmayı amaçladıkları çalışmalarında Evolutionary design ve genetik algoritmalar yöntemlerini kullanmışlardır. Su şebekelerinde basınç düzenlemesi yapan bir program oluşturmuşlardır. Optimizasyon probleminde, izolasyon vanaları karar değişkenleri olarak kullanılırken, izin verilen minimum basınç değeri sınır değeri olarak kullanılmıştır. Seçilen iki su şebekesinin sonuçları incelenerek uygulanan metodolojinin etkili yanları hesaplanmıştır.

Vitkovsky vd. (2000) boru sürtünme katsayılarını, genetik algoritmalar tekniğini süreksiz ters metot ile beraber kullanarak su şebekelerinde sızıntıların yerini belirlemeyi amaçlamışlardır. Genetik algoritmalar tekniğini kullanan süreksiz ters metodun sızıntı yerlerini tespit etmede başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Amaç fonksiyonunda modellenen hidrolik eğim ile saha ölçümleri sonucunda elde edilen hidrolik eğim arasındaki fark azaltılmaya çalışılmıştır.

Evrimsel tabanlı optimizasyon yöntemlerinden olan genetik algoritmalar, sızıntı tespiti çalışmalarında kendine çok önemli bir yer oluşturarak en yaygın kullanılan optimizasyon yöntemi olmuştur. Genetik algoritmalar, doğal seçim ilkelerine dayanan bir arama ve optimizasyon yöntemidir. Temel ilkeleri John Holland tarafından ortaya atılmıştır (Emel ve Taskin, 2002). Genetik algoritmalara ait temel akış diyagramı şekilde gösterildiği gibidir (Şekil 2.6).



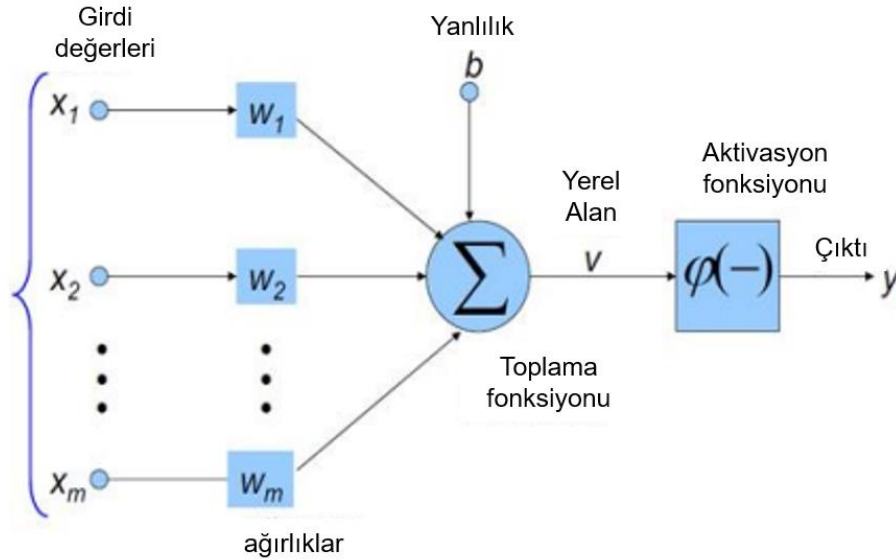
Şekil 2.6 Genetik algoritma temel akış diyagramı (Emel ve Taskin, 2002)

Araujo vd. (2006) basınçları ve dolayısıyla sızıntıları minimize edecek, karar sistemlerini kontrol vana sayısı, lokasyonu ve açık-kapalı pozisyon düzenlemeleri ile destekleyecek bir model çalışmışlardır. Uzatılmış zaman simülasyonunda (extended period simulation) sistem karakteristiklerine göre vana düzenlemeleri yapmaktadır. Hidrolik analiz için EPANET kullanılmıştır. Sızıntıların önlenmesi ve basınç kontrolü için genetik algoritma optimizasyonu metodu kullanılmıştır. Sistemin verimliliğini göstermek için örnek bir uygulama çalışılmıştır.

Alvisi ve Franchini, (2009) çalışmalarında çok amaçlı optimizasyon yöntemini kullanarak sızıntı tespiti ve optimum boru yenileme takvimini oluşturmayı amaçlamışlardır. Kullanılan optimizatör NSGA II çok amaçlı genetik algoritmadır. Sonuçlar uygulanan yöntemin sızıntı tespiti ve boru yenileme takvimi oluşturma açısından güçlü bir karar destek sistemi aracı olduğunu göstermiştir. Lijuan vd. (2012) su şebeke hidrolik modelinde akış

karakteristiklerinde meydana gelen değişimlerin korelasyonu ile sızıntı tespiti yapmayı önermişler ve bu amaçla çalışmalarında genetik algoritmalar yönteminden faydalanmışlardır. Şebeke hidrolik modeli için EPANET programı kullanılmış olup, sonuçlar modelin sızıntı lokasyonlama ve büyüklük tahmini yapabildiğini göstermektedir. Sonuçlara göre; yöntemin su idareleri için küçük ölçekli sızıntıların tespiti için kullanılabileceği önerilmiştir.

Genetik algoritmalar yönteminden sonra en yaygın kullanımı olan algoritma ise “yapay sinir ağıları” tabanlı algoritmalar (Şekil 2.7). Teknik açıdan yapay sinir ağıının görevi, girdi seti olarak kendisine verilen bilgilere karşılık şekil de verildiği gibi bir çıktı üretebilmektir. Bunun yapılabilmesi için ağı belirli örneklerle eğitilir. Sonra ağı genelleme yapabilecek ve karar verebilecek seviyeye kavuşur. Daha sonra bu kazanılan yetenek ile çıktıları belirler (Keskenler ve Keskenler, 2017).



Şekil 2.7 Yapay sinir ağıları akış diyagramı (Keskenler ve Keskenler, 2017).

Wachla vd. (2015) çalışmalarında su şebekelerinde sızıntı lokalizasyonu amacıyla neuro-fuzzy sınıflandırıcılar yöntemi kullanmışlardır. Kullanılan sınıflandırıcı sayısı, şebekenin ayrıldığı bölümlerin sayısında karşılık gelmektedir. Hesaplamalar yapılırken tahminsel modellere ait akış ölçümleri ve çıkış sinyalleri kullanılmaktadır. Önerilen model, güney Polonya’da bir kentin içme suyu şebekesinin belirli bir bölümünde test edilmiş ve sızıntı tespiti yapılmıştır. Kutylowska (2015) Polonya’daki bir su dağıtım sistemi için yapay sinir ağılar uygulaması yöntemi ile boru arıza modellemesini çalışmıştır. Model 173 adet servis bağlantısı arızası ile 147 adet dağıtım şebekesi arızasına uygulanmıştır. Oluşturulan

model sonucunda servis bağlantıları için R2 katsayısı 0,4142 olarak hesaplanmış olup, dağıtım şebekesi için deneysel veriler ve saha verileri arasında kayda değer bir ilişki tespit edilememiştir. Oluşturulan model su idareleri tarafından eski ve yıpranmış boruların rehabilitasyonu için kullanılabilir.

Hidrolik problemlerin çözümünde sıklıkla başvurulanan yöntemlerden biri de, Bayesian Network tekniğine dayalı optimizasyon yöntemidir. Bayesian Network alanındaki çalışmalar ilk olarak 1970'li yıllarda Stanford Üniversitesi'nde başlamıştır (McCabe vd. 1998). Bir Bayesian Network, düğümlerin ilgi duyulan değişkenleri temsil ettiği ve kenarların düğümler arasındaki ilişkiyi temsil ettiği bir directed acyclic graph (DAG) olarak gösterilebilir (Leu ve Bui, 2016). Yapı ve parametreler halihazırda biliniyor olduğu bir durumda, Bayesian Network, grafikteki bütün düğümler için ortak olasılık dağılımını denklem 2.5'te gösterildiği gibi tanımlar;

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | Pa_i) \quad (2.5)$$

X_i ; i düğüm noktası, Pa_i ; i düğüm noktasının çiftleri

Poulakis vd. (2003), çalışmalarında su şebekelerinde sızıntı tespiti için bir bayesian sistem tanımlama metodolojisi uygulamışlardır. Metodoloji; debi test ölçümlerinden gelen verilere dayanarak en olası sızıntı yeri ve büyüklüğü hakkında fikir vermeyi amaçlamaktadır. Metodoloji, gerçek bir şebeke üzerinde test edilmiş ve yöntemin bilgisayar destekli bir karar verme aracı olarak kullanışlı olabileceği gösterilmiştir. Soldevila vd. (2017) çalışmalarında, su şebekelerinde sızıntıları tespit edebilmek amacı ile Bayesian sınıflayıcıları temelli bir metod önermişlerdir. Hidrolik simülatör ile olası bütün sızıntı senaryoları için olasılık yoğunluk fonksiyonları belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda, Hanoi ve Nova Icaria şebekeleri için saha çalışmaları yapılmış ve sonuçlar paylaşılmıştır. Jensen ve Jerez, (2019) su şebekelerinde sızıntı tespiti temelli problemler için bir Bayesian sistem tanımlama tekniği önermişlerdir. Tanımlama süreci, kararlı ve kararsız olarak çalışılmış bir hidrolik simülasyon modeli ile kombine edilmiştir. Buna göre bir dizi hidrolik model sınıfları potansiyel sızıntı olayları olarak tanımlanmıştır. Uygulanan yöntem, borulardan elde edilen debi verilerine göre en olası sızıntı senaryolarını tahmin etmektedir. Önerilen yöntemin etkinliği karmaşık bir şebeke üzerinde test edilmiştir ve buna göre izleme noktalarındaki akış ölçümü test sayıları ve sensör sayılarına göre yöntemin performansı değişmektedir.

Su şebekelerinde sızıntı tespiti probleminin çözümü için yaygın kullanımı olan optimizasyon yöntemlerinin yanı sıra, farklı optimizasyon teknikleri kullanılarak yapılan

Çalışmalarda mevcuttur. İslam vd. (2011) alışmalarında, sızıntı tespiti ve teşhisi için bir çalışma yapmışlardır. Çalışmaya göre su şebekelerinde yaşanan su kayıpları bütün su şebekeleri için görülen yaygın bir fenomendir ve sızıntı oluşur oluşmaz tespit edilebilirse sızıntılarda kaybolan su hacmi büyük oranda azalacaktır. alışmalarında fuzzy-tabanlı bir algoritma kullanmışlardır. Algoritma su şebekelerindeki pürüzlülük, düğümsel talep ve tüketimler ve depo seviyeleri gibi birçok belirsiz parametreyi hesaba katmaktadır. ILP adını verdikleri bir sızıntı meyil endeksi geliştirmişlerdir. Önerilen metodolojinin su idarelerine su kayıplarının tespiti ve teşhisi gibi konularda yardımcı olacağı öngörülmektedir. Casillas vd. (2013) su dağıtım şebekelerinde sızıntı tespiti için basınç hassasiyetlerine dayalı model tabanlı bir çalışma yapmışlardır. Uzatılmış zaman ufuk analizine dayalı bu çalışma tüketim ve talep değişimleri ile oluşan basınç değişimlerini de hesaba katan angle metodu adı verilen bir metoda dayanmaktadır. Önerilen yaklaşımın performansı literatürde iyi bilinen iki yaklaşım olan least square optimizasyonu ve korelasyon metotları ile Barcelona su dağıtım şebekesi kullanılarak kıyaslanmıştır. Zandi vd. (2021); çalışmalarında su şebekelerinde artan talebi yönetmek adına gelir getirmeyen su bileşenlerinden olan sızıntıların tespit edilmesinin öneminden bahsederek, sızıntı tespitini kolaylaştırmak harmony search algorithm tabanlı bir simülasyon-modelleme yöntemi önermişlerdir. Simülasyonlar için EPANET ve MATLAB ortamı kullanılmıştır. Önerilen model 14 farklı senaryo ile test edilmiş olup; sonuçlar yöntemin, tek bir sızıntının yerini ve büyüklüğünü tespit etmede veya üç adet sızıntının yerini tespit etmede başarılı olduğunu göstermektedir.

Romano vd. (2010) su şebekelerinde sızıntıların; değerli kaynakların kaybı, para kaybı, enerji kaybı yanında sağlık açısından da sorunlara yol açabileceğinden bahsetmişler ve sızıntıların oluştuğu andan itibaren dinamik bir şekilde tespit edilmesi amacıyla gerçek zamanlı bir sızıntı tespit modeli üzerinde çalışmışlardır. Sızıntı tespiti için; şebeke üzerinde çeşitli noktalara hidrolik verileri online olarak ölçen ve kaydeden sensörler yerleştirilmiş ve sahadan gelen verilerin analizi, değerlendirmesi ve yorumlanması için yapay zeka yöntemlerinden yararlanmışlardır. Kullanılan yöntemde; yapay sinir ağları, istatistiki işlem kontrol analizi ve bayesian şebeke yöntemleri sentezlenmiştir. Yöntem; Birleşik Krallık'ta gerçek bir DMA üzerinde test edilmiş ve sonuçlar göstermiştir ki, önerilen yöntem gerçek zamanlı sızıntı tespiti için potansiyel teşkil etmektedir.

Quiñones-Grueiro vd. (2021) su şebekelerinde sızıntı tespiti yapmayı amaçlayan veri ve modele dayalı yöntemleri birleştiren bir metodoloji önermişlerdir. Önerilen yöntemde sızıntı tespiti amacıyla bir derin sinir ağı algoritması kullanılmaktadır. Yöntemin büyük

avantajlarından biri de düğüm noktalarını etiketlemeye gerek duymamasıdır. Su dağıtım şebekesinin topolojisini dikkate alan ve zamansal analiz içeren diferansiyel evrim algoritmasının değiştirilmiş bir varyantı kullanılmaktadır. Önerilen yöntem, büyük ölçekli bir su şebekesi olan Modena su şebekesinde test edilmiştir. Sonuçlar, 268 düğümden oluşan bir ağda kurulu sadece 9 sensör göz önüne alındığında, tatmin edici sızıntı tespiti, sızıntı boyutu tahmini ve konum performansı ile önerilen yöntemin etkinliğini göstermektedir. Tabesh vd. (2009) yaptıkları çalışmada, Data-Driven Modelling (DDM) tekniklerine (Artificial Neural Network ve Neuro-Fuzzy Systems) dayalı şebeke borularında arıza oranları ve boru dayanıklılığı tahmin yöntemi ortaya koymuştur. Bu amaçla, boru çapı, boru yaşı, şebeke uzunluğu, şebeke işletme basıncı ve kazı derinliği parametrelerini esas alan regresyon modeli oluşturulmuştur. Neuro-Fuzzy model ve çok değişkenli regresyon modelleri karşılaştırıldığında, Neural Network Model'in boru arıza oranlarını tahmin etmede daha başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Taghlabi vd. (2020); kesintisiz su temininin sağlanabilmesi için şebeke sızıntılarının tespitinin öneminden bahsederek, hidrolik modelleme ile birlikte tahmin algoritmalarının kullanıldığı, Fixed and Variable Area Discharge (FAVAD) denkleminin yeniden çözümüne dayalı bir yöntem ile sızıntıları tespit etmeyi amaçlamışlardır. Önerilen yöntem Casablanca kenti su şebekesinde test edilmiştir. Çalışmanın birinci aşamasında yapay sızıntılar oluşturularak yöntem test edilirken, ikinci aşamada sahada yangın hidrantları açılarak oluşturulan sızıntıları bulmaya çalışmışlardır. Sonuç olarak, önerilen yöntem sızıntıyı 100 m yarıçapında bir alanda tespit edebilmektedir.

3. İÇME SUYU DAĞITIM SİSTEMLERİNDE EPANET İLE DİNAMİK ANALİZ VE SU TALEP MODELİ

İçme suyu dağıtım sistemlerinde sürdürülebilir şebeke yönetimi için uzun dönemli planlama yapılması oldukça önemlidir. Kentsel su yönetiminde en temel prensip yeterli miktarda ve kaliteli suyun zamanında abonelere iletilmesidir. Bunu sağlamak için şebeke ve bileşenleri detaylı analiz edilmeli ve talep debisi doğru bir şekilde tanımlanmalıdır. Su talep modelinde, şebeke özellikleri, abone tüketim davranışları, sızıntı oranları, nüfus, abone sayısı, yasal faturalandırılmamış kullanıcılar doğru bir şekilde tanımlanmalı ve analiz edilmelidir. Diğer taraftan dinamik modelleme şebekenin hidrolik davranışını ortaya koymak adına önemli bir yere sahiptir. Bölgede özellikle kritik yapıların (tarihi eserler, ahşap yapılar, kimyasal tesisler) bulunduğu alanlarda yangın debilerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bölgede yangın çıkması durumunda yangına müdahale için gerekli debi sağlanmalı ve yeterli basınç oluşturulmalıdır. Bunun için bölgede tüm bileşenlerin dikkate alındığı bir model geliştirilmelidir. Bu nedenle bu çalışmada EPANET ile bir dağıtım sisteminde talep akışı ve dinamik modelin oluşturulması ve analizi amaçlanmıştır. Bu amaçla Malatya içme suyu dağıtım sisteminde bir pilot izole bölge için uygulama yapılmıştır. Modelin oluşturulması sırasında gerekli veriler, modelleme aşamaları ve elde edilen sonuçlar detaylandırılmıştır. Dinamik modelde yangın analizleri yapılarak farklı zaman periyotları için talep debileri ve basınçları izlenmiştir.

3.1. Giriş

Artan dünya nüfusu ve kentselleşme süreci beraberinde su talebini artırmaktadır. Bu durum su temini ve dağıtımından sorumlu kurumların su temin ve dağıtım problemine daha detaylı çözümler üretmesini zorunlu kılmaktadır. “Su Yönetimi” ve önemli alt başlıklarından biri olan “Hidrolik Modelleme” konusu üzerindeki ilgi her geçen gün artmaktadır.

Hidrolik Modelleme sürecinde tüketim taleplerinin doğru tahmin edilmesi ve sahadaki gerçek durumun modele gerçekçi bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Kentsel su talebini tahmin etmek ve yönetmek kentsel alanlarda insan ve doğal sistemler arasında var olan sıkı ilişki nedeniyle karmaşıktır. Bu ilişki, mikro ölçekli (bireysel, hane veya parsel düzeyinde) ve makro ölçekli (bölgesel) süreçler ve modeller arasındaki çoklu etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. Örneğin, karmaşık sistemlerde bireyler arasındaki yerel

etkileşimler uzay ve zaman üzerinde birikerek sırasıyla bireysel seçimleri etkilemek veya kısıtlamak için geri besleme sağlayan orta ölçekli ve makro ölçekli değişkenler üretir (Liu vd. 2007; Irwin vd. 2009).

Su dağıtım sistemlerinin planlanması ve işletilmesinde en önemli faktör tüketici talebinin karşılanmasıdır. Bu, kullanıcılara sürekli olarak makul basınçta yeterli hacimlerde kaliteli su sağlamak ve böylece güvenilir su dağıtımını sağlamak anlamına gelir (Brentan vd. 2017). Tüketim modeli oluşturulurken; tüketimleri boru uzunluğu ve tüketim yoğunluğuna bağlı kesafet katsayıları kullanarak dağıtmak hidrolik tasarım süreçlerinde başvurulacak bir uygulamadır. Yaygın kullanımı olan açık kaynaklı EPANET-2 programında, Uzatılmış Dönem Simülasyonu (EPS) sürecinde orijinal formülasyonunda su talebi, ağ düğümlerinde toplu çekimler olarak temsil edilir. Ancak, tek kenar (boru) seviyesinde enerji dengesi gözlemlenmediğinden bu yaklaşım hidrolik yük dağılımında önemli hatalara neden olabilir. Bu dezavantajın üstesinden gelmek için (Menapace vd. 2018) çalışmalarında su talebinin borular boyunca eşit olarak dağıldığı yeni bir EPANET-2 uygulaması önermişlerdir. Tüketim modeli oluşturma uygulamalarına sadece hidrolik tasarım yaparken değil; nüfus artışı, yeni imar alanlarının eklenmesi su dağıtım şebekesinde zamanla artan fiziki kayıplar gibi sebeplerden tasarım sınırlarının dışına çıkmış olan hâlihazırda işletilmekte olan içme suyu dağıtım şebekelerinde de yönetim sürecinde başvurulmaktadır.

Arunkumar ve Mariappan, (2011) çalışmalarında kentsel altyapının en önemli bileşenlerinden biri olan su temini ve dağıtım şebekelerinin etkin bir şekilde planlanması, geliştirilmesi ve işletilmesi amacıyla EPANET 2.0 yazılımı kullanılarak kamusal su temini yapan belediyelerde su talep analizini incelemiştir. Nüfus artışından yetersiz mevcut tesislere kadar bir dizi faktörün metropole su temininde sık sık yaşanan kıtlıktan sorumlu olduğu düşünülmektedir. Çalışmada, belediye bünyesinde hizmet verilmeyen alanlar ile belediye tarafından yetersiz hizmet verilen alanlar tanımlanmış, EPANET 2.0 hidrolik model yazılımı kullanılarak tüketim modeli oluşturulmuş ve yetersiz hizmet verilen alanlar ile hizmet verilmeyen alanlara ait su talepleri hesaplanmıştır.

Tüketim modeli oluşturulurken su dağıtım şebekesinden çekilen su talebinin zamansal değişimleri de dikkate alınmalıdır. Hidrolik modelleme sürecinde izole alt ölçüm bölgelerinde (DMA), farklı abonelere göre günlük ve saatlik su tüketim profilleri ve su tüketim oranları büyük farklılıklar göstermektedir. Su tüketiminin zamansal ve mekânsal varyasyonları ve DMA'nın değişken topografik seviyeleri, hidrolik modellemede dögümsel su talebini tahsis etmek için dikkate alınması gereken parametrelerdendir (Kara vd. 2016).

Ayrıca, su idareleri tarafından işletilmekte olan mevcut içme suyu dağıtım sistemlerinde hidrolik modelleme uygulamaları yaparken, su dağıtım sistemindeki sızıntı miktarlarının tespit edilip tüketim modelinde dağıtılması da hidrolik modelleme sürecinde alınacak olan sonuçların saha koşullarını temsil edebilme kapasitesini artıracaktır. Su dağıtım şebekesi hidroliğini çözebilme kapasitesinin büyük ölçüde ilgili simülasyon modellerinde talep temsiline bağlıdır. Şebekeden farklı su çıkış türleri olarak; insan tabanlı, hacim tabanlı, kontrolsüz orifis tabanlı ve sızıntı tabanlı talepler de dahil olmak üzere, gelişmiş su dağıtım şebekesi simülasyon modellerindeki taleplerin kapsamlı bir görünümünü sunulmalıdır (Guistolisi ve Walski, 2012).

Tüketim talebini ve karakteristiklerini tahmin edebilmek için, hidrolik modelleme sürecine başlamadan önce “Tüketim Modeli”nin oluşturulması gerekir. Bu çalışmada, tüketim modelini gerçekçi bir şekilde tahmin edebilmek için, su idarelerinin teknik kapasiteleri göz önünde bulundurularak uygulanabilir bir yöntem önerilmiştir. Bu amaçla Malatya içmesuyu dağıtım sistemi uygulama alanı olarak seçilmiştir. Uygulama alanında pilot izole bölgede su tüketim modelinin saha verilerine göre belirlenmesi ve yaşanan sorunların tartışılması amaçlanmıştır.

3. 2. Tüketim Modeli: Teorik Altyapı

Hidrolik hesaplamalarda girdi parametrelerinden olan tüketim verisi doğası gereği hesaplamalarda tahmin edilmesi en zor olan parametredir. Hesaplamalar yapılırken kullanılan diğer girdi parametreleri (boru karakteristik özellikleri, topografya, su kaynağı, vb.) çok az hata payı ile hidrolik probleme dâhil edilebilmektedir. Fakat tasarlanan sistemin işletmeye alındıktan sonra ne kadar tüketim yapılacağı, tüketimin nasıl bir dağılıma sahip olacağı, şebekedeki kayıp-kaçak oranlarının nasıl gerçekleşeceği, su tüketiminin hangi dönemlerde ne kadar artacağı gibi sorular belirli kabuller yapılarak hesaplanmaktadır. Bu sebepten hidrolik hesaplamaların en başında tüketimin miktarının ve daha önemlisi tüketim dağılımının iyi hesaplanması gerekmektedir.

Hidrolik hesaplamaları tasarım ve modelleme olarak iki başlık altında inceleyecek olursak, tüketim modelinin oluşturulma yöntemleri de iki durum için daha farklı yaklaşımlar gerektirir. Hidrolik tasarım yaparken, mevcut bir hidrolik sistem olmadığından dolayı, tüketimler belirli kabullere dayalı öngörüler üzerinden yapılır. Hidrolik modelleme ise hali hazırda çalışmakta olan bir hidrolik sistem üzerinden yapıldığı için, tüketim modelinin oluşturulması saha ölçümleri ile elde edilen verilerin çeşitli yöntemlerle analizine dayalıdır.

3.2.1. Hidrolik tasarımda tüketim modeli

Hidrolik tasarımda tüketim modeli oluşturulurken güncel nüfus verisi başlangıç verisidir. Buradan planlanan servis ömrü (genellikle 35 yıl) göz önünde bulundurularak nüfus projeksiyonları yapılır. Sonrasında belirli kabullere dayanan kişi başı tüketim değerleri, sanayi tüketimleri, özel tüketimler, su kayıp-kaçak oranları, vb. kullanılarak tasarım debileri belirlenir. Ayrıca pik tüketim zamanı debileri belirlenir. Son aşamada ise hesaplanan tasarım debisi, proje alanındaki imar planları, nüfus yoğunlukları göz önünde bulundurularak içme suyu şebekesi üzerinden dağıtılır.

3.2.2. Hidrolik modellemede tüketim modeli

Hidrolik modelleme sürecinde sahada hali hazırda bulunan hidrolik sistemden su talep eden ve tüketim gerçekleştirilen kullanıcılar mevcuttur. Sahada mevcut bulunan ölçüm cihazlarından (tüketici sayaçları, debimetreler,...) elde edilen veriler kullanılarak, sahadaki gerçek durum hidrolik sisteme tanımlanabilir. Veriler analiz edilirken doğru bir yaklaşım ile hidrolik model tüketim modelindeki hata payının, hidrolik tasarım tüketim modeline göre çok daha küçük değerlere çekilmesi mümkündür.

3.3. Hidrolik Model için Tüketim Modelinin Oluşturulması

Bir hidrolik sistem; borular, düğüm noktaları, akış kontrol vanaları, basınç kırıcı ve düzenleyici vanalar, pompalar, depo, rezervuar gibi hidrolik elemanlardan oluşur. Her hidrolik sistemde bu elemanların tamamı veya bir kısmı bulunur. Bahsi geçen hidrolik elemanlar arasından su kaynağı, borular ve düğüm noktaları bir hidrolik sistemin temel elemanlarıdır. Her hidrolik sistemde bu 3 eleman mutlaka bulunmalıdır. Burada düğüm noktaları, sistemden ihtiyaç debisinin çekildiği noktalardır. Su kaynağı sisteme ihtiyaç debisi sunan hidrolik elemandır. Borular ise su kaynağı ile düğüm noktaları arasında su iletimini sağlarlar. Toplam tüketim miktarının düğüm noktalarına nasıl dağıtılacağı sorusunun cevabı hidrolik model tüketim modeli oluşturmaktır. Bunun için hesaplanan toplam tüketim miktarının içme suyu dağıtım sistemi üzerinde; miktarsal, mekânsal ve zamansal dağıtımlarının belirlenmesi gerekmektedir.

3.3.1. Miktar dağıtımı

Bir DMA bölgesinde giriş debimetreleri; bölgeye ait ölçülen legal tüketimleri ölçtüğü gibi bölgedeki ölçülmeyen legal kullanımları, illegal kullanımları ve hidrolik sistemin çeşitli

bölümlerinde meydana gelen fiziki kayıplara ait debileri de ölçmektedir. İlegal kullanımlar ile ölçülmeyen legal kullanımları tespit etmek çok kapsamlı çalışmalar gerektirmektedir. Eğer bölgedeki illegal tüketimlerin fazla olduğu düşünülüyorsa, öncelikle bu alanda çalışmalar yapılarak daha sonra hidrolik model ve tüketim modeli çalışmaları yapılabilir. Açıklanan sebeplerden dolayı hidrolik sistemde DMA bölgesine giren debi her zaman sayaçlardan elde edilen tüketim debi miktarından daha fazladır. Eğer bunun aksi bir durum varsa;

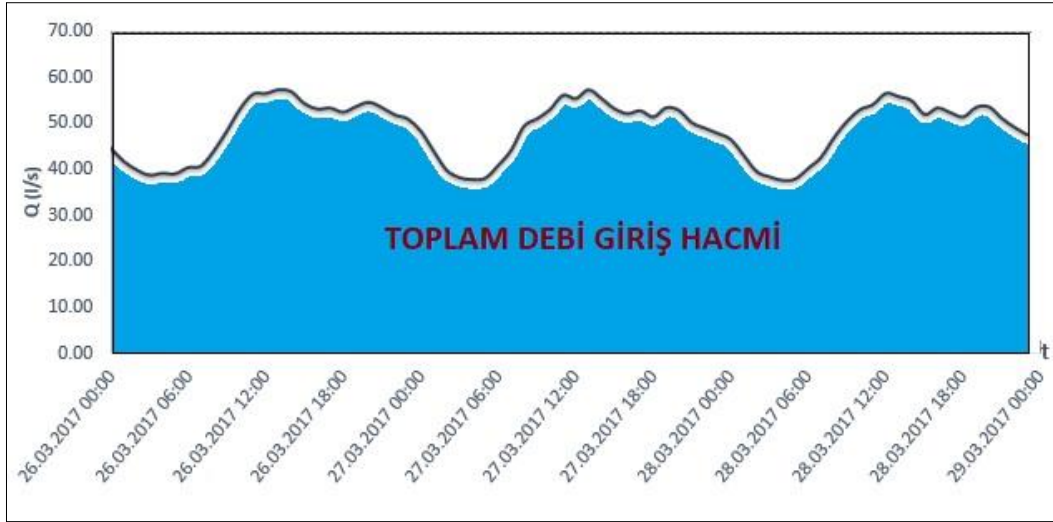
- Ölçüm cihazlarının kalibrasyonlarının yapılıp yapılmadığı
- Sıfır basınç testi kontrolü yapılarak bölgenin izole olup olmadığı
- DMA sınırları ve ilgili birimden temin edilen sayaç okuma verilerine ait sınırların örtüşüp örtüşmediği

kontrolleri yapılmalıdır.

Hidrolik Model Tüketim Modeli oluştururken öncelikle fiziki kayıplara ait debi miktarının toplam giriş debi miktarından ayıklanması ve sayaç okuma verilerinin kalibre edilmesi gerekir.

3.3.1.1. Giriş hacminin belirlenmesi

Hidrolik Modele altlık olacak Tüketim Modeli oluşturulurken öncelikle sınırları belli olan DMA bölgesine giren su hacminin belirlenmesi gereklidir. İzole edilmiş ve debileri izlenen bir DMA bölgesinde, belirli bir zaman dilimi içerisinde debimetrelerden alınan giriş debisi grafiğinin altında kalan alan söz konusu zaman dilimi içerisinde o bölgeye verilen toplam su hacmini $V_{giriş}$ verir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Debimetre Verisi ve Toplam Su Giriş Hacmi

3.3.1.2. Minimum Gece Debisi (MNF) Yöntemi ile Tüketim Hacminin Belirlenmesi

Debimetre ölçümleri ile hesaplanan toplam giriş hacmi, çalışma bölgesine ait, legal ve illegal tüketimler ile su dağıtım sisteminin çeşitli elemanları üzerinde meydana gelen fiziki su kayıplarının toplamıdır. Hidrolik modelleme yaparken tüketimlere ait olan su debisi ile fiziki kayıplara ait debinin birbirinden ayrılması saha koşullarını daha gerçekçi simüle etme yolunu açacaktır. Çünkü tüketimler çalışma alanı üzerinde nüfus yoğunluğu yüksek olan veya özel (ticari, endüstriyel,...) tüketimlerin olduğu bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Fiziki kayıplar ise üzerinde hiç tüketim olmayan borularda bile gerçekleşebilmektedir. Bundan dolayı, bu iki bileşen bu aşamada birbirlerinden ayrılmalıdır. Aksi durumda tüketim modeli üzerinde sahada tüketimin yoğun olduğu yerlere fiziki kayıplar da aynı oranda yoğun olarak tanımlanmış olacaktır.

Tüketim hacmi $V_{tüketim}$ ile sızıntı hacminin $V_{sızıntı}$ belirlenmesi için MNF analizi hızlı ve gerçeğe yakın sonuçlar veren iyi bir yöntemdir (Şekil 3.2). Tüketim hacmi, MNF analizinde belirli kabullere dayalı olarak hesaplanan gece tüketimi ile gün içerisinde anlık kullanım durumuna göre değişen anlık tüketimlerin toplamından oluşmaktadır.

Bunun yanında, her içme suyu dağıtım sisteminde meydana gelen önlenemez kayıplar (arka plan sızıntıları) da MNF'nin bir bileşenidir. Çeşitli arka plan sızıntı tahmin yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar arasındaki fark ihmal edilecek kadar önemsiz olmasına rağmen, MNF'nin legal gece tüketiminden önemli ölçüde etkilenebileceği vurgulanmıştır (Lee vd., 2005). Bu açıdan bakıldığında arka plan sızıntıları dikkate alınması

sonuçları daha tutarlı hale getirecek olsa da bu aşamada gece tüketiminin doğru tahmin edilmesinin en kritik nokta olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.2 MNF Analizi

Tüketim hacmi, denklem 3.1’de gösterildiği şekilde hesaplanabilir;

$$V_{tüketim} = V_{giriş} - V_{sızıntı} \quad (3.1)$$

$V_{tüketim}$; bölgedeki legal ve illegal kullanımların toplam hacmi, $V_{giriş}$; debimetre verileri ile elde edilen bölgeye toplam giriş yapan toplam su hacmi, $V_{sızıntı}$; MNF yöntemi ile belirlenen sızıntı hacmini temsil etmektedir.

