

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**İÇME SUYU DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE FAZLA BASINCIN
AZALTILMASI İLE ENERJİ ÜRETİMİ POTANSİYELİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ: ANTALYA KENTİ ANFAŞ BÖLGESİ VE KALEİÇİ
BÖLGESİ UYGULAMASI**

Barış ŞEKER

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS

HAZİRAN 2019

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İÇME SUYU DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE FAZLA BASINCIN
AZALTILMASI İLE ENERJİ ÜRETİMİ POTANSİYELİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ: ANTALYA KENTİ ANFAŞ BÖLGESİ VE KALEİÇİ
BÖLGESİ UYGULAMASI**

**Barış ŞEKER
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS**

**Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından
FLY-2018-3042 nolu proje ile desteklenmiştir.**

HAZİRAN 2019

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İÇME SUYU DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE FAZLA BASINCIN
AZALTILMASI İLE ENERJİ ÜRETİMİ POTANSİYELİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ: ANTALYA KENTİ ANFAŞ BÖLGESİ VE KALEİÇİ
BÖLGESİ UYGULAMASI**

Barış ŞEKER
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 12/06/2019 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ayşe MUHAMMETOĞLU (Danışman)

Prof. Dr. Bülent TOPKAYA

Prof. Dr. Nevzat Özgü YİĞİT


.....
.....
.....

ÖZET

İÇME SUYU DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE FAZLA BASINCIN AZALTILMASI İLE ENERJİ ÜRETİMİ POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ: ANTALYA KENTİ ANFAŞ BÖLGESİ VE KALEİÇİ BÖLGESİ UYGULAMASI

Barış ŞEKER

Yüksek Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ayşe MUHAMMETOĞLU

Haziran 2019; 155 sayfa

Yaşamın devamlılığı için gerekli olan suyun kaynağından alınıp insanların kullanımı için temini, içme suyu iletim ve dağıtım şebekeleri sayesinde gerçekleşir. Su temini sistemlerinin iyi işletilmesi bir şehrin sürdürülebilir gelişimi için çok önemlidir. Sürdürülebilir içme suyu temini sistemi kapsamında enerji verimliliğinin geliştirilmesi, şebekedeki enerji ve su kayıpları ile birlikte karbon dioksit emisyonlarının azaltılması öncelikli hedefler arasındadır. Basınç, içme suyu iletim hatları ve dağıtım şebekelerinde temel tasarım parametrelerinden birisidir. Dağıtım şebekelerinde çok düşük ve yüksek su basıncı seviyeleri işletim açısından uygun değildir. Düşük basınç seviyelerinde suyun abonelere ulaşımında sorunlar yaşanırken, yüksek su basıncı şebekedeki su kayıplarının artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, içme suyu dağıtım şebekelerindeki su basıncının belirli limitler arasında tutulması ve basınç yönetiminin yapılması önemlidir. İçme suyu temin sistemlerinin çoğunda fazla basınç mevcuttur ve fazla basıncın düşürülmesi için maslak, hazne veya basınç kırıcı vanalar (Pressure Reducing Valve, PRV) kullanılmaktadır. Son yıllarda, içme suyu şebekelerindeki fazla basıncın düşürülmesi ve eş zamanlı olarak enerji üretilmesi amacı ile pompa türbinlerin (Pump as Turbine - PAT) kullanılması konusu oldukça büyük ilgi çekmektedir.

Bu tez çalışmasında hidrolik modelleme ile içme suyu dağıtım şebekelerindeki fazla basıncın düşürülmesi analiz edilerek, bu süreçteki enerji üretim potansiyeli incelenmiş, Antalya kentinde yer alan iki farklı içme suyu dağıtım şebekesi için uygulamalar yapılmıştır. Anfaş bölgesinde yer alan PAT sisteminde basıncın düşürülmesi ile elde edilen enerjinin uzun dönem için analizi gerçekleştirilmiş ve Kaleiçi bölgesi içme suyu dağıtım şebekesi için optimum işletim basıncı ve fazla basınç seviyeleri belirlenerek, enerji üretim potansiyeli incelenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Basınç Yönetimi, Enerji Üretimi, Hidrolik Modelleme, İçme Suyu Şebekeleri, Pompa Türbin

JÜRİ: Prof. Dr. Ayşe MUHAMMETOĞLU

Prof. Dr. Bülent TOPKAYA

Prof. Dr. Nevzat Özgü YİĞİT

ABSTRACT

EVALUATION of ENERGY RECOVERY POTENTIAL in WATER DISTRIBUTION NETWORKS by REDUCING EXCESS PRESSURE: ANTALYA CITY ANFAŞ REGION and KALEİÇİ REGION APPLICATIONS

Barış ŞEKER

M. Sc. Thesis in Department of Environmental Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ayşe MUHAMMETOĞLU

June 2019; 155 pages

The water required for the continuity of life is taken from the source and provided for the use of people by means of the drinking water transmission and distribution networks. Good operation of water supply systems is crucial for the sustainable development of a city. Improving energy efficiency, reducing energy and water losses in the network as well as reducing carbon dioxide emissions are among the priority targets within the scope of sustainable drinking water supply system. Pressure is one of the basic design parameters in drinking water transmission lines and distribution networks. Very low and high water pressure levels are not suitable for operation in distribution networks. At low pressure levels, there are problems in the transportation of water to the subscribers, while high water pressure causes water losses in the network. For this reason, it is important to keep the water pressure in the drinking water distribution networks between certain limits and to manage the pressure. Most of the drinking water supply systems have excess pressure, and balancing reservoirs, tanks or pressure reducing valves (Pressure Reducing Valve, PRV) are used to reduce excess pressure. In recent years, the use of pump as turbine (PAT) has been of great interest in order to reduce the excess pressure in water distribution networks and to generate energy simultaneously.

In this thesis, evaluation of energy recovery potential was conducted by analyzing reduction of the excess pressure in water distribution networks using a hydraulic model. The energy recovery potential in this process was examined and the applications for two different water distribution networks in the city of Antalya were investigated. The long-term analysis of the energy produced by decreasing the excess pressure in the Anfaş region by using a PAT system was carried out. Additionally, the optimum operating pressure and excess pressure levels for the drinking water distribution network of Kaleiçi region were determined and the energy production potential was investigated.

KEYWORDS: Pressure Management, Energy Recovery, Hydraulic Modeling, Water Distribution Networks, Pump as Turbine

COMMITTEE: Prof. Dr. Ayşe MUHAMMETOĞLU

Prof. Dr. Bülent TOPKAYA

Prof. Dr. Nevzat Özgü YİĞİT

ÖNSÖZ

Küresel ısınma, hızlı nüfus artışı ve kullanılabilir su miktarındaki azalış canlı yaşamı üzerinde olumsuz etkilere sebep olmakta, yaşam kalitesini düşürecek etkilere yol açmaktadır. Bununla birlikte ihtiyacımız olan su ve enerjinin sürdürülebilir ve ekonomik kullanımı zorunlu hale gelmeye başlamıştır. Bu kapsamda sürdürülebilir içme suyu temin sistemlerinin geliştirilmesinde su ve enerji kayıpları ile birlikte sera gazı emisyonlarını azaltmak ve enerji verimliliği için yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmek öncelikli konular arasındadır. Enerji israfının önlenmesi, var olan enerji kaynaklarının en verimli düzeyde kullanılabilir hale getirilmesi, toplumlar için önemli bir görev, sorumluluk ya da zorunluluk haline gelmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında, içme suyu dağıtım şebekesindeki fazla basıncın azaltılması ve fazla basınçtan enerji kazanım potansiyelinin incelenmesi hedeflenmiştir. Çalışmada dünyada yaygın olarak kullanılan EPANET hidrolik modeli uygulanarak, çalışma alanı için içme suyu dağıtım şebekesindeki fazla su basıncı belirlenmiş ve fazla basıncın bir pompa türbin sistemi ile düşürülmesi ile potansiyel enerji üretimi incelenmiştir. Belirtilen çalışma Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından “*İçme Suyu Dağıtım Şebekelerinde Fazla Basıncın Azaltılması ile Enerji Üretimi Potansiyelinin Değerlendirilmesi Antalya Kenti Anfaş Bölgesi ve Kaleiçi Bölgesi Uygulamaları*” başlıklı ve FYL-2018-3042 nolu proje tarafından desteklenmiştir. Proje desteğinden dolayı Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü’ne teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasında birlikte çalıştığımız danışmanım Sayın Prof. Dr. Ayşe MUHAMMETOĞLU’na ve bölümümüz öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Habib MUHAMMETOĞLU’na yüksek lisans çalışmalarım sırasında bana göstermiş olduğu desteklerden dolayı teşekkür ederim. Tez çalışması sırasında desteklerini esirgemeyen Çevre Yüksek Mühendisi çalışma arkadaşlarım Oğuzhan GÜLAYDIN, Ahmet ÇİL, Özge ÖZEN, Selma BAŞ ve ayrıca yüksek lisans dönem arkadaşlarım Alex MODİ, Mustafa BOLBOL ve meslektaşım Burak UĞURLUBİLEK’e çok teşekkür ederim.

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “İçme Suyu Dağıtım Şebekelerinde Fazla Basıncın Azaltılması İle Enerji Potansiyelinin Değerlendirilmesi: Antalya Kenti Anfaş Bölgesi ve Kaleiçi Bölgesi Uygulaması” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

12/06/2019

Barış ŞEKER



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	3
2.1. İçme Suyu Dağıtım Şebekelerinde Su Kayıpları.....	4
2.1.1. Fiziki (Gerçek) su kayıpları	6
2.1.2. İdari (Görünen) su kayıpları	7
2.1.3. İçme suyu dağıtım şebekelerinde su kayıplarının azaltılması	8
2.2. Basınç Yönetimi	10
2.2.1. Basınç kontrol sistemleri	11
2.2.2. Su kayıplarına basıncın etkisi	16
2.2.3. Su tüketimine basıncın etkisi	18
2.3. İçme Suyu Dağıtım Şebekelerinde Hidrolik Modelleme	18
2.4. Hidrolik Türbinler	20
2.4.1. Pelton türbini.....	20
2.4.2. Francis türbini	21
2.4.3. Kaplan türbini	22
2.5. Pompa Türbin ile Enerji Üretimi.....	23
3. MATERYAL VE METOT.....	28
3.1. Çalışma Alanı ve Özellikleri	28
3.1.1. Antalya içme suyu dağıtım sistemi.....	28
3.1.2. Antalya ili içme suyu dağıtım sisteminde fazla basıncın kırıldığı noktaların lokasyonları	30
3.1.3. Anfaş bölgesine ilişkin bilgiler	33
3.1.4. Kaleiçi bölgesine ilişkin bilgiler	38
3.2. EPANET 2.0 Hidrolik Modeli	40

3.2.1. EPANET hidrolik modelinin genel özellikleri	41
3.2.2. EPANET programında sürtünme kayıpları	41
3.3. EPANET Modelinin Kaleiçi Çalışma Bölgesi için Uygulanması.....	42
3.3.1. Kaleiçi bölgesi içme suyu dağıtım şebekesindeki fazla basıncın belirlenmesi	43
3.3.2. Kaleiçi bölgesinde fazla basınçtan enerji üretim potansiyelinin incelenmesi	44
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	45
4.1. EPANET Modeli İle Hidrolik Model Kalibrasyonu (Kalibrasyon 1)	45
4.1.1. Giriş	45
4.1.2. Model uygulaması	47
4.1.3. Pürüzlülük katsayısının belirlenmesi	50
4.2. EPANET Modeli ile Hidrolik Model Kalibrasyonu (Kalibrasyon 2)	68
4.2.1. Giriş	68
4.2.2. Model uygulaması	70
4.2.3. Pürüzlülük katsayısının belirlenmesi	72
4.3. EPANET Modeli ile Hidrolik Model Verifikasyonu	87
4.3.1. Giriş	87
4.3.2. Model uygulaması	88
4.3.3. Pürüzlülük katsayısının doğrulanması	91
4.4. EPANET Modeli İle Kaleiçi Bölgesi İçin Basıncı Yönetimi Çalışması	99
4.4.1. Giriş	99
4.4.2. Kaleiçi çalışma bölgesindeki mevcut basıncın değerlendirilmesi	100
4.4.3. Şebekedeki kritik noktanın ve fazla basınç seviyesinin belirlenmesi.....	110
4.5. Enerji Üretimi.....	119
4.5.1. Kaleiçi bölgesinde fazla basınçtan PAT ile enerji üretimi	119
4.6. Anfaş Bölgesindeki PAT Sistemine ait Verilerin Değerlendirilmesi.....	140
5. SONUÇLAR	146
6. KAYNAKLAR.....	149
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

%	: Yüzde
A	: Düğüm noktası A
A	: Direnç katsayısı
a	: Son nüfus sayımından projenin başlatılmasına kadar geçen süre
B	: Düğüm noktası B
b	: Ampirik katsayı
C	: Hazen-Williams pürüzlülük katsayısı
CO ₂	: Karbondioksit
d	: Boru çapı
e _o	: Güç üretim tesisinin toplam verimliliği
f	: Sürtünme faktörü
g	: Yerçekimi ivmesi
H	: Türbindeki mevcut yükseklik
h _L	: Enerji kaybı
L	: Boru uzunluğu
kg	: Kilogram
K _i	: Su tüketme kapasitesini gösteren katsayı
km	: Kilometre
kVA	: Kilovoltamper
kW	: Kilowatt
kWh	: Kilowatt saat
MW	: Megawatt
M	: Düğüm noktası a ya da düğüm noktası b'ye bağlı olan boru sayısı
m	: Metre

m^2	: Metrekare
m^3	: Metreküp
mm	: Milimetre
mSS	: Metre Su Sütunu
n	: Manning pürüzlülük katsayısı
P	: Güç
q	: Debi
sa	: Saat
sn	: Saniye
ρ	: Suyun yoğunluğu
ε	: Darcy-Weisbach pürüzlülük katsayısı
W	: Watt

Kısaltmalar

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
Anfaş	: Antalya Fuarcılık İşletme ve Yatırım A.Ş
ASAT	: Antalya Su ve Atıksu İdaresi
AWWA	: American Water Works Association (Amerika Su Kuruluşu Birliği)
BEP	: Best Efficiency Point (En verimli nokta)
BM	: Birleşmiş Milletler
BÖN	: Basınç Ölçüm Noktası
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemi
DMA	: District Metered Area (İzole Alt Bölge)
EPA	: Environmental Protection Agency (Çevre Koruma Ajansı)
GGs	: Gelir Getirmeyen Su
GPS	: Global Positioning System (Küresel Konumlandırma Sistemi)

IWA : International Water Association (Uluslararası Su Kuruluşu)

PAT : Pump As Turbine (Pompa Türbin)

PRV : Pressure Regulating Valve (Basınç Düşürme Vanası)

SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition (Veri Tabanlı İzleme ve Kontrol Sistemi)

SKH : Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri

TÜBİTAK: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

TÜİK : Türkiye İstatistik Kurumu

US : United States (Birleşik Devletler)



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Bazı şehirler için GGS oranları, (a) %20'nin altında, (b) %20'nin üzerinde (Abd Rahman vd. 2018)	4
Şekil 2.2. Su temin sisteminde oluşan tipik su kayıpları (MNRW 2010; Muhammetoğlu ve Muhammetoğlu 2017)	6
Şekil 2.3. Fiziki su kayıplarının yönetiminde uygulanan temel bileşenler (Simbeye 2010).....	10
Şekil 2.4. PRV'yi bir bypass hattı üzerine kurmak iyi bir uygulamadır (Malcolm vd. 2008)	12
Şekil 2.5. Klasik sabit çıkışlı basınç kırıcı vana ile basıncın azaltılması (McKenzie 2001)	12
Şekil 2.6. Zaman ayarlı basınç kontrolü seçeneği (McKenzie 2001)	14
Şekil 2.7. Debi ayarlı basınç kontrolü seçeneği (McKenzie 2001)	15
Şekil 2.8. Kapalı devre basınç kontrol sistemi (McKenzie 2001)	16
Şekil 2.9. Fazla basıncın düşürülmesi ile fiziki su kayıpları azalır (Muhammetoğlu ve Muhammetoğlu 2017)	17
Şekil 2.10. Borulardan oluşan sızıntı, hidrolik olarak orifis deşarjına benzer (Muhammetoğlu ve Muhammetoğlu 2017)	17
Şekil 2.11. Basitleştirilmiş bir su dağıtım ağı (Ziegler vd. 2011).....	20
Şekil 2.12. Pelton türbini için genel görünüm (Anonim 1)	21
Şekil 2.13. Francis türbini şematik gösterim (Anonim 1).....	22
Şekil 2.14. Francis türbininin çark yapıları (Anonim 1).....	22
Şekil 2.15. Kaplan türbininin genel görünümü (Anonim 2)	23
Şekil 2.16. Pompa türbin sistemine ait bir görsel (Anonim 3)	24
Şekil 2.17. Su dağıtım şebekelerinde PAT kullanımı alternatifleri (a) tek başına PAT, (b) PAT ve PRV birlikte (Fontana vd. 2012)	25
Şekil 2.18. Antalya Anfaş bölgesinde kurulan PAT sistemine ait görüntüler (Muhammetoğlu vd. 2017a).....	26
Şekil 3.1. Antalya kenti içme suyu iletim sisteminde su kaynaklarının ve depoların konumlarını gösteren şematik görüntü (Palancı 2011)	28
Şekil 3.2. Antalya kenti içme suyu kaynakları ve basınç bölgeleri (Palancı 2011).....	29

Şekil 3.3. Antalya kenti su temini sisteminde yer alan PRV'lerin lokasyonları (Muhammetoğlu vd. 2016).....	30
Şekil 3.4. Döşemealtı bölgesinde yer alan PRV'lerin lokasyonları (Muhammetoğlu vd. 2016).....	31
Şekil 3.5. Kepez bölgesinde yer alan PRV'lerin lokasyonları (Muhammetoğlu vd. 2016).....	32
Şekil 3.6. Konyaaltı bölgesinde yer alan PRV'lerin lokasyonları (Muhammetoğlu vd. 2016).....	33
Şekil 3.7. Projede tam ölçekli PAT uygulaması için seçilen Antalya Anfaş EXPO Fuar alanından bir görüntü	34
Şekil 3.8. Antalya Anfaş EXPO binası, mevcut SCADA istasyonu ve PAT uygulama alanı (Muhammetoğlu vd. 2016)	34
Şekil 3.9. PAT uygulaması için seçilen alandaki içme suyu dağıtım şebekesi boru hattı (Muhammetoğlu vd. 2016)	35
Şekil 3.10. PAT uygulaması için şematik gösterim (Muhammetoğlu vd. 2016).....	35
Şekil 3.11. PAT sisteminin sahadaki uygulamasına yönelik teknik çizim (Muhammetoğlu vd. 2016).....	36
Şekil 3.12. PAT sistemi için oluşturulan türbin eğrisi (Muhammetoğlu vd. 2016).....	37
Şekil 3.13. Bypass rögarı üzerine kabin yapılması (Muhammetoğlu vd. 2016).....	38
Şekil 3.14. Kaleiçi bölgesine ait bir uydu görüntüsü	39
Şekil 3.15. Kaleiçi SCADA istasyonu	40
Şekil 3.16. Kaleiçi bölgesine ait içme suyu şebekesi ve düğüm noktalarının EPANET programındaki ekran görüntüsü	43
Şekil 3.17. Kaleiçi içme suyu dağıtım şebekesindeki online basınç ölçüm noktaları	44
Şekil 4.1. Kaleiçi alt bölgesine ait içme suyu şebekesinin EPANET modelindeki ekran görüntüsü	45
Şekil 4.2. 20-25 Ağustos 2015 tarihleri arasında SCADA istasyonunda izlenen debi ve basınç ölçümleri.....	46
Şekil 4.3. Hidrolik model kalibrasyonu süresince SCADA istasyonundan elde edilen 5 dakika zaman aralıklı debi profili.....	48
Şekil 4.4. Hidrolik model kalibrasyonu süresince EPANET modelinde P442 numaralı noktaya karşılık gelen Park için elde edilen 5 dakika zaman aralıklı su kullanım profili	48

Şekil 4.5. Hidrolik model kalibrasyonu süresince EPANET modelinde P4333 numaralı noktaya karşılık gelen İtfaiye için elde edilen 5 dakika zaman aralıklı su kullanım profili	49
Şekil 4.6. Hidrolik model kalibrasyonu süresince SCADA istasyonundan elde edilen 5 dakika zaman aralıklı basınç profili	49
Şekil 4.7. 20-25 Ağustos 2015 tarihleri arasında farklı pürüzlülük katsayılarındaki model tahminleri ile basınç ölçümleri arasındaki ortalama mutlak hatalar	50
Şekil 4.8. Farklı pürüzlülük katsayıları için elde edilen Ortalama Mutlak Hata değerleri	51
Şekil 4.9. Pürüzlülük katsayısı 50 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması	52
Şekil 4.10. Pürüzlülük katsayısı 60 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması	54
Şekil 4.11. Pürüzlülük katsayısı 70 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması	56
Şekil 4.12. Pürüzlülük katsayısı 80 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması	58
Şekil 4.13. Pürüzlülük katsayısı 90 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması	60
Şekil 4.14. Pürüzlülük katsayısı 100 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması	62
Şekil 4.15. En düşük Ortalama Mutlak Hata pürüzlülük katsayısı $R=64$ için elde edilmiştir (Ortalama Mutlak Hata = 0,667 mSS).....	64
Şekil 4.16. Pürüzlülük katsayısı 64 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması	65
Şekil 4.17. Farklı basınç ölçüm noktalarında ölçülen basınç değerleri ile modelin basınç tahminleri arasındaki farklar	67
Şekil 4.18. 14-19 Ocak 2016 tarihleri arasında SCADA istasyonunda izlenen debi ve basınç ölçümleri	69
Şekil 4.19. Hidrolik model kalibrasyonu süresince SCADA istasyonundan elde edilen 5 dakika zaman aralıklı debi profili.....	71
Şekil 4.20. Hidrolik model kalibrasyonu süresince SCADA istasyonundan elde edilen 5 dakika zaman aralıklı basınç profili	71

Şekil 4.21. Hidrolik model kalibrasyonu süresince EPANET modelinde P442 numaralı noktaya karşılık gelen park için elde edilen 5 dakika zaman aralıklı su kullanım profili	72
Şekil 4.22. Farklı pürüzlülük katsayılarındaki model tahminleri ile basınç ölçümleri arasındaki ortalama mutlak hatalar	73
Şekil 4.23. Farklı pürüzlülük katsayıları için tüm BÖN istasyonlarından elde edilen Ortalama Mutlak Hata değerleri.....	74
Şekil 4.24. Pürüzlülük katsayısı 70 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki basınç ölçümleri ile model tahminlerinin karşılaştırılması	75
Şekil 4.25. Pürüzlülük katsayısı 80 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki basınç ölçümleri ile model tahminlerinin karşılaştırılması	78
Şekil 4.26. En düşük Ortalama Mutlak Hata pürüzlülük katsayısı $R=73$ için elde edilmiştir, Ortalama Mutlak Hata = 0,474 mSS.....	81
Şekil 4.27. Pürüzlülük katsayısı 73 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki basınç ölçümleri ile model tahminlerinin karşılaştırılması	82
Şekil 4.28. Farklı basınç ölçüm noktalarında ölçülen basınç değerleri ile modelin basınç tahminleri	85
Şekil 4.29. 1-6 Haziran 2016 tarihleri arasında SCADA istasyonunda izlenen debi ve basınç ölçümleri	87
Şekil 4.30. Hidrolik model verifikasyon süresince SCADA istasyonundan elde edilen 5 dakika zaman aralıklı debi profili.....	89
Şekil 4.31. Hidrolik model verifikasyon süresince EPANET modelinde P442 numaralı noktaya karşılık gelen Park için elde edilen 5 dakika zaman aralıklı su kullanım profili	89
Şekil 4.32. Hidrolik model verifikasyon süresince EPANET modelinde P4333 numaralı noktaya karşılık gelen İtfaiye için elde edilen 5 dakika zaman aralıklı su kullanım profili	90
Şekil 4.33. Hidrolik model verifikasyon süresince SCADA istasyonundan elde edilen 5 dakika zaman aralıklı basınç profili	90
Şekil 4.34. 1-6 Haziran 2016 tarihleri arasında farklı pürüzlülük katsayılarındaki model tahminleri ile basınç ölçümleri arasındaki ortalama mutlak hatalar	92
Şekil 4.35. Farklı pürüzlülük katsayıları için elde edilen Ortalama Mutlak Hata değerleri.....	93
Şekil 4.36. Pürüzlülük katsayısı 80 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması	94