3.3.1.3. Sayaç okuma verileri

Sonraki aşamada, izole edilmiş DMA bölgesinde kayıtlı olan abonelere ait sayaç okuma verileri, ilgili birimler üzerinden temin edilmelidir (Şekil 3.3). Kullanıcılara ait tahakkuk miktarlarının toplamı ($V_{tahakkuk}$) hesaplanır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, debilerin izlendiği dönem ile tahakkuk oluşturulan dönemlerin aynı olmasıdır. Sayaç okumalarına ait dönemler düzenli değilse öncelikle bu konuda bir çalışma yapılmalıdır. Sayaç okuma dönemlerinin debi izleme verileri ile eşleştirilmesi mümkün olamıyorsa günlük ortalama tüketim verileri hesaplanarak bir yaklaşım yapılabilir. Fakat bunun bir yaklaşım olduğu ve mutlaka buradan da bir hata oranının hidrolik model sonuçlarına dahil olacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

FAALİYET_TURU	İLCE	MAHALLE	SOKAK	KAPI_NO	BINA	DAIR_E_NO	TOPLAM_TUKETİM	TOPLAM_TAHAKKUK	GUN_FARKI
	BATTALGAZİ	AKPINAR	ŞEHİT MEHMET ÖZBEK	12 A		2	64	520.76	64
TİCARİ İSYERİ	BATTALGAZİ	AKPINAR	SARIOĞLU	9 A			7	59.06	93
TİCARİ İSYERİ	BATTALGAZİ	AKPINAR	SARIOĞLU	8 G		0	2	17.38	30
TİCARİ İSYERİ	BATTALGAZİ	AKPINAR	ŞEHİT MEHMET ÖZBEK	12 B		UN SA	2	18.56	62
TİCARİ İSYERİ	BATTALGAZİ	AKPINAR	TURFANDA	19	.	0	61	495.28	31
TİCARİ İSYERİ	BATTALGAZİ	AKPINAR	ASLANTEPE	34	.		20	164.36	46
MESKEN	BATTALGAZİ	AKPINAR	SARIOĞLU	5	.	3	23	71.34	62
MESKEN BİNALARI	BATTALGAZİ	AKPINAR	TURFANDA	5 A	.	3	19	59.38	59
MESKEN BİNALARI	BATTALGAZİ	AKPINAR	AZİZLER	20 B	.	0	8	25.34	30
MESKEN BİNALARI	BATTALGAZİ	AKPINAR	AZİZLER	4 A	.	2	16	50.36	62
MESKEN BİNALARI	BATTALGAZİ	AKPINAR	SARIOĞLU	5	.	1	15	47.34	62
MESKEN BİNALARI	BATTALGAZİ	AKPINAR	SARIOĞLU	1	.		18	56.16	93
TİCARİ İSYERİ	BATTALGAZİ	AKPINAR	TURFANDA	16 A	.	1	11	91.46	62
LOJMAN	BATTALGAZİ	AKPINAR	ŞEHİT MEHMET ÖZBEK	7 A	.	1	93	407.59	546
MESKEN BİNALARI	BATTALGAZİ	AKPINAR	AZİZLER	20	.	2	10	32.32	62

Şekil 3.3 Abone sayaç okuma verilerinin bir bölümüne ait ekran görüntüsü

Sayaç okuma verilerinin kalibrasyonu

İzole bir DMA bölgesinin tüketim verileri incelendiği zaman çoğunlukla bölgede tahakkuk edilen su miktarı bölgeye verilen su miktarından daha az miktarda çıkar. Önceki bölümde anlatılan MNF yöntemi ile fiziki kayıplar dolayısıyla sistemde kaybolan sızıntı hacmi düşüldükten sonra bile bu durum çok değişmez.

Bu çalışmada çalışılan DMA bölgesi; Malatya ilinde çok eski yerleşimlerin olduğu karmaşık mimari yapıya sahip eski iş hanları ve ticari binaların olduğu şehrin ticari merkezi konumunda olan bir bölgedir. Müşteri hizmetleri biriminden alınan bilgilere göre bölgedeki sayaçların okuma sürecinin çok zorlu olduğu ve sayaçların bir kısmına ulaşamadığı bilgisi alınmıştır. Bu nedenle bölgedeki sayaç okuma verilerinin güvenilirlik kalitesi düşük olarak belirlenmiştir. Bundan dolayı sayaç okuma verilerinin kalibre edilerek tüketim modeline dâhil edilmesi iyi bir yaklaşım olacaktır. Eğer tahakkuk miktarı tüketim miktarından fazla ise öncelikle hesaplamalar gözden geçirilmeli eğer sonuç alınamazsa debimetre verileri ile sayaç okuma verilerinin doğruluğu sorgulanmalıdır.

Sayaç okuma verileri denklem 3.2 ve 3.3'te gösterildiği şekilde kalibre edilir;

$$k = \frac{V_{tüketim}}{V_{tahakkuk}} \quad (3.2)$$

$$q_{ik} = q_i * k \quad (3.3)$$

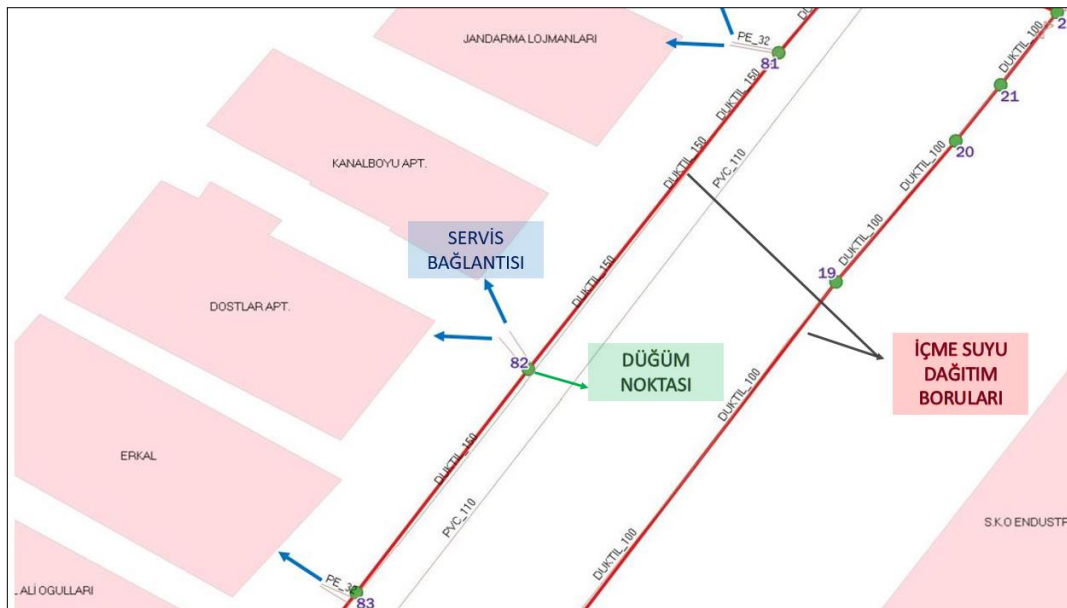
$V_{tüketim}$; Bölgedeki legal ve illegal kullanımların toplam hacmi, $V_{tahakkuk}$; Bölgede tahakkuk edilen toplam su hacmi, k ; kalibrasyon katsayısı, q_i ; “ i ” no’lu abonenin tahakkuk miktarı, q_{ik} ; “ i ” no’lu abonenin kalibre edilmiş tahakkuk miktarı.

3.3.2. Mekansal dağıtım

İzole bir DMA bölgesinde mevcut şebekenin hidrolik modeli oluşturulurken bölgeye giren su miktarı giriş borularına takılacak debimetre cihazları ile takip edilebilmektedir. Bu şekilde debimetreler vasıtasıyla elde edilen giriş debisi verisinin oluşturulan şebeke hidrolik modeli üzerindeki düğüm noktalarına dağıtılması gerekmektedir. Toplam debiyi düğüm nokta sayısına bölerek toplam debi düğüm noktalarına eşit şekilde dağıtım yapılacaktır. Bu şekilde, simülasyon sonuçları sahadaki gerçek durumu yansıtmaktan uzak olacaktır. Bu şekilde, oluşturulmuş olan şebeke geometrisinin durumuna göre düğüm noktalarının sık olduğu bölümler yoğun su talebi yapan bölümler olurken, düğüm noktalarının seyrek atıldığı bölümler daha az su talebi yapan bölümler olacaktır. Çoğunlukla sahadaki gerçek durum bundan farklıdır.

Bir diğer seçenek ise hidrolik tasarımda olduğu gibi toplam debinin boru uzunluğu boyunca kesafet katsayıları dikkate alınarak dağıtılmasıdır. Bu şekilde yapılan debi dağıtımının simülasyon sonucunda doğru sonuçlar verebilmesi öngörülen kesafet katsayılarının ne kadar gerçekçi seçildikleri ile doğru orantılıdır. Toplam giriş debisinin düğüm noktalarına eşit dağıtılmasına göre daha iyi sonuçlar elde edilmesine rağmen gerçek saha sonuçlarının bu şekilde yakalanması yine de pek mümkün olmamaktadır.

Hidrolik modelleme yaparken, sonuçların saha koşullarına en iyi şekilde yaklaştırabilmek ancak sahadaki gerçek durumun modelde yansıtılabilmesi ile mümkün olabilmektedir. Gerçek bir içme suyu dağıtım şebekesinde su talebi çoğunlukla en yakın borudan sağlanan servis bağlantıları sayesinde karşılanır. Eğer servis bağlantılarının konumu sayısal veri olarak mevcut ise o servis bağlantısından su kullanımı sağlayan kullanıcıların hesaplanan tüketimlerini, içme suyu şebekesinden servis bağlantısı yapılan noktaya hidrolik model üzerinden tanımlanacak düğüm noktalarına atamak sahadaki durumu en gerçekçi şekilde modelleme yöntemi olacaktır (Şekil 3.4).



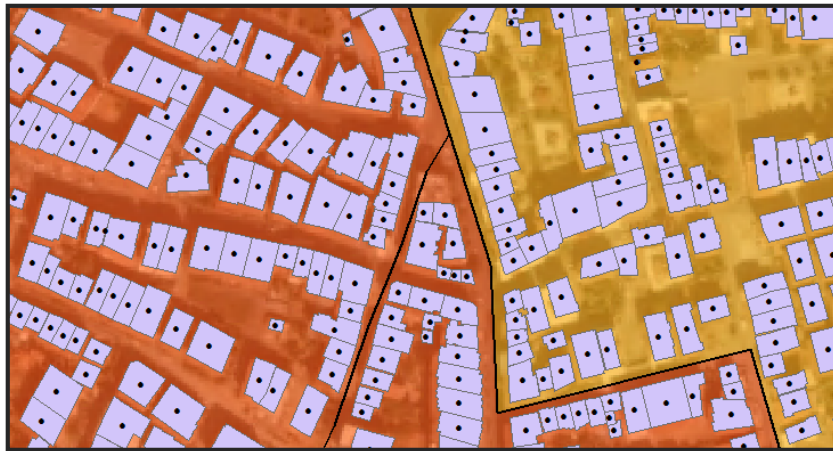
Sayısal şebeke ve servis bağlantısı verileri üzerinden her servis bağlantısına bir düğüm noktası tanımlamak hidrolik modeli gerçek saha koşullarına en çok yaklaştıran yöntem olmakla beraber çoğu su idaresinin elinde özellikle önceki yıllarda yapılmış servis bağlantılarına ait sayısal veri büyük oranda mevcut değildir. Ayrıca her binanın veya bağımsız birimin önüne düğüm noktası tanımlamak modelleme sürecinde zaman kayıplarına sebep olabilmektedir (Şekil 3.5).

Gerek hidrolik tasarım yaparken gerekse de hidrolik modelleme yaparken düğüm noktaları; borunun yön değiştirdiği noktalar, branşman noktaları, boru çapının değiştiği noktalar gibi yerlere tanımlanır. Bunun yanında arazi koşulları ve boru uzunlukları göz önünde bulundurularak fazladan düğüm noktaları tanımlanır. Çok fazla düğüm noktası tanımlamak hesaplamalardaki hassasiyeti artırırken sürecin zorluk derecesini artırmaktadır. Çok az düğüm noktası tanımlamak ise süreci kolaylaştırırken hesaplamalardaki hassasiyet azalacaktır. Bu açıdan hidrolik modelleme yapılırken, bu iki unsur göz önünde bulundurularak ideal bir düğüm noktası sayısı üzerinden hesaplamalar yapılmalıdır.

3.3.2.1.Mekansal dağıtım ve yöntem önerisi

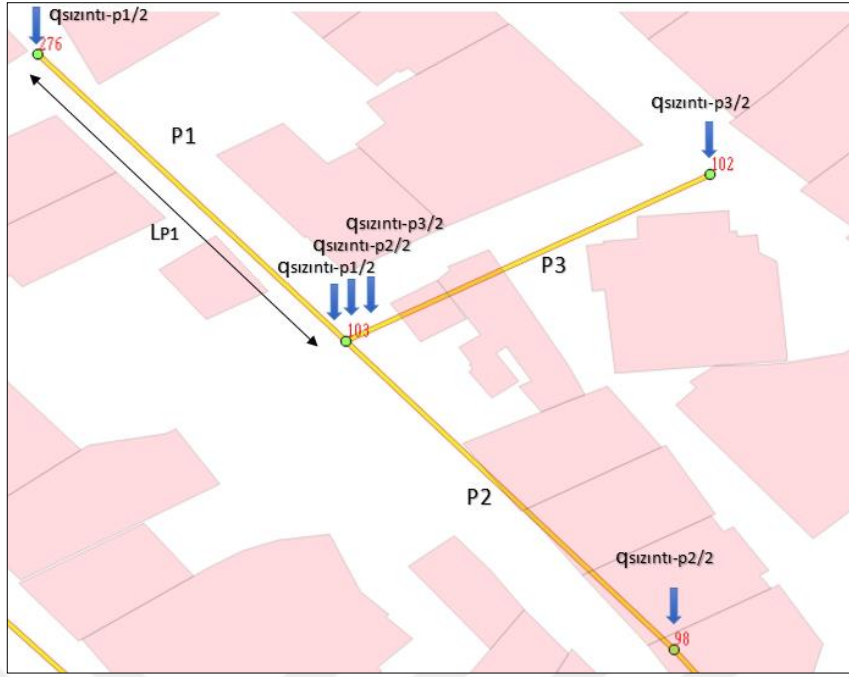
Mekansal dağıtım yaparken dağıtımın yapılabilirliği için zorluk seviyesini çok artırmadan aynı zamanda da sahadaki gerçek durum hidrolik modele aktarılırken doğruluk seviyesinden uzaklaşmadan pratik bir çözüm aşağıdaki gibi önerilmiştir. Mekansal dağıtım, tüketici noktalarının bölgeye ait halihazır haritalar üzerinden coğrafi bilgi sistemleri yardımıyla belirlenen bina şekillerinin ağırlık merkezine tekabül ettiği varsayımı ile yapılabilir (MASKİ Su Temini ve Rehabilitasyonu Projesi, 2016). Uygulama şu şekilde ilerler; her tüketici noktasının su ihtiyacı belirlendiğinde bu ihtiyacın modelin uygun düğümüne atanması gerekmektedir. Uygulanan strateji aşağıdaki gibidir:

Halihazır haritalar ve coğrafi bilgi sistemleri (CBS) kullanılarak binaların ağırlık merkezleri belirlenir (Şekil 3.6). Belirlenen ağırlık merkezi o binadaki kullanıcılara ait toplam tüketimin gerçekleştiği nokta olarak işaretlenir. Sonrasında belirlenen tüketim noktasının en yakın boruya bu boruya dik olan hayali bir kol yardımıyla (Şekil 3.7) atanır.



Şekil 3.6 CBS yardımı ile tüketim noktalarının belirlenmesi





Şekil 3.8 Sızıntı debisinin düğüm noktalarına dağıtılması

Sızıntı debisinin düğüm noktalarına dağılımı denklem 3.4'te gösterilmiştir.

$$Q_i = q_{i(tüketim)} + \sum q_{i(sızıntı-pj)} \quad (3.4)$$

burada;

q_i (tüketim) : "i" no'lu düğüm noktasının tüketim kaynaklı debisi

q_i (sızıntı-pj) : "i" no'lu düğüm noktasının "j" no'lu borudan dolayı oluşan sızıntı debisi

Q_i : "i" no'lu düğüm noktasının toplam (modele esas) debisi

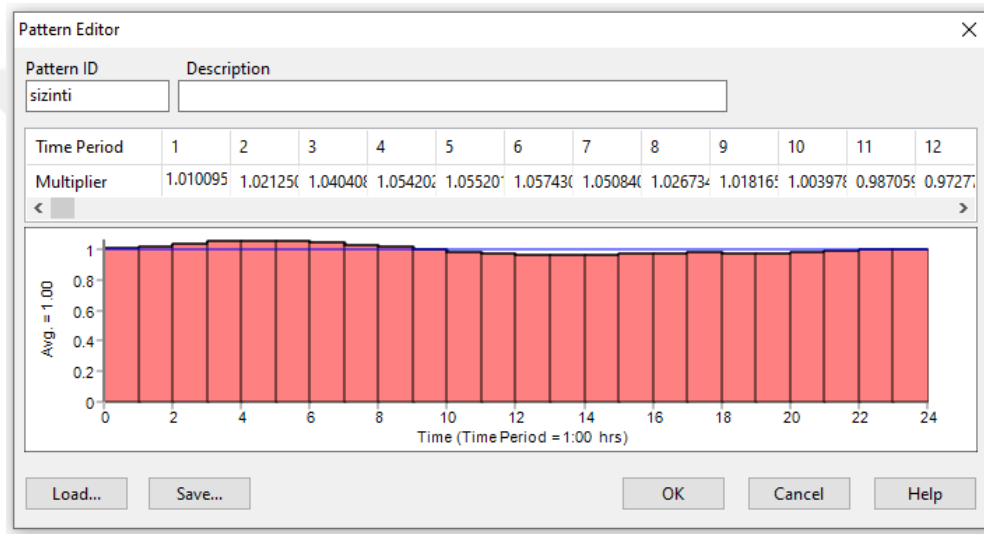
3.3.3. Zamansal dağıtım

Hidrolik çözümler, ortalama debiler kullanılarak anlık çözüm olarak yapılabileceği gibi, debideki dalgalanmalar dikkate alınarak uzatılmış zaman dönemleri için de yapılabilir. Hidrolik modelleme yapılırken ise hidrolik çözümün uzatılmış zaman dönemi için yapılması gerekmektedir.

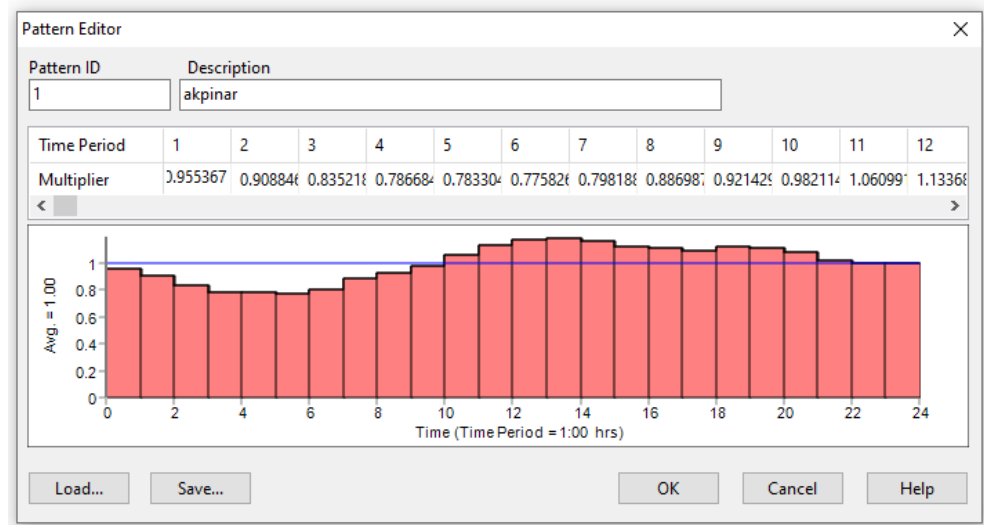
Bir DMA bölgesine giren debiyi ölçen debimetrelerden alınan giriş debisi hacmi farklı zamansal karakteristikleri olan sızıntı debisi ve tüketim debisinin toplamından oluşur. Tüketim debisinin zamansal karakteristiği; DMA bölgesinin sosyo-ekonomik, ticari, turizm, kültürel durumlarına bağlı olarak büyük dalgalanmalar gösterirken sızıntı debisi basınç değişimlerine bağlı olarak daha küçük dalgalanmalar gösterir.

Debinin zamansal dağıtımı için saatlik dilimler kullanılabilir. Bu çalışma bir günlük (24 saat) bir dönem için yapılabileceği gibi hafta boyunca değişen tüketim karakteristiğine sahip bölgeler için 7 günlük (168 saat) bir tüketim deseni oluşturulması faydalı olacaktır.

Bu çalışmada; zamansal dağıtım sürecinde saatlik debi değişimlerini hidrolik modele tanımlamak için tüketim debisini ve sızıntı debisini temsil eden ayrı iki adet zamansal tüketim desenleri oluşturulmuştur (Şekil 3.9, 3.10). Debimetrelerden elde edilen veriler MNF yöntemi ile sızıntı ve tüketimler olarak ayrılmış ve saatlik debi verileri ortalama debilere bölünerek her saat dilimi için katsayılar belirlenmiştir. Belirlenen katsayılar hidrolik simülasyonda kullanılacak şekilde EPANET yazılımına tanımlanmıştır.



Şekil 3.9 Sızıntı Debisine ait Zamansal Tüketim Deseni (EPANET)



Şekil 3.10 Tüketim Debisine ait Zamansal Tüketim Deseni (EPANET)

3.4. Sonuçlar

İçme suyu dağıtım Şebekeleri için tüketim modeli oluşturulması; su yönetimi konusunda yapılacak en önemli iŐlerden olan hidrolik modelleme aŐamasına altlık oluŐturacak ve modelin saha koşullarını gerçekçi bir Şekilde simüle etmesine yarayacak önemli bir aşamadır.

Bu alıŐmada; Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü tarafından işletilmekte olan Malatya İli İçme Suyu Dağıtım Sistemi üzerinde tesis edilmiş olan bir DMA bölgesine ait hidrolik modelleme çalışmaları sürecinde Şebekeden çekilen talep debisinin hidrolik çözüme saha koşullarını en yakın Şekilde temsil etmesini sağlamak amacıyla yapılan tüketim modeli oluşturma süreci aşamaları anlatılmıştır.

DMA bölgesinde Şebekeden çekilen su miktarlarını tespit edebilmek amacıyla miktarsal dağılım süreci tamamlanmıştır. Yanı sıra müşteri hizmetleri biriminden bölgedeki sayaçlara ait okuma verileri alınmıştır. Bu çalışmada çalışılan DMA bölgesi özelinde çok eski yerleşimlerin olduğu karmaşık mimari yapıya sahip eski iş hanları ve ticari binaların olduğu bir bölge olduğundan sayaç okuma verilerinin güvenilirlik kalitesi düşük olarak belirlenmiŐtır. Bu sebeple MNF yöntemi kullanılarak sızıntı hacmi belirlenmeye çalışılmıştır. Sayaç okuma verileri ise mekansal dağıtım sürecine altlık olarak kullanılmak amacıyla kalibre edilmiŐtır. Mekansal dağıtım sürecinde, CBS kullanılarak tüketim debisi önce kendilerine en yakın borulara sonrasında hidrolik hesaplamalara dahil edilebilmesi için tanımlandıkları boru üzerindeki en yakın düğüm noktasına tanımlanmıştır. Sızıntı debisinin ise boru uzunlukları ile orantılı olarak dağıldığı kabul edilerek gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Talep debisindeki zamansal dalgalanmaları tahmin edebilmek amacıyla, bölgeye giren su debisini ölçen debimetreler kullanılarak bölgeye ait zamansal tüketim deseni oluşturulmuştur.

Hidrolik Modelleme ve kalibrasyon süreçleri için tüketim modeli oluşturma çalışmaları yaparken hesaplamaların sezgisel süreci göz önünde bulundurularak, sahadaki gerçek durumunun bire bir simüle edilemeyeceği ancak gerçeğe yakınlalaŐabileceėi unutulmamalıdır. Şebeke üzerinde sahada gerçekleşen su talep debisi çekim karakteristiklerini temsil etmek amaçlı yapılan tüketim modeli uygulamalarında idarelerin teknik kapasiteleri ile su Şebekesinin fiziki durumları göz önünde bulundurularak farklı analiz yöntemleri belirlenebilir. Bu süreçte sahadaki koşulları en gerçekçi Şekilde temsil edilecek bir model teşkil edilmesi amaçlanmalıdır.

Su temini ve dağıtımından sorumlu olan idareler; su yönetimi konusunda çalışmalar yaparken bu çalışmada önerilen tüketim modeli çalışmalarını yapmalarının ilgili kurumlara hidrolik model dışında farklı alanlarda da fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Özellikle müşteri ve abone hizmetleri alanında tahakkuk verilerinin tüketim modeli için önemli bir parametre olması dolayısıyla illegal kullanımların ve bölgesel sayaç okumaları yapılırken farkında olunmayan hataların meydana çıkmasını sağlayarak bir oto-kontrol mekanizmasının gelişmesine dönük faydalar sağlayacağı ve idari su kayıplarını azaltacağı öngörülmektedir.



4. HİDROLİK MODELLEME VE KALİBRASYON

4.1. Giriş

İçme suyu dağıtım sistemlerinde farklı oranlarda ve sayıda sızıntı meydana gelmektedir. Sızıntıların oluşmasında şebeke özellikleri, yüksek basınç, çevresel faktörler ve işletme faktörleri etkilidir. Sızıntıların belli bir kısmı yüzeye çıkarken önemli bir kısmı ise yüzeye çıkmamaktadır. Yüzeye çıkmayan arızalardan kaynaklanan sızıntı hacminin azaltılması için sahada tespit ve izleme faaliyetleri gerçekleştirilmelidir. Bu amaçla çeşitli akustik yöntemler, bölgesel izleme sistemleri gibi yöntemler uygulanmaktadır (Zaman vd., 2020; Fan vd., 2022; Kafle vd.,2022). Bu çalışmada, şebeke davranışının anlaşılması, hidrolik bileşenlerin izlenmesinde kullanılan hidrolik modelin sızıntı yönetiminde uygulanması ve kalibrasyonu amaçlanmıştır. Bu amaçla pilot izole bölge için hidrolik model oluşturulmuştur. Şebeke hidrolik modeli oluşturulurken abone bilgileri, tüketim verileri, şebeke topolojik özellikleri, şebeke karakteristik bilgileri ve pürüzlülük bilgileri esas alınmaktadır. Sisteme ait verilerin doğru bir şekilde belirlenmesi modelin doğru bir şekilde tasarlanmasını ve sahada kalibrasyonunun sağlanmasına imkân tanımaktadır.

Hidrolik model tasarlandıktan sonra sızıntı yönetiminde uygulanabilmesi için saha kalibrasyonu en önemli aşamadır. Bir su dağıtım sistemini analiz etmek amacıyla kullanılacak olan uygun hidrolik modeller kalibrasyon sürecine ihtiyaç duyarlar (Zanfei vd. 2020). Kalibrasyon sürecinin doğruluğu hidrolik modelden elde edilen veriler ile sahada ölçülen veriler kıyaslanarak test edilebilir. Şebeke bilgilerinin eksik veya hatalı alınması saha verisi ve model verisi arasındaki farkın fazla olmasına neden olmaktadır. Model kalibrasyonunun sağlanmamasında özellikle, şebeke topolojisinin ve geometrisindeki belirsizlikler, pürüzlülük ve tüketim bilgilerindeki eksiklikler etkili olmaktadır. Saha verileri ile kalibre edilmiş hidrolik modelde, düğüm noktalarında basınç değişimleri izlenerek potansiyel sızıntıların farkına varılması ve önlenmesi mümkün olmaktadır. Yüzeye çıkmayan sızıntıların farkına varma ve yerini tespit sürelerini azalacağından sistemdeki toplam sızıntı hacmi de azalacaktır.

4.2. Hidrolik Modelleme

Model; en temel tanımıyla, gerçek dünyadaki bir olayın veya sistemin basitleştirilmesi, soyutlaştırılması başka bir deyişle simüle edilmesidir. Hidrolik modelleme ise alt yapı sistemleri için (su, kanalizasyon, drenaj ve taşkın) sahada oluşan hidrolik davranışın analiz edilerek söz konusu sistemin matematiksel modelinin oluşturulması işidir (Arabacı ve Dursun, 2019).

4.3. Kalibrasyon

Mühendisliğin ve bütün bilim dallarının kullandığı modeller gibi hidrolik modeller de simüle ettikleri gerçek sistemlerin saha davranışını girdi verilerindeki (şebeke geometrisi, boru karakteristik özellikleri, tüketim miktarları, vb.) belirsizlikler nedeniyle matematiksel olarak tam anlamıyla yansıtmamakta ve aralarında bir fark oluşmaktadır. Bu noktada kalibrasyon kavramı devreye girmektedir. Kalibrasyon temel olarak, bir model ile temsil ettiği sistem arasındaki farkları minimuma indirme işidir. Model ile saha arasında oluşan bu farka sebep olan başlıca değişkenler;

- Şebeke geometrisinin tam olarak bilinmemesi: Bir modelin saha koşullarını tam anlamıyla yansıtabilmesi için şebeke geometrisinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Birçok su idaresinde eski şebekelere ait sayısal haritalar ya bulunmamaktadır, ya da kısıtlı olarak bulunmaktadır. Haritalar kusursuz bir şekilde saklanmış olsa bile, yıllar içerisinde sahada meydana gelen arızalar, yeni bağlantılar, kısmi yenileme çalışmaları gibi birçok sebeple şebeke geometrisinde değişiklikler olmuş olabilir. Kalibrasyon aşamasında şebeke geometrisinin iyi biliniyor olması zorunluluktur. Eğer şebeke geometrisi ile ilgili soru işaretleri varsa, kalibrasyon aşamasında doğru geometrinin oluşturulması temel hedeflerden biridir.
- Şebeke Karakteristik Özelliklerinde Zamana Bağlı Değişiklikler: Hidrolik hesaplar için iyi bilinmesi gereken şebeke özelliklerinin başlıcaları; boru çapı ve boru pürüzlülüğüdür. İlk imalat aşamasında boru çapları ve pürüzlülük katsayıları iyi şekilde bilinmektedir fakat zamanla gerek boru kesitinde meydana gelen birikimler sonucu boru çapında meydana gelen değişiklikler, gerekse de boru çeperindeki aşınma ve birikimlerden dolayı pürüzlülük özelliklerinde meydana gelen değişimler bu iki değişkenin hidrolik problemin içerisine sağlıklı bir şekilde dahil edilmesinin

önünde zorlayıcı birer unsur olarak durmaktadır. Kalibrasyon yapılırken bu parametrelere ait değerlerin de doğru bir şekilde hesaplanması hedeflerden biridir.

- **Tüketimdeki Belirsizlikler:** Gerek hidrolik tasarım, gerekse de hidrolik modelleme aşamasında, problemin en önemli girdisi şebekeden ne kadar ve hangi dağılımla (yer, zaman) su çekileceğidir. Nüfus dağılımına ve diğer kullanım türlerinin dağılımına göre, belirlenen ortalama tüketimler üzerinden tüketim modelleri oluşturulur. Bu tüketimlerin saatlik, günlük, haftalık ve mevsimsel dağılımları göz önünde bulundurularak hidrolik tasarım yapılır. Tasarım aşamasında bu işlemlerin tamamı projeksiyon temelli olarak tahmini yöntemlerle yapılır. Yıllardır işletilen bir şebekede ise tüketim ilk planlandığı şeklin az veya çok dışına çıkmıştır. Mevcut şebekelerde müşteri sayaçlarından ve diğer debi ölçüm ekipmanlarından gelen veriler de kullanılarak gerçekçi bir tüketim modeli oluşturulması kalibrasyon aşamasının bir başka hedefidir.
- **Sızıntılar:** Su şebekeleri planlanırken mutlaka belli bir oranda sızıntının olacağı kabul edilir ve bu sızıntı şebeke üzerinde homojen bir şekilde dağıtılarak hidrolik problem çözülür. Gerçek saha koşullarındaki sızıntıların ise homojen dağılması beklenmez. Ayrıca toplam sızıntı debisi, çoğunlukla ilk planlanandan daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu nedenle iyi bir kalibrasyon modelinin hedeflerinden biri de sızıntı modelinin doğru bir şekilde oluşturulmasıdır.

4.4. Saha Uygulaması: Malatya İçme Suyu Şebekesi Akpınar DMA Örneği

Çalışma alanı; Türkiye'nin güneydoğusunda, Malatya ili Akpınar DMA Bölgesi içme suyu şebekesidir (Şekil 4.1). Su şebekelerinde hidrolik model oluşturabilmek için şebeke geometrisi, bölge topolojisi, tüketim verileri, saha ölçümleri, vb. bazı verilere sahip olabilmek gerekmektedir. Hidrolik modelleme ve kalibrasyon için bu çalışmada nihai olarak kullanılan program EPANET olmuştur. Hidrolik hesaplar için Hazen-Williams formülü kullanılmıştır. Bunun dışında, verilerin modellemeye uygun hale getirilmesi amacıyla QGIS programı başta olmak üzere çeşitli programlar kullanılmıştır.

Akpınar DMA bölgesi için hidrolik model hazırlanma sürecinde gerekli verilerin nasıl temin edildiği aşağıda özetlenerek anlatılmıştır.



Şekil 4.1 Çalışma alanı (Akpinar DMA Bölgesi)

4.4.1. Şebeke geometrisi

Bir su şebekesinin hidrolik modeli, o şebekeye ait hidrolik özelliklerin dijital bir ortamda simüle edilmesi anlamına geldiğinden öncelikle o şebekeye ait geometriye sayısal ortamda sahip olmak gerekmektedir. Akpinar DMA bölgesindeki su şebekesi, Malatya ili'nde ortalamadan daha eski bir şebekedir. Farklı zamanlarda tamamlanmış olan imalatların birleştirilmesiyle elde edilmiş olan parçalı bir şebeke yapısına sahiptir. Şebeke yaşı 30 ile 40 yıl arasında değişmektedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Çalışma alanı uydu görüntüsü ve içme suyu şebeke haritası

Şebeke geometrisine ait veri sadece kağıt ortamında bulunan 40 yıllık paftalardan oluşan sayısal işletme planlarıdır. Daha önceki yıllarda bu veriler sorumlu idare olan MASKİ tarafından sayısal ortama atılmıştır ve zaman içerisinde oluşan arızalara müdahale edildikçe üzeri açılan şebekeden alınan ölçümlerle mevcut sayısal haritanın doğrulamaları ve güncellemeleri gerçekleştirilmiştir. Buna rağmen eldeki sayısal veri tam anlamıyla güvenilir bir veri değildir.