Şekil 4.37. Pürüzlülük katsayısı 90 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması	97
Şekil 4.38. İçme suyu şebekesinin farklı bölümlerinde farklı basınç seviyelerinin oluşumu.....	99
Şekil 4.39. DMA girişine yerleştirilen bir PRV ile su basıncı istenilen seviyeye indirilebilir	100
Şekil 4.40. SCADA istasyonunda ölçülen minimum basınç durumunda şebekedeki basınç dağılımı (24/08/2015 saat:10:55, SCADA basıncı: 30,88 mSS, SCADA debisi: 148,375 m ³ /sa).....	102
Şekil 4.41. SCADA istasyonunda ölçülen maksimum basınç durumunda şebekede basınç dağılımı (24/08/2015 saat: 05:15, SCADA basıncı: 42,44 mSS, SCADA debisi: 75,6 m ³ /sa).....	103
Şekil 4.42. Yangın musluğunun açıldığı esnada SCADA’da izlenen basınç ve şebekede basınç dağılımı (22/08/2015 saat: 10:45, SCADA basıncı: 31,31 mSS, SCADA debisi: 177,5 m ³ /sa)	104
Şekil 4.43. SCADA istasyonunda ölçülen minimum basınç durumunda şebekedeki basınç dağılımı (15/01/2016 saat:12:10, SCADA basıncı: 31,43 mSS, SCADA debisi: 89,44 m ³ /sa)	105
Şekil 4.44. Şekil 9. SCADA istasyonunda ölçülen maksimum basınç durumunda şebekedeki basınç dağılımı (19/01/2016 saat: 05:15, SCADA basıncı: 42,94 mSS, SCADA debisi: 68,625 m ³ /sa)	106
Şekil 4.45. Yangın musluğunun açıldığı esnada SCADA’da izlenen basınç ve şebekede basınç dağılımı (16/01/2016 saat: 06:25, SCADA basıncı: 39,81 mSS, SCADA debisi 125,5 m ³ /sa)	107
Şekil 4.46. SCADA istasyonunda ölçülen minimum basınç durumunda şebekedeki basınç dağılımı (04/06/2016 saat:10:35, SCADA basıncı: 30,25 mSS, SCADA debisi: 130,625 m ³ /sa)	108
Şekil 4.47. SCADA istasyonunda ölçülen maksimum basınç durumunda şebekedeki basınç dağılımı (05/06/2016 saat: 05:20, SCADA basıncı: 41,56 mSS, SCADA debisi: 95,75 m ³ /sa)	109
Şekil 4.48. 20-25 Ağustos 2015 tarihleri arasında SCADA istasyonunda izlenen debi ve basınç ölçümleri	110
Şekil 4.49. Kaleiçi bölgesi Kalibrasyon 1 çalışması için kritik nokta ve minimum basınç değeri tespiti (22/08/2015, saat 10:45-11:00 arasında, minimum basınç = 23,67 mSS)	111

Şekil 4.50. Kaleiçi bölgesinde kritik nokta (Node S704) için tahmin edilen basınç profili ve İller Bankası Teknik Şartnamesi'nde belirtilen minimum basınç seviyesi (20 mSS).....	112
Şekil 4.51. Kaleiçi bölgesinde kritik nokta (Node S704) için hidrolik modelden elde edilen fazla basınç profili	112
Şekil 4.52. 14-19 Ocak 2016 tarihleri arasında SCADA istasyonunda izlenen debi ve basınç ölçümleri.....	113
Şekil 4.53. Kaleiçi bölgesi Kalibrasyon 2 çalışması için kritik nokta ve minimum basınç değeri tespiti (15/01/2016, saat 12:10'da, minimum basınç = 28,91 mSS).....	114
Şekil 4.54. Kaleiçi bölgesinde kritik nokta (Node S704) için tahmin edilen basınç profili ve İller Bankası Teknik Şartnamesi'nde belirtilen minimum basınç seviyesi (20 mSS).....	115
Şekil 4.55. Kaleiçi bölgesinde kritik nokta (Node S704) için hidrolik modelden elde edilen fazla basınç profili	115
Şekil 4.56. 1-6 Haziran 2016 tarihleri arasında SCADA istasyonunda izlenen debi ve basınç ölçümleri.....	116
Şekil 4.57. Kaleiçi bölgesi verifikasyon çalışması için kritik nokta ve minimum basınç değeri tespiti (04/06/2016 saat 10:25-10:30 arası, minimum basınç = 25,67 mSS)	117
Şekil 4.58. Kaleiçi bölgesinde kritik nokta (Node S704) için tahmin edilen basınç profili ve İller Bankası Teknik Şartnamesi'nde belirtilen minimum basınç seviyesi (20 mSS).....	118
Şekil 4.59. Kaleiçi bölgesinde kritik nokta (Node S704) için hidrolik modelden elde edilen fazla basınç profili	118
Şekil 4.60. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Haziran 2016 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi	122
Şekil 4.61. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Temmuz 2016 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi	123
Şekil 4.62. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Ağustos 2016 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi	124
Şekil 4.63. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Eylül 2016 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi	125
Şekil 4.64. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Ekim 2016 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi	126

Şekil 4.65. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Kasım 2016 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi	127
Şekil 4.66. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Aralık 2016 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi	128
Şekil 4.67. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Ocak 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi	129
Şekil 4.68. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Şubat 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi	130
Şekil 4.69. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Mart 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi	131
Şekil 4.70. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Nisan 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi	132
Şekil 4.71. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Mayıs 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi	133
Şekil 4.72. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Haziran 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi	134
Şekil 4.73. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Temmuz 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel enerji üretiminin değişimi	135
Şekil 4.74. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Ağustos 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi	136
Şekil 4.75. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Eylül 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi	137
Şekil 4.76. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Ekim 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi	138
Şekil 4.77. PAT sisteminden geçmesi beklenen debilerin frekans dağılımı.....	139
Şekil 4.78. PAT sistemi girişindeki basınç yüksekliği değerlerinin frekans dağılımı..	139
Şekil 4.79. PAT sisteminde üretilebilecek potansiyel gücün frekans dağılımı	140
Şekil 4.80. Eylül 2016 döneminde PAT sisteminden geçen debinin zamansal değişimi.....	142
Şekil 4.81. Eylül 2016 döneminde PAT sisteminde üretilen gücün zamansal değişimi.....	143
Şekil 4.82. Eylül 2016 döneminde PAT sisteminde elde edilen verimin zamansal değişimi.....	144

Şekil 4.83. Eylül 2016 döneminde PAT sisteminde elde edilen verim değerlerinin frekans dağılımı	145
--	-----



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Antalya ili basınç bölgeleri, kotları ve su kaynakları (Palancı 2011).....	29
Çizelge 3.2. Tüm akımlar için sürtünme kaybı formülleri (Rossman 2000)	42
Çizelge 3.3. Yeni borular için pürüzlülük katsayısı (Rossman 2000)	42
Çizelge 4.1. Ölçüm istasyonlarının zemin kotları, boru kotları ve basıncın ölçüm noktalarının kotları	47
Çizelge 4.2. Farklı pürüzlülük katsayılarına göre elde edilen Ortalama Mutlak Hata sonuçları	51
Çizelge 4.3. Ölçüm istasyonlarının zemin kotları, boru kotları ve basıncın ölçüm noktalarının kotları	70
Çizelge 4.4. Farklı pürüzlülük katsayılarına göre elde edilen Ortalama Mutlak Hata sonuçları	74
Çizelge 4.5. Kalibrasyon-1 ve Kalibrasyon-2 çalışmaları için elde edilen model tahmin hatalarının birlikte incelenmesi (Ortalama Mutlak Hata – OMH).....	87
Çizelge 4.6. Ölçüm istasyonlarının zemin kotları, boru kotları ve basıncın ölçüm noktalarının kotları	88
Çizelge 4.7. Model verifikasyonu sonucunda farklı pürüzlülük katsayılarına göre Ortalama Mutlak Hata değerleri	93
Çizelge 4.8. PAT sistemi için tanımlanan toplam verimlilik değerlerinin debi ile değişimi.....	119
Çizelge 4.9. Kaleiçi bölgesinde debi ve basınç değerlerinin değişimi	120
Çizelge 4.10. Kaleiçi bölgesinde fazla basınçtan PAT sistemi ile üretilebilecek potansiyel güç	121
Çizelge 4.11. Anfaş-Expo uygulama sahasında yer alan PAT sistemi için 1 Haziran 2016 – 30 Mayıs 2017 dönemine ait ortalama işletim verileri.....	141

1. GİRİŞ

Günümüzde içme suyu temini sistemlerinin sağlık ve hijyen koşullarına uygun şekilde ve kesintisiz olarak işletilmesinin yanı sıra sürdürülebilir ve verimli olması da önem verilmesi gereken konular arasındadır. Sürdürülebilir içme suyu temini sistemi kapsamında enerji verimliliğinin geliştirilmesi, şebekedeki enerji ve su kayıpları ile birlikte karbon dioksit emisyonlarının azaltılması konuları önceliklidir. Suyun kaynaktan alınması, arıtımı, iletimi ve dağıtım aşamalarında ciddi miktarlarda enerji tüketilmekte ve karbon dioksit emisyonları meydana gelmektedir. Basınç, içme suyu iletim hatları ve içme suyu dağıtım şebekelerinde temel tasarım parametrelerinden birisidir ve belirli limitler arasında tutulması zorunludur.

İçme suyu dağıtım şebekelerinde çok düşük ve yüksek su basıncı seviyeleri işletim açısından uygun değildir. Düşük basınç seviyelerinde suyun abonelere ulaşımında sorunlar yaşanırken, yüksek su basıncı şebekedeki su kayıplarının artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, içme suyu dağıtım şebekelerindeki su basıncının belirli limitler arasında tutulması önemlidir. İçme suyu dağıtım şebekeleri için topoğrafik yapının uygun olduğu yerlerde izin verilen en yüksek su basıncı 60 metre su sütunu (mSS) iken, gerekli olan minimum su basıncı seviyesi ise İller Bankası İçme Suyu Tesisleri Etüt, Fizibilite ve Projelerinin Hazırlanmasına Ait Teknik Şartname'ye göre müstakbel nüfusu 50.000 kişiye kadar olan yerlerde 20 mSS, daha büyük nüfuslarda 30 mSS olarak belirtilmiştir (İlbank 2013).

İçme suyu dağıtım şebekelerindeki su basıncı, terfi seviyesine, depo kotuna, dağıtım şebekesindeki boruların tipi, yaşı ve çaplarına, abonelerin su tüketim miktarına ve şebekedeki sızıntı miktarına bağlıdır. İçme suyu dağıtım şebekelerindeki su basıncı, debi ve su hızları saatlik, günlük, mevsimlik ve yıllık olarak büyük değişimler gösterdiği için şebekeler dinamik yapıdadır. Bu nedenle, şebekelerin analiz edilmesi sürecinde su basıncının tahmin edilmesinde detaylı hidrolik modellerin kullanımı gerekli olmaktadır. Şebekelerdeki fazla basıncın düşürülmesi amacı ile basınç yönetimi uygulanmaktadır. Basınç yönetimi için yaygın olarak farklı çeşitteki basınç düşürme vanaları (Pressure Regulating Valves - PRV) kullanılmaktadır. Kullanılan farklı PRV çeşitleri; klasik sabit çıkışlı, zaman ayarlı, debi ayarlı, kapalı devre basınç kontrollü (sensörlü) vanalar olarak tanımlanmaktadır. Belirtilen vana çeşitleri arasında en ucuz ve basit olanı klasik sabit çıkışlı vanalardır ve bu nedenle de basınç düşürmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kapalı devre basınç kontrollü PRV'lerin kullanımı konusunda literatürde yer alan araştırmalar oldukça azdır. İçme suyu dağıtım şebekelerinde hem basıncın azaltılması, hem de enerji üretilmesi konusu ise özgün bir araştırma konusudur.

Son yıllarda, içme suyu şebekelerindeki fazla basıncın düşürülmesi ve eş zamanlı olarak enerji üretilmesi amacı ile pompa türbinlerin (Pump as Turbine - PAT) kullanılması konusu oldukça büyük ilgi çekmektedir. 2017 yılında tamamlanan bir TÜBİTAK Projesi (Proje No: 114Y203, Proje Yürütücüsü Prof. Dr. Ayşe Muhammetoğlu) kapsamında tam ölçekli bir PAT sistemi Antalya kenti Anfaş bölgesi içme suyu dağıtım şebekesinde kurulmuş ve işletilmiştir. Kurulan sistem ile şebekedeki fazla basınç ve su kayıpları azaltılmış, ek olarak da enerji üretilmiştir. Belirtilen proje kapsamında kurulan sistem ile üretilen enerjinin depolanması veya doğrudan elektrik dağıtım şebekesine verilmesi mümkün olmamıştır. Bu nedenle kurulan sistem off-grid olarak elektrik dağıtım şebekesinden bağımsız olarak işletilmektedir.

Tez çalışmasının amacı hidrolik modelleme ile içme suyu dağıtım şebekelerindeki fazla basıncın düşürülmesinin analiz edilmesi ve bu süreçteki enerji üretim potansiyelinin incelenmesidir. Bu amaç için Antalya kenti içinde yer alan iki farklı içme suyu dağıtım şebekesi için uygulamalar yapılmıştır. İlk olarak, Kaleiçi bölgesi içme suyu dağıtım şebekesi için önerilen potansiyel bir PAT sistemi ile basıncın düşürülmesi sürecindeki enerji üretim potansiyeli incelenmiş, ek olarak Anfaş bölgesinde yer alan tam ölçekli PAT sisteminde basıncın düşürülmesi ile elde edilen enerji uzun vadeli olarak irdelenmiştir. Tez çalışması için kapsam aşağıda sunulmaktadır:

- İçme suyu dağıtım şebekelerindeki su basıncının tahmin edilmesi, basınç yönetimi, basıncın azaltılması için kullanılan farklı PRV çeşitleri, PAT sistemi ve enerji üretimi konularında detaylı literatür incelemesi yapılması,
- Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı tarafından geliştirilen US-EPA EPANET (Rossman, 2000) hidrolik modelinin Kaleiçi bölgesi içme suyu dağıtım şebekesine uygulanarak hidrolik modellemesinin yapılması,
- Kaleiçi bölgesi için hidrolik modelin kalibrasyon ve doğrulama uygulamalarının sahadan elde edilen farklı veri setleri kullanılarak gerçekleştirilmesi,
- Kaleiçi bölgesi içme suyu dağıtım şebekesinde optimum şebeke işletim basıncının belirlenmesi ve fazla basınç yüksekliklerinin tespit edilmesi,
- Anfaş bölgesinden elde edilen tecrübe ve PAT sistemi verimliliğinden faydalanılarak Kaleiçi bölgesinde PAT sistemi kurulması halinde potansiyel enerji üretimi ve kullanımının incelenmesi,
- Anfaş bölgesi içme suyu şebekesindeki debi, basınç azalımı, enerji üretimi ve kullanımının PAT sisteminden elde edilen gerçek zamanlı veriler ile izlenmesi ve değerlendirilmesi.

Belirlenen çalışma kapsamı ile tez çalışması için planlanan hedeflerin eksiksiz olarak gerçekleştirilmesi mümkün olmuştur. Böylece hem sahada işletilmekte olan gerçek bir sisteme ait işletim verileri, hem de olası bir uygulama sahası için teorik değerlendirme yapılması sağlanmıştır. Tez çalışması ile Antalya Kaleiçi bölgesi içme suyu dağıtım şebekesi için fazla basıncın azaltılması, basınç yönetimi ve fazla basınçtan enerji üretim potansiyeli net olarak ortaya konulmuştur. Bu çalışma ülkemizde ve Dünya’da yapılacak benzer uygulamalar için özgün nitelikli bir örnek oluşturma potansiyeline sahiptir.

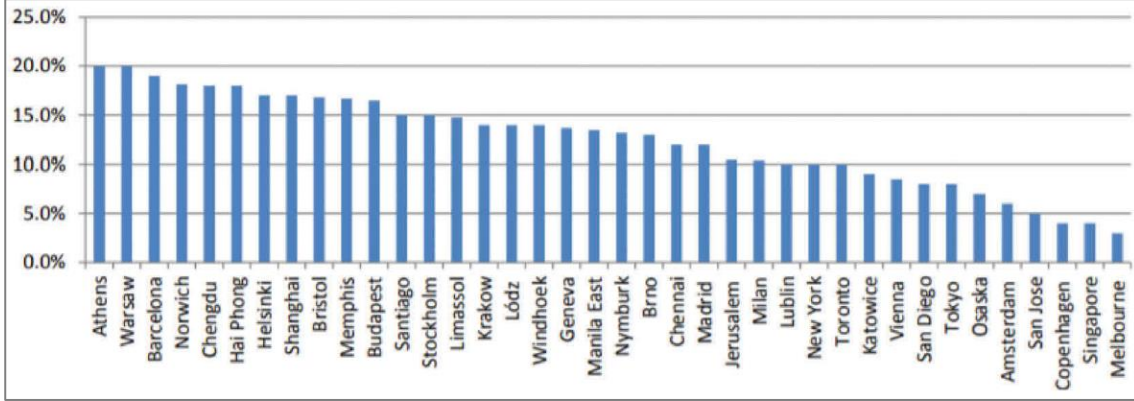
2. KAYNAK TARAMASI

Nüfus artışı ve hızlı kentleşme sonucunda su kaynakları üzerindeki baskılar artmakta, su kıtlığı küresel ölçekte ülkelerin karşılaştığı temel sorunlardan biri haline gelmektedir. Birleşmiş Milletler (BM), su kullanımındaki artışın nüfus artışının iki katı olduğunu ve zamanla artmaya devam ettiğini belirtmektedir. Bu eğilimin devam etmesi halinde, küresel nüfusun üçte ikisinin 2025 yılına kadar su eksikliği ile karşı karşıya kalacağı ön görülmektedir (BM 2009). Yetersiz doğal kaynaklar veya su kaynaklarının kötü yönetimi, su kıtlığına neden olabilir (Cosgrove ve Lounck 2015). Bu sorun, sel, fırtına ve kuraklık gibi doğal afetleri tetikleyen iklim değişikliklerinin etkisi ile daha da kötüleşebilmektedir (World Bank 2018). BM Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH) herkes için daha iyi ve daha sürdürülebilir bir gelecek elde etmeyi hedeflemektedir. Bu hedefler temiz su sağlamak, ekonomik ve temiz enerji üretmek, endüstriye, yeniliğe ve altyapıya destek vermek, sürdürülebilir şehirlere ve toplumlara ulaşmakta büyük rol oynamaktadır. Su kayıplarını, enerji kayıplarını ve sera gazı emisyonlarını azaltmak, sürdürülebilir su temini sistemlerinin uygulanması için birincil hedefler arasındadır ve onlar BM'nin SKH'lerine oldukça büyük katkıda bulunurlar (Abd Rahman vd. 2018).

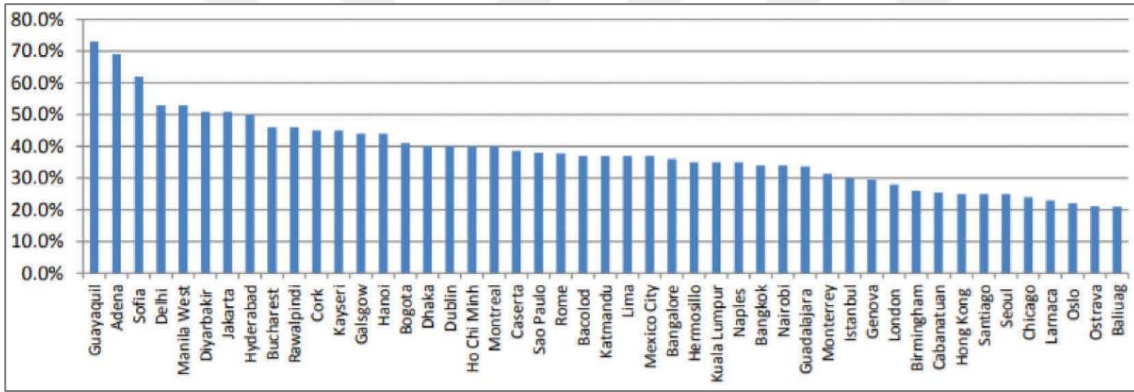
Kaynaktan su temini, arıtma, iletim ve dağıtım aşamalarında yüksek miktarda enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları gerçekleşir. Su basıncı, su temini ve dağıtım sistemleri için ana tasarım parametrelerinden biridir ve belirli sınırlar içinde olması gerekir. Su temini ve dağıtım sistemlerinde aşırı su basıncı, boru patlamaları için riskleri artırır, yüksek su ve enerji kayıplarına neden olur ve altyapı elemanlarının kullanım ömrünü azaltır. Diğer taraftan, su dağıtım şebekelerinde çok düşük su basıncı olması durumunda, su tüketicilere ulaşamaz ve müşteri memnuniyetsizliğine neden olur. Hükümetlerin ve diğer sosyal paydaşların, ulusal su ayak izini ve ekonomisini geliştirmek için su politikalarını, sürdürülebilir su yönetimi ilkeleri ile birleştirmesi ve birlikte çalışması gerekmektedir (Pahlow vd. 2015). Su kuruluşları tarafından sürdürülebilir su yönetimini sağlamak için uygulanan proaktif eylemlerden birisi Gelir Getirmeyen Suyun (GGS) azaltılmasıdır. GGS, dağıtım sistemine giren su miktarı ile faturalandırılmış izinli su tüketimi arasındaki farkı ifade eder ve iki ana bileşenden oluşur; 1) faturalandırılmamış izinli tüketim ve 2) su kayıpları (fiziki kayıplar ve idari kayıplar) (Lambert ve Hirner 2000). İçme suyu temin ve dağıtım sistemlerindeki yüksek GGS seviyesi, su temininden sorumlu kuruluşların su temini sistemlerinin yönetimi konusundaki performansının düşük olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, kayda değer bir gelir kaybına da neden olmaktadır (Malcolm vd. 2008). Yüksek GGS seviyeleri, su temini sistemlerinin sürdürülebilir yönetimini ve iyileştirilmesi sürecini etkileyebilir, kullanıcılara gelecekte yeterli ve sürekli su temini sağlanamayabilir. Bu nedenle, su kayıplarının azaltılmasına yönelik eylemler önemlidir ve ulusal planda vurgulanmalıdır (Abd Rahman vd. 2018).

Etkili bir GGS yönetimi, su kayıplarını ve israfı önemli ölçüde azaltabilir, böylece daha sonra talep edilen alanlara su talebini karşılama imkanını arttırabilir. Uluslararası Su Birliği (IWA), üretilen toplam arıtılmış su hacminin %25'inin altında kalan GGS seviyesini kabul edilebilir düzey olarak önermektedir. Smart Water Network (2011) tarafından yapılan bir araştırmada, GGS'nin %20'nin altında olduğu şehirler arasında Melbourne, Singapur, Kopenhag, Tokyo ve New York gibi gelişmiş ülkelerdeki şehirler gösterilmektedir (Şekil 2.1-a). Öte yandan, Şekil 2.1-b'de GGS oranı %20'den fazla olan şehirler gösterilmektedir. Bangkok, Kuala Lumpur, Ho Chi Minh, Hanoi, Jakarta ve Delhi gibi Asya'da bulunan gelişmekte olan ülkelerin başkentleri, GGS seviyesinin %25'ten

fazla olduğu şehirler arasında yer almaktadır (Abd Rahman vd. 2018). Dünya Bankası (2016), gelişmekte olan ülkelerin her gün yaklaşık 45 milyon metreküp su kaybettiklerini, bu miktarın her gün 90 milyondan fazla insanın su ihtiyacını karşılayabileceğini bildirmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2.1. Bazı şehirler için GGS oranları, (a) %20'nin altında, (b) %20'nin üzerinde (Abd Rahman vd. 2018)

2.1. İçme Suyu Dağıtım Şebekelerinde Su Kayıpları

Su kayıpları, şebekelerin eski ya da yeni olup olmadığına bakılmaksızın tüm içme suyu dağıtım şebekelerinde meydana gelmektedir. Yalnız gelişmemiş ülkelerde değil, gelişmiş ülkelerde de su kayıpları meydana gelmektedir (Thornton vd. 2008).

Su kaynakları, iklim değişikliği, nüfus artışı ve ekonomik kalkınma gibi etkilere dolaylı olarak bir stres altındadır. Su kıtlığı, özellikle Akdeniz bölgesinde ana tehdit olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, su hizmetleri suyun dağıtım süresince verimli halde olmalıdır ki, iyi kalitede su temini sağlanabilsin. Su en değerli doğal kaynaklardan birisi olduğu için su dağıtım sistemlerindeki kayıpları, yönetilmesi gereken bir sorundur (Kanakoudis ve Muhammetoğlu 2014).

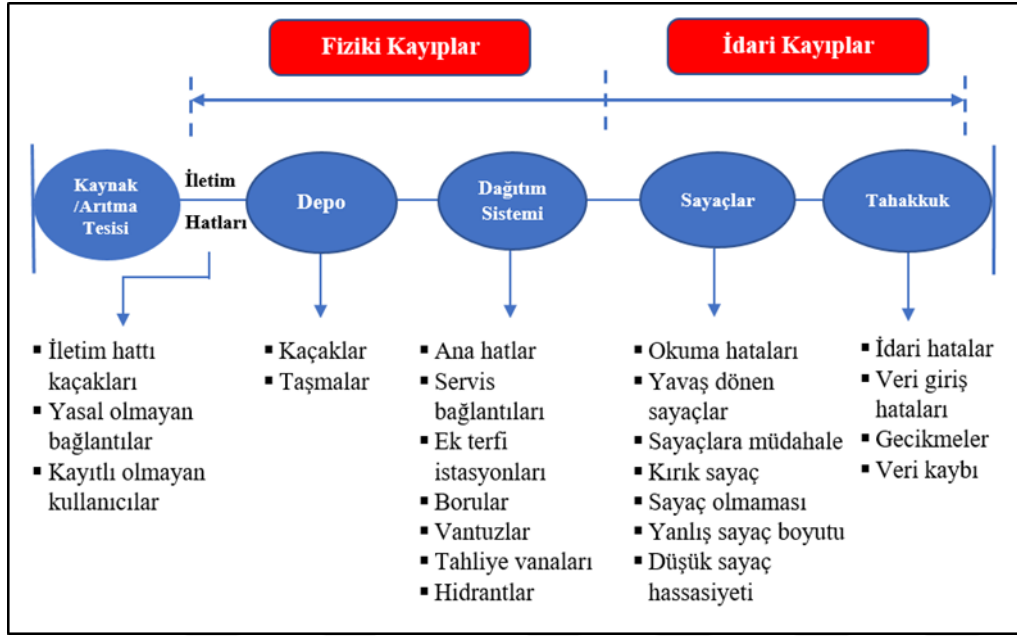
Su dağıtım şebekelerindeki su kayıplarının yönetimi ve azaltılması, aynı zamanda çevresel koruma ve tüketimlerin sürdürülebilirliğini vurgulayan mevcut yaklaşım nedeniyle giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu amaçla su dağıtım sistemi yöneticilerinin temel endişelerinden birisi %40'lık değerlere ulaşan su kayıplarının en aza indirilmesi olmuştur (Araujo vd. 2006).

Fiziki ve idari su kayıplarını içeren toplam su kayıpları, ülkeler arasında büyük farklılıklar göstermektedir. Örnek olarak, bazı Afrika ülkelerinde yasadışı su tüketiminin yüksek olması nedeniyle, idari su kayıplarının toplam su kayıpları içindeki payı, diğer pek çok Afrika dışındaki ülkeden daha yüksektir. Genel olarak, toplam su kayıplarının yaklaşık %60'ı fiziki kayıplardan oluşmakta ve geri kalan %40'ı ise idari su kayıplardan oluşmaktadır (Muhammetoğlu ve Muhammetoğlu 2017).

Ülkemizde 2016 yılında kaynağından içme ve kullanma suyu olarak çekilen 5,8 milyar m³ suyun, %64'ü belediyeler tarafından abonelere dağıtılmış ve faturalandırılmıştır. Geriye kalan %36'lık kısım ise GGS olarak hesaplanmaktadır. Bu da yaklaşık 2 milyar m³ suya ve yaklaşık 27 milyon kişinin bir yıllık su ihtiyacına karşılık gelmektedir (Coşkun vd. 2018).

Türkiye'deki pek çok belediyede, temin edilen suyun toplam hacmini temsil eden Sistem Giriş Hacmi'ni ölçebilen ekipman bulunmamaktadır. Sonuç olarak, Türkiye'deki pek çok su dağıtım sistemlerindeki su kayıp oranları tahminlere dayanmaktadır ve gerçekçi değildir (Güçlü 2014). GGS yüzdesinin, bazı gelişmiş ülkeler için %10'dan az olduğu, ancak gelişmemiş ülkeler için %70'i bile geçebileceği bildirilmektedir. GGS ve su kaybı bileşenlerini anlamak ve ölçmek, kentsel su kayıplarının yönetimi için ilk adımdır. Ek olarak, su kuruluşları GGS azaltma stratejisi geliştirme konusunda uzun vadeli taahhütlerde bulunmalıdır (Muhammetoğlu vd. 2018).

Su kayıpları fiziki (gerçek) kayıplar ve idari (görünür) kayıpları içermektedir (Şekil 2.2). Su kayıpları, arıtma tesisi, dağıtım şebekesi, depolar, su sayaçları ve faturalandırma sistemi (tahakkuk) dahil olmak üzere su temin sisteminin pek çok noktasında meydana gelebilir. Su kayıpları, GGS içinde en büyük bölümü temsil eder.



Şekil 2.2. Su temin sisteminde oluşan tipik su kayıpları (MNRW 2010; Muhammetoğlu ve Muhammetoğlu 2017)

2.1.1. Fiziki (Gerçek) su kayıpları

Fiziki kayıplar, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi iletim ve dağıtım şebekelerindeki sızıntı, tesislerin depolama tanklarındaki sızıntı, taşmalardan ve ölçüm cihazına kadar olan servis bağlantılarındaki sızıntıdan oluşur. Fiziki kayıpların azaltılması için gerekli önlemlerin alınması ve altyapı yatırımlarının yapılması gerekir.

Dağıtım ve iletim hattı ana kaçıkları: sistemden kaybedilen su miktarını temsil eden, gelir üretmeyen, düzeltilmediği takdirde sistem güvenilirliğine ciddi şekilde zarar verebilir ve su kalitesi sorunlarına neden olabilir.

Depolardan su sızıntıları ve taşma: sistemdeki depolama tesislerinden kaybedilen su miktarından oluşur.

Servis bağlantı borusu sızıntıları: Ana şebekeden müşterinin kullanım noktasına sızan su miktarından oluşur. Bir müşterinin sayacından sonra meydana gelen bir sızıntı kamu su kuruluşları için gelir yaratabilse de çoğu zaman müşterinin sorumluluğunda olan bir israftır ve müşteri ile su kuruluşlarının ilişkilerini zorlayabilir. Servis bağlantısı sızıntıları sistemden kaynaklanan gerçek kayıpları temsil eder, tespit edilmesi ve tanımlanması çok zor olabilmektedir. AWWA / IWA su yönetimi metodolojisinde sadece sayaçlara kadar olan servis bağlantısı sızıntıları dahil edilmiştir (EPA 2010). Çok sayıda çalışma, su şebekelerindeki sızıntının kesinlikle boruların ve cihazların bozulmasına ve yaşlarına bağlı olduğunu göstermiştir (Council 1980).

2.1.2. İdari (Görünen) su kayıpları

İdari kayıplar, altyapıdaki fiziki sızıntılar nedeniyle değil, diğer faktörlerin neden olduğu kayıplardır. İdari kayıplar kökenlerine göre aşağıdaki kategorilerde gruplandırılabilir:

- Kırık/bozuk sayaçlardan kaynaklanan yanlışlıklar veya müşteri sayaçlarındaki hassasiyetten kaynaklanan hatalar.
- Su hırsızlığı ve yasadışı bağlantılar nedeniyle izinsiz tüketim.
- Faturalama sisteminde yanlış veri işleme ve okuma hatası

İdari su kayıpları tüketiciye başarıyla iletilen tüm suda görülür, ancak doğru bir şekilde ölçülmez veya kaydedilmez. Bu nedenle tüketicinin su harcama miktarında bir hataya neden olur. Su şebekelerinde sistem genelindeki ölçümler ile yasa dışı bağlantılar ve idari kayıplar nedeni ile oluşan önemli miktardaki su kayıplarını belirlemeye yardımcı olur. İdari kayıplar, işletme için gelir yaratmaz ve üretim maliyetlerini arttırır. İdari kayıplar, perakende satış maliyetinde değerlendirilmekte olup bu nedenle birçok durumda su kuruluşunun karşılayacağı en pahalı kayıplar olmaktadır. İdari su kayıplarının azaltılması, birçok durumda nispeten düşük maliyetlerle sağlanabilir ve bu nedenle genellikle su hizmetine hızlı bir şekilde fayda sağlayan iyi bir başlangıç noktasıdır (Thornton vd. 2008).

İdari kayıplar hafife alınmamalıdır, çünkü daha önce üretilmiş, arıtılmış, taşınmış ve tüketiciye teslim edilmiş su için gelir elde edilmemektedir (Ziegler vd. 2011). Ortaya çıkan idari su kayıplarının sebepleri;

a) Su sayacı yanlışlıkları

Ölçüm kayıpları genellikle idari kayıpların en yaygın şeklidir. Deneyimler, su sayaçlarındaki hataların su tüketimlerini belirli oranda yanlış ölçmeye sebep olduğunu göstermektedir. İdari kayıplar hem müşteri sayaçları, hem de toplu su sayaçlarında gözlemlenebilmektedir. Uygun boyutta olmayan sayaçların kullanımı, aşırı büyük sayaçların kullanımı, yanlış sayaç bağlantıları ve kalibre edilmemiş sayaçların yanı sıra zamanla birçok sayacın ölçüm performansının azalması idari kayıpların oluşmasına neden olmaktadır (Ziegler vd. 2011).

b) Veri işleme hataları

Ölçülmemiş tüketim (belediye ihtiyaçları, yangınla mücadele, yeşil alanların sulanması, sokak temizliği vb.) miktarları göz ardı edilebilirken bazen de ölçülmemiş tüketim miktarları fazla olarak tahmin edilebilir. Sabit oranlı tarifeler, bütçelenen miktarı aşan aşırı iç su tüketimine neden olabilir (Ziegler vd. 2011).

c) İzinsiz tüketim

Yetkisiz su çekimi, birçok ülkede kayda değer bir su kaybı kaynağını teşkil eder ve birçok farklı şekilde görünür; yasa dışı bağlantılar, müşteri sayaçlarına zarar verilmesi,

manipüle edilmiş sayaçlar, yangın hidrantlarından kaçak su çekilmesinin yanı sıra sayaç okuyucular veya diğer yardımcı personelin hatalı davranışları (Ziegler vd. 2011).

2.1.3. İçme suyu dağıtım şebekelerinde su kayıplarının azaltılması

Sanayileşmiş bir toplumda güvenli içme suyu temini sistemlerinin bulunması temel bir gerekliliktir. Bu nedenle su temini sistemleri en önemli kamu yararı sağlayan faaliyetlerin başında yer alır. Dünyada her yıl içme suyu temin sistemlerinin sağlanması veya iyileştirilmesi için büyük miktarlarda para harcanmaktadır. Bir su temini sistemindeki sermaye yatırımının ana payı, su temin ve dağıtım şebekesine gitmektedir. Dağıtım sisteminde, bir su temini projesinin maliyetinin yaklaşık %80 ila %85'i kullanılır. Bu nedenle, bir su dağıtım sistemi tasarlamak için rasyonel yöntemlerin kullanılması önemli ölçüde tasarruf sağlayacaktır (Prabhata ve Ashok 2008).

Dünya Bankası'na ait bir çalışmada, yılda yaklaşık 45 milyar m³ suyun, tedarik edilen toplam suyun %35'ine karşılık gelen sızıntı nedeniyle kaybedildiği gösterilmiştir. Bu su kaybının yarısı önlenememiş olsaydı, 100 milyon insan için daha fazla yatırım yapılmadan güvenli su erişimi sağlanabilirdi (Kanakoudis ve Muhammetoğlu 2014).

GGs'nin su ve enerji kaybı gibi çevresel etkilerinin yanı sıra gelir kaybı gibi ekonomik etkileri de vardır. Ayrıca su kayıpları, sera gazı emisyonlarını arttırmaktadır, çünkü kaybedilen su hacmi enerji kullanılarak pompalanmakta, arıtılmakta ve dağıtılmaktadır. Su temini amacıyla desalinasyon işlemi uygulandığında, sera gazı emisyonlarına bağlı su kayıpları daha da yüksek olmaktadır (Kanakoudis ve Muhammetoğlu 2014).

Dünya'daki su kuruluşlarının en büyük sorunu, su dağıtım şebekelerinin kullanım ömürlerini çoktan aşmış olması ve şebekelerin tamamen yenilenmelerinin ekonomik açıdan uygun bir seçenek olmamasıdır. Bu nedenle, su kuruluşlarının öncelikli görevi, boru hattı sistemlerini mümkün olan en az miktardaki yatırımla yenilemek ve müşterilerine sürekli ve yüksek kalitede su temin edilmesini sağlayacak bir durumda tutmaktır (Agathoklis ve Symeon 2017).

Su kayıplarını azaltmanın temel faydaları; pompalama ve su arıtma maliyetlerini azaltmak, GGS miktarını azaltmak, yeni su altyapısı için yatırımları geciktirmek, yeni su kaynaklarına olan ihtiyacı ertelemek, su kalitesini korumak ve su kaynaklı hastalık risklerini azaltmaktır. Boru patlamaları ve su kesintileri sıklığının azaltılması, boruların ve diğer ekipmanların kullanım ömrünün uzatılması ile su abonelerinin memnuniyeti artmaktadır (Muhammetoğlu vd. 2018).

Malezya ve Filipinler gibi gelişmekte olan ülkelerde son yıllarda su kayıplarının azaltılması yönünde başarılı uygulamalar yürütülmüştür. Örnek olarak; Manila şehrinde su temini hizmetini sağlayan The Manila Water Company firması, 1997-2009 yılları arasında GGS seviyesini %63'ten %16'ya düşürmeyi başarmıştır. Su kayıplarının başlıca sebepleri; hasar görmüş boru hatları, kot problemleri ve kaçak kullanımlar olarak belirtilmiştir. Başarılı uygulamalar sonrasında, ulusal bir su krizinin önüne geçmek amacı ile The Manila Water Company, Filipinler hükümeti tarafından su temini ve atıksu arıtımı konularında resmi kurum olarak yetkilendirilmiş ve bunun sonucu olarak şehrin neredeyse %99'unda 24 saat kesintisiz temiz su temini başta olmak üzere başarılı

sonuçlara ulaşılmıştır. The Manila Water Company, özellikle su şebekelerinde GGS seviyelerinin azaltılmasına yönelik çalışmalarına hızla devam etmektedir (Manila Water Company 2018).

Güney doğu Asya ülkeri de içme suyu şebekelerinde GGS seviyesinin azaltılması için ciddi anlamda önlemler almaktadır. 2018 yılında Malezya hükümeti, yaklaşık 350 milyon Amerika Birleşik Devletleri (ABD) doları tutarındaki bütçeyi, GGS seviyesini %35'ten IWA'nın önermiş olduğu %25 oranına azaltmayı hedefleyen GGS programını desteklemek için ayırmıştır. Dünya genelinde de IWA, Amerika Su Kuruluşu Birliği (American Water Works Association-AWWA) ve Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency-EPA) gibi kurumların yarattığı farkındalık ve destek ile su kayıpları ile mücadelenin ciddi bir sorun olarak değerlendirildiği ve bu konuda önlemler alındığı görülebilir. Temmuz 2014'te İtalya'nın Bari kentinde "The Battle of Background Leakage Assessment for Water Networks" isimli toplantı düzenlenmiştir. Bu toplantıda akademi ve sanayi sektörlerinden 14 ekip toplanmış ve su dağıtım sistemlerinde arka plan su sızıntılarından kaynaklanan su kayıplarını azaltmak için bir yöntem sunulmuştur (Giustolisi vd. 2014).

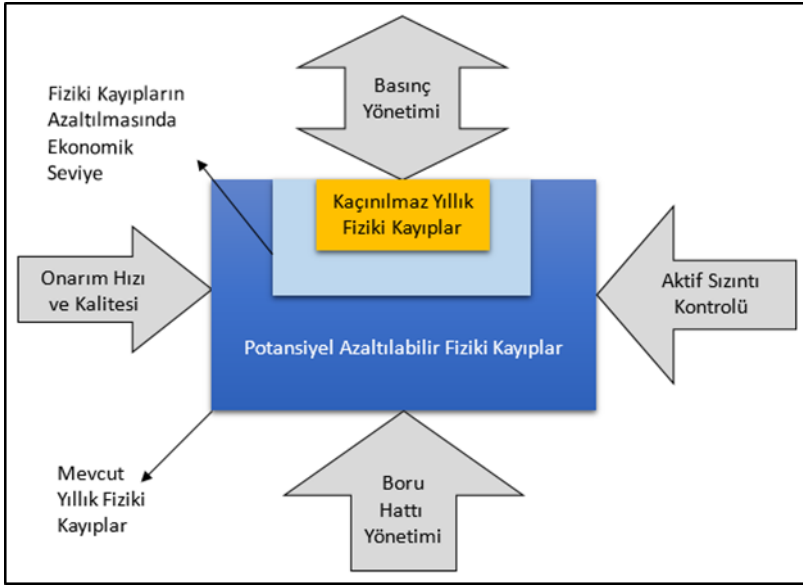
Su şebekelerinde suyun dağıtımı ve hareketi sırasında borularda meydana gelen sızıntılar, su kayıplarına neden olan en büyük etken olarak tanımlanmıştır (Lambert 1994; Fontana ve Morais 2016). Fakat şebekelerde meydana gelen sızıntıların, birkaç temel sebebi bulunmaktadır. Örnek olarak, kullanılan boruların yaşı (Folkman 2018) ve malzemesi (Ferrante 2012; Mora-Rodríguez vd. 2014), toprak karakteristiği (Noack ve Ulanicki 2008), hatalı boru montajı (Hunaidi 2000) ve yüksek su basıncı (Van Zyl ve Clayton 2007; De Paola ve Giugni 2012) gösterilebilir. Sızıntılar genellikle akış yönündeki değişiklikler sonucunda suyun darbe etkisi yaptığı boru bağlantı noktalarında görülmektedir. Gece saatlerinde düşük su kullanımı nedeniyle basıncın artması, su kayıpları için en kötü senaryoyu oluşturmaktadır (Miyaoka ve Funabashi 1984).

Fiziki su kayıplarını azaltmak için birkaç strateji belirlenmiştir: basınç yönetimi, kaçak tespiti ve akıllı ölçüm, boru rehabilitasyonu ve su ile ilgili varlık yönetimi gibi aktif kaçak kontrolü faaliyetleri ile su şebekelerinde alt bölgelerin (District Metered Area-DMA) uygulanmasıdır (Malcolm vd. 2008). Bütünsel bir araştırma/uygulama ile su kayıplarını temelden azaltmak ve su kayıpları yönetiminde başarıyı sağlamak hayati önem taşımaktadır.

Fiziki su kayıpları yönetim stratejisi içinde dört ana bileşen yer alır. Bunlar;

- a) Basınç yönetimi,
- b) Onarım hızı ve kalitesi,
- c) Aktif sızıntı kontrolü,
- d) Boru hattı yönetimi,

Şekil 2.3'te gösterilen büyük mavi alan Potansiyel Azaltılabilir Fiziki Kayıplar olarak tanımlanır ve dağıtım şebekesi eskidikçe fiziki kayıplarda artış gözlenir. Fakat fiziki kayıplardaki artış hızı, fiziki su kayıpları yönetim stratejisinde yer alan dört ana bileşenin uygun şekilde bir araya gelmesi ile sınırlandırılabilir (Muhammetoğlu ve Muhammetoğlu 2017).



Şekil 2.3. Fiziki su kayıplarının yönetiminde uygulanan temel bileşenler (Simbeye 2010)

2.2. Basınç Yönetimi

Basınç yönetimi, sızıntıyı azaltmanın en etkili ve uygun maliyetli yöntemlerinden biridir. Tüketicilere yeterli ve verimli su temini sağlanabilmesi için su dağıtım sistemindeki basınçların, optimum işletim seviyelerinde olacak şekilde yönetilmesi olarak tanımlanabilir (Thornton ve Lambert 2005).

Ülkemizde içme suyu dağıtım şebekelerinde İller Bankası Şartnamesi'ne göre nüfusu 50.000'e kadar olan küçük şehirlerde minimum işletme basıncı 20 mSS (metre su sütunu) 50.000'den fazla olan şehirlerde ise 30 mSS olmalıdır. İller Bankası Şartnamesi'ne göre izin verilen maksimum basınç ise 60 mSS olacak şekilde sınırlandırılmıştır (İlbank 2013).

Bilindiği gibi, basınç ve su kayıpları arasında bir ilişki kurulabilir, buna göre basıncın azaltılması, kayıpların azalmasına neden olur (Nicola vd. 2017).

Şebekede fazla basıncın azaltılması amacı ile yaygın olarak PRV'ler kullanılmaktadır. PRV optimizasyon süreci, su taleplerinin zamansal ve mekansal dağılımı hakkında bilgi gerektirir. Bununla birlikte, bu dağılımlar farklılaştığında, PRV'nin sabit çıkışlı olarak düzenlenmiş kullanımı ile sağlanan çözüm etkili olmayabilir. Bu amaç için, çalışma şartlarından bağımsız olarak şebeke üzerinde en uygun basınç seviyesini sağlamak için PRV'nin Gerçek Zamanlı Kontrolü (Real Time Control) kullanılabilir. Vanaların, pompaların ve diğer cihazların uzaktan kontrolü, son on yılda su temin ve dağıtım sistemi içerisinde yaygın olarak kullanılmasına rağmen, PRV'ler ve basınç kontrolü için çok az sayıda uygulama geliştirilmiş ve bunların en büyük kısmı sadece teorik açıdan incelenmiştir. Gerçek zamanlı kontrol teknikleriyle yapılan düzenleme örnekleri, son on yılda kentsel drenaj sistemleri alanında büyük ölçüde benimsenmiştir (Nicola vd. 2017).

Araujo vd. (2006) her PRV'yi ilave bir boru pürüzlülüğü kullanarak simüle edebilen iki aşamalı bir metodoloji önermiştir. İlk aşamada vanaların sayısı ve yeri optimize edilirken, ikinci aşamada vanaların açılma derecesi ayarlanmaktadır. Nicolini ve Zovatto (2009), vana sayısını ve sistemdeki toplam sızıntıyı minimize ederek PRV'lerin sayısını, yerini ve ayarını iki kriterli optimizasyon problemi olarak belirlemiştir (Nicolini ve Zovatto 2009).

En yaygın basınç yönetimi yöntemleri; sabit çıkışlı basınç kontrol vanaları, pompa ve seviye kontrolü, zaman modülasyonlu kontrol vanaları ve akış modülasyonlu kontrol vanalarını içermektedir (Girard ve Stewart 2007).

2.2.1. Basınç kontrol sistemleri

Sabit çıkışlı basınç kontrolü

Sızıntıyı azaltmak için basınçlı borulardaki sızıntı ve basınç arasındaki ilişkiden kaynaklanan kontrol stratejileri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür stratejiler esas olarak basınç regülasyonu için PRV kullanımına dayanmaktadır. PRV'ler genellikle bölge üzerindeki basınç seviyesini ve su kayıplarını azaltmak için bir DMA girişine monte edilir. Diğer durumlarda, PRV'ler içme suyu dağıtım şebekelerine dağıtılabilir. PRV'ler, tüm düğüm noktalarında minimum basıncı sağlayarak, şebeke içindeki basıncı düzenlemek üzere ayarlanır. Bu amaçla, basıncın tüm şebekede minimum değerden daha yüksek tutulması açısından şebekenin bir (veya daha fazla) dezavantajlı düğüm noktaları (kritik noktalar) tespit edilebilir. Bu düğüm noktaları, basınç ölçümleri veya hidrolik modelleme vasıtasıyla belirlenebilir. Sağlanması gereken minimum basınç, şebeke özelliklerine göre değerlendirilebilir (Nicola vd. 2017).