Akpınar DMA bölgesi içme suyu şebekesi borularına ait karakteristik veriler aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Çalışma şebekesindeki toplam boru uzunluğu 13464.22 metredir. Boru malzemesi olarak büyük oranda PVC ve ACP borulardan oluşmaktadır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 Akpınar DMA boru karakteristik özellikleri

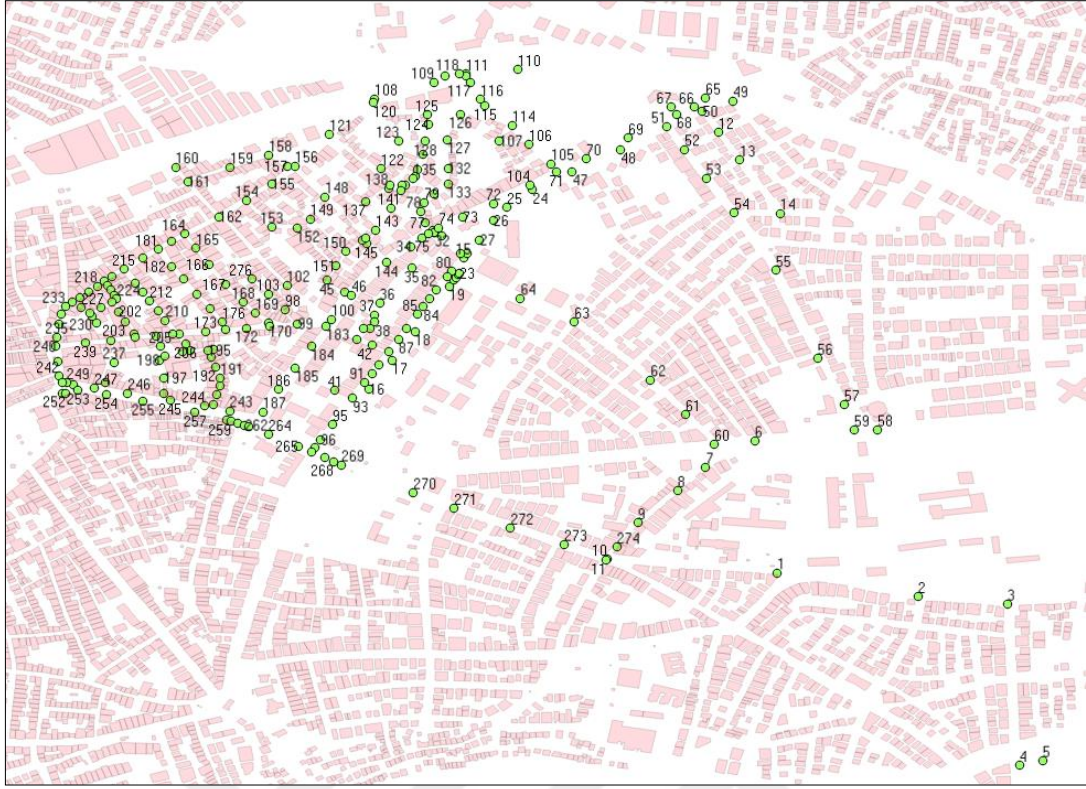
BORU ÇAPI	BORU MALZEMESİ	UZUNLUK (m)
Ø400	ACP	270,24
Ø300	ACP	184,02
Ø175	ACP	474,50
Ø150	ACP	1447,39
Ø150	DF	210,61
Ø100	DF	261,23
Ø140	PVC	133,93
Ø125	PVC	938,30
Ø110	PVC	9544,00
TOPLAM		13464,22

4.4.2. Su kaynağı

Akpınar DMA bölgesine su temini 15,000 m³ su depolama hacmine sahip olan İnderesi Su Deposu'ndan DN 900 mm çelik boru ile sağlanmaktadır. Deponun alt kotu 1038.51 m iken, depo üst kotu 1042.21 m'dir.

4.4.3. Topoloji

Akpınar DMA bölgesinin topolojisi, MASKİ'den temin edilen halihazır haritalar ve digital terrain model (DTM) haritaları vasıtası ile elde edilmiştir. Verilerin, EPANET hidrolik modeline aktarılması amacıyla QGIS programından destek alınmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Akpınar DMA bölgesi içme suyu şebekesi, hâlihazır ve DTM haritaları

4.4.4. Tüketim modeli

Akpınar DMA izole bölgesine ait tüketim özelliklerini belirleyebilmek adına, sorumlu idare olan MASKİ’den bölgeye ait tahakkuk verileri alınmıştır (Şekil 4.4).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	ABONE_TURU	TARİFE_TURU	FAALİYET_TURU	MAHALLE	SOKAK	KAPI_NO	BİNA	DAİRE_NO	LAM_TUKFAM	TAHAŞUN_FARK	ORTALAMA	
1	RESMİ DAİRE	DERNEK-VAKIF-SİY. PARTİ (H)	DERNEK	ÜÇBAĞLAR	BUHARA	83 D	.		743	1204.84	30	24.76666667
2	KONUT MESKEN	MESKEN (GEÇİCİ)-1	MESKEN	ÜÇBAĞLAR	BELEMİR	6	ÇÖLÖĞLÜ	8	585	3699.9	28	20.89285714
4	ATIK SU	ATIK SU TİCARETHANE-1	TİCARETHANE	ÜÇBAĞLAR	BUHARA	81	EKENLER PETROL		578	937.54	30	19.26666667
5	ATIK SU	ATIK SU TİCARETHANE-1	TİCARETHANE	ÜÇBAĞLAR	SİVAS	42 B	.	-1	944	1531.64	62	15.22580645
6	ATIK SU	ATIK SU TİCARETHANE-1	TİCARETHANE	B.HÜSEYİNBEY	UYGUR	6	.	OTOPARK	2105	3412.46	176	11.96022727
7	TİCARETHANE	TİCARETHANE-1	TİCARİ İSYERİ	SANCAKTAR	SİVAS	33 A	HAŞMET ETİC		188	1523.98	16	11.75
8	ATIK SU	ATIK SU TİCARETHANE-1	TİCARETHANE	ÜÇBAĞLAR	SİVAS	95 A	PEKEL PET	1	719	1167.14	62	11.59677419
9	TİCARETHANE	TİCARETHANE-1	TİCARİ İSYERİ	B.HÜSEYİNBEY	ATATÜRK	55 A	ERGÜN APT		191	1548.28	34	5.617647059
10	TİCARETHANE	TİCARETHANE-1	TİCARİ İSYERİ	B.HÜSEYİNBEY	ATATÜRK	39 A	ALÜBEYOĞ	1	174	1410.58	34	5.117647059
11	BEDELSİZ	İBADETHANE-1	İBADETHANE ALANI	ÜÇBAĞLAR	YILDIZ	1	ELİT EVLEF	1	926	0	182	5.087912088
12	TİCARETHANE	TİCARETHANE-1	TİCARİ İSYERİ	B.HÜSEYİNBEY	ATATÜRK	25 B	SEZER İŞ	0	135	1094.68	33	4.090909091
13	KONUT MESKEN	MESKEN-1	MESKEN BİNALARİ	ÜÇBAĞLAR	ARI	6	KAPUSUZ	9	172	704.32	46	3.739130435
14	KONUT MESKEN	MESKEN-1	MESKEN BİNALARİ	KIRÇUVAL	ASLANTEPE	58	ÜMIT APT	3	67	274.53	18	3.722222222
15	TİCARETHANE	TİCARETHANE-1	TİCARİ İSYERİ	AKPINAR	ŞEHİT MEHMET ÖZBEK	13 A	GÜLŞEN	0	106	859.78	29	3.655172414
16	KONUT MESKEN	MESKEN-1	MESKEN	B.HÜSEYİNBEY	TURKUVAZ	7	.	3	103	419.7	29	3.551724138
17	TİCARETHANE	TİCARETHANE-1	TİCARİ İSYERİ	AKPINAR	TURFANDA	1	ÖNCANA.BLOK		101	819.28	33	3.060606061
18	RESMİ DAİRE	BELEDİYE HİZMET TARİFESİ-1	BELEDİYE HİZMET ALANI	ÜÇBAĞLAR	MUHTAR	3	MUHTAR E	1	460	1243.18	172	2.674418605
19	RESMİ DAİRE	RESMİ DAİRE-1	OKUL BİNALARİ	K.HÜSEYİNBEY	ATATÜRK	71/2	TİCARET MESLEK LİSE		73	592.48	32	2.28125
20	KONUT MESKEN	MESKEN-1	MESKEN	AKPINAR	CEZMİ KARTAY	43	AKKUŞ AP	6	140	544.76	62	2.258064516

Şekil 4.4 Abone verilerinin bir bölümüne ait ekran görüntüsü

Bölgede farklı türlerde toplamda 2230 adet aboneye hizmet verilmektedir. Bu abonelerin sayaçlarından geçen suyun günlük ortalama değerleri hesaplandığında abone

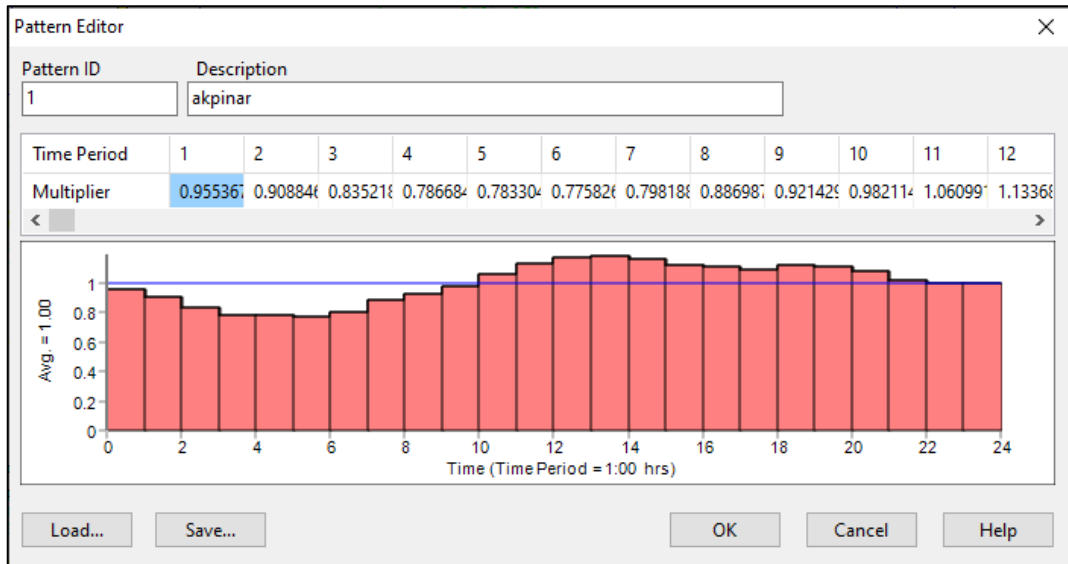
başına günlük 0,416 m3/gün tüketim gerçekleştiği görülmektedir. Günlük ortalama olarak gerçekleşen toplam tahakkuk miktarı ise 927,2575 m3/gün olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.2 Çalışma alanı abone bilgileri

ABONE TÜRÜ	ABONE SAYISI	GÜNLÜK ORTALAM TÜKETİM (M3/GÜN) TOPLAMI	ABONE BAŞI GÜNLÜK ORTALAMA (M3/GÜN)
KONUT MESKEN	1842	712,11	0,387
ATIK SU	5	63,14	12,628
İNŞAAT	1	0,19	0,188
RESMİ DAİRE	9	30,54	3,393
TİCARETHANE	373	121,28	0,325
TOPLAM	2230	927,2575	0,416

4.4.4.1. Tüketim deseninin belirlenmesi

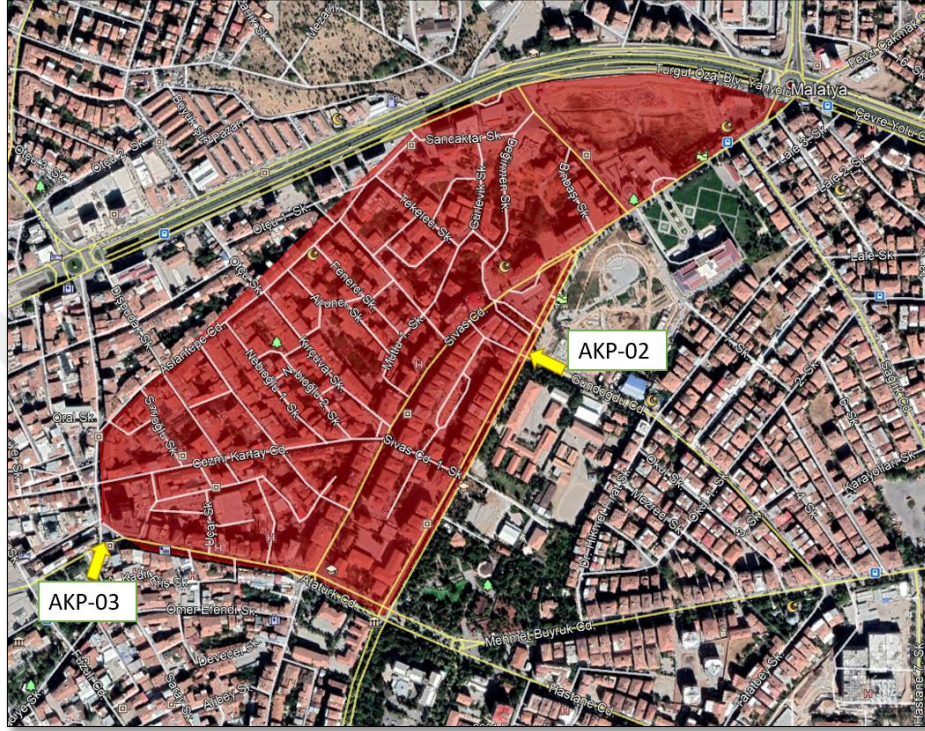
Çalışma bölgesine ait mevcut debi ölçümleri kullanılarak şebekeye özel tüketim desenleri elde edilmiştir ve şebekedeki tüketim elde edilen tüketim desenlerine göre modellenmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Debi izlemeleri sonucu elde edilen çalışma alanı tüketim deseni

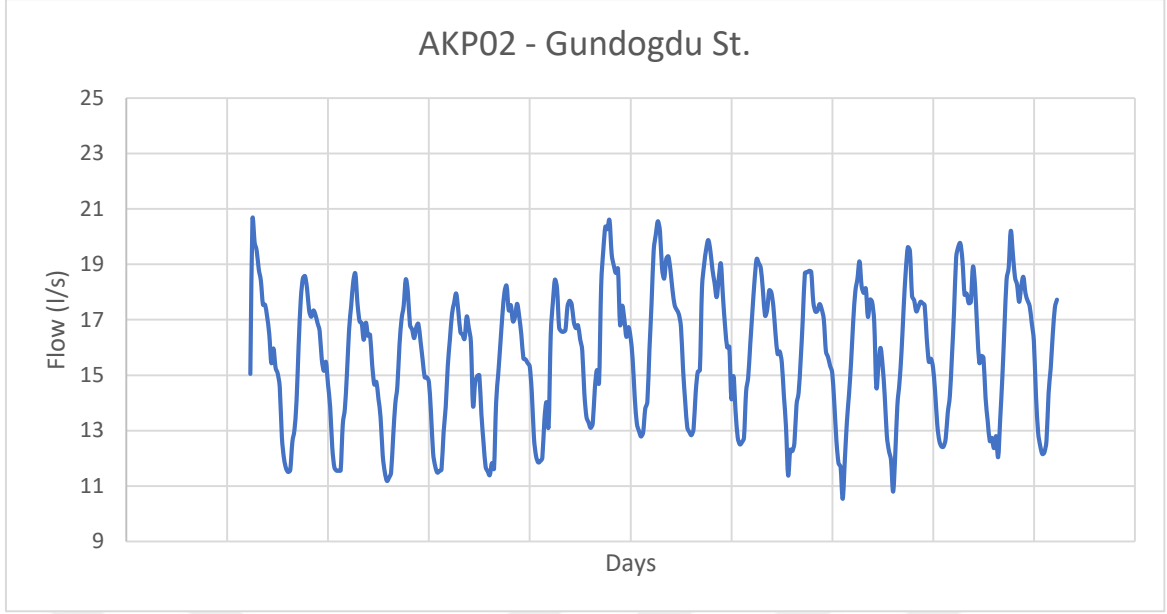
4.4.5. Saha ölçümleri

Sahada gerçekleşen hidrolik olaylara ait ölçümler (basınç, debi) doğrudan hidrolik model için elzem olmasa bile, modelin doğrulanması ve kalibrasyon için gereklidir. Çalışma bölgesindeki izole şebekeye iki noktadan debi girişi sağlanmaktadır. Her iki noktada da anlık olarak debi ve basınç ölçümleri alınarak izlenebilmektedir (Şekil 4.6).



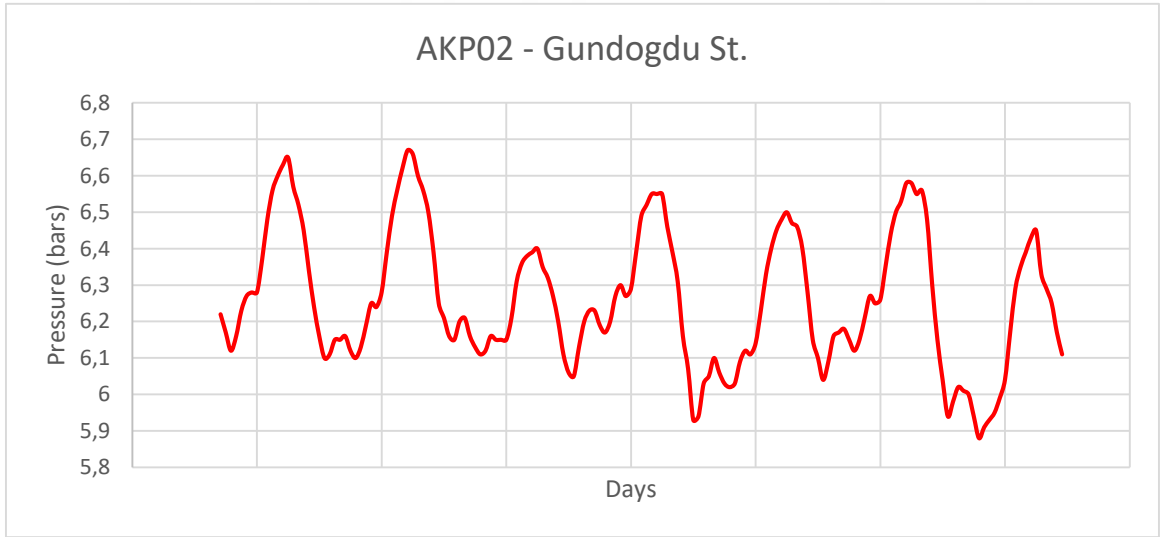
Şekil 4.6 Çalışma alanı ölçüm noktaları

AKP-02 ölçüm noktasından elde edilen debi ölçüm verileri (Şekil 4.7)'deki gibidir. Gün içinde tüketim dalgalanmalarına bağlı olarak söz konusu ölçüm noktasından çalışma alanına girişi debisi 11 l/s ile 21 l/s arasında dalgalanma göstermektedir.



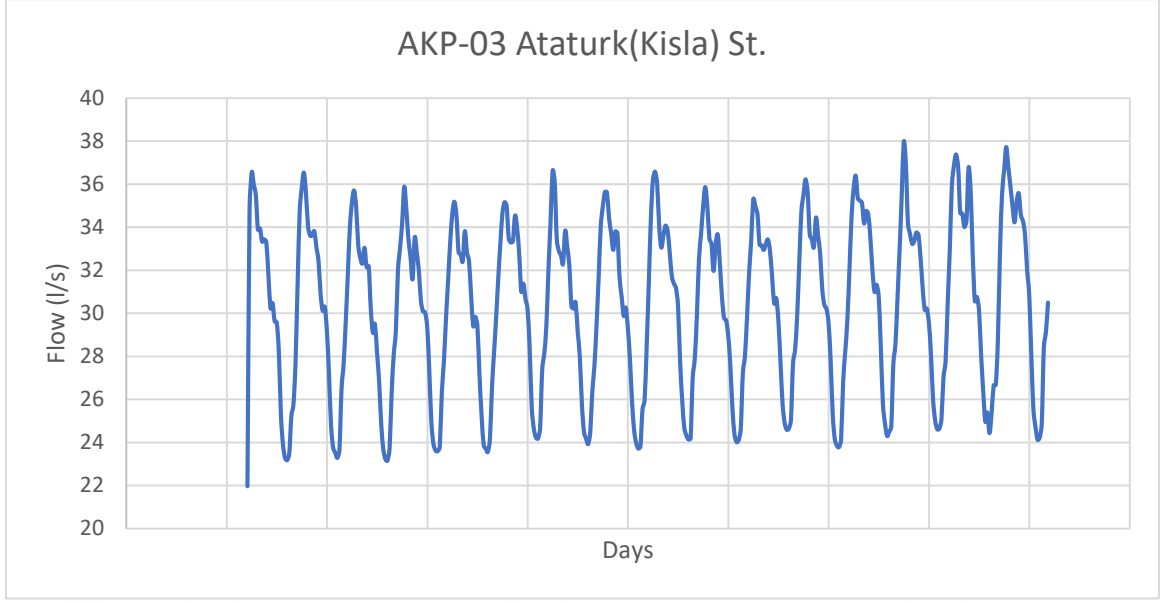
Şekil 4.7 AKP-02 ölçüm noktası debi ölçüm verileri

AKP-02 noktasında elde edilen basınç verileri incelendiğinde tüketim dalgalanmalarına bağlı olarak ölçüm noktasındaki basıncın ortalama olarak 5.9 bar ile 6.6 bar arasında değiştiği görülmüştür (Şekil 4.8).



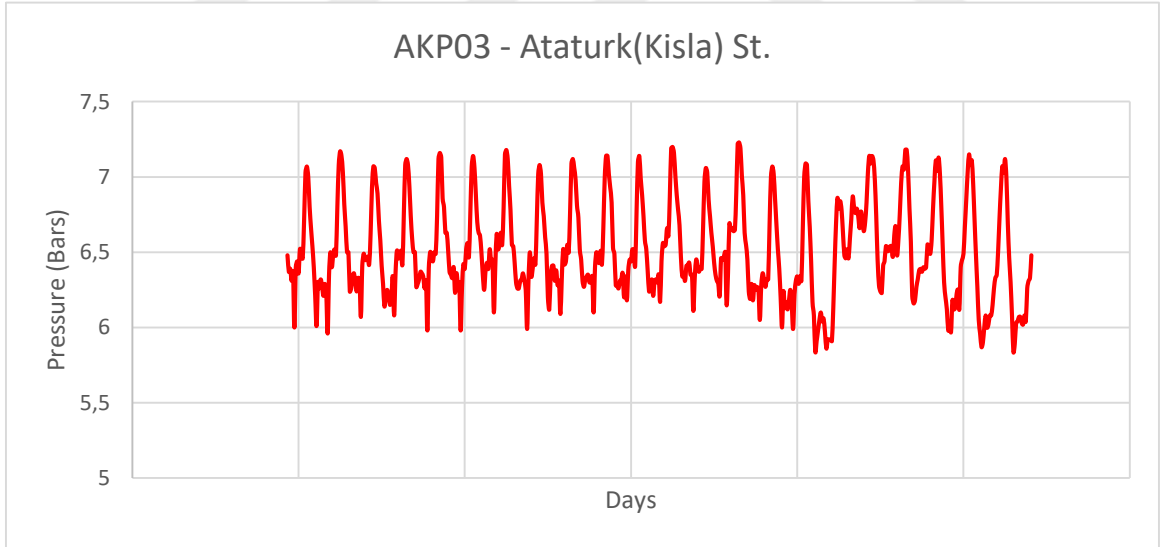
Şekil 4.8 AKP-02 ölçüm noktası basınç verileri

AKP-03 ölçüm noktasında ölçülen debi, tüketim dalgalanmalarına bağlı olarak 24 l/s ile 37 l/s arasında bir değişim göstermektedir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 AKP-03 ölçüm noktası debi ölçüm verileri

AKP-03 ölçüm noktasında ölçülen basınç değerleri ise ortalama olarak 6 bar ile 7.1 bar arasında bir değişim göstermektedir (Şekil 4.10).



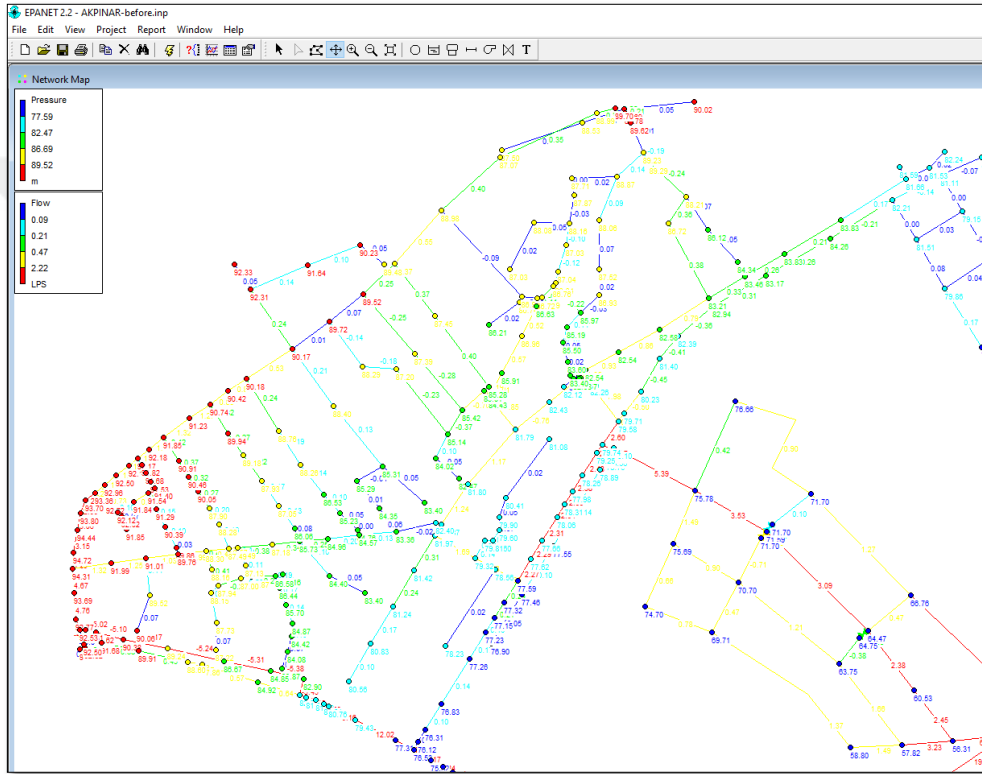
Şekil 4.10 AKP-03 ölçüm noktası basınç verileri

Debimetrelerden geçen anlık debilerin aylık debileri incelendiğinde bölgeye bir ayda iki debimetreden giren suyun toplamının 121,513 m³ olduğu hesaplanmıştır. Buna göre bölgeye giren debi l/s cinsinden denklem 4.1 ve 4.2’de gösterildiği gibi anlık olarak hesaplanacak olursa;

$$Q_{in} = (121513 \text{ m}^3/\text{ay} * 1000 \text{ l/m}^3)/(30 \text{ gün/ay} * 86400 \text{ s/gün}) \quad (4.1)$$

$$Q_{in} = 46.88 \text{ l/s} \quad (4.2)$$

Çalışma boyunca elde edilen veriler EPANET ortamında derlenmiş ve hidrolik simülasyonlar tamamlanmıştır (Şekil 4.11). Bundan sonraki aşama kalibrasyon aşamasıdır. Hesaplanan veriler ile ölçülen değerler karşılaştırılarak aradaki farkları asgari düzeye indirmek hedeflenmektedir.



Şekil 4.11 Akpınar DMA hidrolik modeli

4.4.6. Kalibrasyon aşaması

EPANET programında kalibrasyon, düğüm noktalarında sahada ölçülen basınç verisine karşılık, borularda ise sahada ölçülen debi (hız, akış) verisine karşılık yapılabilmektedir. Hidrolik modeli oluşturulan şebekenin kalibrasyonunu tamamlamak amacıyla, sahada mevcut olan ölçüm noktalarının hidrolik model üzerinde temsil edildiği şebeke elemanları seçilmiştir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3 Kalibrasyon için kullanılacak saha ve model noktaları

SAHA ÖLÇÜM NOKTASI	BASINÇ KALİBRASYONU (MODEL)	HIZ KALİBRASYONU (MODEL)
AKP-02	23 no'lu düğüm noktası	611 no'lu boru
AKP-03	250 no'lu düğüm noktası	751 no'lu boru

Ölçüm noktalarını modelde temsil eden 611 ve 751 no'lu borular ile 23 no'lu ve 250 no'lu düğüm noktaları EPANET programının kalibrasyon arayüzü kullanılarak söz konusu şebeke elemanlarına ait saha ölçüm verileri programa tanımlanmıştır (Şekil 4.12).

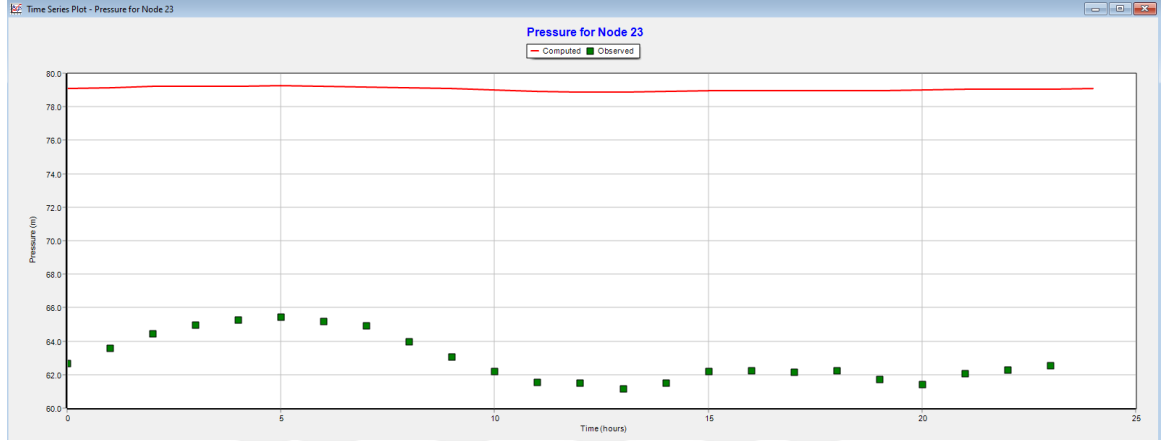


flow - Not Defteri					pressure - Not Defteri				
Dosya	Düzen	Bçim	Görünüm	Yardım	Dosya	Düzen	Bçim	Görünüm	Ye
;Location Time Value					;Location Time Value				
;-----					;-----				
611	0		20.13		23	0		62.67756	
	1		18.91			1		63.59529	
	2		17.64666667			2		64.47903	
	3		17.14			3		64.98888	
	4		17.05666667			4		65.29479	
	5		17.11			5		65.46474	
	6		17.96666667			6		65.19282	
	7		18.69			7		64.9209	
	8		20.41			8		64.00317	
	9		21.72666667			9		63.08544	
	10		23.09			10		62.2017	
	11		23.96			11		61.55589	
	12		24.19			12		61.5219	
	13		24.41666667			13		61.182	
	14		24			14		61.5219	
	15		22.91			15		62.2017	
	16		22.97333333			16		62.23569	
	17		22.93333333			17		62.16771	
	18		22.51			18		62.23569	
	19		22.99			19		61.72584	
	20		23.02333333			20		61.41993	
	21		22.13			21		62.06574	
	22		21.55333333			22		62.30367	
	23		21.03333333			23		62.5416	
751					250				
	0		26.32			0		67.67409	
	1		24			1		70.05339	
	2		22.11666667			2		71.82087	
	3		21.31333333			3		72.70461	
	4		21.14666667			4		73.0785	
	5		21.26			5		73.18047	
	6		22.54333333			6		72.29673	
	7		23.82666667			7		71.379	
	8		26.36			8		68.93172	
	9		28.16666667			9		67.19823	
	10		29.85666667			10		65.2608	
	11		31.46333333			11		63.49332	
	12		31.86333333			12		62.98347	
	13		32.28666667			13		62.30367	
	14		31.63			14		62.84751	
	15		30.15333333			15		64.34307	
	16		29.81333333			16		64.78494	
	17		29.79666667			17		64.581	
	18		29.17666667			18		65.22681	
	19		30.45666667			19		63.9012	
	20		30.54666667			20		63.69726	
	21		29.32333333			21		65.2608	
	22		28.33666667			22		66.14454	
	23		27.64			23		66.82434	

Şekil 4.12 EPANET üzerinden kalibrasyona esas verilerin girilmesi

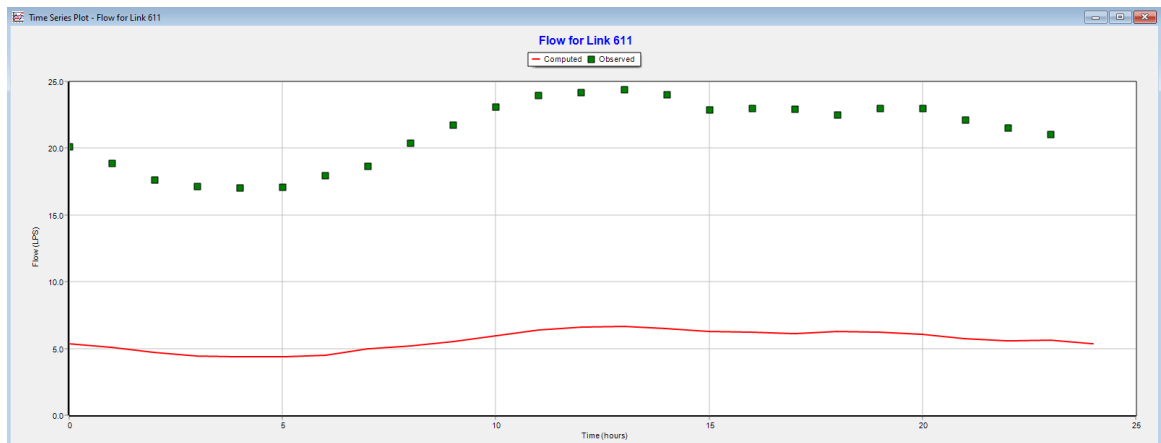
Ölçüm noktaları için basınç ve debi verileri EPANET kalibrasyon özelliği kullanılarak karşılaştırılmıştır. Grafiklerde görülen kırmızı çizgi model sonuçlarını, yeşil noktalar ise saha ölçümlerini göstermektedir. Saha ölçümleri saat başı alınan verilerden olduğundan dolayı grafiğe yansması da noktalar şeklinde olmuştur.

23 no'lu düğüm noktası için (Şekil 4.13) saha model karşılaştırması grafiğine bakılacak olursa hesaplanan basınç verisinin sahada ölçülen basınç verisinden yüksek olduğu ayrıca zamana bağlı değişim eğilimlerinin de örtüşmediği görülmektedir. Bu açıdan tasarlanan hidrolik modelin bu aşamada saha sonuçlarını yansıtmaktan uzak kaldığı söylenebilir.



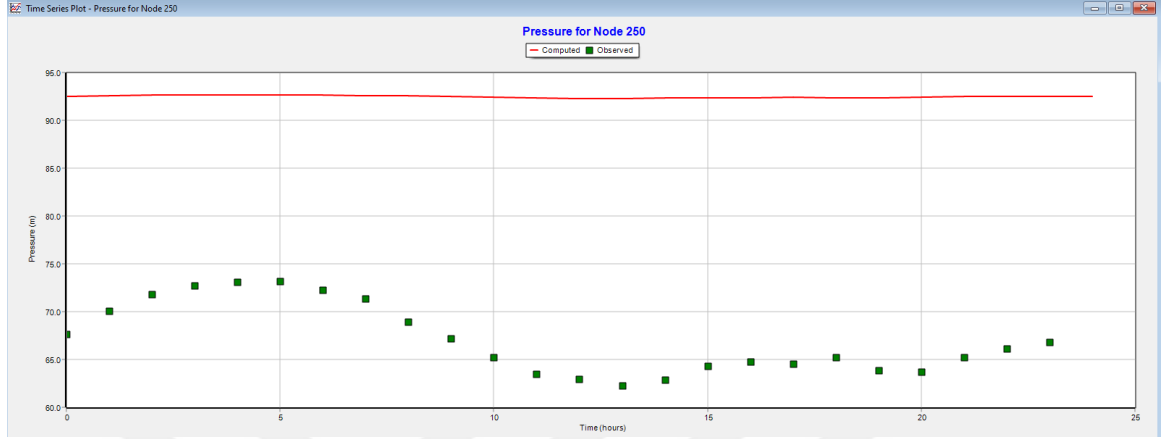
Şekil 4.13 23 no'lu düğüm noktası basınç verisi için saha-model karşılaştırması

Oluşturulan hidrolik modelde 611 no'lu boru için saha ve model karşılaştırması grafiği incelendiğinde ise hesaplanan debi değerlerinin sahada ölçülen debilerden aşağıda kaldığı görülmektedir (Şekil 4.14).