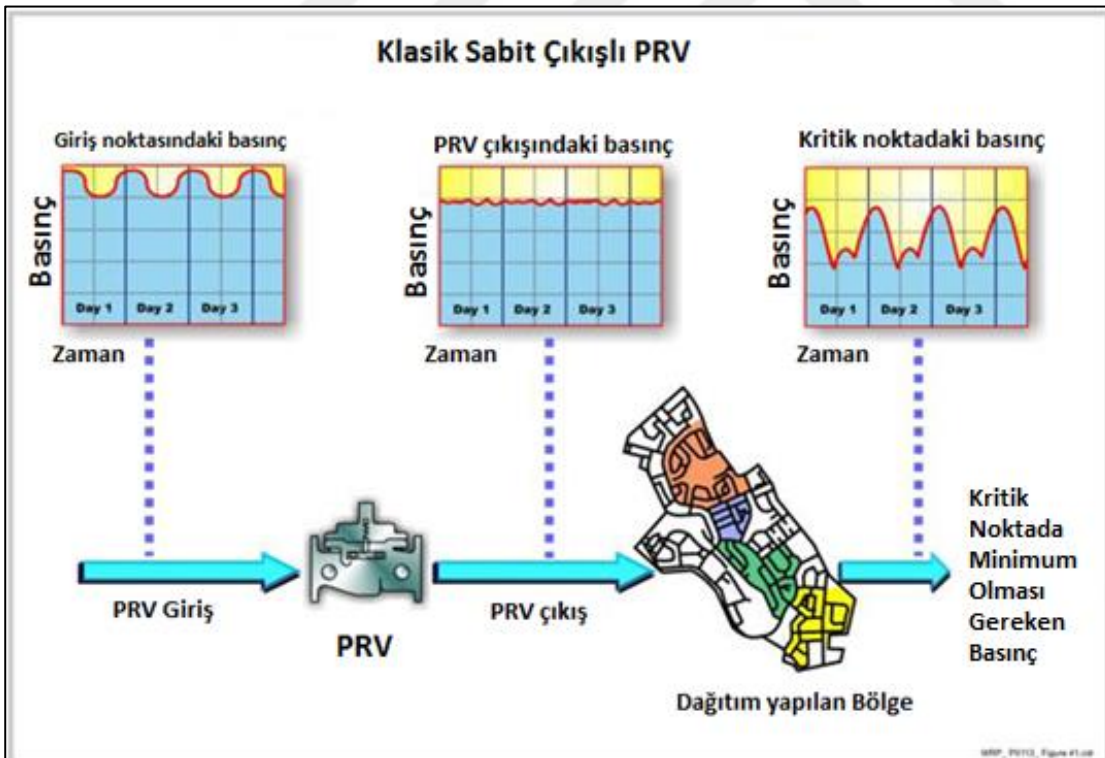
PRV'ler, şebekedeki su basıncını belirli bir seviyede azaltmak veya korumak için şebekedeki stratejik noktalara kurulan ekipmanlardır. Vana, yukarı akış basıncı veya akış hızı dalgalanmalarından bağımsız olarak önceden ayarlanmış aşağı akış basıncını korur. PRV'ler, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi, genellikle DMA girişinde yer alan debimetrenin yanına yerleştirilir. PRV, debimetreden aşağı akış yönünde olmalıdır, böylece vanadaki türbülans debimetre ölçüm cihazının doğruluğunu etkilemez. Gelecekteki bakım çalışmalarını kolayca gerçekleştirmek için PRV'yi bir bypass hattı üzerine kurmak iyi bir uygulamadır (Malcolm vd. 2008).



Şekil 2.4. PRV'yi bir bypass hattı üzerine kurmak iyi bir uygulamadır (Malcolm vd. 2008)

Klasik sabit çıkışlı PRV ile basıncın azaltılması Şekil 2.5'te gösterilmekte olup, bu vana kullanılması halinde PRV çıkışındaki basınç her zaman sabit olmaktadır. PRV'nin kullanım avantajları (McKenzie 2001);

- Sadece bir PRV gerektirir ve yerleştirilmesi oldukça kolaydır,
- Maliyeti oldukça düşüktür, elektronik ekipman gerektirmez,
- İşletmesi ve bakımı kolaydır.



Şekil 2.5. Klasik sabit çıkışlı basınç kırıcı vana ile basıncın azaltılması (McKenzie 2001)

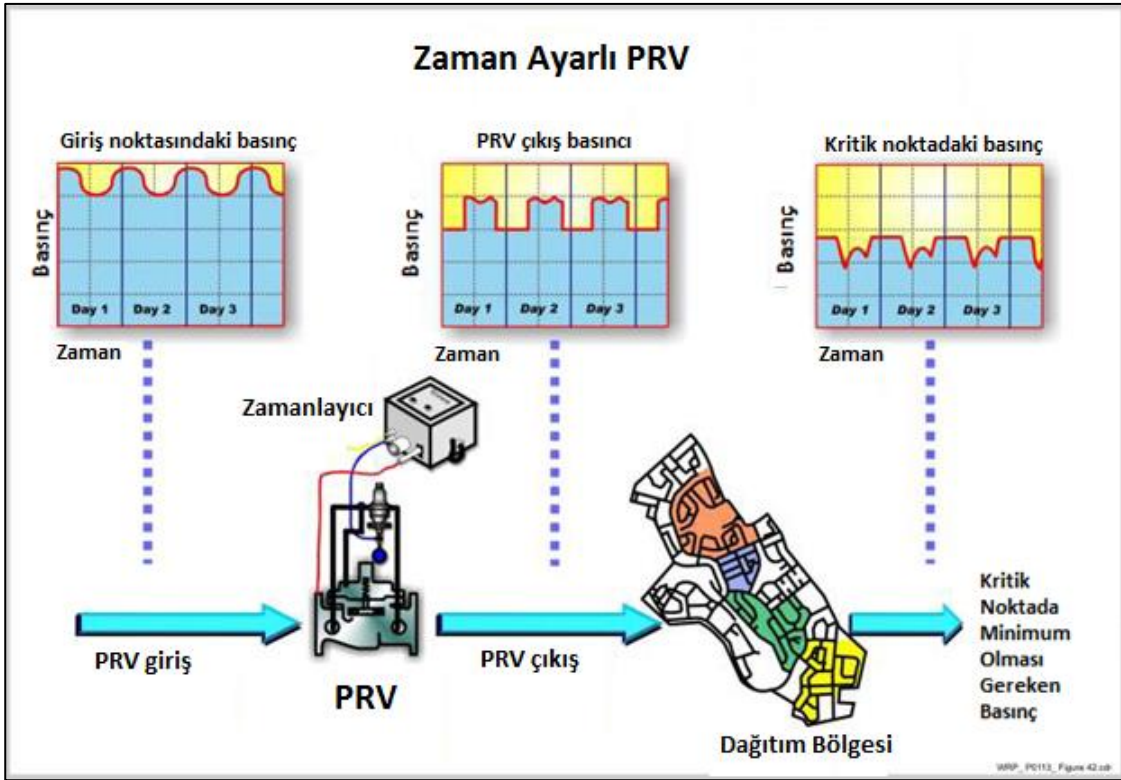
Klasik sabit çıkışlı PRV sisteminin tek dezavantajı, günün farklı zamanlarına yönelik su basıncı ayarlama konusunda esnek olmamasıdır. Bunun neticesi olarak, sistemin tercih edilmesi durumunda çok kazanç sağlamak mümkün değildir. Çoğu örnekte, sabit çıkışlı basınç kontrolü, bakım ekibinin kapasitesinden dolayı tercih edilen bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. İşletme ve bakımını yapmak için ekstra ekipman ve eleman ihtiyacı gerektirmez (McKenzie 2001).

Zaman ayarlı basınç kontrolü

Zaman ayarlı basınç kontrolü seçeneği Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Sabit çıkışlı sistemle etkisi aynı olup, basınç kırıcı vana ve ek bir ekipman ile su kullanımının az olduğu ve dolayısıyla basıncın yüksek olduğu dönemlerde basınçta daha fazla azalma sağlanır. Bu basınç kontrol şekli, su kullanımının az olduğu dönemlerde (genellikle abonelerin uykuda olduğu gece saatlerinde) ve su basıncının yüksek olduğu bölgelerde kullanışlıdır. Avantajları aşağıda sıralanmıştır (McKenzie 2001):

- Günün spesifik anlarında basıncın azaltılabilmesine olanak vererek işletmecilere büyük bir esneklik sağlar, bu sayede su kaybında azalma elde edilir,
- Elektronik kontrol cihazları, debi ayarlı basınç kontrolü cihazlarına göre daha ucuzdur,
- İşletilmesi ve kurulumu daha kolaydır,
- Kurulumu için ekstra debimetre gerekmez, doğrudan PRV üzerine bağlanır.

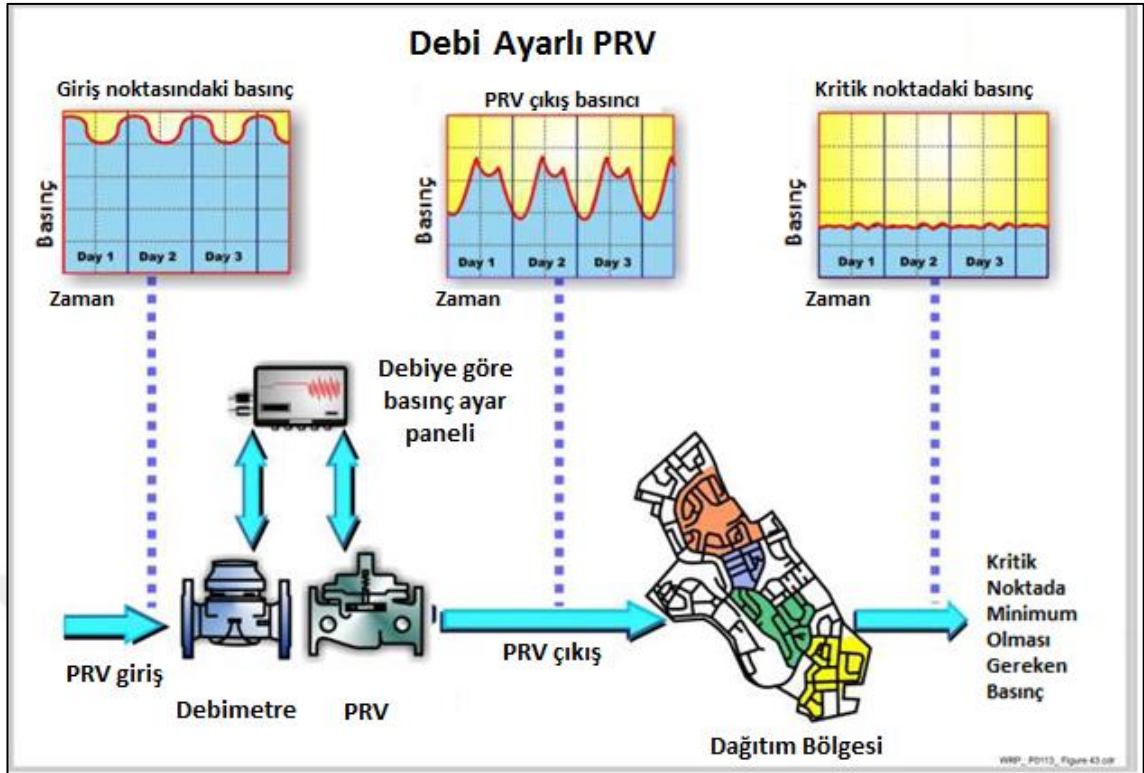
Zaman ayarlı basınç kontrolünün dezavantajı, su kullanımına duyarlı olmamasıdır. Örneğin bir yangın başladığında tam yangının söndürülmesi için basıncın gerekli olduğu anda PRV basıncı azaltılabilir. Bu problem, zaman ayarlı PRV’ye bir debimetre takılmasıyla bir ölçüde çözülebilir ancak bu da maliyeti arttırdığı için çok tercih edilmez. Bununla beraber, zaman ayarlı PRV seçeneği klasik sabit çıkışlı PRV’den daha pahalıdır, işletme ve bakım yönünden uzmanlaşmış ekipler gerektirir (McKenzie 2001).



Şekil 2.6. Zaman ayarlı basınç kontrolü seçeneği (McKenzie 2001)

Debi ayarlı basınç kontrolü

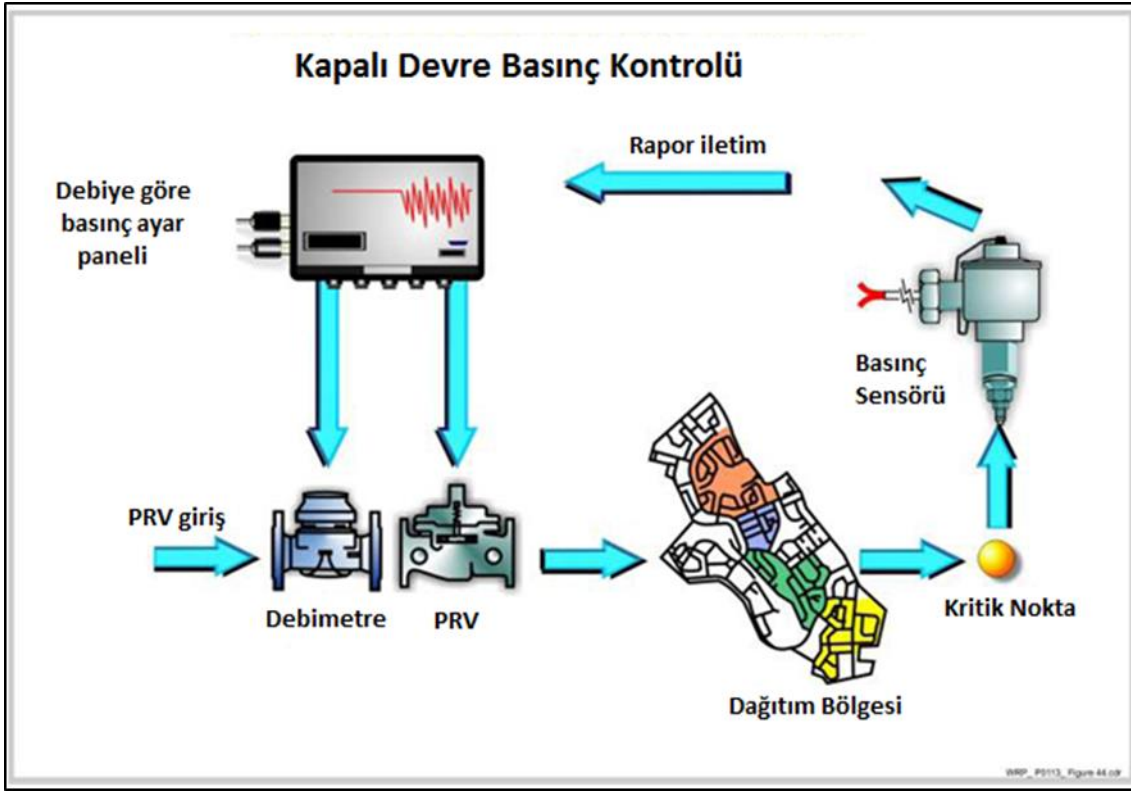
Debi ayarlı basınç kontrolü Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Bu seçenek, işletmecilere kontrol ve esnek işletim konularında büyük imkanlar sağlar. Diğer seçeneklere göre genellikle daha çok su tasarrufu elde edilir ama diğer seçeneklerden daha pahalıdır. Ekstra elektronik cihazlar ve PRV’ye ek olarak uygun büyüklükte debimetre gerektirir. En önemli avantajı herhangi bir olağanüstü durumda (yangın gibi) su akışına engel olmamasıdır (McKenzie 2001).



Şekil 2.7. Debi ayarlı basınç kontrolü seçeneği (McKenzie 2001)

Kapalı devre basınç kontrolü

Son yıllarda, sunulan kontrol seçeneklerine ek olarak “kapalı devre” (closed-loop) olarak da bilinen sistemler dünyanın farklı yerlerinde uygulanmaya başlanmıştır. Sistemde, bölge girişinde basınç kontrolörlerine canlı veri sağlamak için kritik noktalara basınç sensörleri konulmaktadır. Bu tür basınç kontrolü Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Bu sistem üst düzey basınç kontrolü sağlamakta ve bu nedenle sistemden maksimum su tasarrufu elde edilebilmektedir. Ancak, bu sistem basınç kontrolü teknikleri içerisinde en kompleks olanıdır (McKenzie 2001).



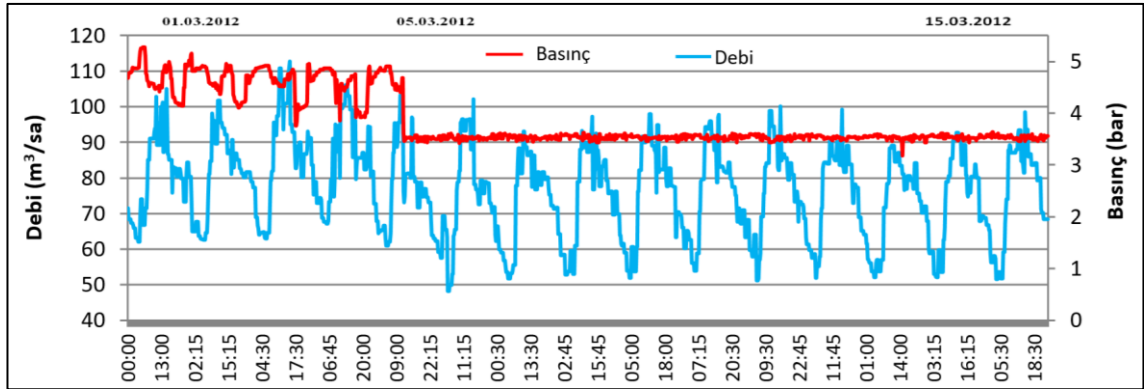
Şekil 2.8. Kapalı devre basınç kontrol sistemi (McKenzie 2001)

Sunulan her bir basınç yönetim sisteminin avantaj ve dezavantajları vardır. Önemli olan husus, herhangi bir bölgeye uygulanması halinde mevcut bütçe, teknik kapasite, memnuniyet, işletme ve bakım gibi bileşenler dikkate alındığında en uygun ve en ekonomik basınç kontrol şeklinin seçilmesidir (McKenzie 2001).

2.2.2. Su kayıplarına basıncın etkisi

Son zamanlarda IWA Water Task Force su kayıplarıyla mücadelede dört ana strateji önermiştir. Bunlar basınç yönetimi, aktif sızıntı kontrolü, hızlı ve kaliteli onarım ve altyapı yönetimidir. Su kaybı azaltımı için her durumda en verimli ve ekonomik aracı elde etmek için bir veya birden çok farklı strateji kombinasyonu kullanılmalıdır (Pilcher vd. 2007; Thornton vd. 2008).

Basınç yönetimi uygulamak için içme suyu dağıtım şebekesinde uygun büyüklükte DMA'lar oluşturulmalıdır. Su basıncı genellikle DMA girişinde ve minimum basıncın olduğu kritik noktalarda ölçülmektedir. Kritik noktaların hidrolik model uygulaması ile tahmin edilmesi mümkündür. DMA içinde basıncın düşürülmesi ile su kayıpları hemen azalır. Sızıntıların azalması, düşürülen basınç seviyesine, sızıntı debisine ve boru özelliklerine göre değişir. Fiziki su kayıplarındaki azalma sisteme verilen debideki azalmanın takip edilmesi ile hesaplanabilir (Şekil 2.9) (Muhammetoğlu ve Muhammetoğlu 2017).

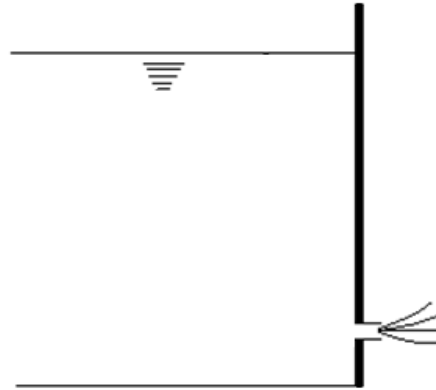


Şekil 2.9. Fazla basıncın düşürülmesi ile fiziki su kayıpları azalır (Muhammetoğlu ve Muhammetoğlu 2017)

Su sızıntıları borulardaki küçük deliklerden meydana gelir. Bu nedenle, sızıntı hidroligi, orifis deşarjına benzer ve geniş bir rezervuarda orifis deşarjı süresince su derinliğinin değişmediği kabul edilir (Şekil 2.10). Rezervuardaki su derinliğinin orifis üzerinde basınç uygulaması gibi borudaki su basıncı da deliklere basınç uygular. Orifis deşarjına ait hidrolik eşitlik aşağıda verilmektedir (Muhammetoğlu ve Muhammetoğlu 2017).

$$Q = C p \gamma \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte Q : sızıntı debisi, p : basınç, C : deşarj katsayısı ve γ : basınç katsayısıdır.



Şekil 2.10. Borulardan oluşan sızıntı, hidrolik olarak orifis deşarjına benzer (Muhammetoğlu ve Muhammetoğlu 2017)

Eşitlik 2.1'de yer alan basınç katsayısı (γ) deliğin şekli, boyutu, boru cinsi ve şebeke özelliklerine göre değişir. Bu değerini tanımlamak nispeten zor olsa da farklı boru cinslerinin bulunduğu büyük şebekeler için $\gamma=1.0$ kabulü uygundur. Buna göre basınç ile sızıntı arasında doğrusal bir bağıntı kurulur. Böylece, örnek olarak su basıncının %20 azalması durumunda, oluşan sızıntı da %20 oranında azalacaktır. Her durum için geçerli olan çıkarımlar aşağıdadır:

- Su basıncındaki azalma ile sızıntı debisi (Q) de azalır. Bu nedenle, sızıntıyı azaltmak için su basıncı azaltılmalıdır. Bu ise basınç yönetimi ile sağlanır.
- Boru üzerindeki toplam delik alanının (A) azalması ile aynı oranda sızıntı debisi (Q) de azalır (basıncın değişmediği kabul edilir). Bu nedenle, sızıntıyı azaltmak için boru üzerindeki delik ve çatlaklar azaltılmalıdır. Bu ise ancak deliklerin tespiti ve onarımı ile sağlanır (Muhammetoğlu ve Muhammetoğlu 2017).

Büyük kentlerdeki binalar genellikle yüksek katlı olabilmektedir. Şebeke suyunun yüksek katlı binalarda en üst kata kadar ulaşabilmesi için yüksek basınç gereklidir, bu ise şebeke sızıntılarını artırır. Bu nedenle, yüksek katlı binalarda, su üst katlara çıkmıyor ise hidrofor kullanılabilir (Muhammetoğlu ve Muhammetoğlu 2017). Boru ve ekipmanların kullanım süresi ile içme suyu dağıtım şebekesindeki su basıncı arasında doğrusal bir ilişki vardır. Su basıncının düşürülmesi ile boru ve ekipmanların kullanım süresinde belirgin bir artış olur. Diğer taraftan, su basıncının artması ile su dağıtım şebekesi elemanlarının kullanım süreleri azalır (Muhammetoğlu ve Muhammetoğlu 2017). Su basıncının düşürülmesi ile boru patlaklarının oluşma sıklığı ve dolayısıyla boru ve ekipmanlar için bakım/onarım ihtiyacı da belirgin düzeyde azalır.

2.2.3. Su tüketimine basıncın etkisi

Tüketici yük değişiklikleri, ani kapanan kontrol elemanları, boru patlakları, kontrolsüz olarak devreye giren veya devreden çıkan pompalar, yangın hidrantlarının açılıp kapanması, borularda meydana gelen tıkanıklıklar ve diğer nedenler basıncı etkileyen unsurlar olarak sıralanabilir. Nitekim basıncın düşük ve yüksek olmasından şebeke ve kullanıcılar etkilenmektedir. Düşük basınçta kavitasyon korozyonu oluşurken, yüksek basınçta ise şebeke üzerindeki kontrol elemanları görev yapamaz, sızıntılar artar, borular zayıf noktalardan patlar ve kazı çalışmaları sırasında daha zayıf darbelerde bile şebeke zarar görür. Kullanıcı bazında ise basıncın yüksek olması su tüketimini artırır, kontrol elemanları zarar görebilir, tesisatta ve tesisat ürünlerinde sızıntılar oluşur veya var olanlar artar, gürültü oluşur ve basınç dalgalanmalarından dolayı konfor seviyesi düşüş gösterir (Şevik 2012).

Tüketicilerin su ihtiyacını karşılamak için şebekede yeterli miktarda, istenilen basınçta ve kullanılabilir kalitedeki suyun bulunması gerekir.

Su dağıtım sistemleri şu özellikleri taşımalıdır (Şevik 2012);

- a) İçme, kullanma, ticari, sanayi ve yangın ihtiyaçları için yeterli miktarda su; ihtiyaç olan anda ve yerde hazır olmalıdır.
- b) Arıtma tesisinden geçirilmiş olan su; dağıtım sisteminin her yerinde ve her zaman sağlık şartlarına uygun olmalıdır.
- c) Bütün kullanım amaçları için şebekede; her zaman ve her yerde yeterli basınç sağlanmalıdır.

2.3. İçme Suyu Dağıtım Şebekelerinde Hidrolik Modelleme

Altyapısının yetersiz olduğu kentsel alanlarda su tasarrufunun kritik bir parçası gerçek su kaybını en aza indirmektir. Su altyapısının bakımı ve yenilenmesi pahalı olan ilk çözüm alternatifidir ve hükümetten en yüksek önceliği almalıdır (Kanakoudis 2004).

İkinci çözüm yöntemi ise basınç yönetimidir. Bu daha az maliyetlidir ve bilimsel literatürde sürekli olarak borulardan su sızıntısını azaltmak (Kanakoudis and Gonelas 2014, 2016), boru patlama sıklığını azaltarak altyapının daha az bakım ve yenilenmesini sağlamak ve muhtemel su tüketimini azaltmak gibi faydalarından bahsedilmektedir (Giustolisi 2017). Bu nedenle, basınç yönetimi sadece su tasarrufu sağlamaz, aynı zamanda sosyal olarak ilgili bakım (Kanakoudis ve Tsitsifli 2016; Kanakoudis vd. 2016) ve GGS kullanım problemlerini de çözmeye yardımcı olur. Basınç yönetimi, su dağıtım şebekelerinde hidrolik modellerin kullanılması ile başarılabılır.

Hidrolik modeller, gerçek bir su temini sisteminin matematiksel bir modelinin oluşturulmasını içerir. Ayrıca, su temini sistemlerinin tasarlanması ve işletilmesinin kritik bir bölümünü temsil etmektedir. Şebeke modelleri, tüketici hizmetini bozmadan çok çeşitli koşullar altında mevcut bir sistemin davranışını simüle etmek için kullanılabilir. Simülasyonlar, mevcut veya planlanan şebekede problemlerini tahmin etmek için yararlıdır ve müdahaleleri düzgün bir şekilde tasarlamak için gereklidir. Bir basınç yönetim uygulamasının planlanması örnek olarak verilebilir. Çeşitli seçenekleri simüle etmenin maliyeti, mevcut inşaat ve proje maliyetlerine kıyasla çok düşüktür (Walski vd. 2003).

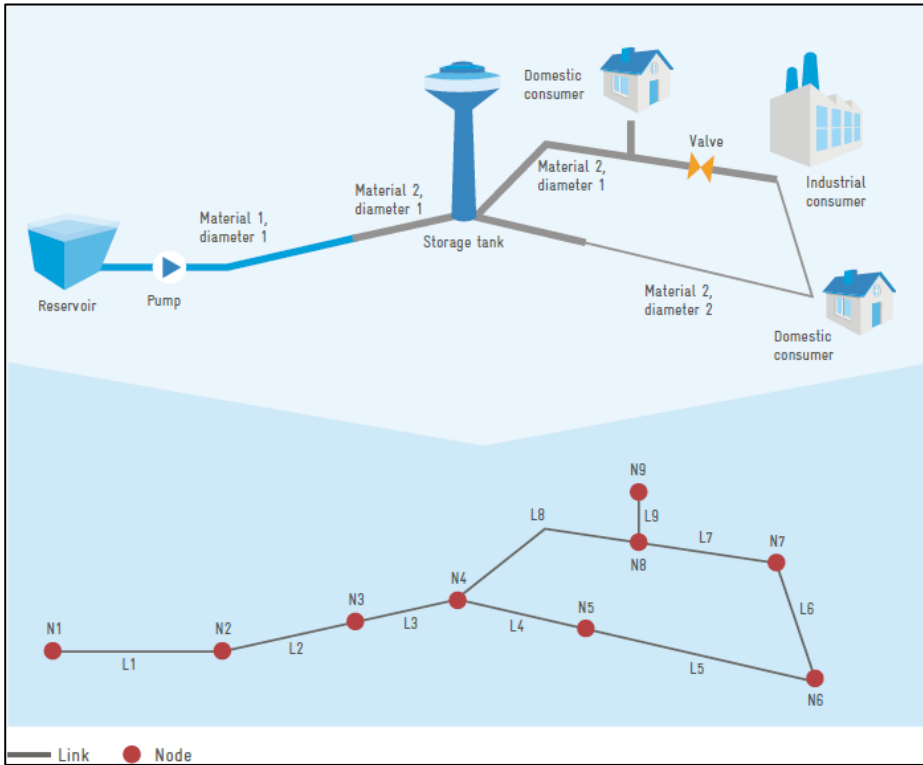
Hidrolik modeller, şebekedeki basınç ve debi değerlerini hesaplar, tasarım açısından zayıf noktaları ve darboğazları belirler, tahsis ve talepteki dalgalanmalar hakkında bilgi verir. Şebekenin hidrolik modellemesinden elde edilen bilgiler, DMA ve basınç yönetimi alanlarında planlama, tasarım ve rehabilitasyon çalışmaları için girdi olarak hizmet edebilir (Ziegler vd. 2011).

Hidrolik modeller, su dağıtım şebekelerinin çalışmasını ve yönetimini verimli hale getirmek için değerli bir araçtır. Hidrolik model kullanıcıları, sonuçları doğru yorumlayabilmek için hidrolik model yazılımında kullanılan matematiksel ve hidrolik ilkeleri anlamalıdır. Verimli su kaybı yönetiminin özel gerekliliklerini dikkate alarak, aşağıdaki önlemleri başarıyla yerine getirmek için hidrolik şebeke modelleri kullanılabilir (Ziegler vd. 2011):

- Sistem kapasitesini doğrulama, basınç ve debi analizi.
- DMA alanları ve basınç yönetimi alanları için bölge sınırlarının seçimi.
- Basınç yönetimini planlamak için özel uygulamalar: vana ve sayaçların belirlenmesi, yangın debisi koşullarının gözden geçirilmesi, basınç ve su kalitesine ilişkin eksikliklerin tespit edilmesi.
- Şebekede oluşabilecek olası tehditler için sistem güvenlik açığının belirlenmesi, su temini güvenliğinin ve acil müdahalenin analiz edilmesi.

Bir su dağıtım şebekesi, sınırlı sayıdaki düğüm ve bağlantı kümesinden oluşan bir ağ olarak tanımlanabilir. Şekil 2.11'de basitleştirilmiş bir su dağıtım hattı temsili olarak sunulmaktadır. Her bağlantıya bir başlangıç düğüm noktası ve bir son düğüm noktası atanmalıdır. Her bağlantı, bir borunun homojen bir bölümünü temsil eder. Vanalar ve pompalar ayrı bağlantılar ile temsil edilir. Düğümler, bir boru bölümündeki fiziksel değişiklikleri, (malzeme değişikliği, çap değişikliği ve boru bağlantılarını) gösterir. Düğüm noktaları, suyun sisteme girip çıktığı noktaları, tankları, tüketicileri ve boruların uç noktalarını tanımlamak için de kullanılır. Tüm sistem bileşenlerinin fiziksel ve fiziksel olmayan özellikleri (boru çapı, malzeme, pompa eğrisi, minimum ve maksimum tank su

seviyeleri vb.) bağlantılara ve düğüm noktalarına nitelik olarak atanmaktadır (Ziegler vd. 2011).



Şekil 2.11. Basitleştirilmiş bir su dağıtım ağı (Ziegler vd. 2011)

2.4. Hidrolik Türbinler

Yerçekimli su iletim hatlarında, su yüksek kotlardan düşük kotlara aktarılır. Bu iletim sırasında, borulardaki su basıncı önemli ölçüde artar ve fazla basıncı azaltmak için genellikle birkaç basınç kırma tankı, dengeleme rezervuarı veya PRV'ler kullanılır. Su iletim hatlarındaki aşırı basınçtan kaynaklanan hidroelektrik potansiyeli uzun zamandır bilinmektedir ve Avrupa, Kuzey ve Güney Amerika, Güney Afrika, Çin ve Hindistan'da birçok hidro türbin uygulaması mevcuttur (ESHA vd. 2010, Choulot vd. 2012, Pérez - Sánchez vd. 2017). İletim hatları tarafından taşınan yüksek debiler dikkate alındığında, düşük olumsuz çevresel etkileri olan türbin sistemleriyle düşük maliyetle kayda değer miktarda enerji üretilebilir ve üretilen elektrik, ulusal elektrik şebekesine veya izole bir elektrik talep kümesine tedarik edilerek yerinde kullanılabilir (White 2011, Möderl vd. 2012, Fontana vd. 2012, Loots vd. 2014, NHA 2016, Van Dijk vd. 2018). İletim hatlarında fazla basınçtan enerji üretmek üzere farklı türbin çeşitleri; Pelton türbini, Francis türbini, Kaplan türbini kullanılabilir.

2.4.1. Pelton türbini

1870 yılında Lester Allan Pelton tarafından geliştirilmiştir. Teğetsel akışlı türbinlerdir. Yüksek düşüye sahip hidroelektrik santral projelerinde kullanılırlar. Büyük hidroelektrik sistemlerde 150 m brüt düşünün üzerinde Pelton türbini uygulaması yapılmaktadır. Mikro hidrolik sistemlerde daha az düşülerde de bu türbin kullanılabilir.

Yüksek güç ve düşük debide hız çok azalır, bu da türbin boyutunu artırır. Bu tip türbinlerde su önce uygun şekle sahip bir borudan geçirilip, çıkış ağzında su jeti haline getirilerek, kinetik enerjiye dönüştürülür. Daha sonra bu jet, kap şeklindeki rotor kanatlarına püskürtülür. Kapların geometrisi, su jetinin enerjisini en yüksek oranda emecek biçimde tasarlanmış ve ortalarından geçen dikey bölücü plakalar, suyun iki yana doğru ‘takatsizce’ dağılmasını sağlamaktadır. Pelton türbinleri, düşey veya yatay olarak konumlandırılabilir. Jetlerin sayısını arttırmak suretiyle, tek bir rotordan sağlanan gücü arttırmak mümkündür. Yatay konum için genellikle iki olan jet sayısı, dikey konumlar için, çoğunlukla dört veya daha fazla olabilir. Yatay konumlandırma halinde, tek bir jeneratörü süren aynı şaft üzerine, bir yerine iki rotor yerleştirmek de mümkündür. En yüksek verim, rotor kaplarının hızı, su jetinin hızının yarısı kadar olduğunda elde edilir. Bu durumda, tam yükün %60-80’i arasında çalışılıyorsa, türbinden geçen suyun kaybettiği potansiyel enerjinin %90’dan fazlası mekanik işe dönüştürülebilir (Şekil 2.12) (Muhammetoğlu vd. 2016).

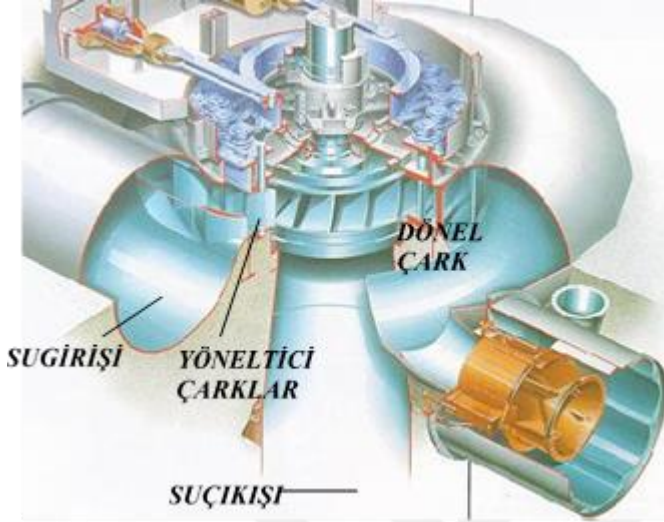


Şekil 2.12. Pelton türbini için genel görünüm (Anonim 1)

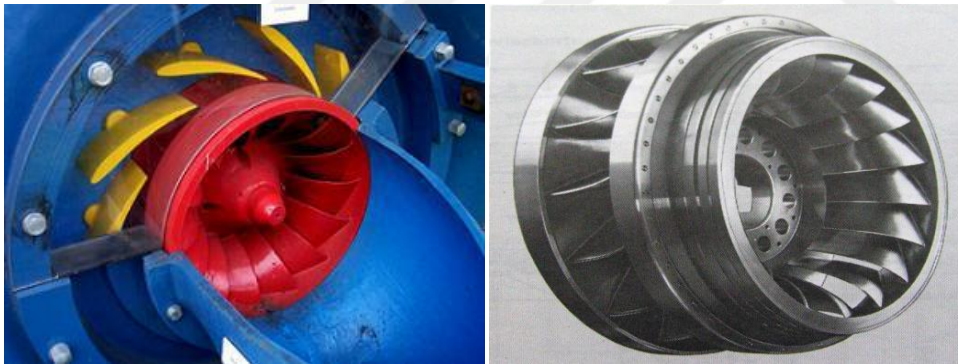
2.4.2. Francis türbini

Bu türbin tipi 19. yüzyılda Amerikalı Howd ile Francis tarafından geliştirilmiştir. Francis türbinine su, yöneltici çarktan dönel çarka dıştan girip, çark kanatları boyunca aşağıya doğru giderek çarkı terk eder. Türbin tipi karşı basınçlıdır (reaksiyon tipi). Şekil 2.13’te tipik bir Francis türbin şeması görülmektedir. Dikey eksenli Francis tipi türbinler 600 m düşüye kadar çalışırlar ve 500 MW’a kadar güç elde edilebilmektedir. Bu türbin tipinin Pelton türbinine göre avantajları, daha küçük boyutlarda imal edilerek daha yüksek dönme sayılarında çalıştırılmasının mümkün olması ve düşük maliyetidir. Yurdumuzda Devlet Su İşlerinin denetiminde bulunan su türbini tesislerinin büyük çoğunluğunda

Francis tipi türbin kullanılmaktadır. Küçük ölçekli, 200 kW'a kadar olan güçlerde ve 5 m düşüden daha az yerlerde, kamara tipi denilen ve düşey eksenli Francis türbini kullanılır. Şekil 2.14'te Francis türbini için çark yapıları gösterilmektedir (Muhammetoğlu vd. 2016).



Şekil 2.13. Francis türbini şematik gösterim (Anonim 1)

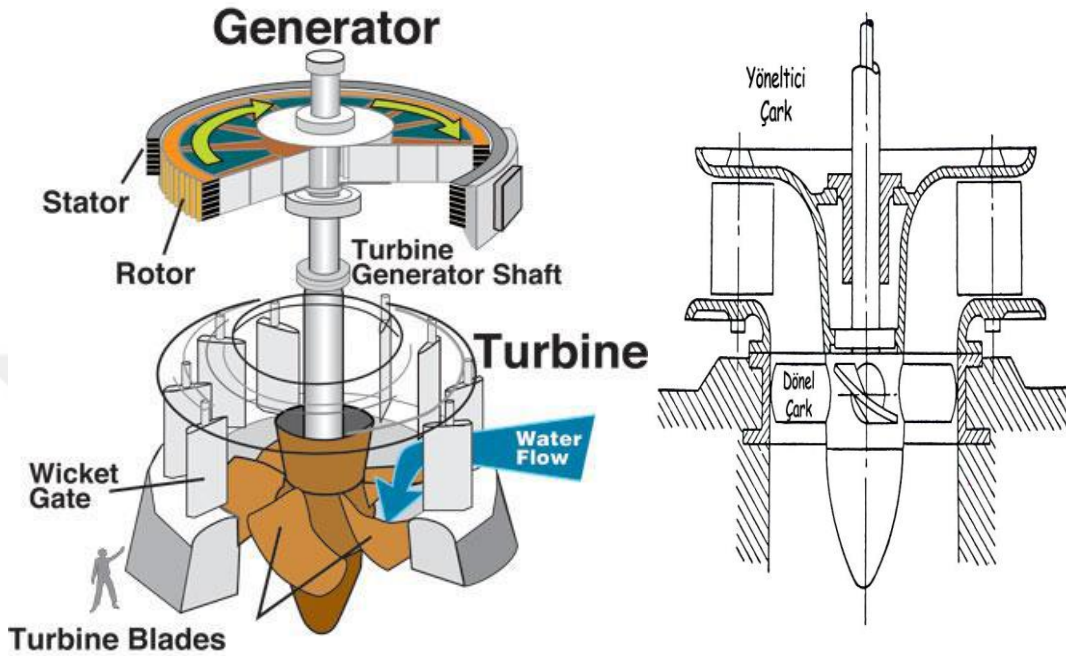


Şekil 2.14. Francis türbininin çark yapıları (Anonim 1)

2.4.3. Kaplan türbini

1913 yılında Prof. Viktor Kaplan tarafından patenti alınan bu türbin, aksenel olarak dönen etki türbinleri sınıfına girmektedir. Diğer bir deyişle suyun girişi ile çıkışı arasında basınç farkı vardır. Bu çarkların özgül hızları büyük olup, yüksek debilerde ve buna karşılık düşük düşülerde çalışırlar. Bu tip türbinlerin verimli olabildiği ortalama düşü değerleri 80 m'nin altındadır. Kaplan türbinleri salyangoz gövdeli veya boru tipi olarak imal edilirler. Bugüne kadar imal edilen en büyük kaplan türbininde elde edilen güç 100 MW olup dönel çark çapı 10 m'nin üstündedir. Kaplan tipi türbinler klasik nehir türbinleri olarak da ifade edilirler. Propeller (Uskur), Bulb, Tube (Boru) ve Straflo diye adlandırılan türbinler de kaplan türbininin varyasyonlarıdır. Kaplan türbininin, gemi pervanesine benzeyen, ama onun tersi biçimde çalışan bir çarkı vardır. Bir motorun

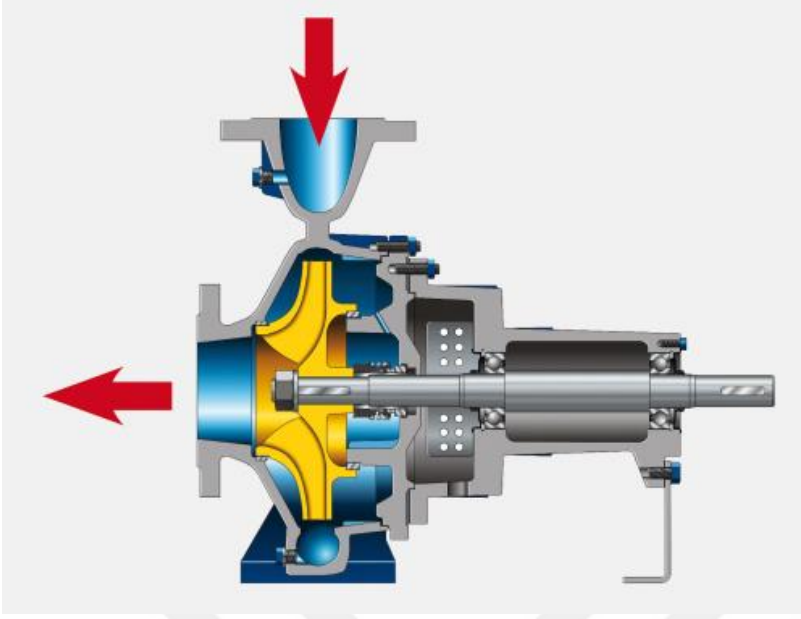
çevirdiği gemi pervanesi gemiyi ileriye doğru hareket ettirmek için suyu geriye iterken; Kaplan türbininin çarkı çevresinden geçen suyun etkisiyle döner. Bu türbinlerde su giriş ve çıkışı aynı eksendedir. Çevre boyunca yerleştirilmiş yönlendirici kanatlardan geçen su türbin çarkına gönderilir. Şekil 2.15'te Kaplan türbininin genel görünümü gösterilmektedir (Muhammetoğlu vd. 2016).



Şekil 2.15. Kaplan türbininin genel görünümü (Anonim 2)

2.5. Pompa Türbin ile Enerji Üretimi

Son yıllarda su dağıtım şebekelerinde basınç düşürme vanalarının yerine mikro türbinlerin veya pompa türbinlerin (Pump as Turbine – PAT) kullanımı dikkat çekmektedir, çünkü PAT ile hem basınç düşürülebilir, hem de küçük ölçekli hidroelektrik üretim sağlanır (Pugliese 2018) (Şekil 2.16). PRV'ler su dağıtım sistemlerinde basıncı azaltmak için yaygın olarak kullanılmakta ise de son yıllarda, PAT'ın basıncı azaltmak ve elektrik üretmek için kullanımı üzerine yapılan birçok çalışma gerçekleştirilmiş, özellikle yenilenebilir enerji alanında sürdürülebilirliğe ek bir katkı yaratacağı bildirilmektedir (Carravetta vd. 2012, Jafari vd. 2015). Lydon vd. (2017) mevcut PRV'deki brüt güç potansiyelinin %40'ını bir PAT kullanarak elektrik enerjisine dönüştürmüş ve aynı zamanda istenen düzeyde basıncı kontrol ederek geri kazanılabileceğini göstermiştir.



Şekil 2.16. Pompa türbin sistemine ait bir görsel (Anonim 3)

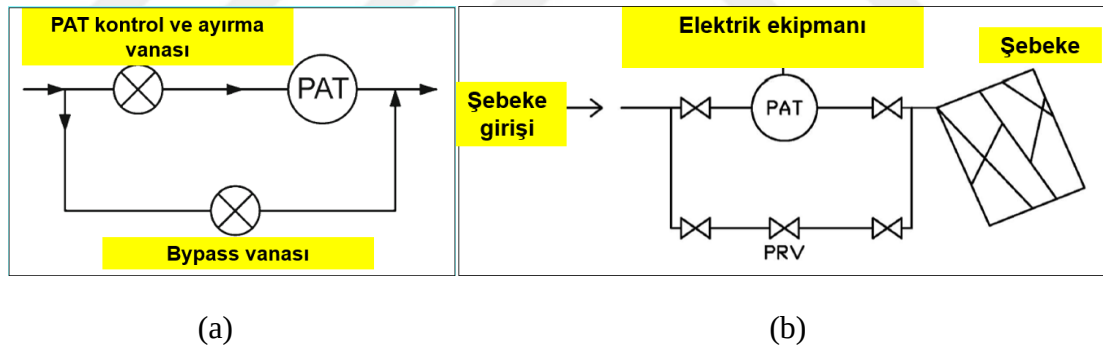
Williams (1996a), PAT'ları özellikle mikro hidro türbinlere rağmen, orta enerji yüksekliğine sahip sahalarda kullanmanın ekonomik ve pratik avantajlarını vurgulamıştır. Çeşitli uygulamalarda kullanım olasılığı ve türbinlerden daha ucuz olan maliyeti nedeniyle, PAT'ların türbinlere göre tercih edilmesi ve PRV'lerin yerine kullanılması değerlendirilmektedir. Ayrıca, endüstriyel tesislerde PAT'lar, proses gereksinimlerine bağlı olarak hem pompa, hem de türbin modunda kullanılabilir. De Marchis vd. (2014) tarafından bu teknolojinin kullanımına vurgu yapılarak, PAT'ların su dağıtım şebekelerindeki basınç seviyesini kontrol etmek ve aynı zamanda elektrik üretmek için PRV'lerin yerini alabileceği bildirilmiştir. Pompalar normal hidro türbinlere göre çok daha ucuzdur, basit ve sağlam ekipmanlardır ve dünya çapında kolayca temin edilebilir. Ayrıca, daha yaygın oldukları için, yedek parça ve tamirat yapacak kalifiye personel de mevcuttur (Derakhshan ve Nourbakhsh 2008).

Mikro hidroelektrik büyük bir potansiyele sahiptir ve izole edilmiş toplulukların elektrik şebekesine bağlantısı olmadan elektrikleşmesini sağlamak için çok faydalı olabilir. Bu özellikle gelişmekte olan ülkelerde, küçük köylerde ve dağlık kırsal alanlarda geçerli olabilir. Bu tür tesislerin işletme maliyetleri düşük ve uygun maliyetli olsa da bu topluluklar açısından en büyük engel, ilk başlangıçtaki yüksek yatırım maliyetidir (Williams 1996a). Uygun bir çözüm olarak, bir pompanın ters akış modunda PAT olarak kullanılmasıdır. Bu uygulamada santrifüj bir pompa tersten çalıştırılarak enerji üretilebilmektedir (Albert 2018).

Su dağıtım şebekelerinde aşırı su basıncından kaynaklanan enerji geri kazanımı yeni bir ilgi konusudur (Bonhuys vd. 2019; Jain ve Patel 2014; Fontana vd. 2012). Son yıllarda PAT kullanımı, enerji geri kazanımının yanı sıra aşırı basıncı azaltmak için de büyük ilgi görmüştür (Ramos ve Borga 1999; Giugni vd. 2009; Samora vd. 2016a, 2016b). Düşük sermaye ve işletme maliyetleri, kolay kurulum, hızlı teslimat ve daha kolay servis olanağı PAT sistemlerinin küçük ölçekli hidroelektrik üretimi için avantajlarıdır (Williams 1996b; Isbasoiu vd. 2007). Mikro hidroelektrik sistemler üzerine

yapılan araştırmalar öncelikle PAT ve hidro türbin testlerinin laboratuvar ölçekli prototip analizine, içme suyu dağıtım şebekelerinde PRV ve PAT'ların optimal yeri için optimizasyon tekniklerine ve enerji geri kazanım potansiyelinin ve ekonomik fizibilitenin değerlendirilmesine odaklanmıştır (Muhammetoğlu vd 2017a; Lima vd 2017). Bonthuys ve arkadaşlarına ait bir çalışmada (2019), içme suyu dağıtım şebekelerine ait varlık yönetimi verileri ve planları, Güney Afrika şehirlerindeki enerji geri kazanımı ve sızıntı azaltma potansiyelini belirlemek için entegre edilmiştir. Benzer şekilde, kaçak azaltma ile birlikte hidroelektrik enerji geri kazanım potansiyeli İrlanda'daki sekiz kırsal su dağıtım şebekesi için değerlendirilmiştir (Garcia vd. 2019). Genetik algoritmalara dayanan akıllı operasyon yönetimi ile bir su dağıtım şebekesindeki aşırı basınçtan enerji elde etmek için PAT'ların sistemde en iyi konuma yerleştirilmesi amacı ile bir çalışma gerçekleştirilmiştir (Telci ve Aral 2018).