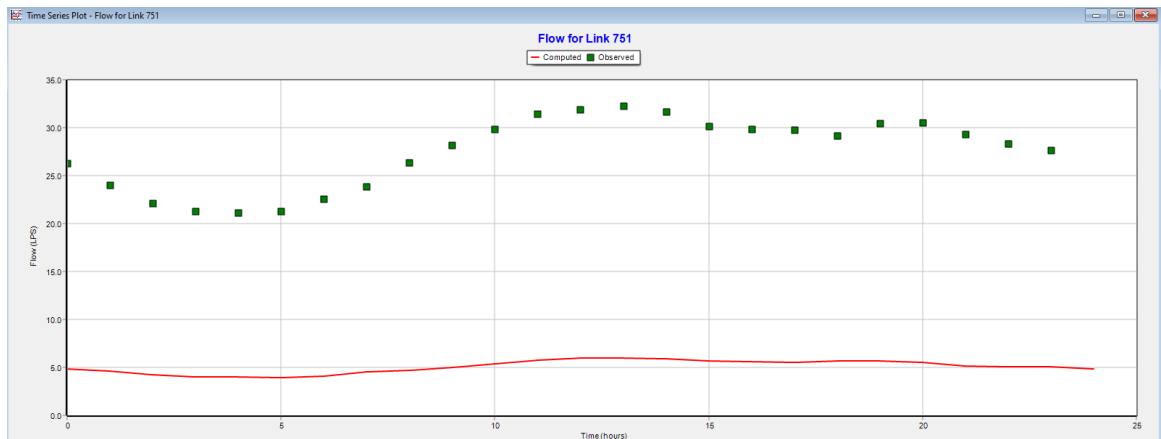
Şekil 4.14 611 no'lu boruya ait debi verisi için saha-model karşılaştırması

250 no'lu düğüm noktası için saha ve model verilenin karşılaştırıldığı grafik incelendiğinde, 23 no'lu düğüm noktasına benzer şekilde hesaplanan basınç değerlerinin ölçülen basınçlardan yüksek olduğu ve eğilimlerinin örtüşmediği görülmektedir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 250 no'lu düğüm noktası basınç verisi için saha-model karşılaştırması

Hidrolik modeldeki 751 numaralı boru için hesaplanan debi değerleri diğer ölçüm noktasındaki benzer şekilde ölçülen debi değerlerinin altında kalmıştır (Şekil 4.16).



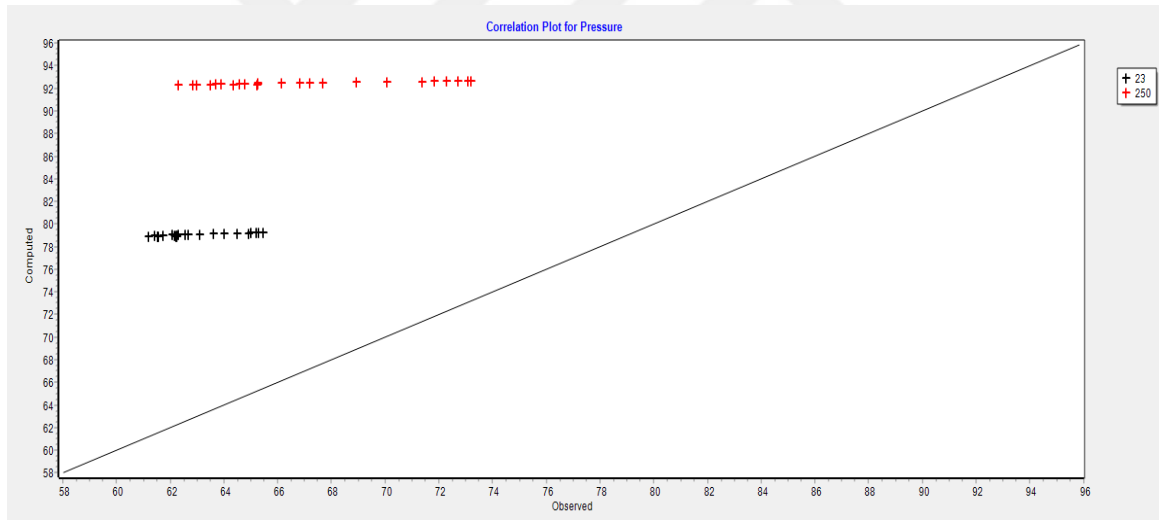
Şekil 4.16 751 no'lu boruya ait debi verisi için saha-model karşılaştırması

Akpınar DMA bölgesi hidrolik modeline ait basınç parametresi için kalibrasyon istatistikleri aşağıda gösterildiği gibidir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4 Akpınar DMA basınç için kalibrasyon istatistikleri

Lokasyon	Ölçüm Sayısı	Ölçümler Ortalaması	Hesap Ortalaması	Ortalama Hata	Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE)
23 No'lu düğüm	24	62.94	79.06	16.114	16.165
250 no'lu düğüm	24	67.08	92.48	25.395	25.628
Şebeke	48	65.01	85.77	20.755	21.425

Basınç verisine ait korelasyon grafiği incelendiğinde yukarıdaki grafik ve tablolarda da görülen benzer durum görülmekte ve saha ile model verileri arasında her iki ölçüm noktası için kuvvetli bir korelasyon olmadığı tespit edilmektedir (Şekil 4.17).



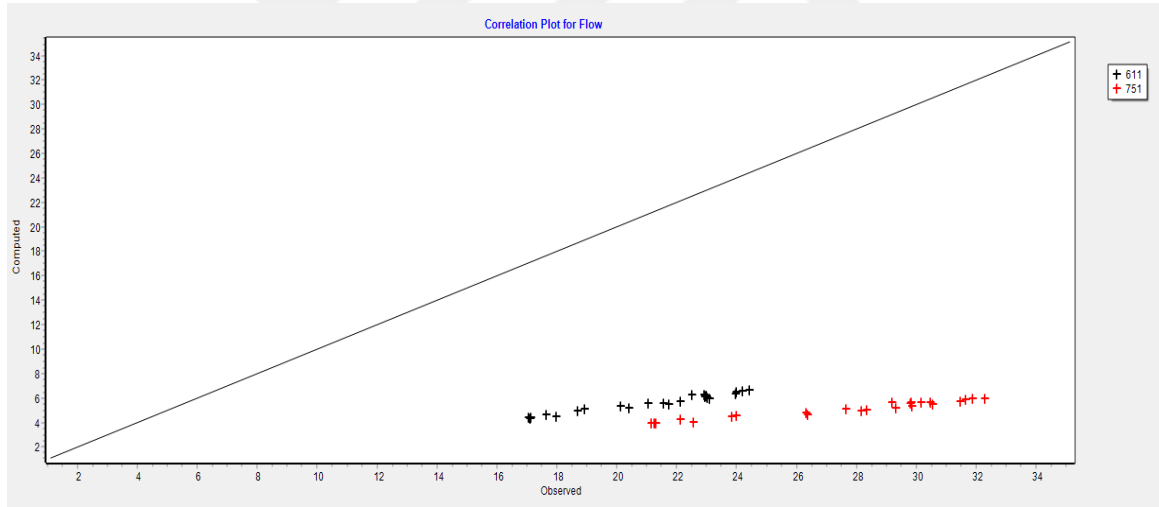
Şekil 4.17 Akpınar DMA hidrolik modeli basınç için korelasyon grafiği

Akpınar DMA bölgesi hidrolik modeline ait debi parametresi için kalibrasyon istatistikleri tablosu aşağıda gösterildiği şekilde oluşmuştur (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5 Akpınar DMA debi için kalibrasyon istatistikleri

Lokasyon	Ölçüm Sayısı	Ölçümler Ortalaması	Hesap Ortalaması	Ortalama Hata	Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE)
611	24	21.19	5.62	15.571	15.666
751	24	27.47	5.08	22.391	22.593
Şebeke	48	24.33	5.35	18.981	19.440

Akpınar DMA bölgesi için oluşturulan hidrolik modele ait debi verileri ile saha ölçümleri korelasyon grafiği üzerinden incelendiği zaman, basınç parametresinde olduğu gibi net bir korelasyon görülmemektedir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18 Akpınar DMA hidrolik modeli debi için korelasyon grafiği

Akpınar DMA bölgesi için oluşturulmuş olan hidrolik model sonuçları saha ölçümleri ile istatistiksel yöntemler kullanılarak karşılaştırıldığında oluşturulan hidrolik modelin saha koşullarını temsil etmediği ortaya çıkmıştır. Bu farkların oluşmasına sebep olabilecek şebeke hakkındaki yanlış veya eksik bilgilerin düzeltilmesi gerekmektedir. Boru pürüzlülük katsayıları, şebeke geometrisi, tüketim dağılımı, sızıntılar gibi konulardaki eksik veya yanlış bilgiler giderilmeye çalışılacaktır.

4.4.6.1. Sızıntı analizi ve tüketim dağılımı kalibrasyonu

Çalışma bölgesinde şebekeye giren debi ve abone sayaçlarından geçen debiler karşılaştırılmıştır. Tahakkuk verilerine göre anlık ortalama debi l/s cinsinden hesaplanacak olursa;

$$Q_{\text{consumer}} = (927.2575 \text{ m}^3/\text{day} * 1000 \text{ l/m}^3)/86400 \text{ s/day}$$

$$Q_{\text{consumer}} = 10.73 \text{ l/s}$$

$$Q_{\text{in}} = Q_{\text{consumer}} + Q_{\text{leakage}}$$

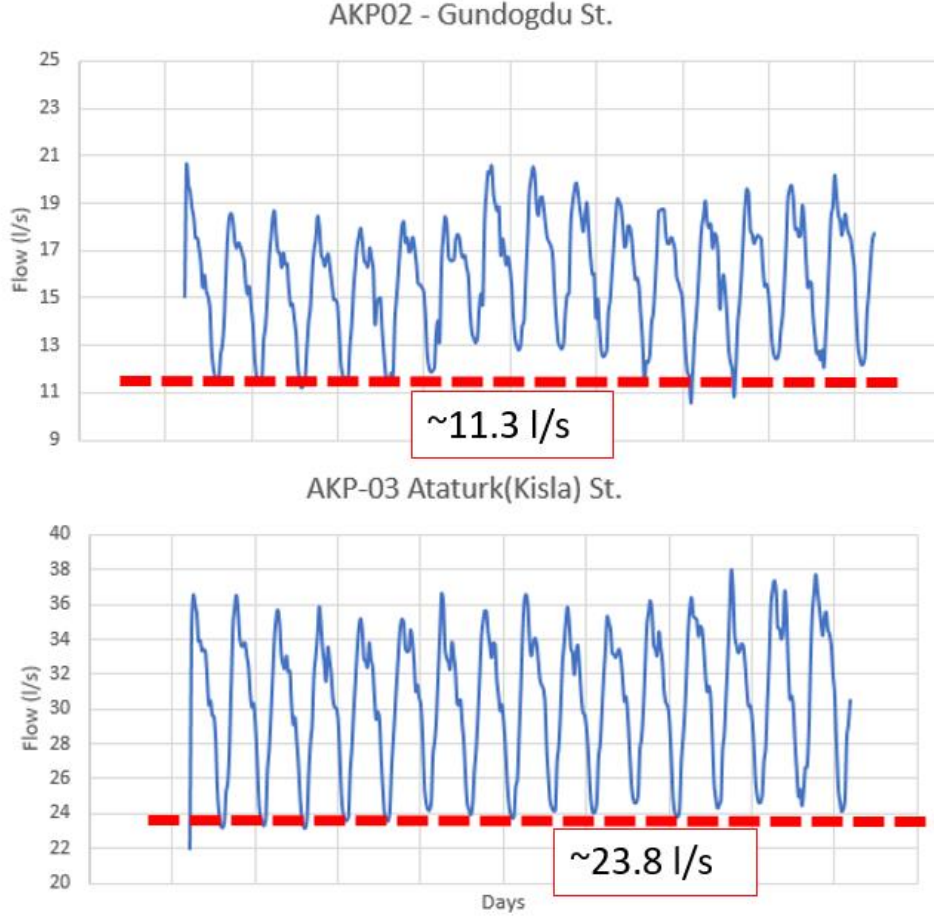
$$Q_{\text{leakage}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{consumer}}$$

$$Q_{\text{leakage}} = 46.88 \text{ l/s} - 10.73 \text{ l/s} = 36.15 \text{ l/s}$$

çalışma bölgesinde 36.15 l/s kadar kayıp-kaçak debisi olduğu kabaca söylenebilir. Bu da yaklaşık olarak %77 oranında bir kayıp kaçak oranına denk gelmektedir.

Minimum gece debisi (MNF) analizi

Sızıntı debisini tahmin etmek amacıyla literatürde yaygın kullanılan metotlardan biri olan minimum gece debisi analizi çalışma bölgesinde izlenen debi ölçümlerine uygulanmıştır (Şekil 4.19).



Şekil 4.19 Akpınar DMA bölgesi için MNF analizi

AKP 02 debimetresinden geçen anlık debilerin günlük minimum değerlerinin ortalamalarının 11,3 l/s ve AKP 03 debimetresinden geçen anlık debilerin günlük minimum değerlerinin ortalamalarının ise 23,8 l/s olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda her iki debimetreden geçen minimum debilerin ortalamalarının toplam değerleri 35,1 l/s olarak hesaplanmıştır. Boztaş vd., (2019) çalışmalarında gösterildiği şekilde minimum gece debisi analizleri tamamlanmıştır. Bu analize göre bölgede yaklaşık olarak %75 oranında kayıp-kaçak olduğu görülmektedir. Her iki analizde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

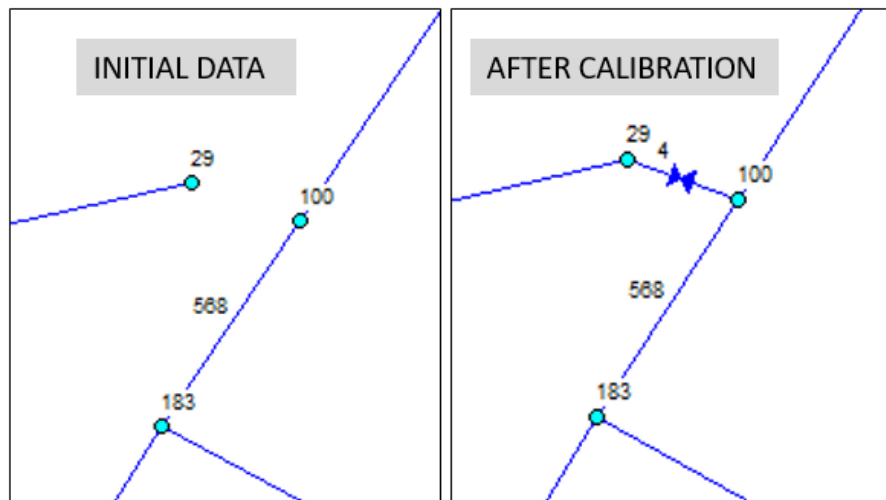
Kalibrasyon sürecinin bu aşamasında hesaplanan sızıntı debisi, hidrolik modelde düğüm noktalarına ihtiyaç debileri ve boru uzunlukları göz önünde bulundurularak dağıtılmıştır. Sızıntı debisi konusunda gerekli görülmesi durumunda daha çok bilgiye sahip olunabilmesi açısından bölgedeki boru yaşları, arıza istatistikleri gibi veriler incelenerek saha çalışmaları yapılabilir.

4.4.6.2. Boru karakteristik özellikleri kalibrasyonu

Çalışma bölgesi şebekesi yoğunluklu olarak PVC ve ACP borulardan oluşmaktadır. Hazen-Williams katsayısı olarak başlangıçta PVC borular için 150 ve ACP borular için 130 seçilmiştir. Bölgedeki şebeke çok eski borulardan oluştuğu için, kalibrasyon aşamasında yapılan bir dizi hidrolik analiz yapılmış ve sonuçlardaki iyileşmeler takip edilmiş olup nihai olarak PVC borular için 130 ve ACP borular için ise 110 değerinin kullanılması uygun görülmüştür.

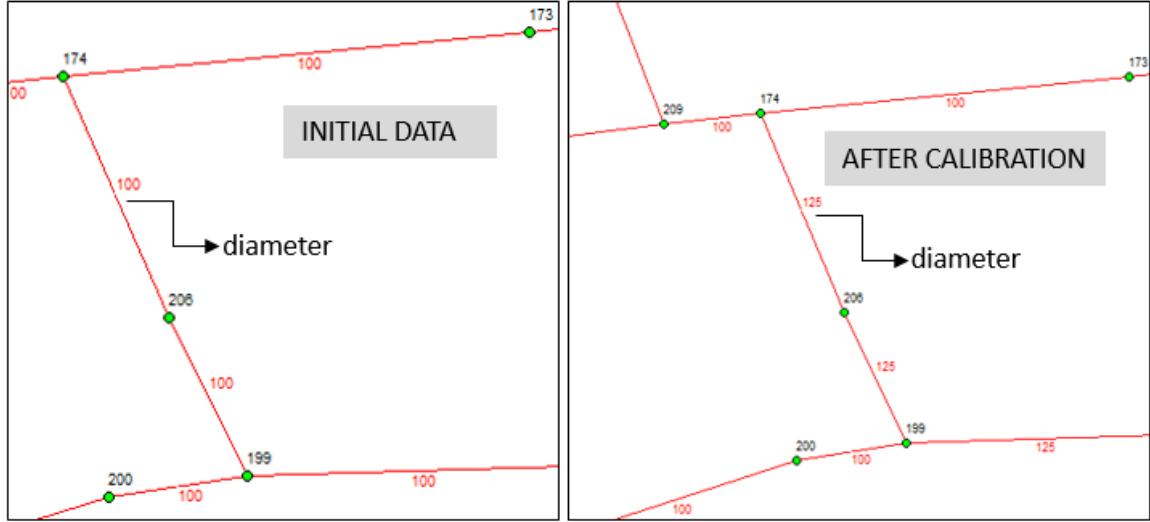
4.4.6.3. Şebeke geometrisi kalibrasyonu

Çalışma bölgesindeki şebeke, daha önce bahsedildiği üzere eski bir şebekedir ve zaman içinde eklemeler yapılmış olan parçalı bir yapıdadır. Zamanında yapılan işlemlerin verileri kayıtlı olmadığı için geometrik veri sahada çalışan tecrübeli ustaların ifadeleri doğrultusunda şekillenmiştir. Kalibrasyon aşamasında, yapılan incelemeler ve bölgede çalışan eski ustaların ifadeleri doğrultusunda şebeke geometrisinde bir takım eksik bilgilerin tamamlanması sağlanmıştır. Örneklendirilecek olursa; 29 no'lu düğüm noktasında bulunan PVC boru daha önceleri kör tapa ile kapalı haldeyken suyun ring yapmasını sağlamak amacıyla belirli bir zaman diliminde 100 no'lu düğüm noktası ile bağlanarak araya vana atıldığı fakat bunun işletme planlarına veya kuruma ait CBS sistemine işlenmediği tespit edilmiştir (Şekil 4.20).



Şekil 4.20 Akpınar DMA kalibrasyon aşamasında tespit edilen vana

Yine benzer şekilde, Turfanda sokakta çapı 100 mm olarak bilinen PVC borunun, belirli bir zaman diliminde 125 mm PVC boru ile değiştirildiği yine kalibrasyon aşamasında tespit edilmiştir (Şekil 4.21).

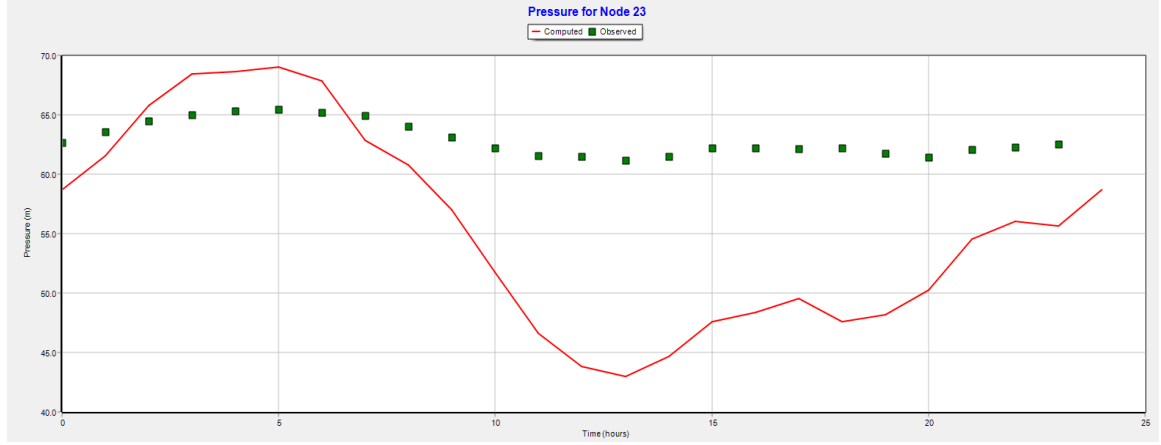


Şekil 4.21 Akpınar DMA kalibrasyon aşamasında düzeltilen boru çapı bilgisi

4.4.6.4. Kalibrasyon sonrası saha-model karşılaştırması

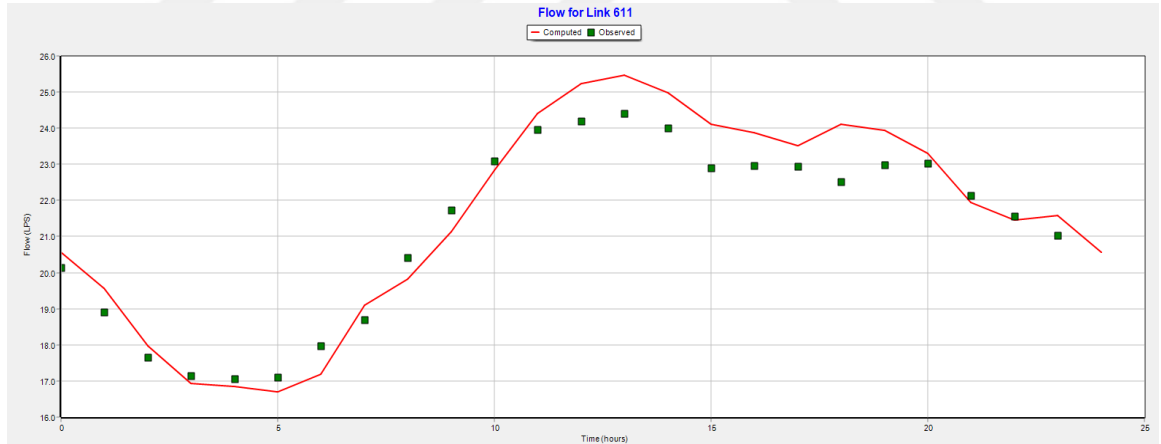
Akpınar DMA bölgesi hidrolik modeli için pürüzlülük katsayıları, sızıntı debisi, tüketim debisi, şebeke geometrisi gibi konularda bilgi eksikliklerinin bir kısmı tamamlanmış ve yeniden hidrolik simülasyonlar yapılmıştır. Modelden elde edilen sonuçlar ile sahada gelen veriler kalibrasyon aşamasından önce olduğu gibi sonrasında da EPANET yazılımı üzerinden kalibrasyon testine tabi tutulmuştur. Ölçüm noktalarından elde edilmiş olan veriler ile kalibre edilmiş hidrolik modelden elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

23 no'lu düğüm noktası için oluşturulan grafikte saha ölçümlerini temsil eden yeşil noktalar ile hidrolik modelde hesaplanmış olan değerleri temsil eden kırmızı çizginin kalibrasyon öncesi duruma göre birbirlerine yaklaştıkları görülmektedir (Şekil 4.22). 24 saatlik saha ve model verilerinin eğilimleri birbirleri ile tam örtüşmese de kalibrasyon öncesi duruma göre eğilimlerin birbirleri ile benzeşmeye başladığı net şekilde görülmektedir.



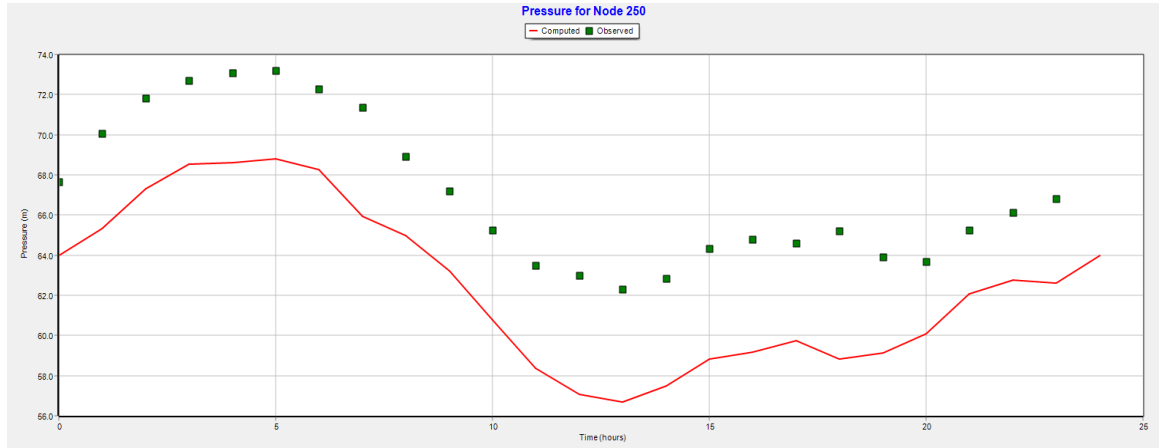
Şekil 4.22 Kalibrasyon sonrası 23 no’lu düğüm noktası basınç verisi için saha-model karşılaştırması

611 no’lu boru için saha ölçümleri ile kalibre edilmiş hidrolik modelden elde edilen veriler karşılaştırıldığında eğilimleri arasında gözle görülür bir uyum olduğu ve saha ölçümü ile model sonuçları arasındaki farkların büyük ölçüde kapandığı görülmektedir (Şekil 4.23).



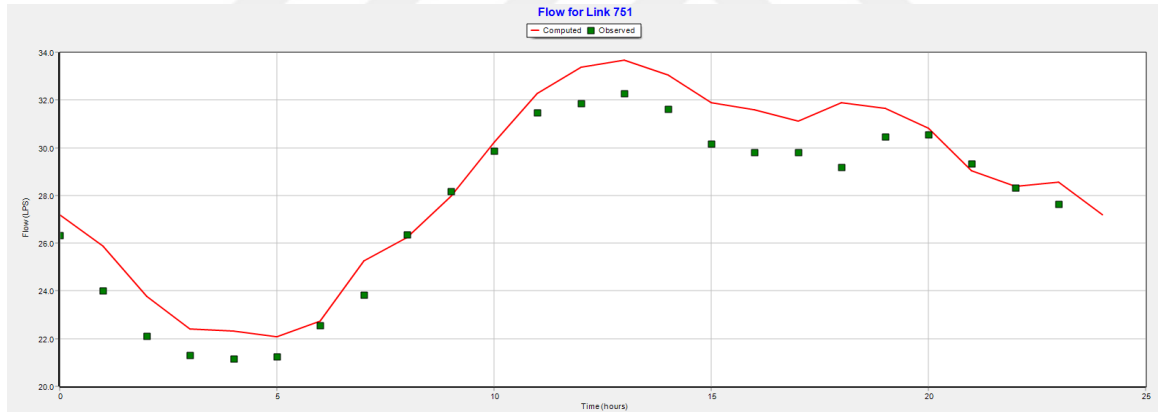
Şekil 4.23 Kalibrasyon sonrası 611 no’lu boru debi verisi için saha-model karşılaştırması

Sahadaki ölçüm noktalarının model üzerinde temsil edildiği bir diğer düğüm noktası olan 250 no’lu düğüm noktası için kalibrasyon çalışmalarından sonra saha ölçümleri ile model sonuçları arasındaki farkların azaldığı fakat tam olarak kapanmadığı görülmektedir (Şekil 4.24). Bununla beraber iki veri setinin eğilimleri ile birbirleri ile örtüşmektedir.



Şekil 4.24 Kalibrasyon sonrası 250 no’lu düğüm noktası basınç verisi için saha-model karşılaştırması

Kalibrasyon sonrası 751 no’lu boru için debi verileri incelendiğinde diğer debi ölçüm noktasında olduğu gibi saha ile model arasındaki farkların kapandığı ve veri setlerinin birbirleri ile uyumlu oldukları görülmektedir (Şekil 4.25).



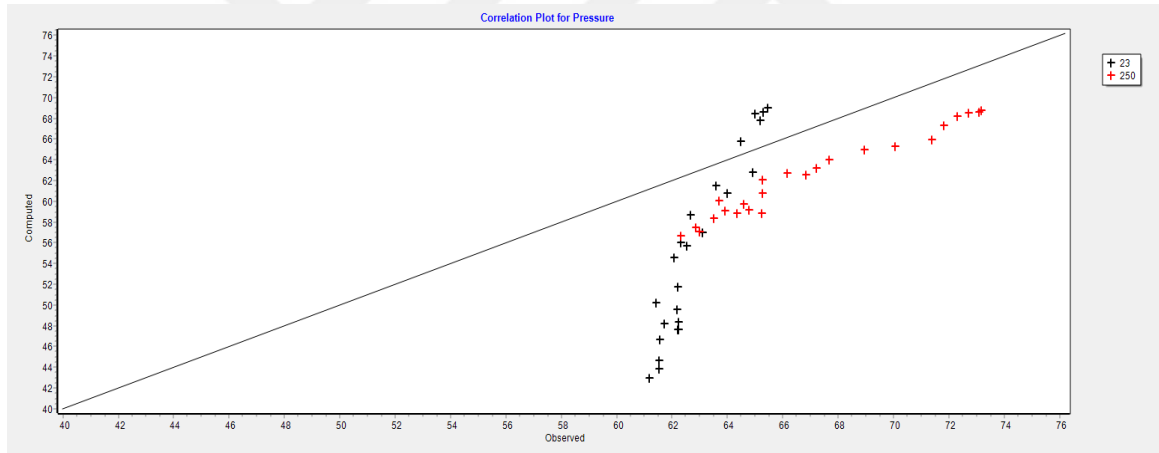
Şekil 4.25 Kalibrasyon sonrası 751 no’lu boru debi verisi için saha-model karşılaştırması

Akpınar DMA bölgesi için kalibrasyon aşaması sonrası basınç verisi için yapılan kalibrasyon testlerine ait istatistiki bilgiler tablodaki gibidir (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6 Akpınar DMA kalibrasyon sonrası basınç kalibrasyon istatistikleri

Lokasyon	Ölçüm Sayısı	Ölçümler Ortalaması	Hesap Ortalaması	Ortalama Hata	Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE)
23 no'lu düğüm noktası	24	62.94	55.35	8.785	10.415
250 no'lu düğüm noktası	24	67.08	62.44	4.641	4.713
Şebeke	48	65.01	58.90	6.713	8.083

Basınç verisi için kalibrasyon sonrası korelasyon grafiği incelendiğinde, saha ile model arasında yüksek dereceli bir doğrusal ilişki tam olarak kurulamamış olsa da iki veri setinin kalibrasyon öncesi duruma göre birbirleri ile çok daha uyumlu hale geldiği görülmektedir. (Şekil 4.26).



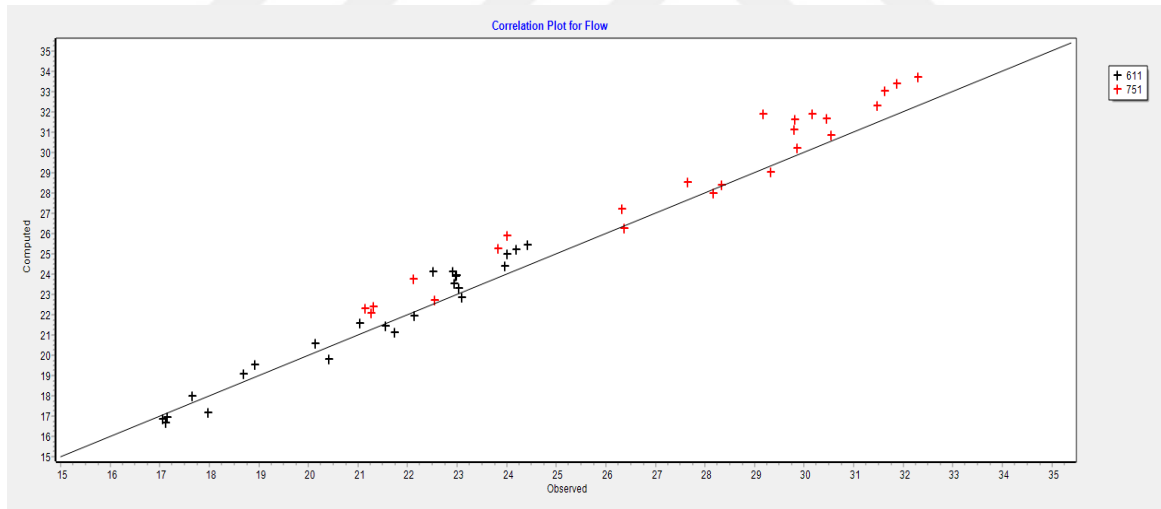
Şekil 4.26 Kalibrasyon aşaması sonrası basınç için korelasyon grafiği

Kalibrasyon aşaması sonrası debi verisi için saha ile model sonuçlarının karşılaştırıldığı kalibrasyon istatistikleri tablodaki gibidir (Çizelge 4.7).

Çizelge 4.7 Akpınar DMA kalibrasyon aşaması sonrası debi kalibrasyon istatistikleri

Lokasyon	Ölçüm Sayısı	Ölçümler Ortalaması	Hesap Ortalaması	Ortalama Hata	Kök Ortalama Kare Hatası (RMSE)
611 no'lu boru	24	21.19	21.52	0.612	0.716
751 no'lu boru	24	27.47	28.48	1.053	1.248
Şebeke	48	24.33	25.00	0.833	1.017

Kalibrasyon sonrası debi parametresi için istatistiklerde de görüleceği üzere saha ile model sonuçları arasında yüksek dereceli bir uyum yakalanmış olup ikisi arasındaki farklar çok küçük miktarlara kadar azaltılabilmektedir. Kalibrasyon sonrası debi için oluşturulan korelasyon grafiği de iki veri seti arasında yüksek dereceli bir doğrusal ilişkinin olduğunu teyit etmektedir (Şekil 4.27).