Su dağıtım hatlarında PAT'ların veya türbinlerin çalışması, akış hızlarındaki ani değişimler nedeniyle karmaşıktır ve ayrıca su dağıtım hatlarında optimum su basıncı seviyesinin korunmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Fontana vd. 2016). Bu zorluklara rağmen, tek başına veya bir PRV ile paralel olarak uygulanan PAT sistemleri uygulanabilir seçenekler olarak önerilmiştir (Carravetta vd. 2012; Fontana vd. 2012) (Şekil 2.16). PAT sistemlerinin uygulanmasındaki yeni gelişmeler kapsamında, Fontana vd. (2018), hem basıncı düzenlemek, hem de enerji üretimini optimize etmek için PAT'ın motoruna pervanenin dönme hızını ayarlayan bir frekans dönüştürücü bağlamıştır. Son zamanlarda, bir laboratuvar prototipi üzerinde, su dağıtım şebekesindeki maksimum enerji üretimi ve basıncın düzenlenmesi amacı ile vanaların ve türbinin gerçek zamanlı çalışmasını tanımlayan bir optimizasyon algoritması incelenmiştir (Fontana vd. 2019).



Şekil 2.17. Su dağıtım şebekelerinde PAT kullanımı alternatifleri (a) tek başına PAT, (b) PAT ve PRV birlikte (Fontana vd. 2012)

Agarwal (2012)'deki çalışmasında mikro hidroelektrik türbinleri yerine PAT'ları kullanmanın avantajlarını ana hatlarıyla ortaya koymuş olup daha geniş basınç yüksekliği ve akış hızı için kullanılabildiğini, contalar, rulmanlar vb. yedek parçaların kolay temin edilebildiğini ifade etmiştir.

Lima vd. (2017) çalışmalarında sudan elektrik enerjisi üretmek ve basıncı kontrol etmek için PRV yerine, yatırım maliyeti düşük olan PAT kullanımı ve yer seçimi için bir yöntem önermiştir. Bu yöntem, üretilen enerjinin maksimize edilmesi ve sistem basınç sınırlarıyla sınırlandırılmasına dayanmaktadır. Particle Swarm Optimization tekniği ile PAT'ları simüle etmek için komple pompa eğrileri kullanılmıştır. Bu yöntem şebekedeki en iyi konumu belirleme yeteneğine de sahiptir (Lima vd. 2017).

Muhammetoğlu vd. (2017b) tarafından Antalya’da yüksek basınca sahip bir içme suyu dağıtım şebekesine eklenen yeni bir bypass hattında, PRV ve PAT sistemini paralel iki boru üzerinde işleten tam ölçekli bir PAT sistemi kurulmuştur (Şekil 2.18). PAT sisteminin işletimi süresince debi, güç ve basınç online olarak izlenmiştir. Sistemde üretilen enerji, ortalama %60 verimlilikle yaklaşık 10,2 mSS (1 bar) basınç yüksekliği azaltılması için 0,7 ile 8,4 kWh arasında değişmektedir (Muhammetoğlu vd. 2017b).



Şekil 2.18. Antalya Anfaş bölgesinde kurulan PAT sistemine ait görüntüler (Muhammetoğlu vd. 2017a)

Güney İspanya’da Bembézar Nehri kıyısında tarım alanı sulama şebekesinde aşırı basınç noktalarında enerji üretmek için bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada PAT’ın kurulumu için beş potansiyel nokta bulunmuştur. Bu noktaların basınç yükseklikleri ve debilerine bağlı olarak PAT verimliliği, güç aralıkları ve enerji üretimi incelenmiştir. Sonuç olarak 93,9 MWh potansiyel enerji geri kazanımı ve 0.10 MWh/yıl/ha düzeyinde sulanan yüzey alan başına yıllık enerji üretimi sağlanmıştır (Crespo Chacón vd. 2019).

İrlanda’da sekiz adet kırsal su dağıtım şebekesinde yapılan çalışmada, su kayıplarının azaltılması ve hidroelektrik enerji geri kazanım potansiyeli değerlendirilmiştir. Bu çalışmada basıncın azaltılması için kullanılan ekipmanların PAT ile değiştirilmesi ve enerji üretim potansiyeline sahip yüksek basınç noktaları önerilmiştir. Kullanılan ekipmanların PAT ile değiştirilmesiyle, şebekedeki net enerji tüketiminin %21’i, bazı yeni önerilen noktalar için de %23’üne kadar enerji üretilbileceği bildirilmiştir. Blackstairs bölgesinde yaklaşık 5 kW, Ballinabranna bölgesinde 405 ve 317 W, Kilanerin bölgesinde ise yaklaşık 493 W’lık en yüksek potansiyel görülmüştür. Yeni bulunan basınç noktalarına PAT’ların kurulumu ile tüm şebekedeki basıncın minimize edileceği, sızıntı hacimlerinin azalması ile 4348 m³/yıl’dan 73000 m³/yıl’a kadar değişen su tasarruflarına yol açacağı ifade edilmiştir. PAT uygulaması ile incelenen sekiz adet bölgedeki su kayıplarının azaltılacağı ancak sadece üçünün ekonomik açıdan uygulanabilir mikro hidroelektrik alanına sahip olduğu bulunmuştur (Fernández vd. 2019).

Literatürde Sharma (1985), Williams (1994), Krivchenko (1994) ve Stepanoff (1997)’a ait çalışmalarda, küçük ölçekli hidroelektrik güç için kullanılan PAT’ın En İyi Verimlilik Noktasını (Best Efficiency Point) değerlendirmek için farklı matematiksel ifadeler incelenmiştir. Laboratuvar testleri ve istatistiksel değerlendirmeler ile gerçekleştirilen deneysel sonuçlar irdelenmiştir. Bu teorik ifadeler, seçilen pompaların türbin modunda çalıştırılarak BEP’ini tahmin etmek için uygulanmıştır (Rossi 2016).

Bu bölümde sunulan literatür incelemesi dikkate alındığında, tez çalışmasının amacı olan içme suyu şebekelerindeki fazla su basıncının hidrolik modelleme ile hassas olarak belirlenmesi, optimum şebeke işletim basıncının bulunması, fazla su basıncının PAT sistemi ile azaltılması ve eş zamanlı olarak enerji üretilmesi konularının literatüre önemli katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

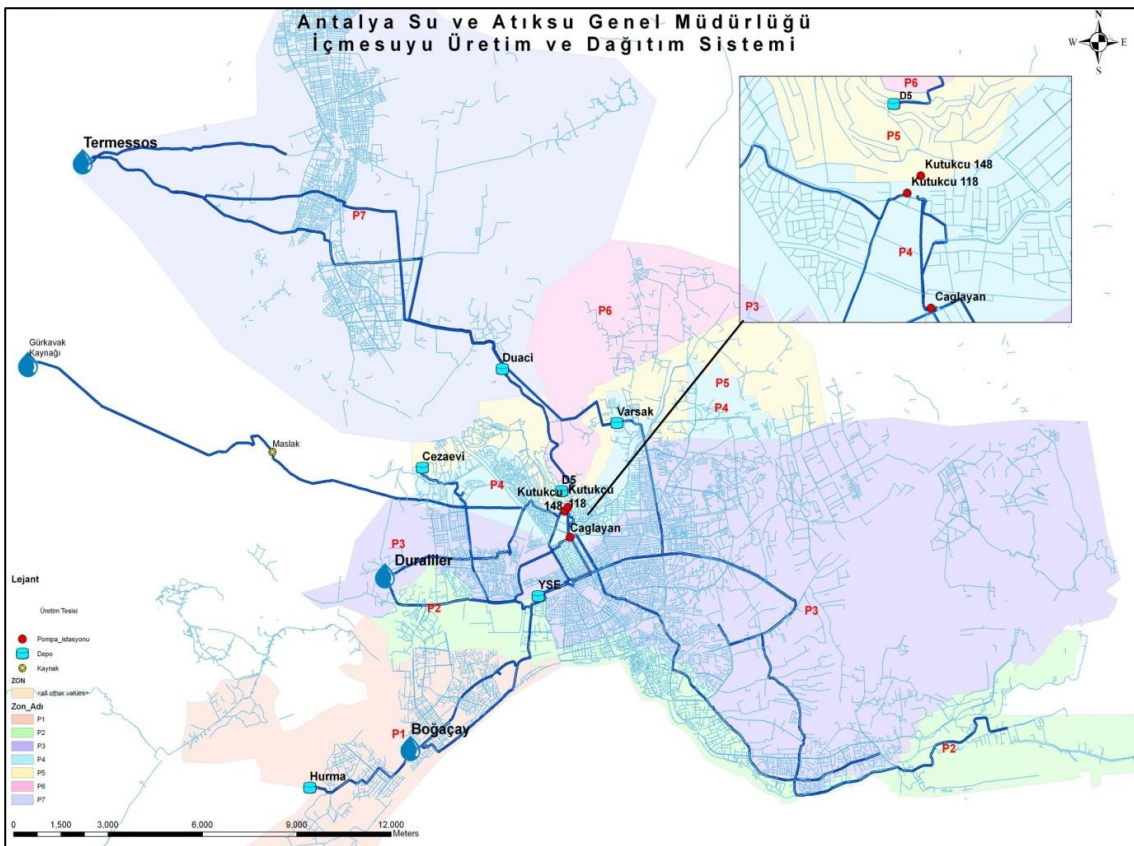
3. MATERYAL VE METOT

3.1. Çalışma Alanı ve Özellikleri

3.1.1. Antalya içme suyu dağıtım sistemi

Antalya’da içme suyu ve atıksu yönetimi Antalya Su ve Atıksu İdaresi (ASAT) tarafından sağlanmaktadır. ASAT 12.909 km’lik içme suyu şebeke uzunluğu ile 19 ilçe ve toplam 1.214.752 abone sayısına sahiptir. Yaklaşık 2.328.555 kişiye hijyenik koşullarda sağlıklı, içilebilir ve kesintisiz içme suyu temin etmektedir (ASAT 2018).

Antalya şehri için içme suyunun sağlandığı beş adet kaynak vardır. Bu kaynaklar, Duraliler, Boğaçay, Termessos, Gürkavak ve Yemişpınarı’dır (Şekil 3.1).

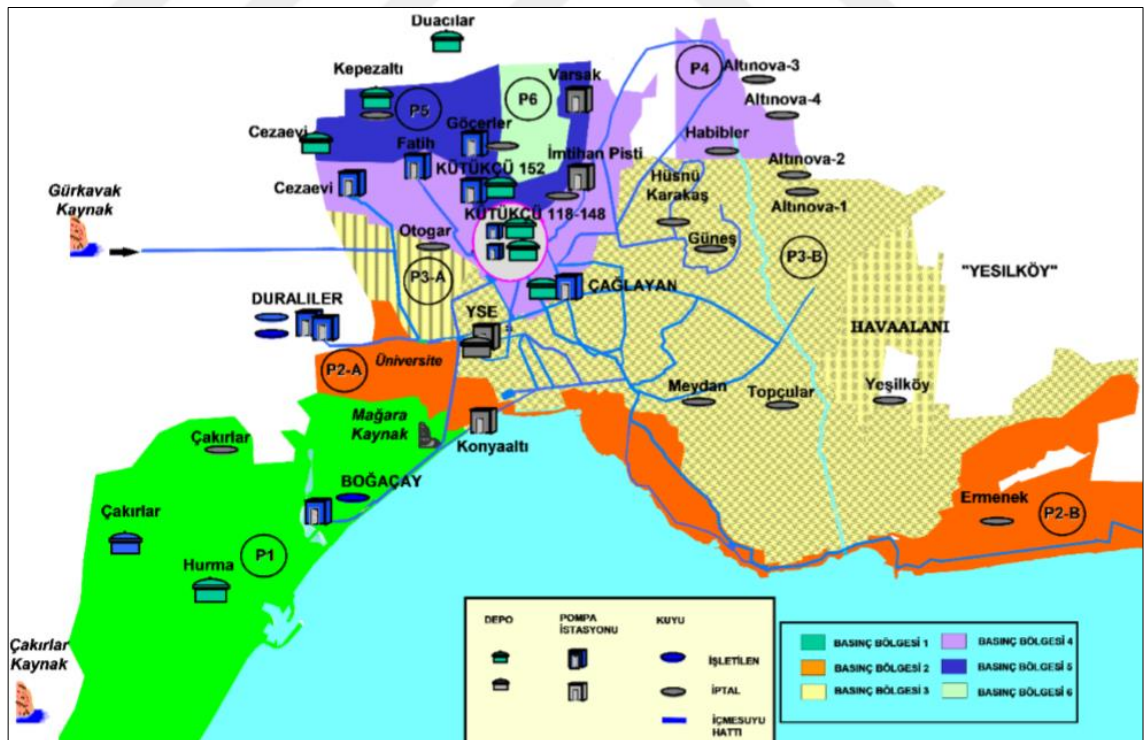


Şekil 3.1. Antalya kenti içme suyu iletim sisteminde su kaynaklarının ve depoların konumlarını gösteren şematik görüntü (Palancı 2011)

ASAT, Antalya’nın topografik özelliklerinden dolayı şehrin su dağıtım şebekesini sekiz adet basınç bölgesine ayırarak işletmektedir. Basınç bölgelerinin kotları ve beslediği kaynaklar Çizelge 3.1’de gösterilmekte olup, bölgeler Şekil 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Antalya ili basınç bölgeleri, kotları ve su kaynakları (Palancı 2011)

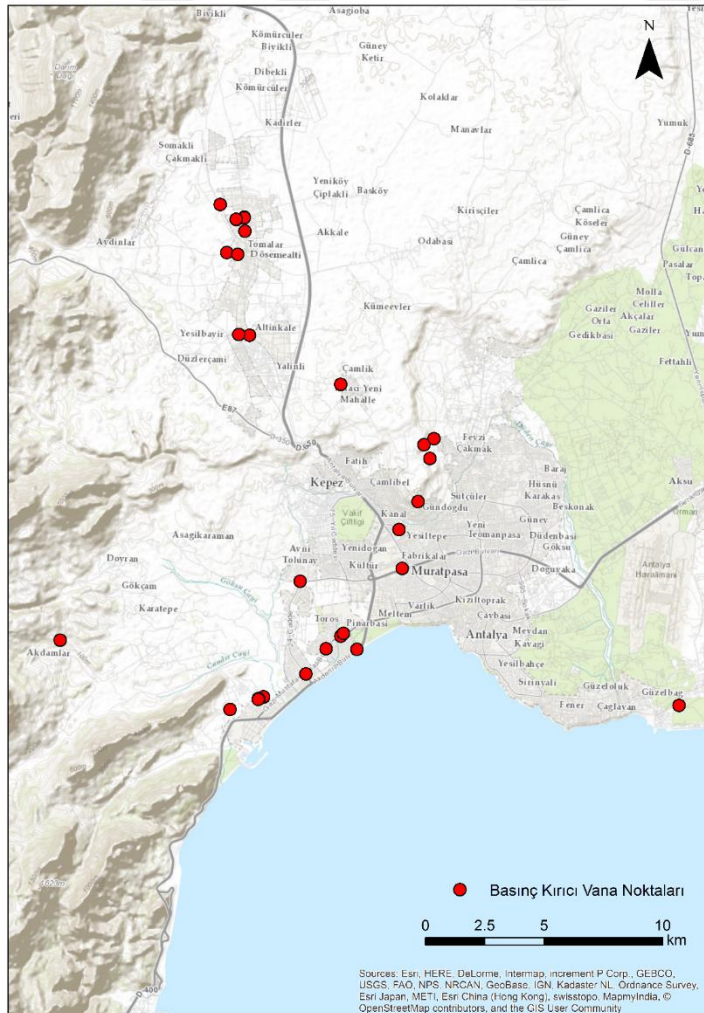
Basınç Bölgesi	Basınç Bölgesinin Su Verdiği Kotlar	Kaynaklar
P1	0 - 20 m	Boğaçay
P 2A	20 - 40 m	Duraliler 1
P 2B	0 - 40 m	Duraliler 1
P 3A	40 - 80 m	Gürkavak
P 3B	40 - 80 m	Duraliler 2
P4	80 - 120 m	Duraliler 2
P5	120 - 170 m	Termessos
P6	170 - 230 m	Termessos
P7	>230m	Termessos



Şekil 3.2. Antalya kenti içme suyu kaynakları ve basınç bölgeleri (Palancı 2011)

3.1.2. Antalya ili içme suyu dağıtım sisteminde fazla basıncın kırıldığı noktaların lokasyonları

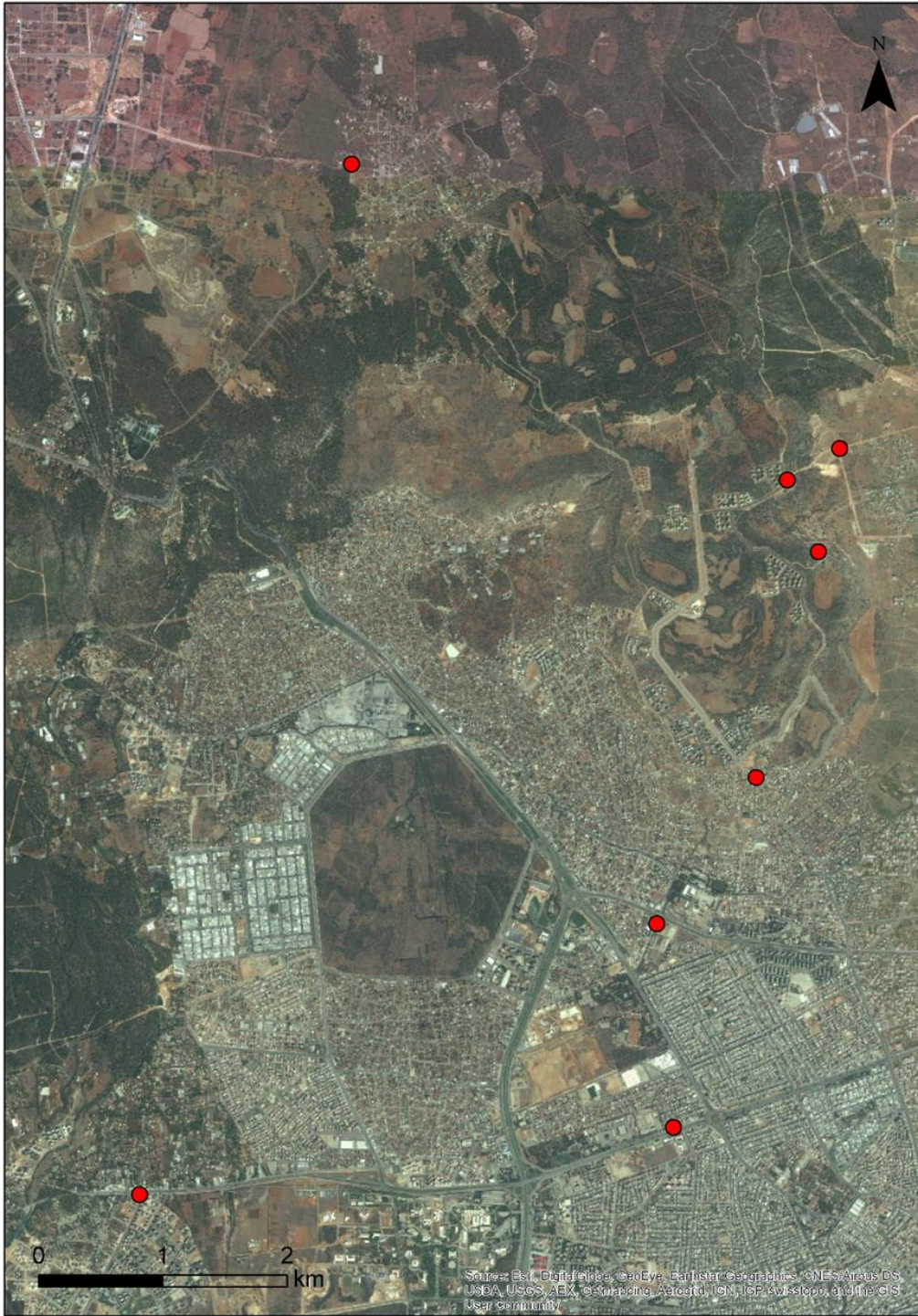
Su kayıplarının azaltılması amacıyla PRV kullanılarak şebekedeki fazla basınç düşürülmektedir. Bu amaçla Antalya kenti içme suyu dağıtım şebekesinde ASAT'ın ilgili birimlerinden alınan bilgiye göre potansiyel olarak 29 PRV bulunmaktadır. Bu PRV'ler belirli dönemlerde veya sürekli olarak çalıştırılmaktadır. PRV'ler 80 ila 800 mm arasında değişen farklı boru çaplarında bulunmakta ve iletim hattı üzerindeki PRV'lere girişteki maksimum su basıncı 100,2 mSS (10 bar), dağıtım şebekesindeki PRV'lere girişteki maksimum su basıncı ise 61,2 mSS (6 bar) olarak ifade edilmiştir. Şekil 3.3'te Antalya kenti içme suyu temin sisteminde yer alan PRV'lerin lokasyonları verilmektedir. Görüldüğü üzere Yeşilbayır, Döşemealtı gibi yüksek kotlu alanlarda, yüksek nüfusa sahip Kepez bölgesinde, şehrin düşük kotlu alanlarından Konyaaltı bölgesinde birçok PRV bulunmaktadır. Mevcut olan PRV'lerin ilçeler bazındaki lokasyonları, Döşemealtı bölgesi için Şekil 3.4'te, Kepez bölgesi için Şekil 3.5'te ve Konyaaltı bölgesi için Şekil 3.6'da gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Antalya kenti su temini sisteminde yer alan PRV'lerin lokasyonları (Muhammetoğlu vd. 2016)



Şekil 3.4. Döşemealtı bölgesinde yer alan PRV'lerin lokasyonları (Muhammetoğlu vd. 2016)



Şekil 3.5. Kepez bölgesinde yer alan PRV'lerin lokasyonları (Muhammetoğlu vd. 2016)



Şekil 3.6. Konyaaltı bölgesinde yer alan PRV’lerin lokasyonları (Muhammetoğlu vd. 2016)

3.1.3. Anfaş bölgesine ilişkin bilgiler

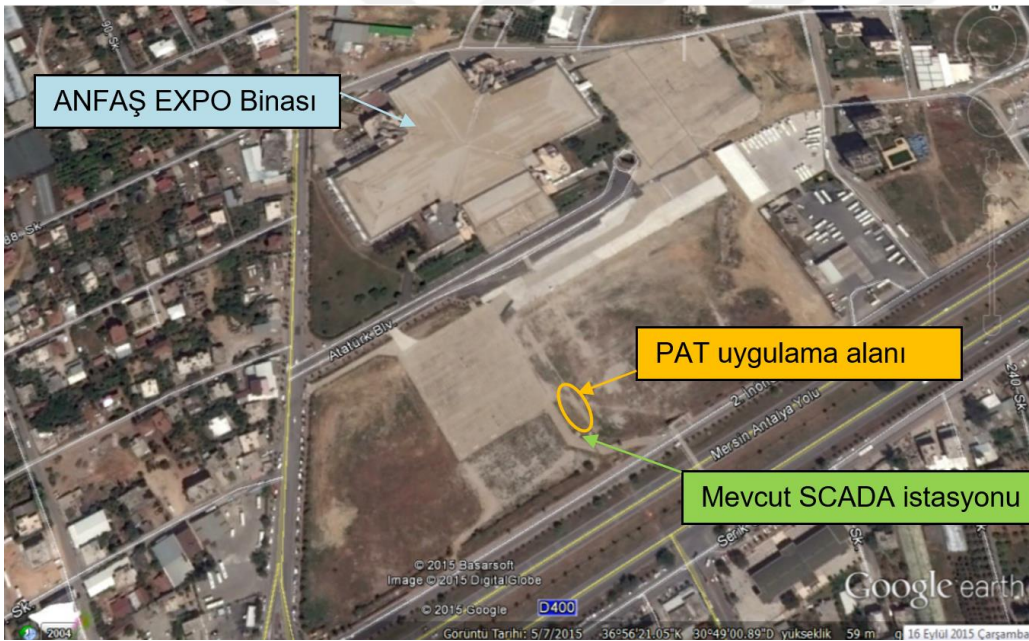
ASAT ekibi ile birlikte gerçekleştirilen teknik incelemeler sonucunda, Antalya kenti içme suyu şebekesinde pompa türbin (PAT) eklenmesi için uygun olan çalışma sahası olarak, Antalya-Mersin karayolu üzerinde yer alan Antalya Anfaş EXPO Fuar alanı önündeki bölge seçilmiştir. PAT uygulaması için seçilen bölgeye ait genel bir görüntü Şekil 3.7’de sunulmaktadır. ASAT-SCADA birimi tarafından sürekli olarak on-line debi ve basınç ölçümü yapılan bir SCADA istasyonu ise belirlenen bölgenin hemen yakınında bulunmaktadır. SCADA istasyonunun da bulunduğu bölgenin haritası Şekil 3.8’de verilmektedir. Seçilen uygulama alanı için içme suyu dağıtım şebekesine ilişkin boru hattı Şekil 3.9’da gösterilmektedir.

Tam ölçekli PAT sisteminin kurulduğu Antalya Anfaş EXPO binası alanındaki uygulama için şematik çizim Şekil 3.10 ve teknik çizim detayları Şekil 3.11’de sunulmaktadır. PAT sistemi için oluşturulan türbin eğrisi Şekil 3.12’de verilmektedir. PAT sisteminin ön kurulumu Standart Pompa A.Ş. tarafından gerçekleştirilmiş ve çalışma bölgesi olan Antalya Aksu’ya getirilmiştir. PAT sistemi Antalya Anfaş EXPO alanı önündeki içme suyu dağıtım şebekesine bypass hattı ile bağlanmış ve bypass hattının inşası konusunda ASAT Genel Müdürlüğü ile koordinasyon sağlanmıştır. PAT sisteminin kurulum işlemleri tamamlandıktan sonra 26 Ocak 2016 tarihinde sistem devreye alınmıştır. PAT sisteminin devreye alınması öncesinde, ASAT ekiplerince 650 mm çaplı içme suyu dağıtım şebekesi ana borusu üzerindeki kapatma vanası tamamen kapatılmış ve tüm debi bypass hattına yönlendirilmiştir. PAT sisteminden geçen debi, PAT sistemi girişi ve çıkışındaki basınç değerleri ve üretilen güç verilerinin gösterge panolarında

izlenmesi ve kayıt altına alınması için gerekli bağlantılar yapılmıştır (Muhammetoğlu vd. 2016).



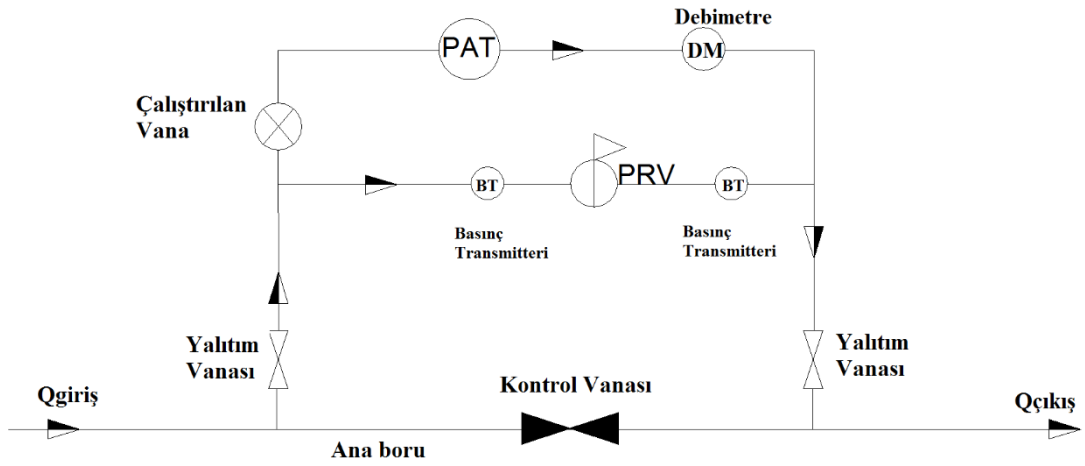
Şekil 3.7. Projede tam ölçekli PAT uygulaması için seçilen Antalya Anfaş EXPO Fuar alanından bir görüntü



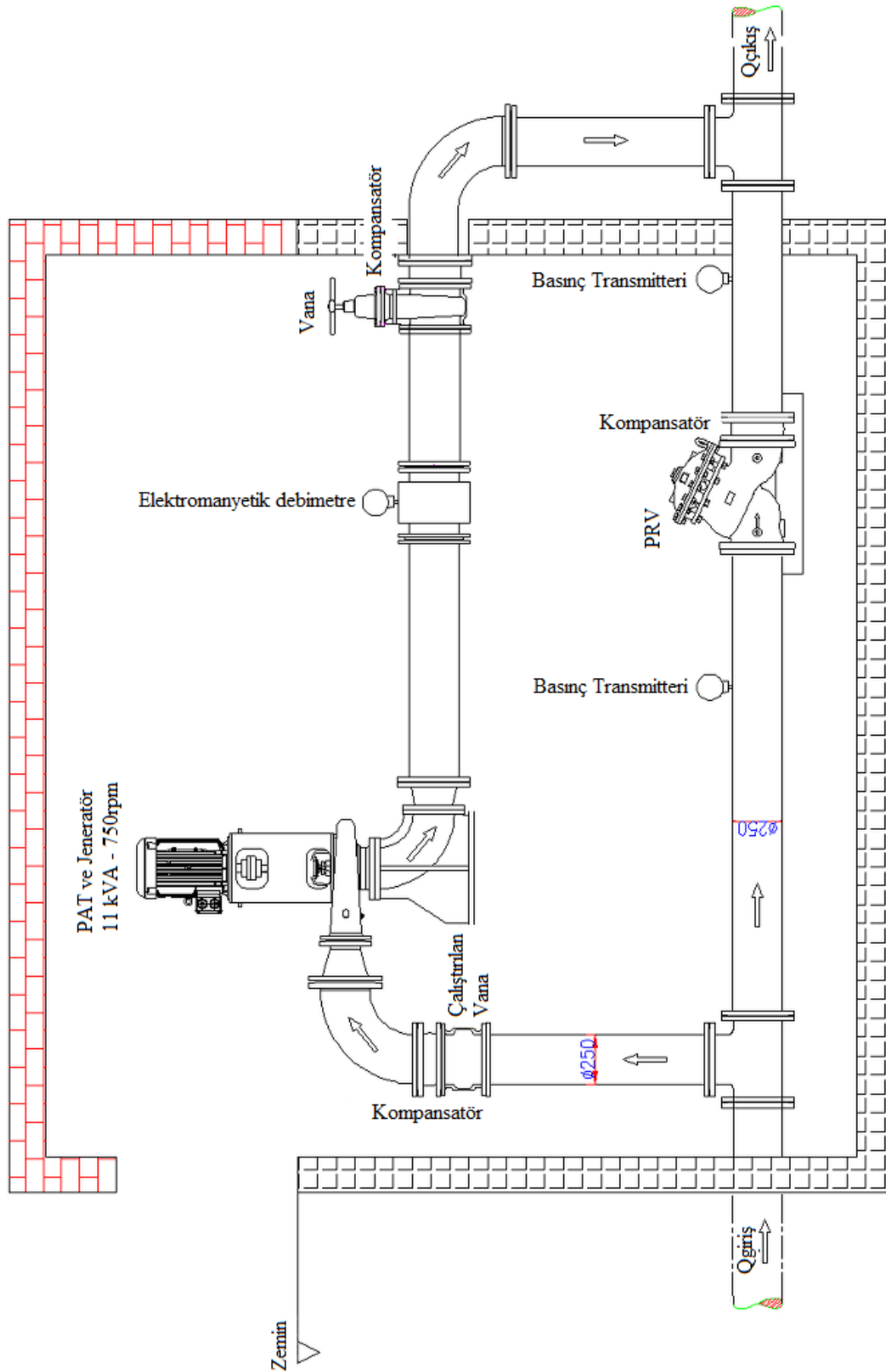
Şekil 3.8. Antalya Anfaş EXPO binası, mevcut SCADA istasyonu ve PAT uygulama alanı (Muhammetoğlu vd. 2016)



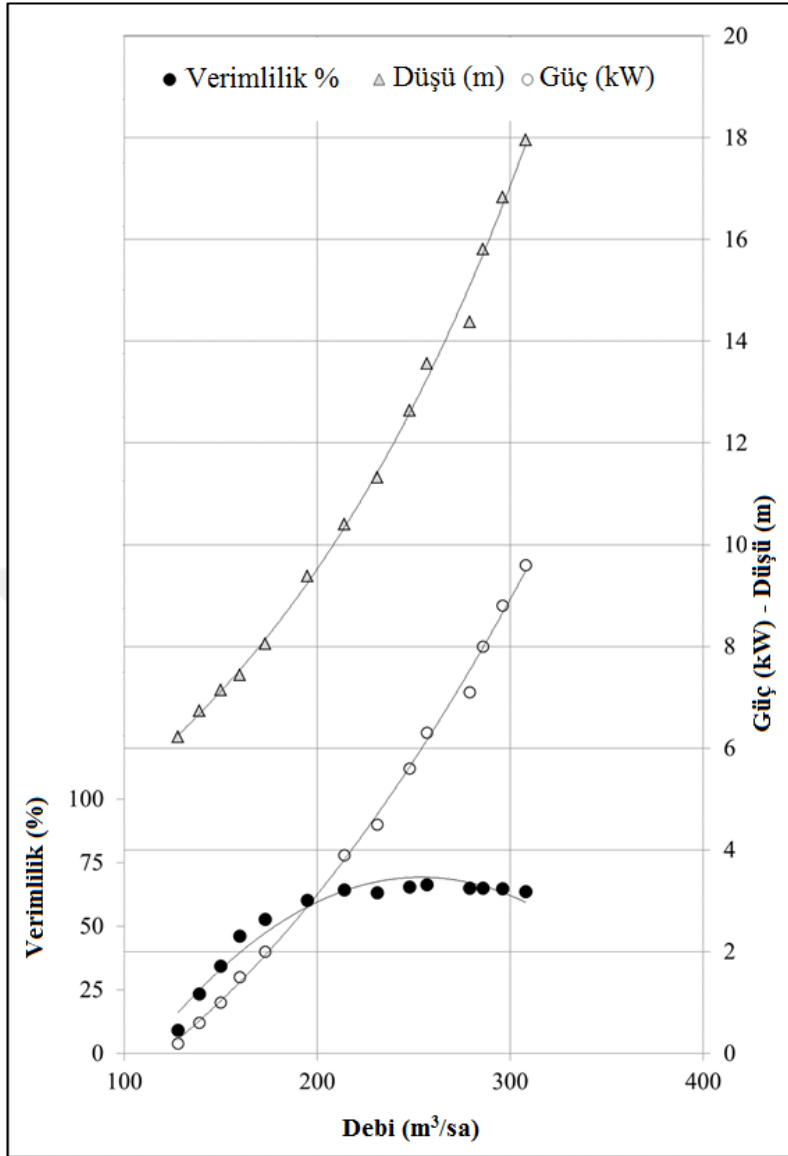
Şekil 3.9. PAT uygulaması için seçilen alandaki içme suyu dağıtım şebekesi boru hattı (Muhammetoğlu vd. 2016)



Şekil 3.10. PAT uygulaması için şematik gösterim (Muhammetoğlu vd. 2016)



Şekil 3.11. PAT sisteminin sahadaki uygulamasına yönelik teknik çizim (Muhammetoğlu vd. 2016)



Şekil 3.12. PAT sistemi için oluşturulan türbin eğrisi (Muhammetoğlu vd. 2016)

PAT sistemi giriş debisi, PAT sistemi giriş ve çıkışındaki su basıncı ile üretilen güç miktarı sahada gerçek zamanlı olarak izlenmektedir. Giriş su basıncı PAT sistemi ile yaklaşık 10,2 mSS (1 bar) düzeyinde azaltılmaktadır. Sistemde üretilen güç, giriş debisindeki değişime paralel olarak değişim göstermekte olup genel olarak 1-6 kW arasındadır.

$$P_1 = Q \rho g H e_0 \quad (3.1)$$

Verilen eşitlikte P_1 : PAT sisteminde üretilen güç (watt), Q : PAT sisteminden geçen suyun debisi (m^3/sn), ρ : suyun yoğunluğu (kg/m^3), g : yerçekimi ivmesi (m/s^2), H : PAT sistemindeki mevcut yükseklik (m) ve e_0 : ise güç üretim tesisinin toplam verimliliğidir. Tesis verimliliği kinetik enerjiden mekanik enerjiye dönüşüme bağlı kayıpları (türbin kayıpları, enerji dönüşümü ve dağıtım kayıpları dahil) içermektedir (McNabola vd. 2014).



Şekil 3.13. Bypass rögarı üzerine kabin yapılması (Muhammetoğlu vd. 2016)

Tez çalışması kapsamında Anfaş bölgesi içme suyu şebekesindeki debi ve basınç verilerinin zamansal değişimi Haziran 2016 - Ekim 2017 dönemine ait veriler için incelenmiştir. Bu dönemde PAT sisteminde üretilen güç ve verim oranları, sistemden elde edilen gerçek zamanlı izleme verileri değerlendirilerek irdelenmiştir.

3.1.4. Kaleiçi bölgesine ilişkin bilgiler

Kaleiçi, Antalya merkezinde yer alan tarihi ve turistik nitelikli bölgelerden biridir. Kaleiçi bölgesinde çok sayıda küçük motel, pansiyon, restoran, cafe, bar, dükkân, park ve müstakil evler mevcuttur. Kaleiçi bölgesindeki zemin kötü oldukça değişken olup deniz seviyesi ile 40 metre yükseklik arasında değişmektedir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Kaleiçi bölgesine ait bir uydu görüntüsü

Kaleiçi bölgesinin içme suyu, Duraliler yeraltısuyu kuyularından temin edilmekte ve temin noktasında klorlama yapılarak şebekeye verilmektedir. Kaleiçi bölgesi bağımsız bir alt bölge (DMA) olarak bölünmüştür. Kaleiçi alt bölgesine içme suyu tek bir noktadan beslenmekte ve bu noktada bölgeye verilen toplam su hacmi elektromanyetik bir debimetre ile hassas bir şekilde ölçülmektedir. Ölçülen debi değerleri Kaleiçi SCADA istasyonundan kablosuz olarak ASAT SCADA Merkezi'ne ulaştırılmakta ve 5 dakika aralıklarla kaydedilmektedir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Kaleiçi SCADA istasyonu

3.2. EPANET 2.0 Hidrolik Modeli

EPANET 2.0 programı su dağıtım şebekelerini “Newton Gradyan Yöntemi” ile çözümleyen bir hidrolik hesap programıdır (Rossman 2000). Program şebekenin hidrolik durumunu hibrit bir nokta-ağ yaklaşımı mantığı içerisinde, debi sürekliliği ve yük kaybı eşitliklerini kullanarak hesap etmektedir. EPANET programına boru uzunlukları, çapları, pürüzlülük katsayıları, düğüm noktalarında su kullanımları, arazi kotları, su alma yapıları, pompa, vana gibi ekipmanlarla ilgili veriler girilerek şebekede anlık hidrolik durum (single period simülasyon) ya da uzun zaman zarfındaki hidrolik durumlarına (extended period simülasyon) göre şebeke hidrolik hesapları yapılabilmektedir (Rossman 2000).

EPANET 2.0 programının temel kullanım amaçları içerisinde mevcut olan veya henüz tamamlanmamış bir şebekeyi modellemek, su kalitesini istenilen seviyeye çıkartmak için farklı senaryoları geliştirmek ve geliştirilen senaryoların uygulanabilirliğini test etmek yer almaktadır. Model, dağıtım sistemleri içindeki içme suyu öğelerinin davranışlarını anlamamıza yardımcı olabilmektedir.

EPANET programı, su dağıtım şebekesinin kullanıcı tarafından basit bir şekilde görsel olarak oluşturulmasına ve şebeke elemanlarına ait verilerin bu ortama aktarılmasına izin vermektedir. Şebekeye ilişkin çok çeşitli veri analizleri ve raporlaması yapılabilmektedir. Analizler içerisinde grafiksel zaman serisi, (profil ya da counterplotlar gibi), düzlemsel görünüm ve özel raporlar (enerji kullanımları, oluşan reaksiyonlar veya kalibrasyon raporları) yer almaktadır (TÜBİTAK 2008).

EPANET 2.0 programında hidrolik ve su kalitesi modellemesine yönelik olarak kullanılan eşitlikler, matematiksel çözüm yöntemleri, eşitliklerde kullanılan katsayı ve sabitler ile ilgili detaylı bilgiler kullanıcı el kitabında açıklanmaktadır (Rossman 2000).

3.2.1. EPANET hidrolik modelinin genel özellikleri

Su dağıtım şebeke elemanları ve yapıları olarak borular, düğüm noktaları, pompalar, vanalar, depolama tankları ve rezervuarlar sayılabilmektedir. EPANET programı ile oluşturulan su dağıtım şebekesindeki her bir borudaki suyun akış hızı, düğüm noktalarındaki su basıncı, tanklardaki su yüksekliği ve şebekede yürütülen simülasyon periyodu boyunca kimyasal maddelerin konsantrasyonlarındaki değişim hesaplanabilmektedir. Ayrıca su yaşı ve su içindeki kimyasal maddelerin seviyelerinin izlenmesinde de yardımcı olmaktadır (Tiryakioğlu 1999).

EPANET programının hidrolik model özellikleri aşağıda sıralanmıştır (Rossman 2000);

- Analiz edilen sistem sınırsız büyüklüktedir.
- Hazen-Williams, Darcy-Weisbach veya Chezy-Manning formüllerine göre sürekli yük kayıpları hesaplanır.
- Dirsekler ve diğer şebeke elemanlarındaki yerel yük kayıpları hesaplanır.
- Sabit ya da değişken pompaların hızları modellenir.
- Pompaj enerjisini ve maliyetini hesaplar.
- Değişik vana modelleri (kapatma, kontrol, basınç ayarlama ve akış kontrolü vanaları) kullanılır.
- Değişik çap ve yüksekliklerdeki hazneleri içerir.
- Basınca bağlı olarak orifisten çıkan akışı modeller.
- Tüm basit tank seviyelerini ya da zaman kontrollerini ve karmaşık kontrolleri ana sisteme işleyebilir.

Hidrolik yük kayıpları genel olarak 2 kısma ayrılmakta olup sürtünme kayıpları ve yersel kayıplar olarak dikkate alınır.

3.2.2. EPANET programında sürtünme kayıpları

Boru cidarlarındaki sürtünme ile oluşan yük kayıpları EPANET programında;

- Hazen-Williams,
- Darcy-Weisbach,
- Chezy-Manning formülleri ile bulunabilmektedir.

Hazen-Williams formülü su dışında başka bir sıvı için kullanılamamaktadır ve başlangıçta türbülanslı akım koşullarını gerektirmektedir. Darcy-Weisbach formülü giriş

sistemi üzerinde uygulanır ve bütün sıvıları kapsar. Chezy-Manning formülü ise açık kanallar için kullanılan bir formüldür (Rossman 2000).

Boru içerisindeki yük kayıplarının hesaplanması için aşağıdaki eşitlik kullanılır:

$$h_L = A \times q^b \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte h_L enerji kaybını, A direnç katsayısını, q debiyi, b ise ampirik katsayısı belirtmektedir. EPANET programı Darcy-Weisbach formülü ile birlikte giriş yapısından kaynaklanan sürtünme faktörünün hesabı için farklı yöntemler kullanmaktadır (Rossman 2000). Sürtünme kaybı formülleri Çizelge 3.2’de, yeni borular için pürüzlülük katsayıları Çizelge 3.3’te verilmektedir.

Çizelge 3.2. Tüm akımlar için sürtünme kaybı formülleri (Rossman 2000)

Formül	Sürtünme Katsayısı	Ampirik Katsayı
Hazen-Williams	$4,727 \cdot C^{-1,852} \cdot d^{-4,871} \cdot L$	1,852
Darcy-Weisbach	$0,0252 \cdot f(\epsilon, d, q) \cdot d^{-5} \cdot L$	2
Chezy-Manning	$4,66 \cdot n^2 \cdot d^{-5,33} \cdot L$	2
C : Hazen-Williams pürüzlülük katsayısı ϵ : Darcy-Weisbach pürüzlülük katsayısı f : Sürtünme faktörü (ϵ, d, q ’ ya bağlı olarak) n : Manning pürüzlülük katsayısı d : Boru çapı (ft) L : Boru uzunluğu (ft) q : Debi (ft ³ /sn)		

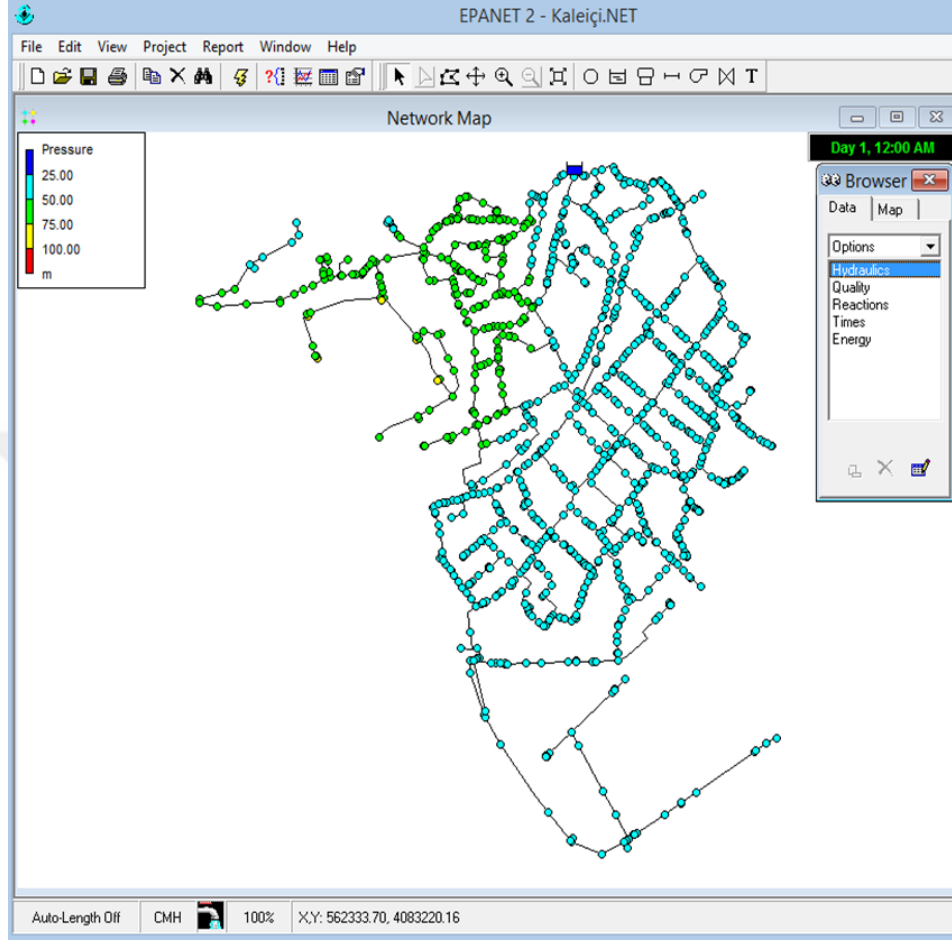
Çizelge 3.3. Yeni borular için pürüzlülük katsayısı (Rossman 2000)

Madde	Hazen-Williams C	Darcy-Weisbach ϵ (feet*10 ⁻³)	Chezy-Manning n
Dökme Demir	130 – 140	0,85	0,012 – 0,015
Beton	120 – 140	1,0 – 10	0,012 – 0,017
Galvanize Demir	120	0,5	0,015 – 0,017
Plastik	140 – 150	0,005	0,011 – 0,015
Çelik	140 – 150	0,15	0,015 – 0,017
İşlem Görmüş Kil	110		0,013 – 0,015

3.3. EPANET Modelinin Kaleiçi Çalışma Bölgesi için Uygulanması

Hidrolik modelleme çalışmasının yapılabilmesi için ilk aşama, içme suyu dağıtım şebekesinin model ekranında oluşturulmasıdır. EPANET programının çalışma bölgesine

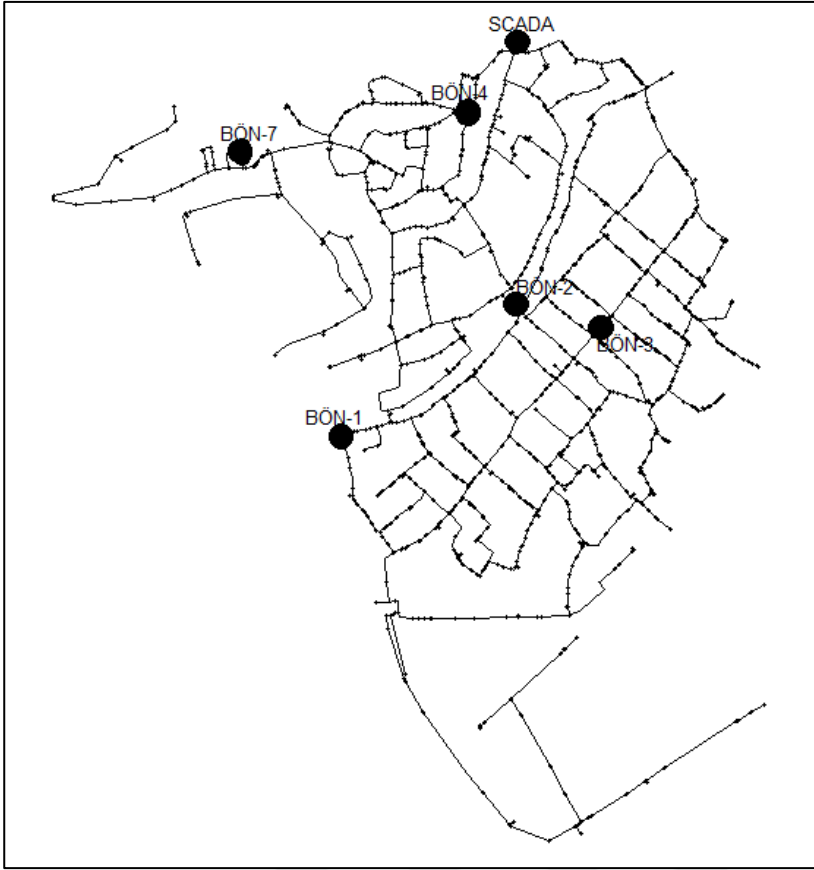
uygulanması için gerekli olan giriş dosyaları ASAT-CBS biriminden elde edilen veriler ve saha çalışmaları neticesinde tamamlanmıştır. Kaleiçi bölgesine ait içme suyu şebekesinin EPANET programındaki ekran görüntüsü Şekil 3.16’da verilmektedir.