Şekil 4.27 Kalibrasyon aşaması sonrası debi için korelasyon grafiği

4.5. Sonuçlar

Akpınar DMA bölgesi için hidrolik model tamamlandıktan sonra, sahadan gelen veriler doğrultusunda ilk aşama kalibrasyon değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda, şebeke boruları için pürüzlülük katsayısı güncellenmiştir. şebeke geometrisinde tespit edilen yanlışlıklar düzeltilmiştir. Ayrıca sızıntı debisi hesaplanmıştır, düğüm noktalarındaki tüketimler göz önünde bulundurularak ve boru uzunlukları ile orantılı olarak hesaplanan sızıntı debisi dağıtılmıştır. Her ne kadar sızıntının bu şekilde dağıtılması tam anlamıyla gerçekçi bir yaklaşım olmasa da nihai hidrolik model ve kalibrasyon sonuçlarına bakıldığında, değerlerde iyileşme kayda değerdir. Bu aşamadan sonra, daha gerçekçi ve saha ölçümleri ile daha çok örtüşen bir kalibrasyon modeli oluşturmak için sızıntı dağılımının daha ileri araştırmalar ile gerçekçi bir şekilde yapılması ve bölgenin sızıntı modelinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu da aslında, hidrolik modelleme ve kalibrasyon aşamalarını takip ederek su şebekesinde sızıntılarını tespit etmeye yarayacaktır. Bu durum, su şebekelerinde sızıntı tespitinin her geçen gün önem kazandığı bir ortamda, su yönetimi ile uğraşan idareler, şirketler ve çalışanları için daha az saha çalışması ile sızıntıları tespit edebilme anlamına gelmektedir. Ayrıca bir kere hidrolik model oluşturulup kalibrasyonu sağlandıktan sonra bu model dinamik tutulduğu sürece sahada oluşabilecek yeni sızıntıları da kısa sürede tespit edip müdahale edebilme imkanı tanıyacaktır.

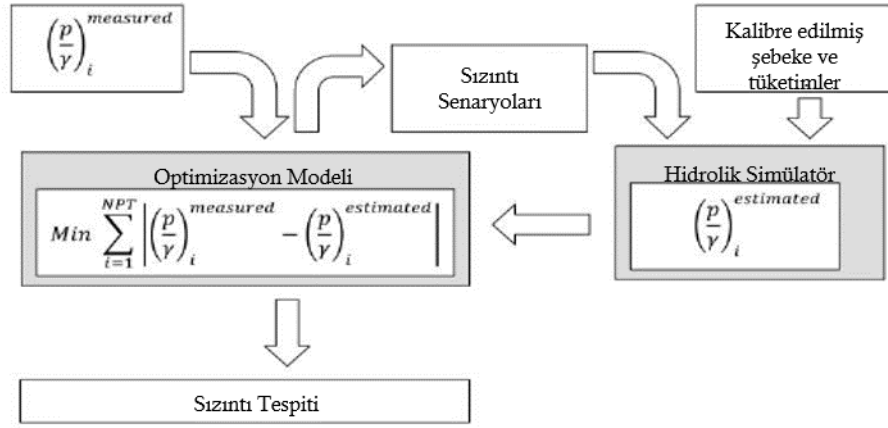
5. SIZINTI TAHMİN MODELİ VE GENETİK ALGORİTMALAR YÖNTEMİ İLE SIZINTI TESPİTİ

5.1. Giriş

Su dağıtım şebekelerinde (SDŞ) rapor edilmeyen su kayıpları, günümüz modern şehirlerindeki ilgili idare ve şirketlerin su yönetimi uygulamalarında mevcut kaynakların (para, zaman, işçilik, vb.) en yoğun şekilde harcandığı problemlerin başında gelmektedir. Uygulamada, sızıntı tespit süreci haftalar, aylar gibi uzun süreler alabildiğinden sızıntı tespit edilene kadar büyük hacimlerde su kayıplarına sebep olabilmektedirler (Perez vd., 2011). Sızıntı tespit edilene kadar geçen sürede idareler ve işletmeler ciddi personel maliyetlerini göze almakta olup, ayrıca bu süre içerisinde kaybolan su miktarı işletme maliyetlerini yükseltmektedir.

SDŞ'lerde rapor edilmeyen sızıntıların tespiti probleminin çözümüne katkı sunmak amacıyla hidrolik yöntemler ile optimizasyon yöntemlerini bir arada kullanarak yapılmış birçok çalışma literatürde mevcuttur (Darsana vd., 2018; Gupta vd., 2018; Savic vd., 2018; Hu vd.,2021). Sızıntı tespiti amacıyla, hidrolik model ile optimizasyon yöntemleri kullanılırken, Genetik Algoritmalar (GA), Yapay Sinir Ağları (ANN) gibi farklı mühendislik alanlarında da sıklıkla kullanılan algoritmalar kullanıldığı gibi (Meseguer vd., 2015) literatürde mevcut algoritmaları melezleyerek veya yeni yaklaşımlar geliştirerek çalışılmış olan birçok yöntem de mevcuttur (Huang vd., 2015; Fallahi vd.,2021).

Sousa vd. (2015) çalışmalarında hipotetik sızıntı senaryolarını simüle ederek sızıntı tespit problemine çözüm aramışlardır. Sahada ölçülen basınç değerleri, daha önceden hazırlanmış olan kalibre edilmiş bir hidrolik modelin basınç değerleri ile karşılaştırılarak algoritma tarafından bir sızıntı senaryosu oluşturduktan sonra önerilen senaryonun hidrolik analiz sonuçlardaki iyileşmeye göre yeni senaryoların belirlenerek algoritma tarafından sürecin yürütülmesine dayalı olan metot (Şekil 5.1) SDŞ'lerde sızıntılı boruları tespit etmek için başarılı sonuçlar vermiştir.



Şekil 5.1 Sızıntı tespiti ve yönetimi için Sousa vd. (2015) tarafından önerilen yaklaşım

Sahada ölçülen basınç değerleri ile hidrolik model üzerinden hesaplanmış olan basınç değerleri arasındaki farkları kullanarak önerilmiş olan metodolojiler yaygın ve başarılı sonuçlar veren uygulamalardır (Ferrandez-Gamot vd., 2015; Abdulshaheed vd., 2017; Mohammed vd., 2021; Steffelbauer vd., 2022). Bu çalışmada su şebekelerinde rapor edilmeyen sızıntıların tespiti amacıyla hidrolik model üzerinde hesaplanan ve sahada ölçülen basınç değerleri arasındaki farkları kullanan bir optimizasyon algoritması ile sızıntı tespit problemine çözüm önerilmiştir.

5.1.1. Teori

SDŞ'ler, hidrolik prensiplere dayanarak tasarlanır ve kütlenin korunumu, enerjinin korunumu gibi hidrolik sistemlere ait bütün özellikleri taşırlar. Bir SDŞ'de sistemin sürdürülebilmesi için gerekli olan enerjinin ilk kaynağı, su deposunda servise hazır olan suya ait potansiyel enerjidir. Bunlar dışında nadiren de olsa şebeke üzerinde muhtelif noktalarda sisteme enerji girişi sağlayan hidrofor, pompa gibi elemanlar da olabilir.

SDŞ'ler projelendirilirken, öncelikle tüketim modeli oluşturulur ve öngörülen tüketimlere göre şebeke geometrisi tasarlanır. Boru cinsleri ve boyutlandırmaları tamamlandıktan sonra, nihai tasarımda yapılan hidrolik analizde öngörülen tüketim noktalarına suyun iletimi sağlanırken, şebeke üzerinde hangi noktada ne kadar basınç beklendiği hesaplanır. Beklenen basınç, sistemin giriş enerjisi ile sistemde oluşan enerji kayıplarının ve o noktaya ait bağıl yüksekliğin farkıdır. Şebeke üzerinde öngörülmemiş sızıntılar oluşması durumunda sistem bu sızıntı noktasına da su temin edeceğinden dolayı sistem daha fazla enerji tüketecek ve şebeke üzerinde bütün noktalarda farklı oranlarda da olsa basınç düşüşleri gerçekleşecektir. Söz konusu basınç düşüşlerinin farklı noktalardaki

büyüklüğü sızıntı miktarı ve sızıntının şebeke üzerinde olduğu noktaya uzaklığına göre değişen miktarlarda olup doğrusal olmayan bir dağılım göstermektedir.

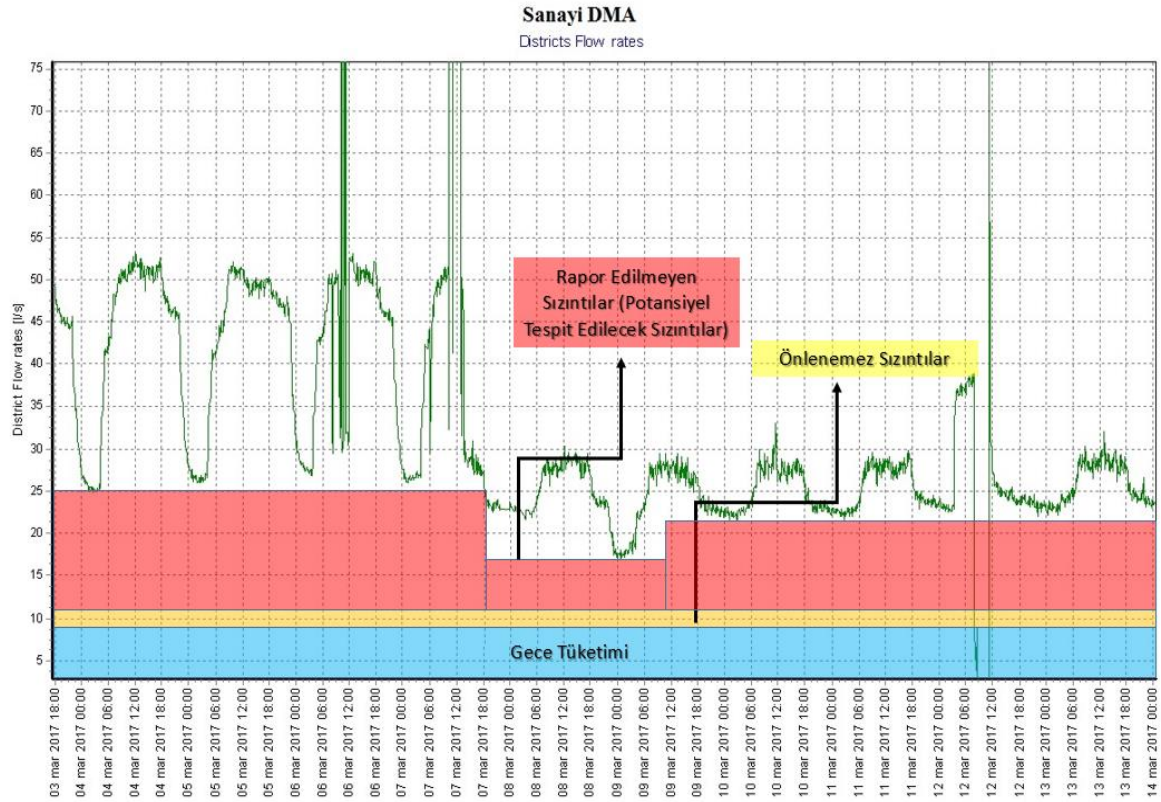
İçme suyu şebekelerinde zaman içerisinde meydana gelen sızıntılar, içme suyu dağıtım şebekesi için hesapta olmayan debilerin taşınmasına ve iletilmesine sebep olarak, hesaplanmış olan hidrolik değerlerde sapmalar meydana getirirler. Hidrolik veride meydana gelen sapmalar düğüm noktalarından ve borular üzerinden yapılacak olan saha ölçümleri ile tespit edilebilir. Oluşan sızıntılardan dolayı yaşanacak olan basınç ve hız değişimleri ilgili içme suyu dağıtım şebekesinin, sızıntı noktasına olan uzaklığına, şebeke geometrisine ve tüketim karakteristiklerini göre farklı büyüklüklerde olabilir.

Bu çalışmanın dayandığı teori şebeke üzerinde oluşan sızıntılardan dolayı yaşanacak olan basınç düşüşleri verileri kullanılarak sızıntının yerinin tespit etmek üzeredir. Literatürde, hidrolik verilerdeki sapmaları kullanarak sızıntı tespiti yapmayı amaçlayan çalışmalar ve farklı yöntem önerileri mevcuttur (Kapelan vd., 2003; Casillas vd., 2013; Shao vd., 2019; Santos Ruiz vd., 2022).

5.2. Sızıntı Tespit Yönteminin Oluşturulması Ön Tasarım Aşamaları

Literatürde yapılan su yönetimi ile alakalı diğer çalışmalarda olduğu gibi sızıntı tespit ve önleme çalışmalarında da sınırları diğer bölgelerden tamamen izole edilmiş bölgelerden (DMA) yararlanmak faydalı bir yöntem olarak kullanılmaktadır (Wu, 2008; Mamo vd., 2014; Fırat vd., 2021). Özellikle rapor edilmeyen sızıntıların farkına varılma ve yerini tespit etme sürelerinin azaltılması ve dolayısıyla da kayıp hacminin düşürülmesinde izole bölgede debilerin izlenmesi önemli katkılar sunmaktadır. Zamana bağlı debi değişimlerinin izlenmesi bölge içerisinde meydana gelen ve özellikle yüzeye çıkmayan sızıntıların yönetilmesine imkan tanımaktadır.

İçme suyu şebekelerinde sınırları belirlenmiş bir bölgeye giren toplam debi grafiği aşağıdaki şekildeki gibi olmaktadır (Şekil 5.2). Sistem giriş debisi gün içerisinde yoğun tüketimin olduğu saatlerde tepe noktalara ulaşırken, gece tüketimin az olduğu saatlerde minimum noktalara düşmektedir. Gece tüketimin minimum olduğu saatte bölgede ölçülen net debi değeri rapor edilmeyen sızıntı miktarı ile doğrudan bağlantılıdır. Bu kapsamda SDS'lerde sızıntı debisinin belirlenmesi için minimum gece debisi (MNF) analizi iyi bir yaklaşımdır (Alkassab vd., 2013).



Şekil 5.2 İzole bir bölge için debi grafiği ve bileşenleri

Belirli bir süre debileri izlenen bir şebekede minimum tüketim saatinde ölçülen debi miktarı; (i) önlenemeyen (belirsiz) sızıntılar, (ii) gece yasal tüketimi ve (iii) rapor edilmeyen sızıntıların (potansiyel önlenebilir sızıntılar) toplamından oluşmaktadır. Aslında herhangi bir saatte ölçülen debi de yine bu üç debinin toplamından oluşmaktadır. Fakat, bölgedeki rapor edilmeyen sızıntı debisini hesaplamak için yaklaşım yaparken, diğer iki debinin toplam debi içindeki oranının en az olduğu saatin baz alınması yaklaşımın doğruluk oranını artıracaktır. Sızıntı debisi denklem 5.1 ve 5.2’de gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$Q_{min} = Q_{uarl} + Q_{cons} + Q_{leakage} \quad (5.1)$$

$$Q_{leakage} = Q_{min} - (Q_{uarl} + Q_{cons}) \quad (5.2)$$

Q_{min} : Minimum tüketim saatinde ölçülen debi (l/s)

Q_{uarl} : Önlenemez (belirsiz) sızıntı debisi (l/s)

Q_{cons} : Minimum saatte kullanıcılar tarafından şebekeden çekilen debi (l/s)

$Q_{leakage}$: Rapor edilmeyen (potansiyel olarak önlenebilir) sızıntı debisi (l/s)

Burada Q_{cons} minimum saatte gerçekleşen tüketim olup her içme suyu şebekesinde hizmet ettiği bölgenin karakteristiğine göre minimum saatte bile kullanıcılar tarafından su tüketimi gerçekleşmektedir. Günümüzde, akıllı sayaç denilen ve anlık olarak uzaktan takip edilebilen, anlık veri gönderebilen sayaçlar ile bir içme suyu şebekesinde herhangi bir saatte gerçekleşen tüketimi net olarak belirleyebilmek mümkün olmakla beraber, akıllı sayaç uygulaması pahalı ve yaygın olmayan bir uygulamadır. Bu sebepten minimum saatteki tüketimi hesaplamak için bölge karakteristiklerini esas alan varsayımsal formüller mevcuttur. Bu formüller temel olarak, şebeke üzerindeki bağlantı sayısı, bölge nüfusu, farklı kullanım şekillerine sahip abonelerin sayısı (konut, ticari, resmi,vb.) gibi parametrelere dayanmaktadır. Q_{cons} değeri hesaplanırken kullanılan değerler kabule dayalıdır. Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi tarafından 2016 yılında yapılan bir çalışmada minimum gece debisi ve bileşenleri hesaplanırken kabul edilmiş olan değerler aşağıdaki gibi gerçekleşmiştir.

Minimum saat tüketimi Q_{cons} aşağıdaki faktörlerin eklenmesi ile verilmiştir:

- Sivil ve endüstriyel aboneler nedeniyle önde gelen gece tüketimi (500 lt/saat).
- İstatistiksel analiz sonuçlarından 1,7 lt/kullanıcı/saat sivil tüketim.
- Ortalama değeri 8 lt/kullanıcı/saat olarak varsayılan endüstriyel tüketim. (Malatya Su Temini ve Rehabilitasyon Projesi, 2016).

Önlenemez (belirsiz) sızıntılar (UARL), her içme suyu şebekesinin yapısı gereği, şebeke bağlantı noktalarında (özellikle servis bağlantıları ve vanalar) oluşan ve önlenmesi çok zor ve yüksek maliyetli olan bu yüzden önlenemez olarak kabul edilen çok küçük ölçekli sızmalardır. Literatürde UARL, iyi bakılmış ve yönetilmiş sistemin teknik olarak en düşük ulaşılabilir değeri yani referans sızıntı seviyesi olarak tanımlanır (Lambert, 1999).

Önlenemez sızıntılara ait debi hesabı için IWA tarafından önerilen BABE yaklaşımı yaygın bir şekilde uygulanan ve kabul gören bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Hesaplama yapılırken temel olarak şebeke yaşı, şebeke üzerindeki servis bağlantı sayısı, şebeke işletme basıncı gibi parametreler esas alınmaktadır. UARL hesabı için yapılan yaklaşım aşağıdaki gibidir;

- Ortalama işletme basıncı 20 ile 100 m aralığındadır.
- Servis bağlantılarının yoğunluğu km hat başına 10 ile 120 bağlantı aralığındadır.
- Tüketici sayaçları sokak köşesinden 0 ve 30 metre aralığında yerleştirilmiştir.

UURL, ortalama işletme basıncının 20 ile 60 m, servis yoğunluğunun km başına 20 ile 100 arasında değiştiği ve abone sayaçlarının 0 ve 20 m arasında yer aldığı varsayılan bir durum için 20 ile 142 litre/servis-bağlantısı/gün aralığında değer alabilir. Denklem 5.3'te UURL hesaplaması gösterilmiştir.

$$UURL = (18 \cdot L_m + 0.8 \cdot N_c + 25 \cdot L_p) \cdot P \quad (5.3)$$

burada:

L_m : ana hat uzunluğu (hizmet boruları olmadan) [km]

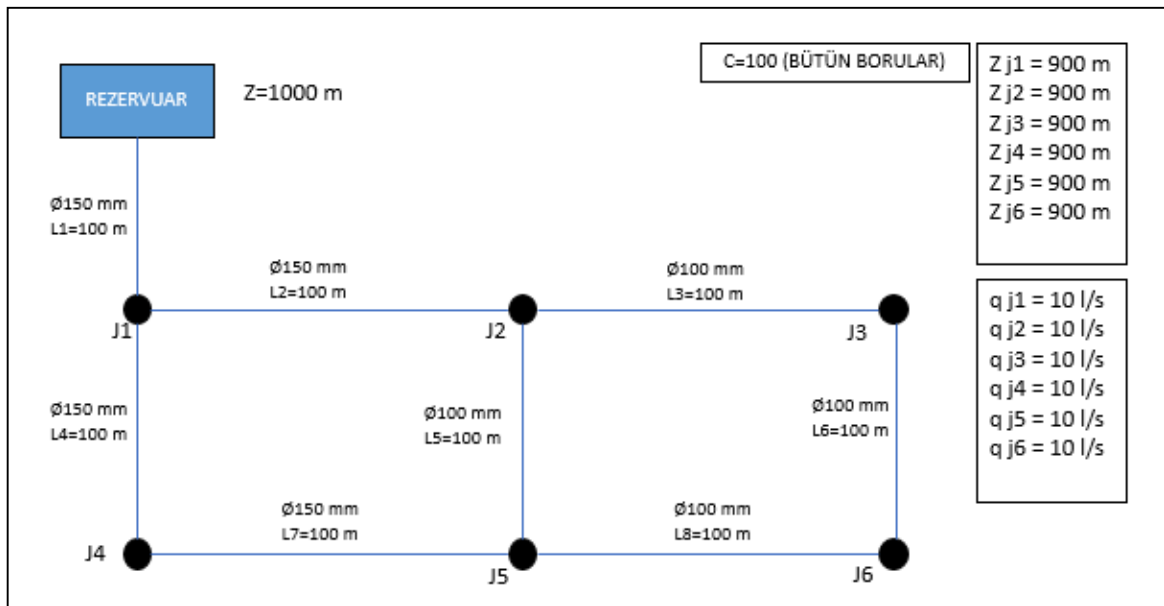
N_c : servis bağlantıları sayısı

L_p : servis bağlantılarının toplam uzunluğu [km]

P : ortalama işletme basıncı [m]

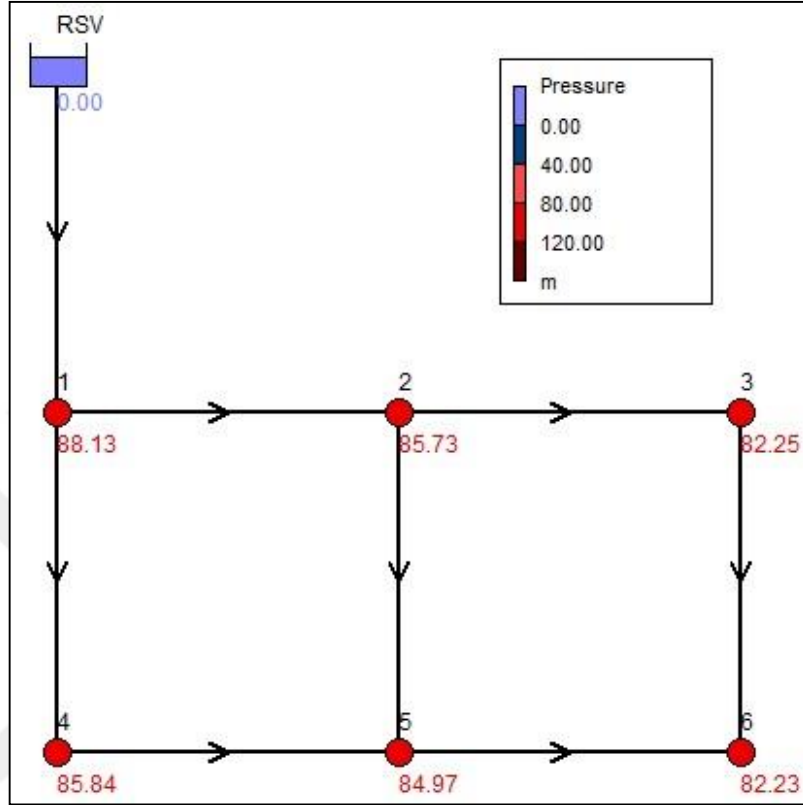
Minimum gece debisinden, önlenemez sızıntı debisi ve gece tüketim debisinin çıkarılmasıyla hesaplanacak olan sızıntı debisi ($Q_{leakage}$) çalışmanın başlangıç noktası olacaktır.

Çalışmanın ilk aşaması; bir sanal şebeke oluşturulup, üzerinde oluşturulan sanal sızıntıların tespit edilmesidir (Şekil 5.3). Çalışma şebekesinde 1 adet rezervuar, 6 adet düğüm noktası, 8 adet boru bulunmaktadır. Toplam debi 60 l/s olarak belirlenmiş ve düğüm noktalarına eşit miktarda dağıtılmıştır.



Şekil 5.3 Çalışma şebekesi

Normal şartlarda yukarıdaki şebekenin hidrolik modeli oluşturulduğunda basınç ve hız dağılımı aşağıdaki gibi olacaktır (Şekil 5.4). Çalışma şebekesinin hidrolik analizleri için EPANET yazılımı kullanılmıştır.



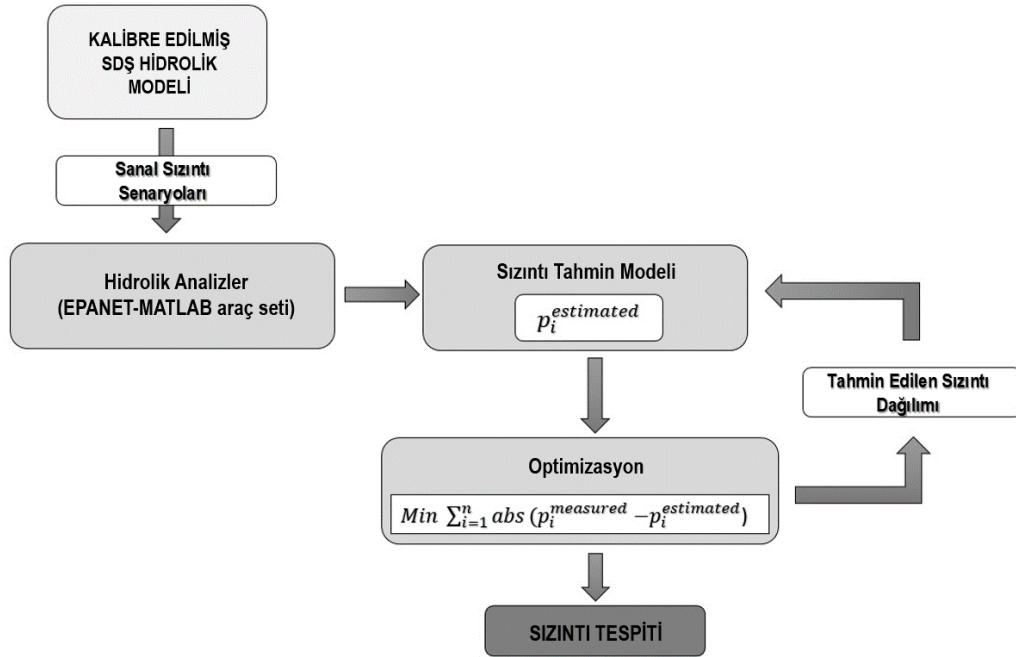
Şekil 5.4 Çalışma şebekesi hidrolik modeli

Fakat şebeke üzerinde bilinmeyen sızıntılar varsa hesaplanan basınç ve hız değerleri ile sahada ölçülen değerler birbirini tutmayacaktır. Problemin çözümüne gideceğimiz başlangıç noktası burasıdır. Bu aradaki fark sızıntı noktalarından, bu sızıntı noktalarındaki sızıntı debisinin büyüklüğünden ve sızıntı noktasının ölçüm noktasına olan uzaklığından direk olarak etkilenmektedir. Burada oluşan etki doğrusal bir etki değildir. Şebekeler dallı yapıya sahip olduğundan bir düğüm noktasında birden çok sayıda gelen ve giden boru olduğundan bu etkiyi belirleyebilmek için sezgisel yöntemlerden yararlanılacaktır.

5.3. Sızıntı Tespiti için Önerilen Metodoloji

Bu çalışmada önerilen metodoloji, sızıntı kaynaklı basınç düşüşlerinin büyüklüklerinden yola çıkarak yapılan hidrolik analiz ile sızıntının yerini tespit etmeyi hedeflemektedir. Problemin doğrusal olmayan doğasından dolayı sezgisel çözüme dayalı optimizasyon teknikleri kullanılmıştır.

SDŞ'lerde sızıntı tespiti yapma amacıyla yapılan çalışmalar çoğunlukla çeşitli optimizasyon tekniklerinin hidrolik analiz problemine uyarlanmasına dayalıdır. Hajibandeh vd., (2018) çalışmalarında, SDŞ'lerde sızıntı tespiti için iki aşamalı bir metodoloji uygulamışlardır, birinci aşamada SDŞ basınç ölçümlerine dayalı olarak çeşitli basınç zonlarına ayrılırken ikinci aşamada ise hidrolik simülasyon ve çok amaçlı karınca kolonisi optimizasyonu birbiri ile ilişkilendirilerek sızıntı tespiti yapılmaktadır. Lijuan vd., (2012) SDŞ'lerde sızıntı tespiti amacıyla, hidrolik simülasyonlar için EPANET ve modelin optimizasyonu için MATLAB programında Genetik Algoritmalar tekniklerini uygulamışlardır. Enerjinin ve kütlenin korunumu yasalarını esas alarak çalışan hidrolik simülasyon kendi içinde iteratif olarak çalışmakta olup, her bir hidrolik simülasyonun birçok girdi parametresi yanı sıra birçok çıktı parametresi mevcuttur. Sızıntı tespiti yapmayı amaçlayan optimizasyon yöntemlerinde, her bir iterasyonda değiştirilen tek bir parametre olsa bile hidrolik simülasyonda diğer değişmeyen girdi parametreleri ile beraber tekrar tekrar iterasyona dahil edilir. Bu durum sızıntı tespit probleminin çözüm sürelerini uzattığı gibi, optimizasyon probleminin lokal değerlere takılmasına sebep olarak doğru çözümden uzaklaşmasına sebep olabilmektedir. Metodoloji hidrolik simülasyon süreci ile optimizasyon sürecini birbirinden ayırmaktadır. Söz konusu ayırma süreci için Sızıntı Tespit Modeli (STM) kullanılmaktadır. Bu çalışmada önerilen metodolojiye ait akış şeması aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 Sızıntı tespiti için tez kapsamında önerilen metodolojiye ait akış şeması

Önerilen metodolojinin ihtiyaç duyduğu kaynaklar; sınırları belirlenmiş olan bir SDŞ, kalibrasyonu tamamlanmış bir hidrolik model, su şebekesi üzerinde giriş debisi ölçümleri, dağıtım şebekesi üzerinden basınç ölçümleri, hidrolik analiz yazılımı ve optimizasyon algoritması yazılımıdır. Bu çalışmada hidrolik analizler için EPANET yazılımı ve optimizasyon algoritması için MATLAB yazılımı kullanılmış olup, çalışmada kullanılan EPANET-MATLAB araç seti çözüm sürelerini kısaltan aynı zamanda iş yükünü azaltan faydalı bir araç olmuştur (Eliades vd., 2016).

5.3.1. Kalibre edilmiş SDŞ modeli

Önerilen metodoloji, kalibre edilmiş bir SDŞ hidrolik modeli verilerini baz alarak çalışır. Kalibrasyon temel olarak, bir SDŞ’de ölçülen ve hesaplanan parametreler arasındaki farkların kabul edilir bir düzeye indirilmesidir (Nicolini vd., 2011). Burada takip edilen parametreler basınç ve debi verileridir. SDŞ’lerde ölçülen ve hesaplanan değerler arasındaki fark; tüketim dağılımı, boru malzeme özellikleri (pürüzlülük katsayısı, vb.), şebeke geometrisi (boru uzunlukları, boru çapları, borular üzerindeki bağlantılar, vb.) topolojik özellikler, SDŞ üzerindeki rapor edilmeyen sızıntılar gibi birçok SDŞ parametrelerinin gerçek durumlarının veya değerlerinin model üzerinde tanımlanmış olan durumundan veya değerinden farklı olmasından kaynaklanır.

Üzerinde hiçbir bağlantı olmayan ve tek seferde aynı çapta aynı boru malzemesi kullanılarak üretilmiş müstakil bir isale hattında bile, zaman içerisinde yıpranmalar ve kesit daralmaları ile beraber, borunun farklı bölümlerinde farklı boru çapları ve pürüzlülük katsayıları oluşabilmektedir. Bu açıdan bakıldığında her borunun farklı birçok boruya bağlantısının olduğu, çoğunlukla birden çok boru malzemesi ve boru çapı kullanılarak inşa edilmiş, işletme periyodu süresince yenileme ve bakım çalışmaları ile beraber birçok değişikliğe uğramış bir SDŞ, kütlenin ve enerjinin korunumu yasalarını esas alan hidrolik analiz sürecindeki doğrusal olmayan yapı ile beraber düşünüldüğünde kalibrasyon probleminin geleneksel matematiksel yöntemlerle çözümü imkansızdır. Kalibrasyon modelleri sezgisel yöntemlerle ve çoğunlukla belirli kabullere dayalı olarak yapılmaktadır.

Greco vd. (1999) çalışmalarında SDŞ’ler için boru pürüzlülük katsayısının kalibrasyonuna dayalı bir yöntem önermişlerdir, önerilen yöntem boru pürüzlülük katsayısı için sahadaki gerçek değerleri hesaplamaya çalışırken, düğümlerden çekilen su miktarlarının yani tüketim dağılımlarının iyi bilindiği kabulünü yapmıştır. Yapılan kabul daha önce yapılmış olan kalibrasyon çalışmalarında yapılmış olan kabullerle örtüşmekte ve tutarlıdır

(Ormsbee ve Wood, 1986; Walski, 1986). Her ne kadar SDŞ üzerindeki mevcut sızıntılar kalibrasyon sürecinin bir parçası olsa da bu çalışmada SDŞ için mevcut durumda diğer SDŞ parametreleri için (şebeke geometrisi, pürüzlülük katsayısı, tüketim dağılımı, vb.) kalibre edilmiş bir modelin olduğu kabul edilerek SDŞ üzerinde yeni sızıntılar oluşması durumunda algoritma tarafından ölçülen değerlerdeki sapmaları kullanarak söz konusu sızıntıların hem lokasyonlarının hem de büyüklüklerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır.

5.3.2. Hidrolik analiz süreci ve sızıntı tespit modeli

Önerilen metodolojide Sızıntı Tespit Modelini (STM) oluşturmak için EPANET – MATLAB araç seti kullanılarak SDŞ üzerinde bir dizi hidrolik analizler yapılmaktadır. SDŞ üzerindeki her bir düğüm noktasına sırayla belirli oranda sızıntılar yüklenerek, söz konusu yüklemekten kaynaklanan şebeke üzerindeki diğer düğüm noktalarındaki basınç değişimleri kaydedilmektedir. Yapılan analizler neticesinde her bir düğüm noktası için diğer düğümlerdeki olası farklı büyüklüklerdeki sızıntılardan basınç değişimi olarak hangi oranda etkileneceğine dair bilgileri içeren bir STM oluşmaktadır (Şekil 5.6).

LDM	l_{k_1}	l_{k_2}	l_{k_3}	...	l_{k_i}
ΔH_1	$\Delta Hl_{k_{11}}$	$\Delta Hl_{k_{21}}$	$\Delta Hl_{k_{31}}$		$\Delta Hl_{k_{i1}}$
ΔH_2	$\Delta Hl_{k_{12}}$	$\Delta Hl_{k_{22}}$	$\Delta Hl_{k_{32}}$	...	$\Delta Hl_{k_{i2}}$
ΔH_3	$\Delta Hl_{k_{13}}$	$\Delta Hl_{k_{23}}$	$\Delta Hl_{k_{33}}$	...	$\Delta Hl_{k_{i3}}$
...	...	...	...	...	...
ΔH_j	$\Delta Hl_{k_{1j}}$	$\Delta Hl_{k_{2j}}$	$\Delta Hl_{k_{3j}}$	...	$\Delta Hl_{k_{ij}}$

Şekil 5.6 Sızıntı tespit modelinin (STM) bir alt matrisinin görünümü

$$i = 1 : Jn ; j = 1 : Jm.$$

Jn ; SDŞ'deki toplam düğüm noktası sayısı, Jm ; SDŞ'deki toplam ölçüm noktası sayısı, l_{k_i} ; “i” no’lu düğüm noktasında oluşan sızıntı, ΔH_j ; “j” no’lu ölçüm noktasında oluşan basınç değişimi, $\Delta Hl_{k_{ij}}$; “i” no’lu düğüm noktasında meydana gelen “ l_k ” büyüklüğündeki sızıntıdan dolayı “j” no’lu düğüm noktasında oluşan basınç değişimi

STM alt matrisinin yapısını şekil üzerinden açıklayacak olursak satırlar ölçüm yapılan düğüm noktalarına sütunlar ise bütün düğüm noktalarını temsil etmektedir.

SDŞ için STM oluştururken, sızıntının sahada oluşması ihtimali olan bütün noktalar modele dahil edilmelidir. Bu sebepten, STM tasarlanırken hidrolik model üzerindeki bütün düğüm noktaları potansiyel sızıntı noktası olarak STM'ne tanımlanır. Hidrolik hesaplamalar düğüm noktasından düğüm noktasına yapıldığı için, tanımlanabilecek maksimum potansiyel sızıntı noktası sayısı, toplam düğüm noktası sayısını geçemez. Bu yüzden eğer şebeke üzerinde uzun borular varsa sızıntı tespit hassasiyetini artırmak adına, uzun borular aralara sanal düğüm noktaları tanımlanarak daha küçük parçalara bölünebilir.

STM oluşturulurken herhangi bir saha ölçümüne gerek duyulmadığından $J_m = J_n$ olarak kabul edilir. Optimizasyon aşamasında ise sahadaki ölçüm noktaları hangileri ise onlardan gelen veriler ile sızıntı tespit optimizasyonu yapılır.

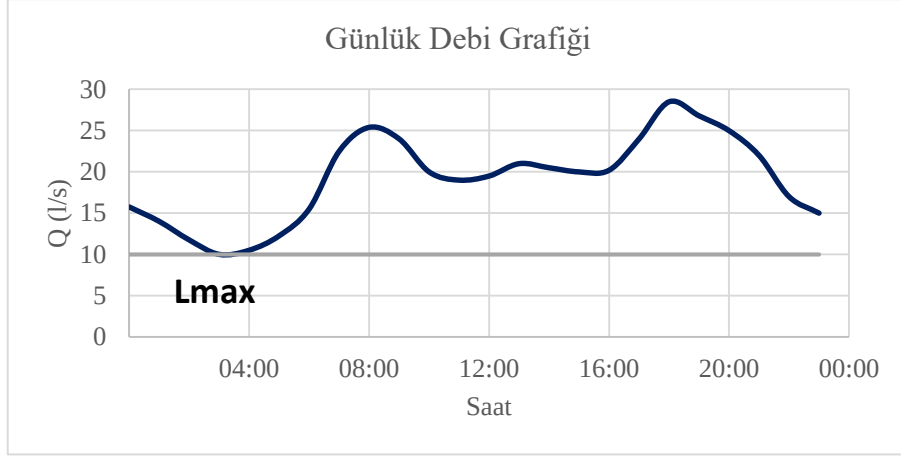
Önerilen metodolojide sanal sızıntı senaryolarının tanımlanması şu şekilde ilerler;

- Günlük debi grafiği üzerinden minimum debi noktası L_{max} (maksimum sızıntı debisi) olarak belirlenir (Şekil 5.7). Çalışılan SDŞ bölgesinde gece saatlerinde yüksek tüketim yapan bilinen kullanıcılar olduğu biliniyorsa önceki bölümde anlatılan MNF analizi yapılarak L_{max} değeri belirlenir.
- Buna göre, $Q_{sızıntı}$ (sızıntı debisi) başlangıç noktası 0 ve bitiş noktası L_{max} olacak şekilde adımlar arası Δl (sızıntı debisi artış miktarı) belirlenir.
- Bu durumda sızıntı senaryo dağılımında toplam adım sayısı t_s aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Denklem 5.4);

$$t_s = \frac{L_{max}}{\Delta l} \quad (5.4)$$

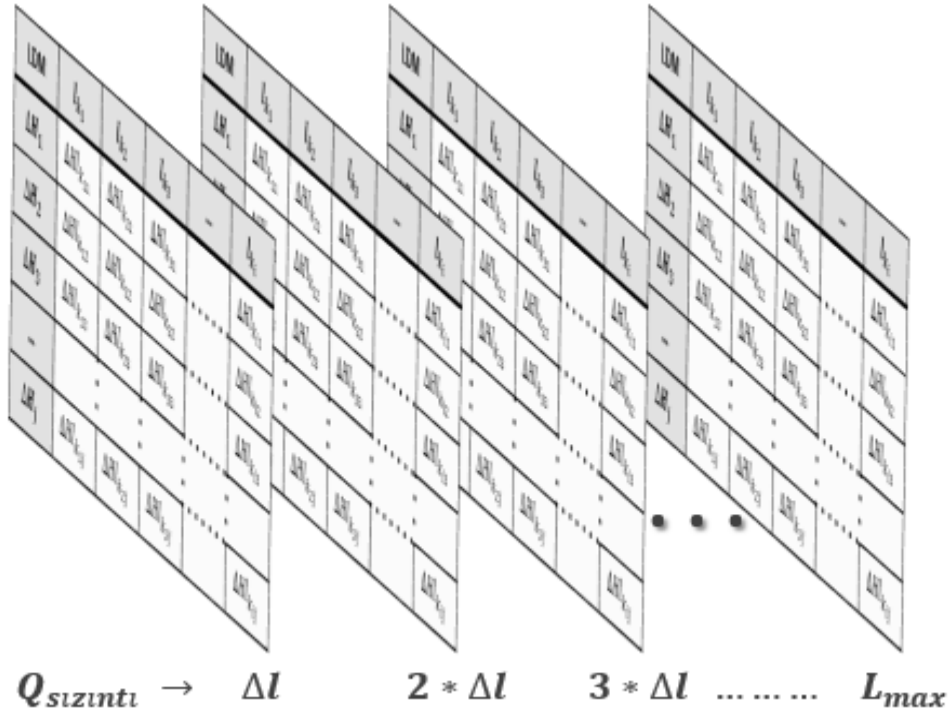
- STM'ni oluşturmak için yapılması gereken NHS (hidrolik simülasyon sayısını) denklem 5.5'teki gibi hesaplanabilir;

$$NHS = NJ * t_s \quad (5.5)$$



Şekil 5.7 Bir SDŞ için günlük debi grafiği ve L_{max} değeri

EPANET–Matlab araç seti kullanılarak sızıntı senaryoları belirlenen artış miktarları kadar artırılarak her bir adımda sırası ile düğüm noktalarına tek tek tanımlanır ve her simülasyonda diğer düğüm noktalarında oluşan basınç değişimleri kaydedilir. Toplamda NHS sayıda hidrolik simülasyon tamamlandıktan sonra 3 boyutlu ($J_n \times J_m \times t_s$) STM matrisi oluşur (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 Önerilen metodolojide 3-Boyutlu sızıntı tespit modeli (STM) matrisi

5.3.3. Optimizasyon modeli

EPANET-MATLAB araç seti kullanılarak STM oluşturulduktan sonra, oluşturulan yapının optimizasyon modeline uygun hale getirilmesi gerekmektedir. STM’de herhangi bir düğüm noktasında oluşabilecek sızıntının olduğu düğüm noktası dahil diğer düğüm noktalarında meydana getireceği basınç değişimi ile ilgili bilgi mevcuttur. Bu bilgi kullanıcı tarafından seçilen Δl değerinin büyüklüğüne bağlıdır. Seçilmiş olan Δl değerinin büyüklüğüne göre sızıntı doğrusu üzerinde belirli noktalar için hesaplanmış olan düğümler arası sızıntı etkisi değerleri $\Delta Hl_{k_{ij}}$ polinom haline getirilmelidir. Bunun için MATLAB programında *En Küçük Kareler Yöntemi* metoduna dayalı ‘polyfit’ komutu kullanılarak STM’deki her bir hücredeki değerleri bir polinoma dönüştürecek olan katsayılar k hesaplanır. Polinom derecesi n beklenen hassasiyete göre kullanıcı tarafından belirlenir.

Sonuç olarak STM her bir hücresinde i no’lu düğüm noktasındaki sızıntı değeri l_i ‘ne bağlı polinomlardan oluşan iki boyutlu dinamik bir matrise dönüştürülür (Denklem 5.6).

$$FL_{ij} = \sum_{x=0}^n k_{x_{ij}} * l_i^x \quad (5.6)$$

Optimizasyon algoritması temel olarak sahada ölçülen basınç değerleri P_M ve hidrolik modelde hesaplanmış olan basınç değerleri P_C arasındaki farkı STM verilerini kullanarak yakalamayı amaçlamaktadır. Sahada basınç değerleri ölçülen düğüm noktası sayısı yani toplam ölçüm noktası sayısı Jm olmak üzere, P_M ve P_C algoritmada ($Jm*1$) boyutlarında birer matris olarak temsil edilir. Sızıntının olduğu düğüm noktası i ve sızıntıdan etkilenmekte olan düğüm noktası j olmak üzere amaç fonksiyonu ve kısıtları aşağıdaki (5.7) şekilde oluşur.

Aranacak Parametre; $|l|$

$$\text{Minimizasyon;} \quad F(l) = \sum_{j=1}^{Jm} \left| \sum_{i=1}^{Jn} FL_{ij} - |P_{C_j} - P_{M_j}| \right|$$

$$\text{Kısıtlar;} \quad \sum_{i=1}^{Jn} l_i \leq L_{max} , \quad 0 \leq l_i \leq L_{max} \quad (5.7)$$

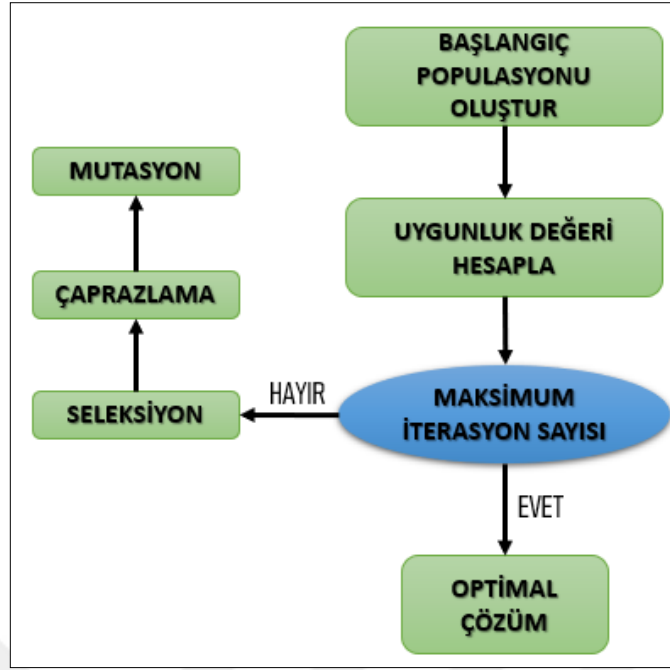
Önerilen metodoloji durağan durum analizine dayanmaktadır. Optimizasyon probleminde amaç fonksiyonu bir minimizasyon fonksiyonudur. Algoritma $(1 \times J_n)$ boyutlarında olan $|l|$ matrisini bulmayı hedeflemektedir. Her bir düğüm noktası için hesaplanan toplam basınç değişimi değerleri mutlak değer içerisinde alınarak, algoritmanın STM üzerinden hesaplanan toplam basınç değişimi ile sahada ölçülen toplam basınç değişimi değerleri arasındaki farkı her bir ölçüm noktası için ayrı ayrı sıfırlamaya çalışmasına yönlendirmektedir. Bu şekilde amaç fonksiyonu çok amaçlı bir yapıya dönüşmektedir.

Algoritma, bir SDŞ için toplam sızıntı miktarını herhangi bir kısıt olmadan bulabilme yeteneğine sahiptir fakat algoritmanın tek kısıtı olan toplam sızıntının, günlük debi grafiğindeki en küçük değer olan L_{max} değerinden küçük olması kısıtı, algoritmanın lokal değerlerde takılarak yanlış sonuçlar vermesini önlemenin yanı sıra, arama kümesini daraltarak çözüme daha hızlı gidilmesini sağlamaktadır.

5.3.4. Genetik algoritmalar

1950’li yıllardan sonra artan bilgisayar kullanımı ile sayısal çözümlemeler güncel hale gelmiştir. Sayısal yöntemlerin çözümüne ancak çözüm uzayları içerisinde mevcut bulunması gereken kesin bir örgünlük ile gidilebilmektedir fakat kesin örgünlük çözüme katkısı olmayacak fazla sayıda noktaların ve alt alanların hesaplamalara dahil edilmesi anlamına gelmektedir. Bu tür bir olumsuz etkiden kaçınmak için rastgele bir düzen içinde etkili ve hızlı bir şekilde çözüme ulaşabilen optimizasyon (en iyileme) yöntemleri kullanılmaktadır (Şen, 2004).

Optimizasyon yöntemleri arasında yaygın kullanım alanına sahip olan ve en modern yöntemlerden biri olan Genetik Algoritmalar (GA) yöntemi; doğada gözlemlenen evrimsel mekanizmaları baz alarak çalışan ve çok boyutlu çözüm uzayında arama yaparak optimum çözüme ulaşmayı sağlayan bir yapay zeka tekniğidir (Aydın, 2017). Temel ilkeleri 1975 yılında John Holland tarafından belirlenmiştir (Emel vd.,2022). GA için akış şeması şekilde gösterilmiştir (Şekil 5.9).



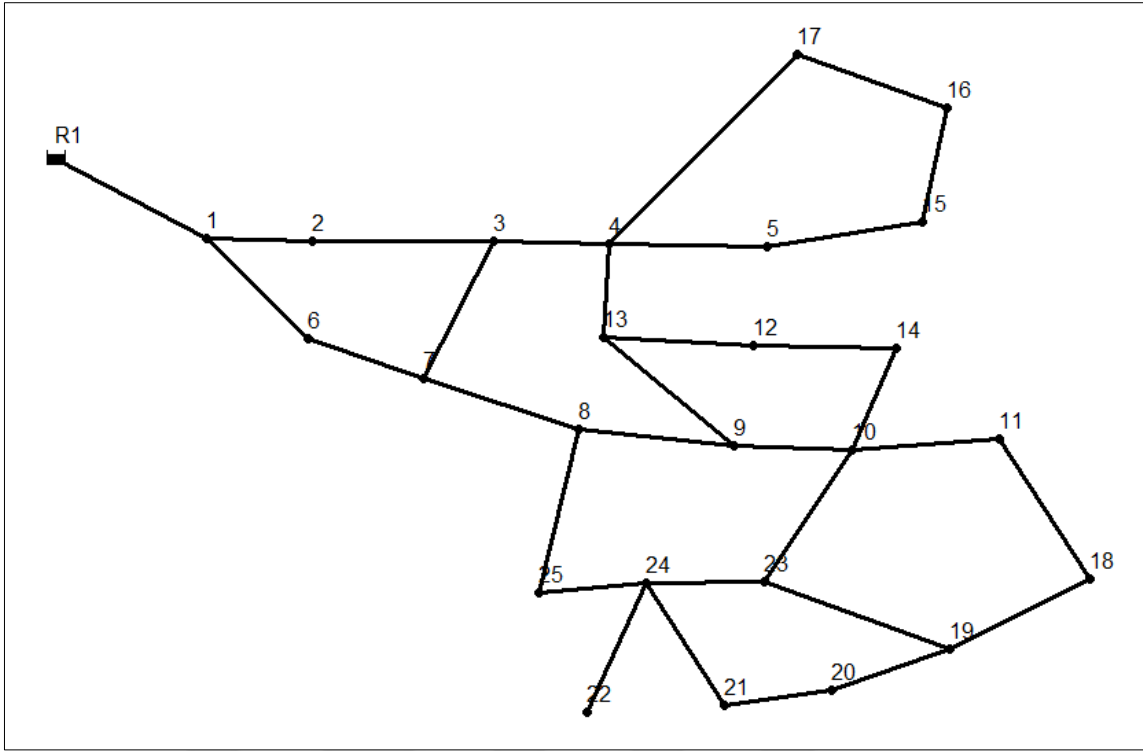
Şekil 5.9 Genetik algoritmalar akış şeması

Su dağıtım şebekelerinde sızıntı araması için bu çalışmada oluşturulan yapı büyük ve karmaşık bir arama uzayına sahip ve doğrusal olmayan bir yapıdır. Ayrıca su dağıtım şebekesi üzerinde sızıntının lokasyonu ve miktarını verecek belirli bir matematiksel model oluşturmak mümkün değildir. Bundan dolayı çalışmaya konu olan sızıntı tespiti probleminin çözümünde bu türden problemlerin çözümünde etkili ve kullanışlı bir yöntem olan GA optimizasyonu kullanılmıştır.

5.4. Sızıntı Tespit Modelinin Deneysel Şebekede Uygulanması

Önerilen metodoloji, EPANET programında hazırlanmış olan bir deneysel şebeke ve literatürde iyi bilinen ve birçok çalışmaya konu olmuş Hanoi şebekesi (Fujiwara vd., 1990; Vasan vd., 2010; Ferrandez-Gamot vd., 2015; Bi vd., 2015, Yılmaz vd., 2019) üzerinden test edilmiştir.

Deneysel şebeke, birbirinden farklı tüketim değerlerine sahip 25 düğüm noktası, birbirinden farklı çaplarda ve uzunluklarda 32 adet boru ve 1 adet rezervuardan oluşmaktadır (Şekil 5.10). Söz konusu şebeke tüketim amaçlı olarak 20 l/s debi sunmaktadır.



Şekil 5.10 Sızıntı Tespiti için Geliştirilen Deneysel Şebeke Geometrisi

Metodolojinin test edildiği deneysel şebekeye ait geometrik özellikler (Çizelge 5.1)'de gösterilmiştir. EPANET modelinde akış birimleri olarak LPS ve hidrolik analizler için Hazen-Williams formülü kullanılmıştır.

Çizelge 5.1 Deneysel şebekeye ait geometrik özellikler

Düğüm Noktası			Borular					
ID	Kot	Talep	ID	Düğüm 1	Düğüm 2	Uzunluk	Çap	Pürüzlülük
1	840	0.8	1	1	2	64	160	130
2	837	0.6	2	2	3	112	160	130
3	835	1.2	3	3	4	71	160	130
4	838	1.4	4	4	5	98	90	130
5	833	0.4	5	5	15	96	90	130
6	839	0.8	6	15	16	72	90	130
7	831	0.6	7	16	17	98	90	130
8	834	0.2	8	1	6	88	160	130
9	827	0.4	9	6	7	76	160	130
10	825	0.8	10	7	8	102	160	130
11	820	1	11	8	9	97	110	130
12	813	1.2	12	9	10	73	110	130
13	819	0.4	13	10	11	91	110	130
14	822	0.8	14	10	14	69	90	130
15	830	1.4	15	14	12	89	90	130
16	831	0.8	16	12	13	93	90	130
17	819	0.8	17	11	18	103	110	130
18	811	0.4	18	18	19	97	110	130
19	812	0.6	19	19	20	78	90	130
20	814	0.8	20	20	21	66	90	130
21	816	1	21	21	24	90	90	130
22	817	1	22	24	25	66	90	130
23	825	1.2	23	24	22	88	90	130
24	819	0.8	24	23	19	122	90	130
25	835	0.6	25	23	24	72	90	130
			26	8	25	105	110	130
[Hazne]			27	4	13	58	110	130
ID	Kot		28	3	7	95	90	130
R1	890		29	17	4	166	90	130
			30	13	9	105	90	130
			31	23	10	98	90	130
			32	R1	1	106	200	130

5.4.1. Deneyisel şebekede ölçüm noktalarının belirlenmesi

Önerilen metodolojinin test edileceği şebeke için oluşacak bir sızıntı diğer düğüm noktalarında hidrolik yükseklik ve basınç parametresinde bir düşüşe sebep olacaktır.

Metodoloji test edilirken şebeke üzerine tanımlanan bir sızıntının diğer düğüm noktalarındaki yapacağı basınç düşüşü EPANET programında bütün düğüm noktaları için raporlanmaya müsaittir. Gerçek saha koşullarında ise oluşacak bir sızıntının yapacağı basınç düşüşünü bütün düğüm noktalarında ölçebilmek şebeke üzerine çok fazla ölçüm ve izleme enstrümanları monte etmeyi gerektirecektir. Bu durum sızıntıyı yakalama hassasiyetini artırırken maliyetleri de yükseltecektir. Casillas vd. (2013) çalışmalarında optimum sensör yerleşimini tespit edebilmek amacı ile tamsayı optimizasyon yöntemini kullanmışlardır. Sarrate vd. (2014) çalışmalarında maksimum teşhis edilebilirlik derecesini garanti eden bir sensör konfigürasyonunu karakterize edip belirlerken sensör maliyetlerini belirlenmiş bir bütçenin içinde tutmayı garanti eden bir optimizasyon stratejisi sunmuşlardır.

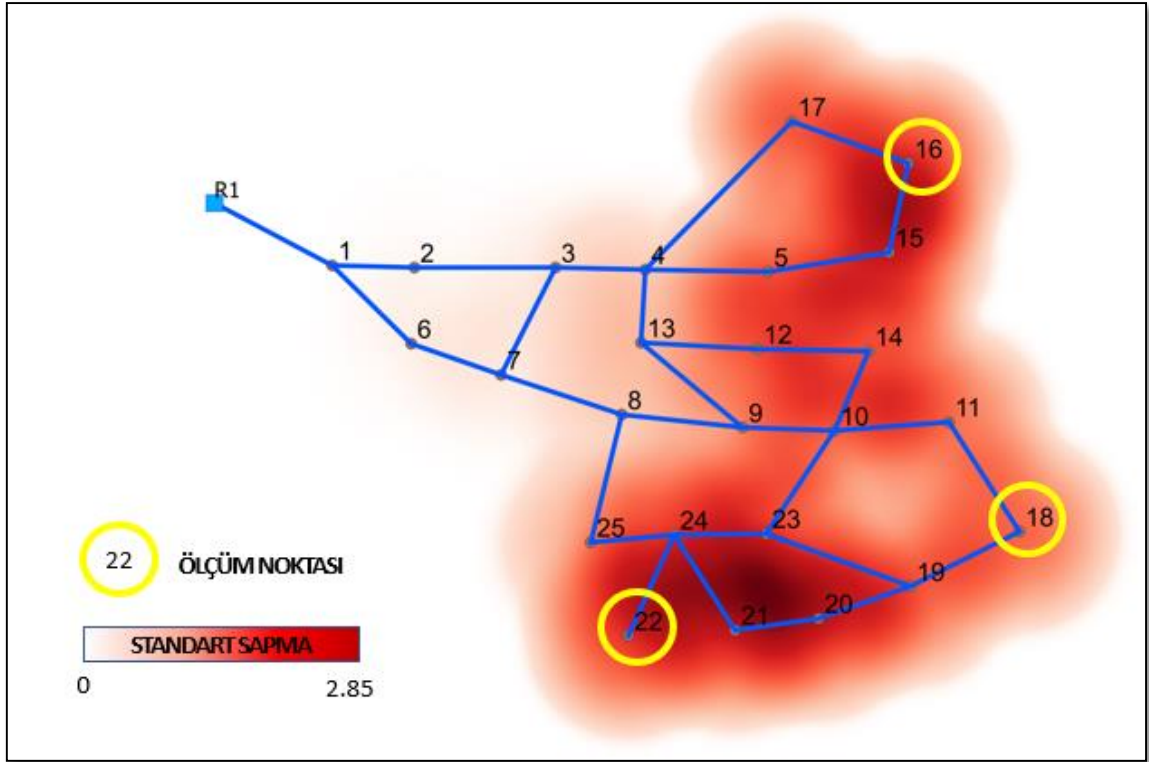
Bu çalışmada gerçek saha koşullarında uygulanabilirlik açısından optimum sensör yerleşimi belirlenerek EPANET üzerinden hesaplanan sızıntı senaryosunun raporlarından sadece belirlenmiş olan ölçüm noktalarına ait veriler kullanılarak algoritmanın sonuca eldeki sınırlı veri ile gidebilmesi için zorlanmıştır.

Algoritma defalarca çalıştırılarak farklı ölçüm noktası kombinasyonları test edilmiş ve nihai olarak deneyisel şebeke için 3 adet ölçüm noktasının yeterli olacağı sonucuna varılmıştır. Optimum ölçüm noktası sayısı ve yerleşimi için bu çalışmada, STM verilerinin her düğüm noktası için standart sapmaları hesaplanmıştır (Çizelge 5.2). Her bir düğüm noktası için potansiyel sızıntı noktası olması durumunda diğer düğüm noktalarında oluşturduğu basınç düşüşü değerleri kümesi için hesaplanan Düğüm Standart Sapma Analizi (DSSA) sonucunda yüksek standart sapma değerine sahip düğüm noktalarının algorithmada daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Çizelge 5.2 DeneySEL Şebeke STM için standart sapma tablosu

--> DÜĞÜM NOKTALARINDA SIZINTI SONUCUNDA OLUŞAN BASINÇ DÜŞÜŞÜ (mss) -->																											
DN	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	σ	
<-- SIZINTININ TANIMLANDIĞI DÜĞÜM NOKTALARI (2 L/S) <--	1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.00	
	2	0.5	1.0	0.9	0.9	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.11	
	3	0.5	0.9	1.6	1.5	1.5	0.7	1.0	1.0	1.2	1.2	1.2	1.2	1.4	1.2	1.5	1.5	1.5	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	0.26
	4	0.5	0.9	1.5	2.0	2.0	0.7	1.0	1.1	1.4	1.4	1.4	1.5	1.8	1.4	2.0	2.0	2.0	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.1	0.40
	5	0.5	0.9	1.5	2.0	8.3	0.7	1.0	1.1	1.4	1.4	1.4	1.5	1.8	1.4	6.6	6.4	5.6	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.1	2.06
	6	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	1.2	1.0	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.7	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	0.14
	7	0.5	0.7	0.9	0.9	0.9	1.1	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.2	1.1	1.3	0.9	0.9	0.9	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	0.24
	8	0.5	0.7	1.0	1.0	1.0	1.0	1.4	2.1	1.7	1.7	1.7	1.6	1.3	1.7	1.0	1.0	1.0	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	2.0	0.43
	9	0.5	0.7	1.2	1.4	1.4	0.9	1.3	1.7	3.9	3.3	3.1	3.0	2.3	3.2	1.4	1.4	1.4	3.1	3.0	3.0	3.0	2.9	3.0	2.9	2.2	0.96
	10	0.5	0.8	1.2	1.4	1.4	0.9	1.3	1.7	3.3	5.3	5.0	4.6	2.4	5.1	1.4	1.4	1.4	4.8	4.7	4.6	4.6	4.5	4.6	4.5	2.7	1.70
	11	0.5	0.7	1.2	1.4	1.4	0.9	1.3	1.7	3.2	5.1	6.8	4.4	2.3	4.9	1.4	1.4	1.4	6.2	5.9	5.6	5.5	5.2	5.4	5.2	3.0	2.07
	12	0.5	0.8	1.2	1.5	1.5	0.9	1.2	1.6	2.9	4.3	4.0	6.0	2.7	4.7	1.5	1.5	1.5	3.9	3.8	3.8	3.7	3.7	3.8	3.7	2.3	1.44
	13	0.5	0.8	1.4	1.8	1.8	0.8	1.1	1.3	2.2	2.3	2.2	2.6	3.5	2.4	1.8	1.8	1.8	2.2	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	1.6	0.62
	14	0.5	0.8	1.2	1.4	1.4	0.9	1.3	1.7	3.2	5.1	4.9	4.9	2.4	5.7	1.4	1.4	1.4	4.7	4.6	4.5	4.5	4.4	4.5	4.4	2.6	1.69
	15	0.5	0.9	1.5	2.0	6.8	0.7	1.0	1.1	1.4	1.4	1.4	1.5	1.8	1.4	10.2	9.9	8.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.1	2.83
	16	0.5	0.9	1.5	2.0	6.7	0.7	1.0	1.1	1.4	1.4	1.4	1.5	1.8	1.4	9.9	10.3	8.6	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.1	2.85
	17	0.5	0.9	1.5	2.0	5.6	0.7	1.0	1.1	1.4	1.4	1.4	1.5	1.8	1.4	7.9	8.2	9.6	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.1	2.48
	18	0.5	0.7	1.1	1.4	1.4	0.9	1.3	1.8	3.1	4.9	6.3	4.3	2.2	4.7	1.4	1.4	1.4	7.2	6.7	6.2	6.2	5.8	6.0	5.8	3.1	2.26
	19	0.5	0.7	1.1	1.4	1.4	1.0	1.3	1.8	3.1	4.8	5.9	4.2	2.2	4.6	1.4	1.4	1.4	6.8	7.3	6.7	6.6	6.1	6.4	6.1	3.3	2.35
	20	0.5	0.7	1.1	1.3	1.3	1.0	1.3	1.8	3.0	4.7	5.6	4.1	2.2	4.5	1.3	1.3	1.3	6.3	6.7	8.7	8.3	6.4	6.4	6.4	3.3	2.55
	21	0.5	0.7	1.1	1.3	1.3	1.0	1.3	1.8	3.0	4.7	5.7	4.1	2.2	4.5	1.3	1.3	1.3	6.3	6.7	8.4	8.7	6.4	6.4	6.4	3.3	2.56
	22	0.5	0.7	1.1	1.3	1.3	1.0	1.3	1.8	2.9	4.5	5.2	3.9	2.1	4.3	1.3	1.3	1.3	5.7	6.0	6.3	6.4	12.2	6.3	6.7	3.4	2.75
	23	0.5	0.7	1.1	1.3	1.3	1.0	1.3	1.8	3.0	4.7	5.4	4.1	2.2	4.5	1.3	1.3	1.3	5.9	6.1	6.3	6.4	6.5	6.7	6.5	3.4	2.23
	24	0.5	0.7	1.1	1.3	1.3	1.0	1.3	1.8	2.9	4.5	5.2	3.9	2.1	4.3	1.3	1.3	1.3	5.7	6.0	6.3	6.4	6.7	6.3	6.7	3.4	2.21
	25	0.5	0.7	1.0	1.1	1.1	1.0	1.4	2.0	2.1	2.6	2.9	2.4	1.6	2.5	1.1	1.1	1.1	3.0	3.1	3.2	3.2	3.4	3.2	3.4	5.3	1.14

Düğüm noktalarının basınç düşüşü açısından farklı düğüm noktalarında oluşan sızıntılardan etkilenme değerlerinin standart sapmaları da göz önünde bulundurularak yapılan karşılaştırmalı analizler sonrasında; deneySEL Şebeke için 16, 18 ve 22 no'lu düğüm noktaları ölçüm noktası olarak seçilmiş ve CBS yazılımı üzerinden standart sapma verileri ısı haritası haline getirilerek ölçüm noktaları işaretlenmiştir (Şekil 5.11). Burada standart sapma parametresi göz önünde bulundurulmakla beraber, ölçüm noktalarının Şebeke geometrisine göre birbirinden mümkün olduğunca farklı noktalarda seçilmesi ve boru sonu olan düğüm noktalarına öncelik tanınması gibi parametreler de dikkate alınmıştır.



Şekil 5.11 Deneysel Şebeke Düğüm Noktaları Standart Sapmaları Isı Haritası ve Seçilmiş Ölçüm Noktaları

Belirlenen stratejiyi örneklendirecek olursak 15 ve 17 no'lu düğüm noktalarına ait standart sapma değerleri 18 no'lu düğüme ait standart sapma değerinden daha yüksektir. Buna rağmen 15 ve 17 no'lu düğüm noktaları ölçüm noktası olarak belirlenmeyip 18 no'lu düğüm noktası ölçüm noktası olarak belirlenmiştir. Burada şebeke geometrisi incelendiği zaman 15, 16 ve 17 no'lu düğüm noktaları birbirlerine çok yakın komşu düğüm noktalarıdır. Bundan dolayı şebekenin geri kalan kısımlarında oluşan sızıntılardan birbirlerine yakın oranlarda etkilenmektedirler ve standart sapma değerleri birbirlerine çok yakın değerlerdir (Tablo 2). Şebekede oluşan sızıntılar sonrasında hemen hemen birbiri ile aynı şekilde etkilenen bu 3 adet düğüm noktasından sadece 1 tanesinin seçilmesi yeterli olacaktır.

Dolayısıyla bu gruptan en yüksek standart sapma değerine sahip olan 16 no'lu düğüm noktası hâlihazırda seçilmiş olduğundan, standart sapma değerleri tablosunda 15 ve 17 no'lu düğümler atlanarak şebeke geometrisinde farklı bir konumda olan düğüm noktaları arasından en yüksek standart sapma değerine sahip olan 18 no'lu düğüm noktası seçilmiştir.

5.4.2. Sızıntı tespit analizi

Deneysel şebekede 20 l/s olarak belirlenmiş olan normal tüketim debisinin üzerine 2 l/s sızıntı debisi olduğu tanımlanmıştır. Bu durumda rezervuardan çekilen anlık debi toplam 22 l/s'dir. Sızıntı debisi şebekedeki bütün düğüm noktalarına sırasıyla tanımlanmış ve her bir düğüm noktası için sızıntı durumuna göre algoritma test edilmiştir. Ölçüm noktaları bütün düğüm noktaları için sabittir. Her düğüm noktası için sızıntı durumunda oluşacak seçilmiş olan ölçüm noktalarında oluşan basınç düşüşleri algoritmaya girdi verisi olarak verilmiş ve sızıntı araması gerçekleştirilmiştir.

Deneysel şebeke; sızıntının dağılımı açısından iki duruma göre test edilmiştir. Birinci durumda; toplam sızıntı miktarı algoritmaya bir kısıt olarak tanımlanmış fakat sızıntının düğüm noktalarına dağılımı için bir kısıt eklenmemiştir. Bu durumda algoritma düğümlerdeki toplam sızıntı miktarını sağlamak kaydıyla söz konusu miktarı bütün düğüm noktalarına küçük miktarlarda da olsa dağıtabilme seçeneğine sahiptir. Bu durumda arama uzayı büyüktür ve doğru sonucu bulmak daha zorlayıcıdır.

İkinci durumda ise ek bir kısıt olarak sızıntının sadece bir düğüm noktasında olabileceği algoritmaya tanımlanmış ve sızıntı dağılımına sınırlama getirilmiştir. Bu durumda arama uzayı daraltılmış ve doğru sonuca daha kolay gidilmesi sağlanmıştır.

5.4.2.1. Sızıntı dağılımı serbest bırakılmış analiz

Algoritma için herhangi bir sınır tanımlanmamış ve sızıntının farklı oranlarda farklı düğüm noktalarında olabilecek şekilde algoritma sızıntıyı aramıştır. Her ne kadar tek bir sızıntı noktası için arama yapılmış olsa da sahada gerçek durum bundan farklı olabileceği için algoritma bunu bilmemektedir ve her ihtimali göz önünde bulundurmaktadır.

Deneysel şebeke üzerinde belirlenen sızıntı debisi (2 l/s) sırası ile bütün düğüm noktalarına tanımlanmış, belirlenen ölçüm noktalarında oluşan basınç değişimleri kaydedilmiş ve algoritmaya veri olarak girilmiştir. Daha önceden hesaplanmış olan STM verileri kullanılarak algoritma her düğüm noktası için 15 defa çalıştırılmıştır. Analiz sonuçları tablodaki gibidir (Çizelge 5.3).

Çizelge 5.3 Deneysel şebeke analiz sonuçları

Düğüm No	Oran (%)*	Ortalama Miktar (l/s)**	SIRALAMA *** (25 Düğüm Noktası Arasında)
1	100	2.000	1
2	100	1.914	1
3	87	1.782	1
4	93	1.825	1
5	93	1.890	1
6	80	1.146	1
7	67	1.110	1
8	100	1.976	1
9	100	1.911	1
10	100	1.997	1
11	67	1.485	1
12	100	1.776	1
13	100	1.987	1
14	93	1.925	1
15	100	1.962	1
16	93	1.895	1
17	73	1.644	1
18	100	1.987	1
19	87	1.778	1
20	100	1.921	1
21	93	1.876	1
22	100	1.999	1
23	87	1.881	1
24	100	1.985	1
25	93	1.908	1
*Düğüm noktası üzerindeki potansiyel sızıntının algoritma tarafından doğru tespit edilme oranı			
**Düğüm noktası üzerindeki sızıntı miktarının (2 l/s) algoritma tarafından farklı analizlerde hesaplanmış değerlerinin ortalaması			
***Düğüm noktası için algoritma tarafından hesaplanan ortalama miktarının sıralaması			

Analiz sonuçlarına göre algoritma 25 düğüm noktasına sahip deneysel şebekede, 12 adet düğüm noktası için %100 oranında doğru sonuç verdiğini ve her defasında doğru sızıntı noktasını tahmin edebildiğini göstermektedir. Geriye kalan düğüm noktaları için de gerçek sızıntı noktası ortalama %85 oranında doğru tahmin edilmektedir. Bu durumda bütün düğüm noktaları için farklı arama sonuçlarında doğru tahmin edilme oranı %92 olmaktadır.

Düğüm noktalarının tamamı için arama sonuçlarında algoritma tarafından belirlenen ortalama debiler göz önüne alındığında ise %100 doğruluk oranı ile gerçek sızıntı noktası tespit edilebilmektedir.

Algoritmanın herhangi bir düğüm noktası için 5 defa çalıştırılması doğru sızıntı noktasının tahmin edilmesini garantilemektedir. Yukarıdaki tabloda algoritma 15 defa çalıştırılmış olup her çalıştırmada tahmin edilen sızıntı noktası ve miktarı kaydedilmiştir. Herhangi bir düğüm noktası için en çok 5. çalıştırmadan sonra gerçek sızıntı noktasının en çok tahmin edilen düğüm noktası olduğu kaydedilmiştir.

5.4.2.2. Sızıntı dağılımı sınırlandırılmış analiz

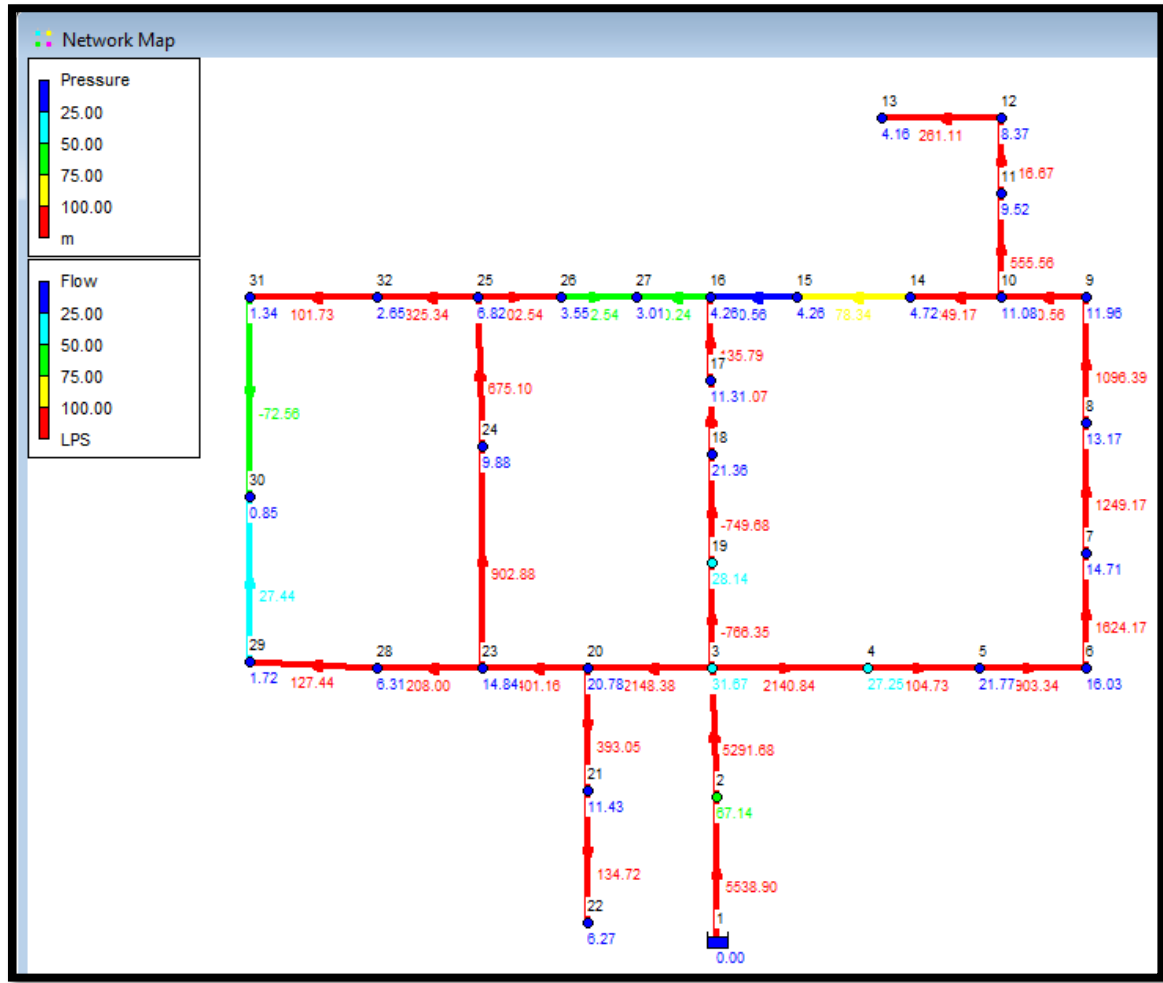
Deneysel şebeke için algoritmaya non-lineer kısıt olarak sızıntının dağınık bir görüntü vermediği ve tek bir düğüm noktasında olduğu tanımlanarak, aramanın bu kısıta göre şekillenmesi sağlanmıştır. Bu durumda, algoritma her düğüm noktasında potansiyel sızıntı durumu için %100 oranında doğru lokasyon ve belirlemiştir. Kısıt olarak tek bir düğüm noktasında arama seçildiği için doğal olarak bütün sızıntı miktarını tahmin edilmiş olan düğüm noktasına atamış ve sonuç olarak hem miktar hem lokasyon olarak %100 doğrulukla çalışabilmiştir (Çizelge 5.4).

Çizelge 5.4 Deneysel şebeke tek sızıntı kısıntı durumunda arama sonuçları

Düğüm No	Oran (%)*	Ortalama (l/s)**	Miktar
1	100	2.000	
2	100	2.000	
3	100	2.000	
4	100	2.000	
5	100	2.000	
6	100	2.000	
7	100	2.000	
8	100	2.000	
9	100	2.000	
10	100	2.000	
11	100	2.000	
12	100	2.000	
13	100	2.000	
14	100	2.000	
15	100	2.000	
16	100	2.000	
17	100	2.000	
18	100	2.000	
19	100	2.000	
20	100	2.000	
21	100	2.000	
22	100	2.000	
23	100	2.000	
24	100	2.000	
25	100	2.000	
*Düğüm noktası üzerindeki potansiyel sızıntının algoritma tarafından doğru tespit edilme oranı			
**Düğüm noktası üzerindeki sızıntı miktarının (2 l/s) algoritma tarafından farklı analizlerde hesaplanmış değerlerinin ortalaması			

5.5. Sızıntı Tespit Modelinin Hanoi Şebekesine Uygulanması

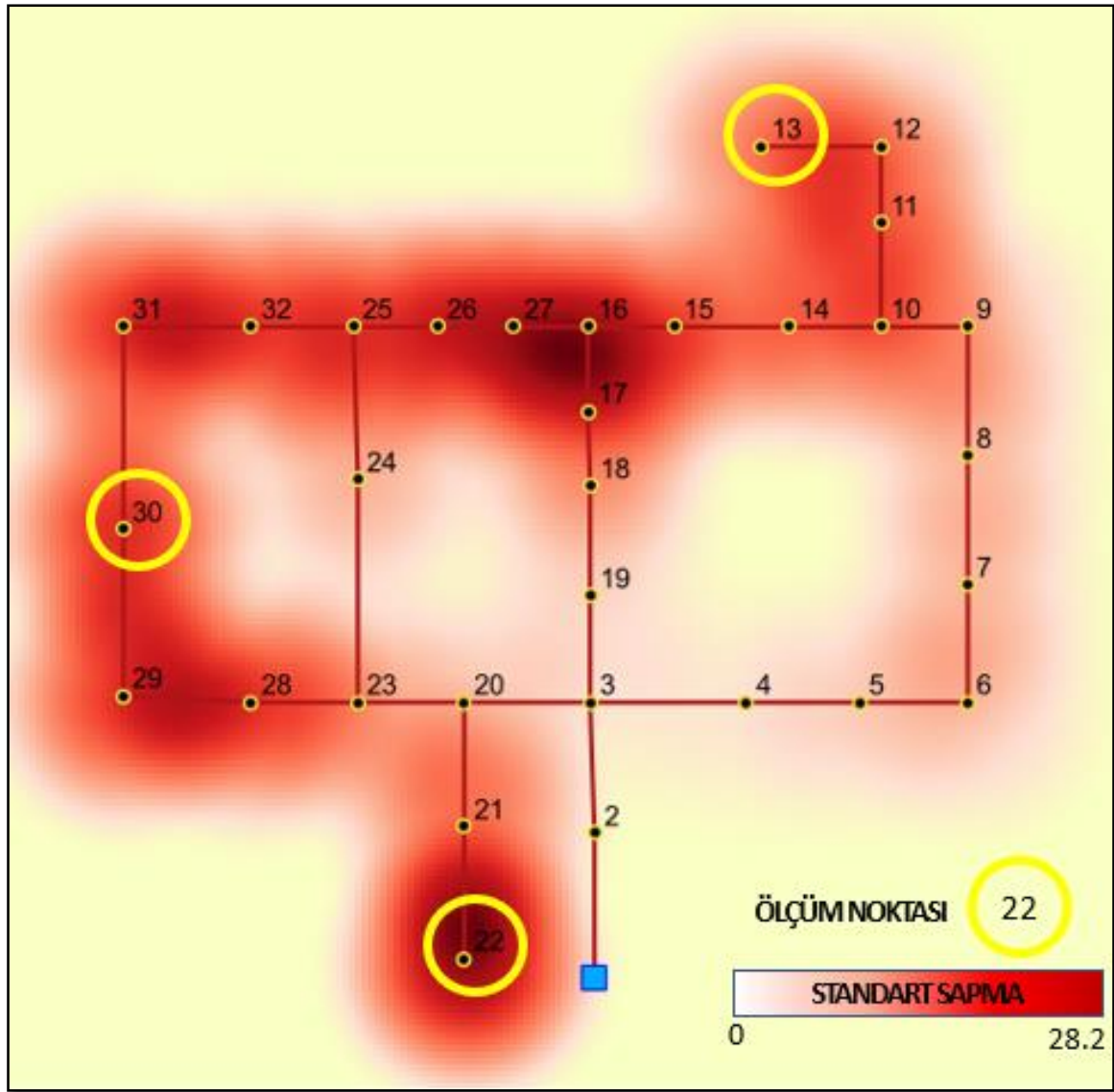
Hanoi Şebekesi, performans karşılaştırması için sıklıkla kullanılan ve literatürde geometrisi iyi bilinen bir şebekedir (Suribabu ve Neelakantan, 2006; Zheng vd.; 2012; Sheikholeslami vd., 2014; Bi vd., 2015). Sızıntı tespiti dahil farklı hedeflerle tasarlanmış birçok hidrolik optimizasyon problemine konu olmuştur. Hanoi şebekesi hidrolik modeli EPANET programı üzerinde oluşturulmuştur (Şekil 5.12). Şebeke; 1 adet rezervuar, 31 adet düğüm noktası ve 34 adet borudan oluşmaktadır.



Şekil 5.12 Sızıntı Tespit Modelinin Test Edilmesinde Kullanılan Hanoi Şebekesi Hidrolik Modeli

5.5.1. Hanoi şebekesi ölçüm noktalarının belirlenmesi

Deneysel şebeke için uygulanan DSSA yöntemi Hanoi şebekesi için de uygulanmış ve ısı haritası üretilmiştir (Şekil 5.13). Analiz sonucunda uygun ölçüm noktaları 13, 22 ve 30 no'lu düğüm noktaları olarak belirlenmiştir. Sonuçlar; sızıntı tespiti amaçlı optimum basınç sensörü yerleşimini sağlamayı hedefleyen bir yöntem öneren çalışmada (Ruiz vd.,2022) elde edilmiş olan sonuçlar ile uyumludur.



Şekil 5.13 Hanoi Şebekesi Düğüm Noktaları Standart Sapmaları Isı Haritası ve Seçilmiş Ölçüm Noktaları

5.5.2. Hanoi şebekesi sızıntı tespit analizi

Hanoi şebekesinde sızıntı araması gerçekleştirmek amacıyla sızıntı debisi 100 l/s (toplam debinin %1,8'i) olarak belirlenmiştir. Söz konusu sızıntı debisi sırası ile şebekedeki bütün düğüm noktalarına tanımlanmış ve her defasında belirlenmiş olan ölçüm noktalarındaki basınç düşüşlerinden yola çıkılarak sızıntı araması gerçekleştirilmiştir.

DeneySEL şebekede olduğu gibi Hanoi şebekesi de iki ayrı duruma göre test edilmiştir. Birinci durumda; toplam sızıntı miktarı algoritmaya bir kısıt olarak tanımlanmış fakat sızıntının düğüm noktalarına dağılımı için bir kısıt eklenmemiştir. İkinci durumda ise ek bir

kısıt olarak sızıntının sadece bir düğüm noktasında olabileceği algoritmaya tanımlanmış ve sızıntı dağılımına sınırlama getirilmiştir.

5.5.2.1. Hanoi şebekesi sızıntı dağılımı serbest bırakılmış analiz

Toplamda 31 adet düğüm noktası bulunan şebekede, sızıntı aramasında 21 adet (%67,7) düğüm noktası için her defasında algoritma tarafından belirlenen en yüksek sızıntı debisi doğru sonuca aittir (Çizelge 5.5). Geriye kalan 11 düğüm noktasından 6 adedi için doğru sonuç algoritma tarafından % 50'nin üzerinde bir oranla tespit edilebilmiştir. Toplamda 27 adet (%87,1) düğüm noktası için aramalarda tam sonuç bulma oranı %50'nin üzerinde gerçekleşmiştir.

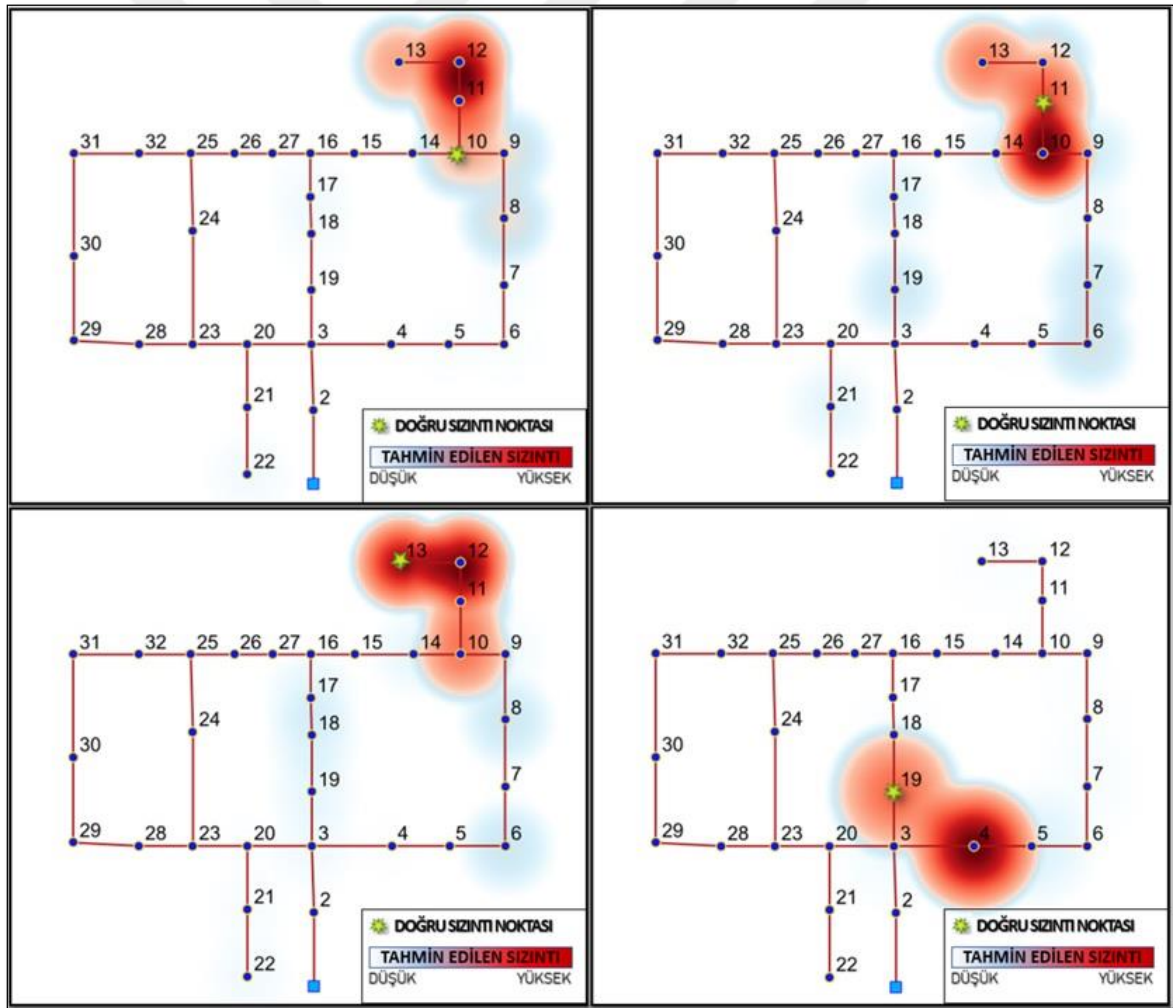
Sızıntı araması sırasında algoritma her düğüm noktası için 5'er defa çalıştırılmış olup algoritma tarafından bütün düğümler için belirlenen ortalama debiler dikkate alındığında bir düğüm noktasının sızıntı noktası olma durumunda sızıntı aramasında 31 düğüm noktasından 27 adetinin (%87,1) 1. sırada gelerek algoritma tarafından doğru şekilde tespit edildiği görülmüştür. 3 adet (%9,7) düğüm noktasında ise doğru sonuç 2. sırada işaretlenmiştir. 1 adet (%3,2) düğüm noktası ise ortalama debi olarak 4. sırada işaretlenmiştir.

Çizelge 5.5 Hanoi şebekesi sızıntı araması sonuçları

Düğüm No	Oran (%)*	Ortalama Miktar (l/s)**	Sıralama*** (31 Düğüm Noktası Arasında)
2	100	100.000	1
3	100	88.101	1
4	100	63.944	1
5	100	59.621	1
6	100	88.334	1
7	100	86.029	1
8	100	69.419	1
9	100	56.083	1
10	0	8.053	4
11	20	21.402	2
12	60	40.049	1
13	60	31.477	2
14	80	61.004	1
15	100	97.466	1
16	100	93.527	1
17	100	94.555	1
18	100	78.802	1
19	20	29.579	2
20	80	62.094	1
21	40	35.912	1
22	60	41.662	1
23	100	97.112	1
24	100	95.088	1
25	100	94.316	1
26	100	98.447	1
27	80	66.431	1
28	100	98.899	1
29	100	95.326	1
30	100	99.191	1
31	100	99.891	1
32	100	99.461	1
*Düğüm noktası üzerindeki potansiyel sızıntının algoritma tarafından doğru tespit edilme oranı **Düğüm noktası üzerindeki sızıntı miktarının (2 l/s) algoritma tarafından farklı analizlerde hesaplanmış değerlerinin ortalaması ***Düğüm noktası için algoritma tarafından hesaplanan ortalama miktarının sıralaması*Düğüm noktası üzerindeki potansiyel sızıntının algoritma tarafından doğru tespit edilme oranı			

Sızıntı aramalarında doğru tahmin edilme oranı olarak en düşük skora sahip 4 adet düğüm noktası için, tahminlere ait ısı haritaları QGIS programı kullanılarak aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur (Şekil 5.14). Isı haritaları incelendiğinde söz konusu 4 düğüm noktası için her ne kadar kesin bir doğrulukla sızıntı tahmini yapılamamış olsa da yine de gerçek sızıntı noktasına çok iyi bir yaklaşım gösterildiği ve sızıntı arama alanının ciddi oranda daraltıldığı görülmektedir.

31 adet düğüm noktası içeren Hanoi Şebekesi için yapılan sızıntı araması testlerinde; 3 adet sensör (ölçüm noktası) kullanılarak 27 adet düğüm noktasında oluşacak potansiyel sızıntılar kesin bir doğrulukla tahmin edilmiştir. Arda kalan 4 adet düğüm noktası için de gerçek sızıntı noktası yüksek ihtimalli olarak işaretlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında önerilen yöntemin testleri geçtiği ve su dağıtım şebekelerinde sızıntıların önlenmesi için güçlü bir araç olarak kullanılabileceği görülmektedir.



Şekil 5.14 Sızıntı Araması Sonucunda En Düşük Skora Sahip Olan Potansiyel Sızıntı Noktalarına ait Sızıntı Tahmin Isı Haritaları

5.5.2.2. Hanoi şebekesi sızıntı dağılımı sınırlandırılmış analiz

Deneyisel şebekede olduğu gibi Hanoi şebekesinde de algoritmaya sızıntının tek bir noktada olduğu bir optimizasyon kısıtı olarak eklendiği durumda algoritma her düğüm noktası için her aramasında doğru sonucu hem lokasyon hem de miktar olarak %100 doğrulukla bulmayı başarmıştır (Çizelge 5.6).

Çizelge 5.6 Hanoi şebekesi tek sızıntı kısıtı durumunda arama sonuçları

Düğüm No	Oran (%)*	Ortalama Miktar (l/s)**
2	100	100.000
3	100	100.000
4	100	100.000
5	100	100.000
6	100	100.000
7	100	100.000
8	100	100.000
9	100	100.000
10	100	100.000
11	100	100.000
12	100	100.000
13	100	100.000
14	100	100.000
15	100	100.000
16	100	100.000
17	100	100.000
18	100	100.000
19	100	100.000
20	100	100.000
21	100	100.000
22	100	100.000
23	100	100.000
24	100	100.000
25	100	100.000
26	100	100.000
27	100	100.000
28	100	100.000
29	100	100.000
30	100	100.000
31	100	100.000
32	100	100.000

*Düğüm noktası üzerindeki potansiyel sızıntının algoritma tarafından doğru tespit edilme oranı
**Düğüm noktası üzerindeki sızıntı miktarının (2 l/s) algoritma tarafından farklı analizlerde hesaplanmış değerlerinin ortalaması

5.6. Sonuçlar

Dünya nüfustaki hızlı artış ve artan kentsel nüfus oranı yanı sıra azalmakta olan sağlıklı su kaynakları birlikte düşünüldüğünde kısıtlı olan sağlıklı suyu etkili ve verimli bir şekilde kullanmak bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu çalışmada su dağıtım şebekelerinde (SDŞ) rapor edilmeyen sızıntıları tespit edebilmek ve sızıntı kaynaklı su kayıplarını azaltma motivasyonu ile bir sızıntı tahmin yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem, şebekedeki basınç verilerindeki değişimleri izleyerek sızıntının lokasyonunu tahmin etmektedir. SDŞ'lerin karmaşık geometrisi ve hidrolik hesaplamalardaki iteratif süreçler ile beraber sızıntı tahmin problemine geleneksel matematik yöntemleri ile çözüm getirmek mümkün değildir. Bundan dolayı, öncelikle EPANET-MATLAB araç seti kullanılarak SDŞ için bir dizi hidrolik analizler yapılarak sızıntı tahmin modelleri (STM) oluşturulmuştur.

SDŞ'lerinde optimum sensör (basınç ölçüm noktası) yerleşimi için düğüm noktalarının sızıntı kaynaklı basınç düşüş veri setlerine ait standart sapma verilerini kullanan bir yöntem olan Düğüm Standart Sapma Analizi (DSSA) adı verilen pratik bir yöntem önerilmiştir. DSSA yönteminin sonuçları, SDŞ'ler için optimum sensör yerleşimini bulmayı amaçlayan daha ileri çalışmalarda elde edilmiş sonuçlar ile uyumludur.

SDŞ üzerinde belirlenen ölçüm noktalarından gelen basınç verileri ile hidrolik model üzerinde hesaplanmış olan basınç verileri arasında sızıntı durumunda oluşacak olan farkları önceden hesaplanmış olan STM verilerini kullanarak sızıntının yerini ve büyüklüğünü bulmayı hedefleyen minimizasyon probleminin yapısı oluşturulmuştur.

Minimizasyon probleminin çözümü için, doğadaki evrimsel süreci baz alarak en uygun çözüme gitmeyi amaçlayan Genetik Algoritmalar (GA) yöntemi kullanılmıştır.

Önerilen yöntem iki adet SDŞ üzerinde test edilmiştir. Birincisi bu çalışma özelinde oluşturulmuş olan bir deneysel şebekedir. İkinci SDŞ ise, literatürde sızıntı tahmin çalışmaları başta olmak üzere farklı birçok alanda çalışmaya konu olmuş ve geometrisi iyi bilinen Hanoi şebekesidir. Her iki SDŞ için de, bütün düğüm noktaları sırası ile sızıntı noktası olarak işaretlenmiş ve algoritma her düğüm noktası için birden çok defa çalıştırılarak sonuçlar kaydedilmiştir.

Algoritmanın bir sızıntı aramasında en yüksek sızıntı miktarı olarak işaretlediği düğüm noktası eğer gerçek sızıntı noktası ise doğru sonuç, değilse yanlış sonuç olarak bakıldığı zaman 25 adet düğüm noktasına sahip deneysel şebekede yapılan analizler sonucunda; 12 adet düğüm noktasında sızıntı oluşması durumunda her defasında doğru

sonuç bulunmuştur. Diğer 13 adet düğüm noktasında ise aramalarda %85 oranında doğru sonuç bulunabilmiştir. Kümülatif doğru sonuç oranı ise %92'dir. Deneysel şebekede herhangi bir düğüm noktası için algoritma en çok 5. defa çalıştırmadan sonra en çok işaretlenen düğüm noktası doğru sonucu vermektedir. Algoritmaya sızıntının sadece tek bir düğüm noktasında olduğu bilgisi bir kısıt olarak tanımlandığında ise doğru sonuç çok kısa sürelerde ve %100 doğruluk oranı ile bulunmuştur.

31 adet düğüm noktasından oluşan Hanoi şebekesi için yapılan analizlerde 27 adet düğüm noktasında oluşacak potansiyel sızıntılar kesin bir doğrulukla tahmin edilmiştir. Arda kalan 4 adet düğüm noktası için de gerçek sızıntı noktası yüksek ihtimalli olarak işaretlenmiştir. En kötü tahmin edilen 4 düğüm noktası için oluşturulan ısı haritalarında da görüldüğü üzere, algoritma gerçek sızıntı noktasını yine yüksek ihtimalli olarak işaretlemiş olup sadece en yüksek ihtimali gerçek sızıntı noktasının komşu düğüm noktalarında işaretlemiştir. Deneysel şebekede olduğu gibi, algoritmaya sızıntıyı tek bir noktada araması kısıtı eklendiğinde ise her düğüm noktası için doğru sonuç çok kısa sürelerde bulunmuştur.

Analiz sonuçları göstermektedir ki önerilen yöntem, su yönetimi aşamalarını tamamlamış, şebekelerindeki su kayıplarını kabul edilebilir seviyeye düşürmüş, şebekelerine ait hidrolik modelleri olan ve sahadaki hidrolik verileri takip eden su idareleri, şirketleri ve çalışanları için sahada oluşabilecek yeni bir sızıntının yerini anında tahmin etme konusunda ciddi destek sağlayacaktır. Bu sayede sahada sızıntı araması için harcanacak her türlü zaman, işçilik, ekipman, vb. maliyetleri azaltmanın yanı sıra sızıntı tespit sürelerini de kısaltarak su kayıplarının daha az olmasına yardımcı olacaktır. Su yönetiminin henüz başlarında olan su idareleri ve şirketleri için de sızıntı aramalarında alan daraltmasını sağlayarak yine maliyetlerin azaltılmasına ve çok değerli olan su kaynaklarının korunmasına destek olacaktır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada “İçme Suyu Şebekelerinde Sezgisel ve İstatistiksel Yöntemlerle Sızıntı Tespit Modelinin Oluşturulması” konusuna cevaplar aranmıştır. Çalışmada; kentsel su dağıtım şebekelerinde rapor edilmeyen sızıntılar yolu ile kaybolmakta olan su miktarının azaltılması dolayısıyla International Water Association ve American Water Works Association (IWA/AWWA) tarafından önerilen “Standart Su Dengesi Analizi” tablosunda Gelir Getirmeyen Su (GGS) miktarının azaltılması hedeflenmektedir. Bu sayede, su dağıtım şebekelerinin (SDŞ) yönetiminden sorumlu kurumlar için şebekede meydana gelen sızıntılar sebebi ile oluşan fazladan maliyetler azalacak, su birim maliyetleri azalarak nihai kullanıcıların ihtiyaç duydukları temiz suya daha düşük maliyetlerle ulaşmasını sağlanacak ve kısıtlı olan su kaynakları daha verimli kullanılmış olacaktır.

Çalışma, SDŞ’lerin işletmesinden sorumlu kişi ve kuruluşlara sürdürülebilir bir su yönetimi konusunda stratejiler sunmaktadır. Bu kapsamda, çalışmada hidrolik model, tüketim modeli, sızıntı tahmin modeli gibi araçlar oluşturulmuştur. Çalışmalar esnasında yapılan; modellerin oluşturulması, gerekli olan veriler, gerçek saha koşullarındaki SDŞ’ler üzerinden yapılan çalışmalar, izlenecek stratejiler, olası karşılaşılabilecek güçlükler, karşılaşılabilecek güçlükler karşısında çözüm önerileri, deneysel SDŞ’ler üzerinden yapılan test aşamaları, literatürde iyi bilinen ve benzer çalışmalara konu olmuş olan SDŞ’ler üzerinden yapılan test aşamaları açıklanmıştır.

Bu çalışma; SDŞ’lerde hesap edilmemiş bir sızıntı oluştuğunda hidrolik yüksekliklerde dolayısı ile sahada ölçülen basınçlarda düşüş gözlemlenecektir teorisine dayanmaktadır. Sızıntı oluşması durumunda şebeke üzerinde farklı ölçüm noktalarında kaydedilecek olan basınç düşüşlerinin büyüklüğü, oluşan sızıntının miktarı ve oluştuğu lokasyon ile bir ilişki içerisindedir. Literatürde benzer çıkış noktasından çıkarak sızıntıların miktarını tahmin etmeyi amaçlayan veya şebeke üzerinde sızıntının oluştuğu bölgeyi bulmayı amaçlayan benzer çalışmalar mevcuttur (Vitkovsky vd., 2000; Casillas vd., 2013; Savic vd., 2018).

SDŞ üzerinde oluşan sızıntılardan dolayı oluşacak olan basınç düşüşleri sızıntının büyüklüğü ve lokasyonu ile ilişkili olsa da söz konusu ilişki doğrusal değildir ve bu ilişkiyi kullanarak geleneksel yöntemlerle sızıntı tespit problemini çözmek mümkün değildir. Bundan dolayı benzer çalışmalarda sıklıkla sezgisel optimizasyon yöntemlerine başvurulmaktadır (Meseguer vd., 2015; Fallahi vd., 2021; Quiñones-Grueiro vd., 2021).

Sızıntı tespit problemine çözüm arayan benzer çalışmalarda hidrolik veriler (boru çapı, boru uzunluğu, malzeme özellikleri, tüketim verileri, vb.) ile şebeke ölçümleri (basınç, debi, vb.) optimizasyonun girdi parametresidir. Optimizasyon sürecinde söz konusu hidrolik verilere dayalı hesaplamalar ile şebeke ölçümleri arasındaki farkların minimuma indirilmesi hedeflenir.

Optimizasyon (en iyileme) yöntemleri, rastgele bir düzen içinde etkili ve hızlı bir şekilde çözüme ulaşabilmeyi hedeflemektedir (Şen, 2004). Sezgisel teknikler, çözüm uzayında mevcut olan çözüm noktalarının tamamını aramak yerine belirlenen tekniğe göre sınırlı sayıda deneme yaparak çözümü ararlar, matematiksel model kurularak çözülemeyecek olan problemlerin çözümü noktasında başvurulduklarından dolayı da literatürdeki sezgisel yöntemler kesin sonucu garanti edemezler (Özdemir ve Cura, 2021). Literatürde, matematiksel modelle çözümü olmayan sızıntı tespit probleminin çözümü noktasında sezgisel optimizasyon yöntemlerini kullanarak çözüm bulan çok sayıda çalışma mevcut olmakla beraber söz konusu çalışmaların; kısıtlı koşullar şartları altında çalışabilmek, sızıntı lokasyonu belirleme noktasında her ne kadar alan daraltılsa bile çoğunlukla daraltılması planlanan alan büyük bir alan olarak çıktığından dolayı sızıntı arama maliyetlerinde kayda değer bir azalma sağlayamamak, karmaşık şebekelerde lokal minimumlara takılarak gerçek çözüm noktasından uzaklaşabilmek gibi dezavantajları olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada sızıntı tespit problemine çözüm ararken benzer çalışmalardaki dezavantajların neden kaynaklıyor olduğu sorusuna yanıt aranmıştır. Bahsedildiği üzere sızıntı tespit problemine sezgisel optimizasyon yöntemleri ile çözüm arayan modeller, saha ölçümleri ile hidrolik hesaplamalar arasındaki farkı asgari düzeye indirmeyi hedeflerler. Sezgisel optimizasyon yöntemleri ise büyük arama uzaylarında sınırlı sayıda deneme yaparak çözüm ararlar ve her denemede saha ölçümleri ile hidrolik hesaplamalar arasındaki fark hesaplanır. Saha ölçümleri sabit değerler olmakla beraber, hidrolik hesaplamalardan gelen değerler her denemede tahmin edilmiş olan sızıntı dağılımına göre yeniden hesaplanmak zorundadır. Sezgisel optimizasyon yöntemlerinin iteratif yapısı hidrolik hesaplamalardaki iteratif yapı ile birleşince, oluşturulan model her denemede sayısız iterasyona maruz kalmaktadır. Bundan dolayı optimizasyon yavaş ilerlemekte ve lokal minimumlara takılarak gerçek çözümünden uzaklaşmaktadır.

Bu çalışmada hidrolik hesaplamaların iteratif yapısının optimizasyon sürecinin dışına çıkarılması hedeflenmiştir ve bu çalışmanın benzer çalışmalara göre en önemli ayırt edici

yönünün bu nokta olduğu düşünülmektedir. Sızıntı tespit probleminin çözümü için oluşturulan model iki parçalı hibrit bir yapıda tasarlanmıştır. Birinci aşamada, sızıntı tespit problemine çözüm aranacak şebeke üzerinde EPANET-MATLAB araç seti kullanılarak sızıntı büyüklüğü, belirlenen çözüm hassasiyeti ve şebeke düğüm sayısı parametrelerinin büyüklüğü ile doğru orantılı olarak artan sayıda bir dizi hidrolik simülasyonlar gerçekleştirilmektedir. Yapılan hidrolik simülasyonlar neticesinde her bir düğüm noktası için oluşması muhtemel farklı miktarlardaki sızıntıların diğer düğüm noktalarında tetikleyeceği basınç düşüşleri bilgilerinin olduğu 3 boyutlu bir Sızıntı Tahmin Modeli (STM) oluşmaktadır. Oluşan STM üzerindeki bilgiler doğrusal denklemlere dönüştürülerek şebekenin bir nevi doğrusal denklemlere dayalı hidrolik cetveli oluşturulmaktadır. İkinci aşamada ise modern sezgisel optimizasyon yöntemlerinden biri olan Genetik Algoritmalar (GA) tekniğine dayalı olarak optimizasyon süreci başlamaktadır. Bu sayede optimizasyon her denemede daha az hesaplama yapmakta ve gerçek çözüme gitme ihtimali artarken lokal minimumlara daha az takılmaktadır.

Yöntem oluşturulurken deneysel bir şebeke üzerinde sayısız denemeler yapılmış ve tatmin edici sonuçlar elde edildikten sonra literatürde sızıntı tespit probleminin çözümü başta olmak üzere bir çok hidrolik hesaplamalara dayalı optimizasyon problemi için çalışılmış olan ve iyi bilinen Hanoi şebekesi üzerinde test edilmiştir.

31 adet düğüm noktasından oluşan Hanoi şebekesi için yapılan analizlerde 27 adet düğüm noktasında oluşacak potansiyel sızıntılar kesin bir doğrulukla tahmin edilmiştir. Arda kalan 4 adet düğüm noktası için de gerçek sızıntı noktası algoritma tarafından yüksek ihtimalli olarak işaretlenmiştir. Sızıntı yerinin doğru tahmin edilme konusunda en düşük skora sahip 4 düğüm noktası için oluşturulan ısı haritaları oluşturulmuştur. Isı haritalarında algoritmanın tahmin ettiği sızıntı noktasının gerçek sızıntı noktasına çoğunlukla komşu olduğu ve her ne kadar gerçek sızıntı noktası en yüksek skoru alamamış olsa da yine de algoritma tarafından en yüksek skorlu düğüm noktaları arasında gösterildiği görülmüştür.

Bu çalışmada önerilen metodolojinin ihtiyaç duyduğu kaynaklar; sınırları belirlenmiş olan bir SDS, kalibrasyonu tamamlanmış bir hidrolik model, su şebekesi üzerinde giriş debisi ölçümleri, dağıtım şebekesi üzerinden basınç ölçümleri, hidrolik analiz yazılımı ve optimizasyon algoritması yazılımıdır. Başka bir deyişle, bu çalışmada önerilen yöntemin faydalı bir şekilde kullanılabilmesi için su yönetimi konusunda belirli bir aşama kaydedilmiş olması gerekmektedir. Söz konusu kaynaklardan hidrolik modelleme ve kalibrasyon işlemleri bir çok su idaresi tarafından ya hiç kullanılmamakta ya da çok az kullanılmaktadır.

Yine de bu çalışmada önerilen yöntemin uygulanmasının bütün su idarelerine ciddi katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Su yönetimi çalışmaları konusunda geri kalmış idareler için ilk etapta sızıntı tespiti konusunda alan daraltma konusunda fayda sağlayacağı düşünülen çalışmanın, ileri safhalarda idareleri hidrolik modelleme ve kalibrasyon çalışmaları konusunda da zorlayacağı öngörülerek bütün su idareleri tarafından uygulanması gerektiği tavsiye edilmektedir.

Çalışmalar sırasında, su yönetimi konusunda ilerleme kaydedememiş su idarelerine rehber olması metodolojinin ihtiyaç duyduğu kaynaklardan olması sebebi ile hidrolik modelleme konusu da çalışılmıştır. Söz konusu çalışmalar, Malatya ili içme suyu şebekesinde izole bir alt bölge (DMA) olan ve çok eski yıpranmış borulardan oluşan şehrin ticari merkezi olması dolayısı ile kazılı müdahale konusunun çok zor olduğu karmaşık bir şebeke yapısına sahip Akpınar DMA bölgesi üzerinde yapılmıştır. Çalışma alanında sorumlu idare olan Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi'nden (MASKİ) temin edilen veriler ile hidrolik model oluşturulmuştur. Saha ölçümleri ile hidrolik model sonuçları arasında başlangıçta ciddi farkların hesaplandığı şebekede kalibrasyon süreçleri tamamlanarak farklar asgari düzeye indirilebilmiştir. Kalibrasyon sürecinde ilgili idare MASKİ'ye geri bildirimlerde bulunarak şebeke üzerindeki bilgi ve kontrolün artması sağlanmıştır. İyi bir hidrolik modelin ihtiyaç duyduğu en önemli kaynak olan tüketim modeli oluşturulması süreci de ayrıca bu çalışmalar esnasında tamamlanmış ve sonuçlar paylaşılmıştır.

Sonuç olarak, artan dünya nüfusu ve hızla büyüyen kentlere tanıklık ettiğimiz içerisinde bulunduğumuz yüzyılda kentlerimizin sağlıklı bir şekilde büyümesi için ev sahipliği ettiği insanlara temiz içme suyu sunabilmek en önemli sorumluluklardan biridir. Küresel ısınma ve azalan su kaynakları ile beraber düşünülünce sürdürülebilir şehirlere sahip olmak için su kaynaklarını verimli kullanmak bir zorunluluktur. SDŞ'lerde kısıtlı içme suyunun israf olmasına sebep olan rapor edilmeyen sızıntıları tespit etmeyi hedefleyen bu çalışmada belirlenmiş olan stratejilerin ilgili kişi ve kurumlar tarafından uygulanması sürdürülebilir şehirlere sahip olabilmek, işletme maliyetlerini azaltarak nihai kullanıcıların temiz suya kesintisiz ve daha düşük maliyetler ile ulaşabilmesini sağlamak açısından güçlü bir şekilde tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Aamo, O. M.** (2015). Leak detection, size estimation and localization in pipe flows. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 61(1), 246-251.
- Abdulshaheed, A., Mustapha, F., & Ghavamian, A.** (2017). A pressure-based method for monitoring leaks in a pipe distribution system: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 902-911.
- Aboelnga, H., Saidan, M., Al-Weshah, R., Sturm, M., Ribbe, L., & Frechen, F. B.** (2018). Component analysis for optimal leakage management in Madaba, Jordan. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 67(4), 384-396.
- Adachi, S., Takahashi, S., Zhang, X., Umeki, M., & Tadokoro, H.** (2015). Estimation of area leakage in water distribution networks: a real case study. *Procedia Engineering*, 119, 4-12.
- Adedeji, K., Hamam, Y., Abe, B., & Abu-Mahfouz, A. M.** (2017). Leakage detection algorithm integrating water distribution networks hydraulic model. <http://hdl.handle.net/10204/10125>
- Ahadi, M., & Bakhtiar, M. S.** (2010). Leak detection in water-filled plastic pipes through the application of tuned wavelet transforms to acoustic emission signals. *Applied Acoustics*, 71(7), 634-639.
- Akkaya, A. E., & Talu, M. F.** (2017). Su boru hatlarında sızıntı konum tespiti için genişletilmiş kalman filtresi tabanlı IMU sensör füzyonu uygulaması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(4), 1393-1404.
- Aksela, K., Aksela, M., & Vahala, R.** (2009). Leakage detection in a real distribution network using a SOM. *Urban Water Journal*, 6(4), 279-289.
- Al Qahtani, T., Yaakob, M. S., Yidris, N., Sulaiman, S., & Ahmad, K. A.** (2020). A review on water leakage detection method in the water distribution network. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 68(2), 152-163.
- Alkasseh, J. M., Adlan, M. N., Abustan, I., Aziz, H. A., & Hanif, A. B. M.** (2013). Applying minimum night flow to estimate water loss using statistical

modeling: a case study in Kinta Valley, Malaysia. *Water resources management*, 27, 1439-1455.

Almandoz, J., Cabrera, E., Arregui, F., Cabrera Jr, E., & Cobacho, R. (2005). Leakage assessment through water distribution network simulation. *Journal of water resources planning and management*, 131(6), 458-466.

Alonso, J. M., Alvarruiz, F., Guerrero, D., Hernández, V., Ruiz, P. A., Vidal, A. M., ... & Ulanicki, B. (2000). Parallel computing in water network analysis and leakage minimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126(4), 251-260.

Alperovitz, E., and Shamir, U. (1977). "Design of optimal water distribution systems." *Water Resour. Eng.*, 13(6), 885–900.

Alvisi, S., & Franchini, M. (2009). Multiobjective optimization of rehabilitation and leakage detection scheduling in water distribution systems. *Journal of water resources planning and management*, 135(6), 426-439.

Al-Washali, T., Sharma, S., Lupoja, R., Al-Nozaily, F., Haidera, M., & Kennedy, M. (2020). Assessment of water losses in distribution networks: Methods, applications, uncertainties, and implications in intermittent supply. *Resources, Conservation and Recycling*, 152(September 2019), 104515. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104515>

Arabacı, E., & Dursun, Ş. (2019). İçme suyu altyapı sistemlerinde hidrolik modelleme: Konya örneği. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 2(4), 177-185.

Araujo, L. S., Ramos, H., & Coelho, S. T. (2006). Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Water resources management*, 20, 133-149.

Arunkumar, M., & Mariappan, V. N. (2011). Water demand analysis of municipal water supply using epanet software. *International Journal on Applied Bioengineering*, 5(1), 9-19.

AWWA Water Loss Control Committee. (2003). Committee Report: Applying worldwide BMPs in water loss control. *Journal-American Water Works Association*, 95(8), 65-79.

- Aydın, Ş. E.** (2017). YAPAY ZEKÂ TEKNOLOJİSİ. Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Ve Teknoloji Yönetimi, 32.
- Bakanlığı, T. O. v. S.** (2014). İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerindeki Su Kayıplarının Kontrolü Yönetmeliği. 8 Mayıs 2014 Tarihli Resmi Gazete, (28994)-1.
- Bello, O., Abu-Mahfouz, A. M., Hamam, Y., Page, P. R., Adedeji, K. B., & Piller, O.** (2019). Solving management problems in water distribution networks: A survey of approaches and mathematical models. *Water*, 11(3), 562.
- Berardi, L., & Giustolisi, O.** (2021). Calibration of design models for leakage management of water distribution networks. *Water Resources Management*, 35(8), 2537-2551.
- Berardi, L., Laucelli, D. B., Simone, A., Mazzolani, G., & Giustolisi, O.** (2016). Active Leakage Control with WDNNetXL. *Procedia Engineering*, 154, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.420>
- Bi, W., Dandy, G. C., & Maier, H. R.** (2015). Improved genetic algorithm optimization of water distribution system design by incorporating domain knowledge. *Environmental Modelling & Software*, 69, 370-381.
- Bosco, C., Campisano, A., Modica, C., & Pezzinga, G.** (2020). Application of rehabilitation and active pressure control strategies for leakage reduction in a case-study network. *Water*, 12(8), 2215.
- Bozkurt, C., Firat, M., Ates, A., Yilmaz, S., & Özdemir, Ö.** (2022). Strategic water loss management: current status and new model for future perspectives. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 40(2), 310-322.
- Boztaş, F., Özdemir, Ö., Durmuşçelebi, F. M., & Firat, M.** (2019). Analyzing the effect of the unreported leakages in service connections of water distribution networks on non-revenue water. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 4393-4406.
- Brentan, B. M., Luvizotto Jr, E., Herrera, M., Izquierdo, J., & Pérez-García, R.** (2017). Hybrid regression model for near real-time urban water demand forecasting. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 309, 532-541.

- Buchberger, S. G., & Nadimpalli, G.** (2004). Leak estimation in water distribution systems by statistical analysis of flow readings. *Journal of water resources planning and management*, 130(4), 321-329.
- Candelieri, A., Conti, D., & Archetti, F.** (2014). A graph based analysis of leak localization in urban water networks. *Procedia Engineering*, 70, 228-237.
- Casillas, M. V., Garza-Castañón, L. E., & Puig, V.** (2013, July). Extended-horizon analysis of pressure sensitivities for leak detection in water distribution networks: Application to the Barcelona network. In *2013 European Control Conference (ECC)* (pp. 401-409). IEEE.
- Casillas, M. V., Puig, V., Garza-Castanón, L. E., & Rosich, A.** (2013). Optimal sensor placement for leak location in water distribution networks using genetic algorithms. *Sensors*, 13(11), 14984-15005.
- Chan, T. K., Chin, C. S., & Zhong, X.** (2018). Review of current technologies and proposed intelligent methodologies for water distributed network leakage detection. *Ieee Access*, 6, 78846-78867.
- Creaco, E., & Pezzinga, G.** (2015). Multiobjective optimization of pipe replacements and control valve installations for leakage attenuation in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(3), 04014059.
- Darsana, P., & Varija, K.** (2018). Leakage detection studies for water supply systems—A review. *Water Resources Management*, 141-150.
- di Nardo, A., di Natale, M., Giudicianni, C., Santonastaso, G. F., Tzatchkov, V., & Varela, J. M. R.** (2017). Economic and energy criteria for district meter areas design of water distribution networks. *Water (Switzerland)*, 9(7), 1–13. <https://doi.org/10.3390/w9070463>
- Diao, X., Jiang, J., Shen, G., Chi, Z., Wang, Z., Ni, L., ... & Hao, Y.** (2020). An improved variational mode decomposition method based on particle swarm optimization for leak detection of liquid pipelines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 143, 106787.

- Dilcan, Ç. C., Çapar, C., Korkmaz, A., İritaş, Ö., Karaaslan, Y., & Selek, B.** (2018). İçme Suyu Şebekelerinde Görülen Su Kayıplarının Dünyada ve Ülkemizdeki Durumu. *Anahtar Dergisi*, 354, 10-18.
- Doğan, B. S., & Sag, T.** (2021). Solution of Water Distribution Networks Design with Evolutionary Optimization Techniques. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 638-642.
- Eliades, D. G., & Polycarpou, M. M.** (2012). Leakage fault detection in district metered areas of water distribution systems. *Journal of Hydroinformatics*, 14(4), 992-1005.
- Eliades, D. G., Kyriakou, M., Vrachimis, S., & Polycarpou, M. M.** (2016, November). EPANET-MATLAB toolkit: An open-source software for interfacing EPANET with MATLAB. In *Proc. 14th international conference on computing and control for the water industry (ccwi)* (Vol. 8).
- Emel, G. G., & Taşkın, Ç.** (2002). Genetik algoritmalar ve uygulama alanları. *Uludağ Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 21(1), 129-152.
- Fallahi, H., Jalili Ghazizadeh, M., Aminnejad, B., & Yazdi, J.** (2021). Leakage detection in water distribution networks using hybrid feedforward artificial neural networks. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 70(5), 637-653.
- Fan, H., Tariq, S., & Zayed, T.** (2022). Acoustic leak detection approaches for water pipelines. *Automation in Construction*, 138, 104226.
- Farley, M.** (2008). Finding ‘difficult’leaks. *International Water Association Specialist Group-Efficient Operation and Management*.
- Feldman, M.** (2009, April). Aspects of energy efficiency in water supply systems. In *Proceedings of the 5th IWA water loss reduction specialist conference* (Vol. 26, p. 30).
- Ferrandez-Gamot, L., Busson, P., Blesa, J., Tornil-Sin, S., Puig, V., Duviella, E., & Soldevila, A.** (2015). Leak localization in water distribution networks using pressure residuals and classifiers. *IFAC-PapersOnLine*, 48(21), 220-225.

- Firat, M., Yilmaz, S., Ateş, A., & Özdemir, Ö.** (2021). Determination of economic leakage level with optimization algorithm in water distribution systems. *Water Economics and Policy*, 7(03), 2150014.
- Fuchs, H. V., & Riehle, R.** (1991). Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis. *Applied acoustics*, 33(1), 1-19.
- Fujiwara, O., & Khang, D. B.** (1990). A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks. *Water resources research*, 26(4), 539-549.
- Giustolisi, O., & Walski, T. M.** (2012). Demand components in water distribution network analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(4), 356-367.
- Greco, M., & Giudice, G. D.** (1999). New approach to water distribution network calibration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(8), 849-854.
- Gupta, A., & Kulat, K. D.** (2018). A selective literature review on leak management techniques for water distribution system. *Water Resources Management*, 32, 3247-3269.
- Hajibandeh, E., & Nazif, S.** (2018). Pressure zoning approach for leak detection in water distribution systems based on a multi objective ant colony optimization. *Water Resources Management*, 32(7), 2287-2300.
- Hamam, Y. M., & Brameller, A.** (1971, November). Hybrid method for the solution of piping networks. In *Proceedings of the institution of electrical engineers* (Vol. 118, No. 11, pp. 1607-1612). IET Digital Library.
- Hu, X., Han, Y., Yu, B., Geng, Z., & Fan, J.** (2021). Novel leakage detection and water loss management of urban water supply network using multiscale neural networks. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123611.
- Hu, Z., Chen, B., Chen, W., Tan, D., & Shen, D.** (2021). Review of model-based and data-driven approaches for leak detection and location in water distribution systems. *Water Supply*, 21(7), 3282-3306.
- Huang, Y. C., Lin, C. C., & Yeh, H. D.** (2015). An optimization approach to leak detection in pipe networks using simulated annealing. *Water Resources Management*, 29(11), 4185-4201.

- Hunaidi, O., Chu, W., Wang, A., & Guan, W.** (2000). Detecting leaks in plastic pipes. *Journal-American Water Works Association*, 92(2), 82-94.
- Irwin, E. G., Jayaprakash, C., & Munroe, D. K.** (2009). Towards a comprehensive framework for modeling urban spatial dynamics. *Landscape ecology*, 24, 1223-1236.
- Islam, M. S., Sadiq, R., Rodriguez, M. J., Francisque, A., Najjaran, H., & Hoorfar, M.** (2011). Leakage detection and location in water distribution systems using a fuzzy-based methodology. *Urban Water Journal*, 8(6), 351-365.
- Jensen, H. A., & Jerez, D. J.** (2019). A Bayesian model updating approach for detection-related problems in water distribution networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 185, 100-112.
- Kafle, M. D., Fong, S., & Narasimhan, S.** (2022). Active acoustic leak detection and localization in a plastic pipe using time delay estimation. *Applied Acoustics*, 187, 108482.
- Kammoun, M., Kammoun, A., & Abid, M.** (2022). Leak detection methods in water distribution networks: a comparative survey on artificial intelligence applications. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 13(3), 04022024.
- Kapelan, Z. S., Savic, D. A., & Walters, G. A.** (2003). A hybrid inverse transient model for leakage detection and roughness calibration in pipe networks. *Journal of Hydraulic Research*, 41(5), 481-492.
- Kara, S., Karadirek, I. E., Muhammetoglu, A., & Muhammetoglu, H.** (2016). Hydraulic modeling of a water distribution network in a tourism area with highly varying characteristics. *Procedia Engineering*, 162, 521-529.
- Karadirek, I. E., Kara, S., Yilmaz, G., Muhammetoglu, A., & Muhammetoglu, H.** (2012). Implementation of hydraulic modelling for water-loss reduction through pressure management. *Water resources management*, 26, 2555-2568.
- Kayaalp, F., Zengin, A., Kara, R., & Zavrak, S.** (2017). Leakage detection and localization on water transportation pipelines: a multi-label classification approach. *Neural Computing and Applications*, 28, 2905-2914.

- Keskenler, M. F., & Keskenler, E. F.** (2017). Geçmişten günümüze yapay sinir ağları ve tarihçesi. *Takvim-i Vekayi*, 5(2), 8-18.
- Kutylowska, M.** (2015). Neural network approach for failure rate prediction. *Engineering Failure Analysis*, 47, 41-48.
- Lambert, A. O.** (2002). International report: water losses management and techniques. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2(4), 1-20.
- Lambert, A. O., Brown, T. G., Takizawa, M., & Weimer, D.** (1999). A review of performance indicators for real losses from water supply systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 48(6), 227-237.
- Lansey, K. E., El-Shorbagy, W., Ahmed, I., Araujo, J., & Haan, C. T.** (2001). Calibration assessment and data collection for water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(4), 270-279.
- Lee, H., Chung, S., Yu, M., Koo, J., Hyun, I., & Lee, H.** (2005). Applicable background minimum night flow for leakage management of small district metered areas in Korea. *Water Science and Technology: Water Supply*, 5(3-4), 181-188.
- Leu, S. S., & Bui, Q. N.** (2016). Leak prediction model for water distribution networks created using a Bayesian network learning approach. *Water resources management*, 30, 2719-2733.
- Li, J., Wang, C., Zhang, W., & Lu, C.** (2021). A novel multi-leak sensor deployment strategy in water distribution networks based on the LSDR-JMI method. *Control Engineering Practice*, 107, 104691.
- Lijuan, W., Hongwei, Z., & Hui, J.** (2012). A leak detection method based on EPANET and genetic algorithm in water distribution systems. In *Software Engineering and Knowledge Engineering: Theory and Practice: Volume 1* (pp. 459-465). Springer Berlin Heidelberg.
- Liu, F., Zhuang, P., Anh, V., Turner, I., & Burrage, K.** (2007). Stability and convergence of the difference methods for the space–time fractional advection–diffusion equation. *Applied Mathematics and Computation*, 191(1), 12-20.
- Mamo, T. G., Juran, I., & Shahrour, I.** (2014). Virtual DMA municipal water supply pipeline leak detection and classification using advance pattern recognizer multi-class SVM. *Journal of Pattern Recognition Research*, 9(1), 25-42.

- MASKİ Genel Müdürlüğü.** (2016). Malatya Su Temini Rehabilitasyon Projesi, Şebeke Sayısal Modeli Raporu. 42-43
- May, J.** (1994). Pressure dependent leakage. *World water and environmental engineering*, 17(8), 10.
- McCabe, B., AbouRizk, S. M., & Goebel, R.** (1998). Belief networks for construction performance diagnostics. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 12(2), 93-100.
- Menapace, A., Avesani, D., Righetti, M., Bellin, A., & Pisaturo, G.** (2018). Uniformly distributed demand EPANET extension. *Water resources management*, 32(6), 2165-2180.
- Meseguer, J., Mirats-Tur, J. M., Cembrano, G., & Puig, V.** (2015). Model-based monitoring techniques for leakage localization in distribution water networks. *Procedia Engineering*, 119, 1399-1408.
- Mohamed, M. B.** (2011). Low cost nanomaterials for water desalination and purification. United Nations UNSCO.
- Mohammed, E. G., Zeleke, E. B., & Abebe, S. L.** (2021). Water leakage detection and localization using hydraulic modeling and classification. *Journal of Hydroinformatics*, 23(4), 782-794.
- Morais, D. C., & de Almeida, A. T.** (2007). Group decision-making for leakage management strategy of water network. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2), 441-459.
- Moslehi, I., Jalili-Ghazizadeh, M., & Yousefi-Khoshqalb, E.** (2021). Developing a framework for leakage target setting in water distribution networks from an economic perspective. *Structure and Infrastructure Engineering*, 17(6), 821-837.
- Mpesha, W., Gassman, S. L., & Chaudhry, M. H.** (2001). Leak detection in pipes by frequency response method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(2), 134-147.
- Mu, T., Huang, M., Tan, H., Chen, G., & Zhang, R.** (2021). Pressure and water quality integrated sensor placement considering leakage and contamination intrusion within water distribution systems. *ACS ES&T Water*, 1(11), 2348-2358.

- Nasirian, A., Maghrebi, M. F., & Yazdani, S.** (2013). Leakage detection in water distribution network based on a new heuristic genetic algorithm model.
- Nicolini, M., Giacomello, C., & Deb, K.** (2011). Calibration and optimal leakage management for a real water distribution network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(1), 134-142.
- Ormsbee, L. E., & Wood, D. J.** (1986). Explicit pipe network calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 112(2), 166-182.
- Özdemir, M. & Cura, T.** (2021). Yeni bir sezgisel optimizasyon: arama ve kurtarma algoritması ve fonksiyon optimizasyon problemlerinin çözümü. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Elektronik Dergisi*, 12(1), 24-44.
- Park, S.** (2004). Identifying the hazard characteristics of pipes in water distribution systems by using the proportional hazards model: 1. Theory. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 8(6), 663.
- Pearson, D.** (2019). Standard Definitions for Water Losses. London, UK: IWA Publishing.
- Pérez, R., Puig, V., Pascual, J., Peralta, A., Landeros, E., & Jordanas, L.** (2009). Pressure sensor distribution for leak detection in Barcelona water distribution network. *Water science and technology: water supply*, 9(6), 715-721.
- Pérez, R., Puig, V., Pascual, J., Quevedo, J., Landeros, E., & Peralta, A.** (2011). Methodology for leakage isolation using pressure sensitivity analysis in water distribution networks. *Control Engineering Practice*, 19(10), 1157-1167.
- Poulakis, Z., Valougeorgis, D., & Papadimitriou, C.** (2003). Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 18(4), 315-327.
- Price, E., & Ostfeld, A.** (2014). Optimal water system operation using graph theory algorithms. *Procedia Engineering*, 89, 502-508.
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D. A., & Koppel, T.** (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, 7(1), 25-45.
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D., & Koppel, T.** (2007). *Probabilistic leak detection in pipe networks using the SCEM-UA algorithm*. TUT Press.

- Qu, Z., Feng, H., Zeng, Z., Zhuge, J., & Jin, S.** (2010). A SVM-based pipeline leakage detection and pre-warning system. *Measurement*, 43(4), 513-519.
- Quiñones-Grueiro, M., Milián, M. A., Rivero, M. S., Neto, A. J. S., & Llanes-Santiago, O.** (2021). Robust leak localization in water distribution networks using computational intelligence. *Neurocomputing*, 438, 195-208.
- Rathnayaka, S., Shannon, B., Rajeev, P., & Kodikara, J.** (2016). Monitoring of pressure transients in water supply networks. *Water resources management*, 30, 471-485.
- Romano, M., Kapelan, Z., & Savić, D. A.** (2010). Real-time leak detection in water distribution systems. In *Water distribution systems analysis 2010* (pp. 1074-1082).
- Saldarriaga, J. G., Fuentes, D. A. A., & Galvis, L. F. C.** (2008). Implementation of the hydraulic transient and steady oscillatory flow with genetic algorithms for leakage detection in real water distribution networks. In *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006* (pp. 1-14).
- Santos-Ruiz, I., Blesa, J., Puig, V., & López-Estrada, F. R.** (2020). Leak localization in water distribution networks using classifiers with cosenoidal features. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 16697-16702.
- Santos-Ruiz, I., López-Estrada, F. R., Puig, V., Valencia-Palomo, G., & Hernández, H. R.** (2022). Pressure Sensor Placement for Leak Localization in Water Distribution Networks Using Information Theory. *Sensors*, 22(2), 443.
- Sarbu, I.** (2021). Optimization of urban water distribution networks using deterministic and heuristic techniques: comprehensive review. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 12(4), 03121001.
- Sarisen, D., Koukoravas, V., Farmani, R., Kapelan, Z., & Memon, F. A.** (2022). Review of hydraulic modelling approaches for intermittent water supply systems. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 71(12), 1291-1310.
- Sarrate, R., Blesa, J., Nejjari, F., & Quevedo, J.** (2014). Sensor placement for leak detection and location in water distribution networks. *Water Science and Technology: Water Supply*, 14(5), 795-803.

- Savić, D. A., & Mala-Jetmarova, H.** (2018, July). History of Optimization in Water Distribution System Analysis:(009). In *WDSA/CCWI Joint Conference Proceedings* (Vol. 1).
- Savic, D. A., & Walters, G. A.** (1995). An evolution program for optimal pressure regulation in water distribution networks. *Engineering Optimization*, 24(3), 197-219.
- Shao, Y., Li, X., Zhang, T., Chu, S., & Liu, X.** (2019). Time-series-based leakage detection using multiple pressure sensors in water distribution systems. *Sensors*, 19(14), 3070.
- Sheikholeslami, R., Kaveh, A., Tahershamsi, A., & Talatahari, S.** (2014). Application of charged system search algorithm to water distribution networks optimization.
- Soldevila, A., Fernandez-Canti, R. M., Blesa, J., Tornil-Sin, S., & Puig, V.** (2017). Leak localization in water distribution networks using Bayesian classifiers. *Journal of Process Control*, 55, 1-9.
- Sophocleous, S., Savić, D., & Kapelan, Z.** (2019). Leak localization in a real water distribution network based on search-space reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(7), 04019024.
- Sousa, J., Ribeiro, L., Muranho, J., & Marques, A. S.** (2015). Locating leaks in water distribution networks with simulated annealing and graph theory. *Procedia Engineering*, 119, 63-71.
- Steffelbauer, D. B., Deuerlein, J., Gilbert, D., Abraham, E., & Piller, O.** (2022). Pressure-leak duality for leak detection and localization in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(3), 04021106.
- Suribabu, C. R., & Neelakantan, T. R.** (2006). Design of water distribution networks using particle swarm optimization. *Urban Water Journal*, 3(2), 111-120.
- Şen, Z.** (2004). *Genetik algoritmalar ve en iyileme yöntemleri*. Su Vakfı.
- Tabesh, M., Soltani, J., Farmani, R., & Savic, D.** (2009). Assessing pipe failure rate and mechanical reliability of water distribution networks using data-driven modeling. *Journal of Hydroinformatics*, 11(1), 1-17.

- Taghlabi, F., Sour, L., & Agoumi, A.** (2020). Prelocalization and leak detection in drinking water distribution networks using modeling-based algorithms: A case study for the city of Casablanca (Morocco). *Drinking Water Engineering and Science*, 13(2), 29-41.
- Thu, K.** (2010). Adsorption desalination: theory & experiments.
- Todini, E.** (1979). Un metodo del gradiente per la verifica delle reti idrauliche. *Bollettino degli Ingegneri della Toscana*, 11, 11-14.
- Todini, E., & Pilati, S.** (1987). A gradient method for the analysis of pipe networks: Proceedings International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution. *Leicester Polytechnic*.
- Vasan, A., & Simonovic, S. P.** (2010). Optimization of water distribution network design using differential evolution. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(2), 279-287.
- Vilanova, M. R. N., & Balestieri, J. A. P.** (2014). Energy and hydraulic efficiency in conventional water supply systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 701-714.
- Vítkovský, J. P., Simpson, A. R., & Lambert, M. F.** (2000). Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms. *Journal of water resources planning and management*, 126(4), 262-265.
- Wachla, D., Przystalka, P., & Moczulski, W.** (2015). A method of leakage location in water distribution networks using artificial neuro-fuzzy system. *IFAC-PapersOnLine*, 48(21), 1216-1223.
- Walski, T.** (2017). Procedure for hydraulic model calibration. *Journal (American Water Works Association)*, 109(6), 55-61.
- Walski, T. M.** (1986). Case study: Pipe network model calibration issues. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 112(2), 238-249.
- Wang, X., & Ghidaoui, M. S.** (2018). Pipeline leak detection using the matched-field processing method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(6), 04018030.
- Wu, Z. Y.** (2008). *Innovative optimization model for water distribution leakage detection*. Watertown, USA: Bentley Systems Inc.

- Wu, Z. Y., Sage, P., & Turtle, D.** (2010). Pressure-dependent leak detection model and its application to a district water system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(1), 116-128.
- Xu, Q., Liu, R., Chen, Q., & Li, R.** (2014). Review on water leakage control in distribution networks and the associated environmental benefits. *Journal of Environmental Sciences*, 26(5), 955-961.
- Yazdekhesti, S., Piratla, K. R., Atamturktur, S., & Khan, A.** (2018). Experimental evaluation of a vibration-based leak detection technique for water pipelines. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(1), 46-55.
- Zaman, D., Tiwari, M. K., Gupta, A. K., & Sen, D.** (2020). A review of leakage detection strategies for pressurised pipeline in steady-state. *Engineering Failure Analysis*, 109, 104264.
- Zandi, R., Yazdi, J., & Shahsavandi, M.** (2021). Leakage Detection in Water Distribution Systems by Considering the Hourly Changes of Node Demands Using Harmony Search Algorithm. *Modares Civil Engineering journal*, 21(4), 205-217.
- Zanfei, A., Menapace, A., Santopietro, S., & Righetti, M.** (2020). Calibration procedure for water distribution systems: Comparison among hydraulic models. *Water*, 12(5), 1421.
- Zheng, F., Simpson, A. R., & Zecchin, A.** (2011). Performance study of differential evolution with various mutation strategies applied to water distribution system optimization. In *World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability* (pp. 166-176).
- Zhou, S., O'Neill, Z., & O'Neill, C.** (2018). A review of leakage detection methods for district heating networks. *Applied Thermal Engineering*, 137, 567-574.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Furkan BOZTAŞ

Öğrenim Durumu

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Orta Doğu Teknik Üniversitesi	2015
Y. Lisans	İnşaat Mühendisliği	İnönü Üniversitesi	2017
Doktora	İnşaat Mühendisliği	İnönü Üniversitesi	2023

Mesleki Durumu

Çalıştığı Yer	Görevi	Yıl
ATN İmar İnşaat A.Ş. - Ankara	Proje Uzmanı	2014
Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü - Malatya	Proje Mühendisi, Kontrol Mühendisi, Şube Müdürü	2014 – Devam Ediyor

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR (Makaleler, Bildiriler v.b.)

BOZTAŞ, F., & FIRAT, M. (2022, May). Dynamic Analysis and Water Demand Model with EPANET in Drinking Water Distribution Systems. In Proceedings of the International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism-ICCAUA (Vol. 5, No. 1, pp. 984-993).