Şekil 3.16. Kaleiçi bölgesine ait içme suyu şebekesi ve düğüm noktalarının EPANET programındaki ekran görüntüsü

3.3.1. Kaleiçi bölgesi içme suyu dağıtım şebekesindeki fazla basıncın belirlenmesi

Daha önce gerçekleştirilmiş olan bir TÜBİTAK Projesi kapsamında (Proje No: 114Y168) Kaleiçi içme suyu dağıtım şebekesine ait pek çok bilgi ve veri setleri temin edilmiştir. Bu kapsamda içme suyu dağıtım şebekesi planı, abone bilgileri, su debisi, abonelerin su tüketim miktarları, bölgede 5 farklı noktada ölçülen basınç verileri elde edilmiştir. Kaleiçi içme suyu dağıtım şebekesinde online basınç ölçümleri gerçekleştirilen ölçüm noktaları Şekil 3.17’de gösterilmektedir.



Şekil 3.17. Kaleiçi içme suyu dağıtım şebekesindeki online basınç ölçüm noktaları

Elde edilen veriler ve EPANET hidrolik modeli kullanılarak Kaleiçi bölgesinin hidrolik modellemesi yapılmıştır. Sahadan elde edilen farklı veri setleri kullanılarak model kalibrasyonu ve doğrulaması çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Hidrolik model ile Kaleiçi bölgesindeki su basıncının mekânsal ve zamansal değişimi ortaya konulmuştur. Elde edilen basınç dağılımlarından fazla basınç miktarı hesaplanmıştır.

3.3.2. Kaleiçi bölgesinde fazla basınçtan enerji üretim potansiyelinin incelenmesi

Anfaş bölgesinde kurulan ve işletilen PAT sisteminde izlenen enerji üretim verimliliği kullanılarak, Kaleiçi bölgesi için tespit edilen fazla basınç düzeyi için PAT sistemi kurulması durumunda üretilebilecek potansiyel güç miktarı hesaplanmıştır. Farklı dönemlere ilişkin fazla basınç düzeyleri dikkate alınarak, PAT kullanılması halinde elde edilebilecek potansiyel enerji üretimi değerlendirilmiştir.

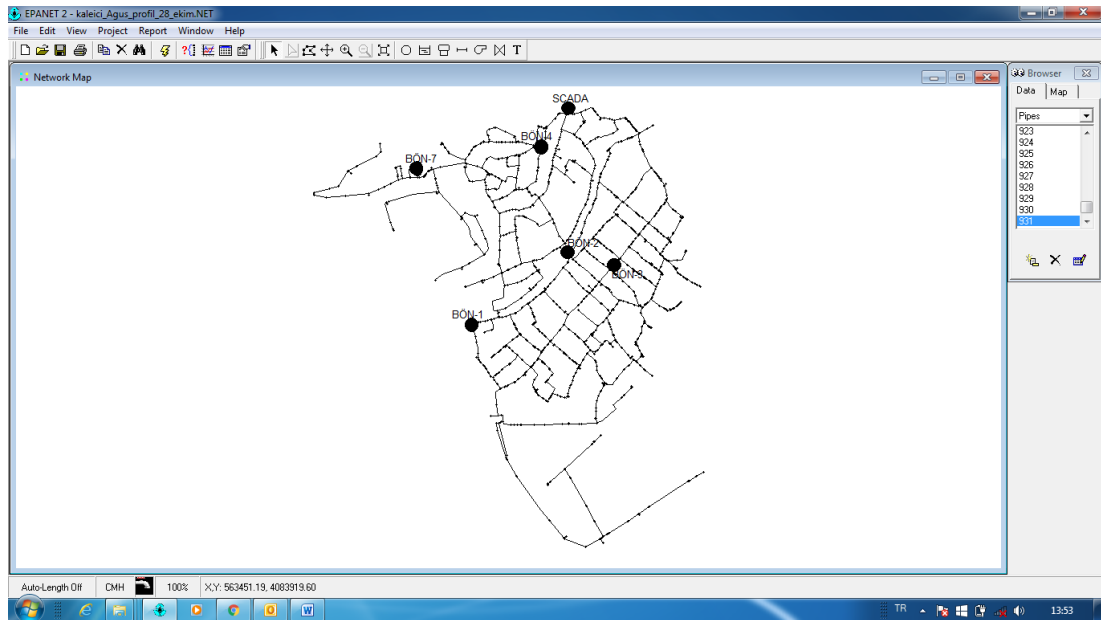
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. EPANET Modeli İle Hidrolik Model Kalibrasyonu (Kalibrasyon 1)

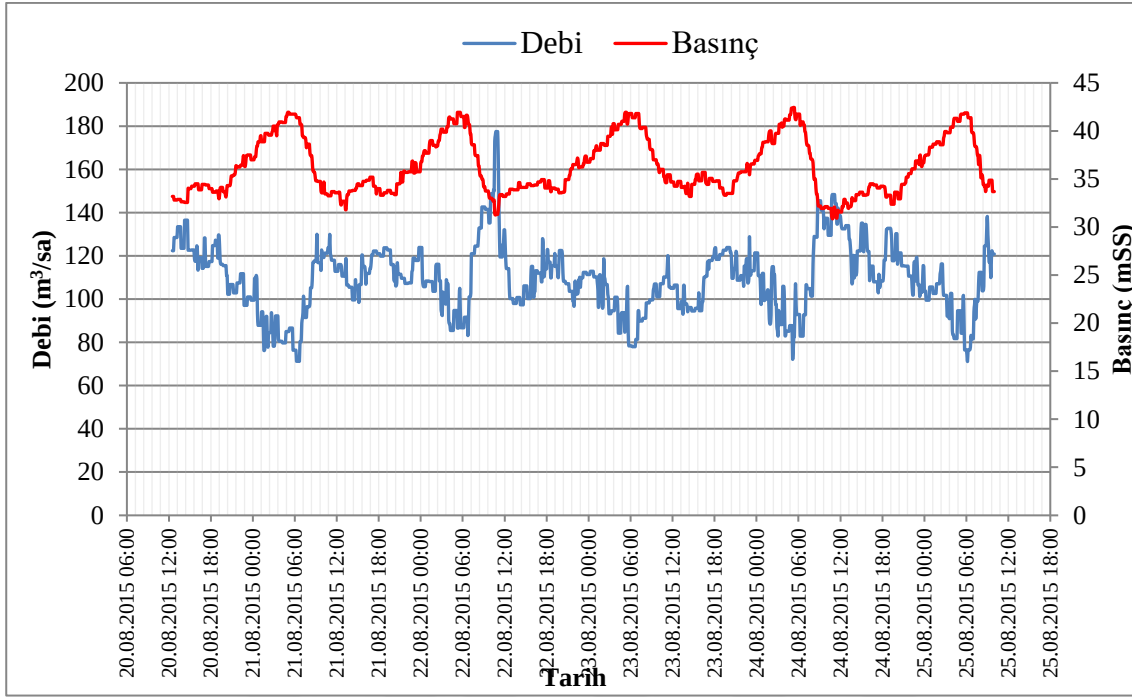
4.1.1. Giriş

Hidrolik model kalibrasyonu çalışmasının amacı, modelden elde edilen basınç tahminleri ile Kaleiçi çalışma bölgesinde anlık basınç ölçümleri yapılan 5 farklı basınç ölçüm noktasından elde edilen basınç ölçümlerini kıyaslayarak, şebekede meydana gelen boru pürüzlülük katsayısını bulmaktır.

Kaleiçi çalışma bölgesine ait hidrolik modelleme çalışmasında EPANET programı kullanılmıştır. EPANET modelinin giriş dosyaları ASAT-CBS biriminden elde edilen veriler ve saha çalışmaları neticesinde tamamlanmıştır (Şekil 4.1). Hidrolik model kalibrasyonu çalışması 20 Ağustos 2015 günü saat 12:30 ile 25 Ağustos 2015 günü saat 10:00 arasında kalan zaman sürecinde 5 dakika zaman aralığında gerçekleştirilmektedir. Belirtilen tarihler arasında farklı su kullanıcılarına yönelik olarak özellikle fazla su tüketimi olan Antalya Büyükşehir Belediyesi itfaiye önü park sayacının sahada saatlik sayaç okumaları gerçekleştirilmiştir. 20 Ağustos 2015 günü modelin ısınma süresi olarak alınmış (24 saat) ve 21 Ağustos 2015 günü saat 12:30 ile 25 Ağustos 2015 günü saat 10:00 arasındaki model tahminleri ile ölçümler arasında karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca 22 Ağustos 2015 tarihinde 35 dakika süreyle bölge içinde bulunan yangın muslukları açılarak yapay debi artışı sağlanmıştır. Belirtilen debi artışına bağlı olarak su basıncında düşme kaydedilmiştir. Yapay olarak gerçekleştirilen debi artışı durumu için de modelin tahmin becerisi incelenmiştir. Hidrolik model kalibrasyonu çalışması süresince Kaleiçi SCADA istasyonunda ölçülen debi ve basınç değerleri Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Kaleiçi alt bölgesine ait içme suyu şebekesinin EPANET modelindeki ekran görüntüsü



Şekil 4.2. 20-25 Ağustos 2015 tarihleri arasında SCADA istasyonunda izlenen debi ve basınç ölçümleri

Kaleiçi çalışma bölgesinde basınç ölçümleri, farklı kot seviyelerine göre seçilmiş 7 noktada yapılabilmektedir. Ancak tez çalışmasında mevcut olan 5 adet portatif basınç metre kullanılarak, şebeke üzerinde aynı zamanda 5 noktada basınç ölçümleri yapılabilmektedir. Kaleiçi bölgesindeki basınç ölçümleri yangın dolapları içerisine eklenen özel bölmelere yerleştirilen basınç metreler ile yapılmıştır. Yangın dolapları içerisine yerleştirilen basınç metrelerin kotları (deniz seviyesinden yüksekliği) yüksek hassasiyetli GPS seti ve uzman bir harita mühendisi ile arazi çalışması neticesinde belirlenmiştir. Hidrolik model kalibrasyonu çalışması için BÖN-1, BÖN-2, BÖN-3, BÖN-4 ve BÖN-7 kısaltmaları ile verilen basınç ölçüm noktalarında portatif basınç metreler ile yapılan basınç ölçümleri kullanılmıştır. Basınç ölçümlerinin gerçekleştirildiği noktaların kotları (Basınç Ölçüm Kotu), zemin kotları ve boru kotları (Node Seviyesi) Çizelge 4.1’de verilmektedir.

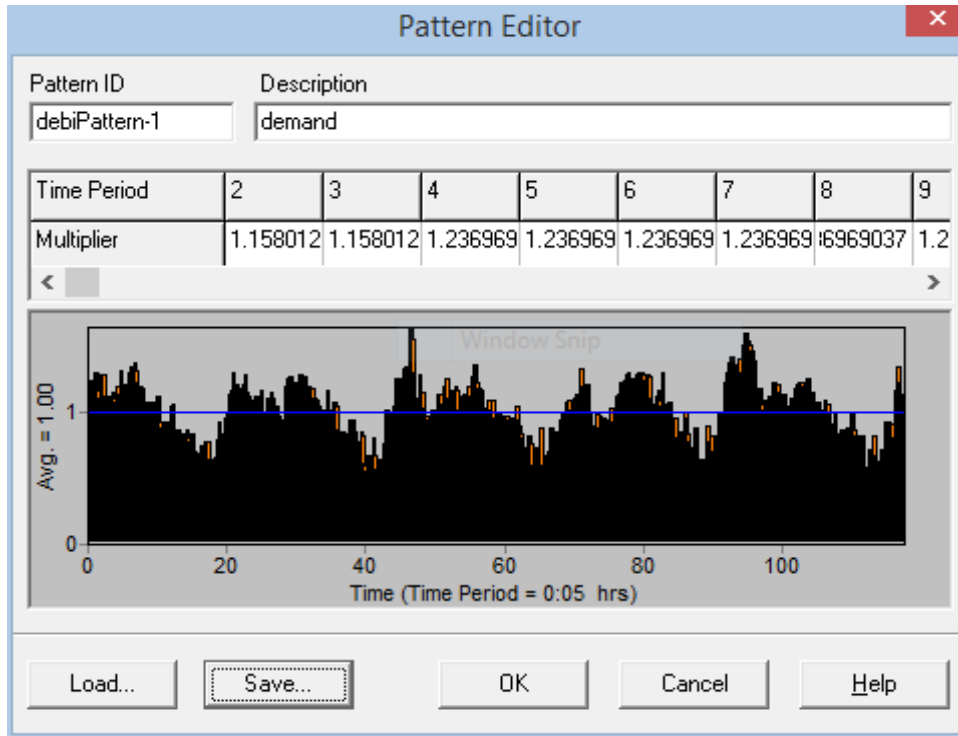
Çizelge 4.1. Ölçüm istasyonlarının zemin kotları, boru kotları ve basıncın ölçüm noktalarının kotları

Ölçüm İstasyonları	Model Node ID ¹	Node Seviyesi ² (m)	Zemin Kotu (m)	Basınç Ölçüm Kotu (m)
SCADA	-	38,360	39,360	38,360
BÖN-1	S492	31,700	32,700	33,905
BÖN-2	S232	32,100	33,100	33,540
BÖN-3	S623	37,603	38,603	39,317
BÖN-4	S468	24,162	25,162	25,902
BÖN-7	S490	5,300	5,300	5,790

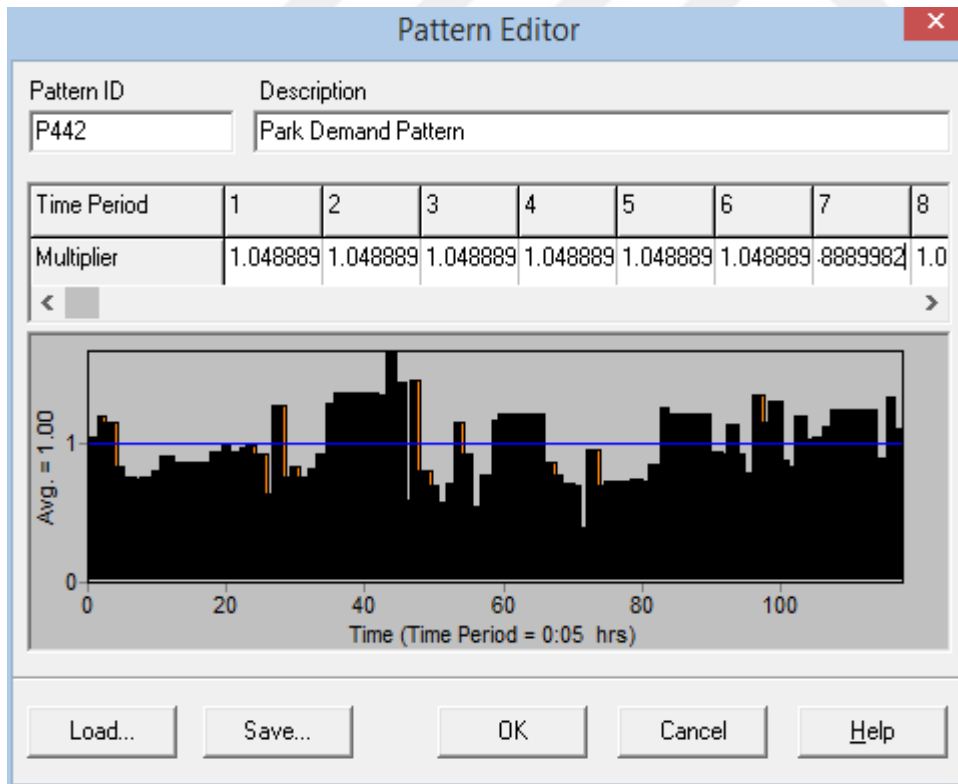
¹ EPANET modelinde tanımlanan düğüm noktası tanımı, ² Düğüm noktasındaki boru kotu

4.1.2. Model uygulaması

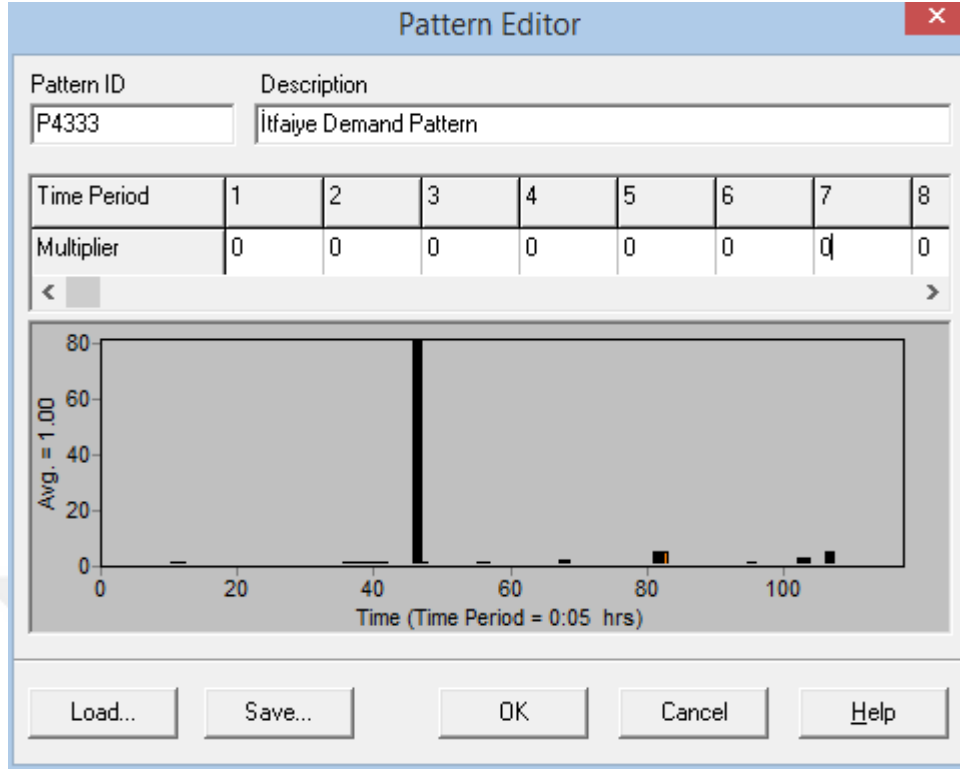
Hidrolik modeller ile içme suyu şebekelerindeki su basıncının tahmin edilmesine yönelik çalışmalarda 2 temel belirsizlik parametresi söz konusudur. Bu parametrelerden birincisi temel su kullanımları ve su kullanımlarının zamansal değişimi iken diğeri ise boru cidar sürtünme katsayısıdır. Tez çalışması kapsamında temel su kullanımının ve zamansal değişiminin belirlenmesi için sayaç okumaları ve SCADA ölçümlerinden faydalanılmıştır ve böylece birinci belirsizlik parametresi tespit edilmiştir. İkinci belirsizlik parametresi olan boru cidar sürtünme katsayısı ise kalibrasyon çalışması süresince deneme-yanılma metodu kullanılarak tahmin edilmiştir. Kalibrasyon çalışması için Kaleiçi bölgesinden seçilen farklı su kullanıcılarının saatlik su tüketimleri belirlenmiş ve su tüketimi bilinen su kullanıcıları için noktasal su ihtiyacı ile saatlik su tüketim profilleri hidrolik modelde tanımlanmıştır. Saatlik su tüketimi bilinmeyen aboneler için ASAT Tahakkuk Birimi'nden Ağustos 2015 ayına ilişkin tüketim miktarları temin edilmiş ve zamansal su tüketim profili SCADA istasyonundan elde edilen 5 dakika zaman aralıklı debi profiline göre hesaplanmıştır (Şekil 4.3). Saatlik su kullanım miktarları sahada tespit edilen aboneler için modele girilen 5'er dakikalık su tüketim profilleri Şekiller 4.3-4.5'te sunulmaktadır. SCADA istasyonunda izlenen basınç profili de 5 dakika zaman aralıklı olarak modele tanıtılmıştır (Şekil 4.6). Boru cidar sürtünme katsayısının kalibrasyonu ise modelin farklı katsayı değerleri ile çalıştırılmasından elde edilen basınç tahminleri ile ölçümlerin karşılaştırılması ve en düşük model hatası veren katsayının seçilmesi yoluyla gerçekleştirilmiştir.



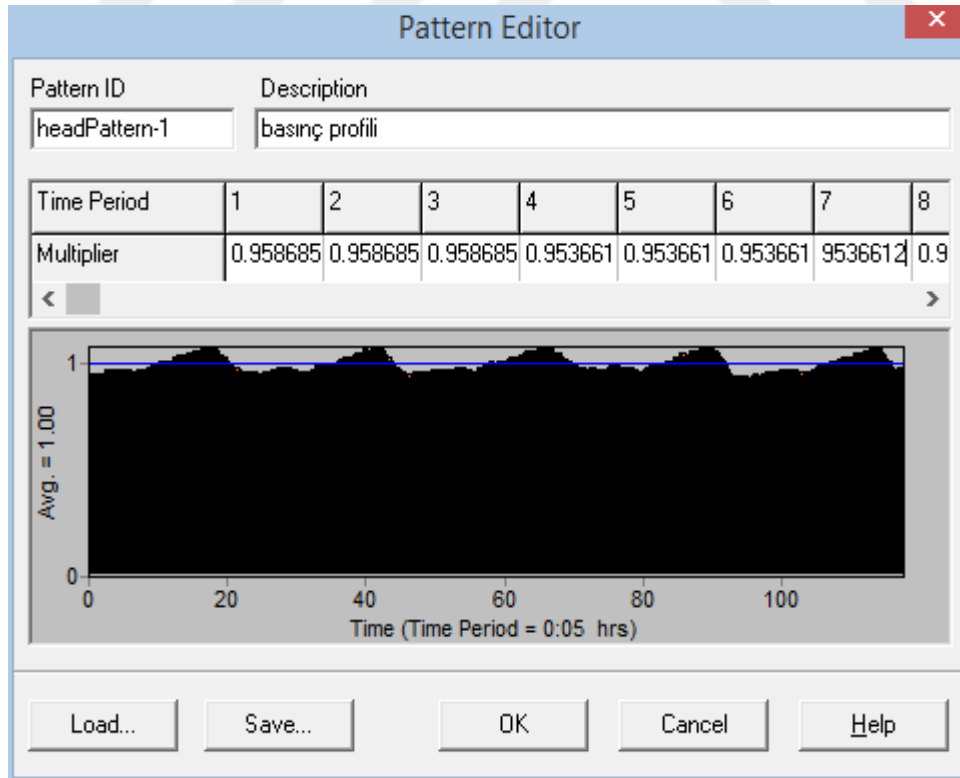
Şekil 4.3. Hidrolik model kalibrasyonu süresince SCADA istasyonundan elde edilen 5 dakika zaman aralıklı debi profili



Şekil 4.4. Hidrolik model kalibrasyonu süresince EPANET modelinde P442 numaralı noktaya karşılık gelen Park için elde edilen 5 dakika zaman aralıklı su kullanım profili



Şekil 4.5. Hidrolik model kalibrasyonu süresince EPANET modelinde P4333 numaralı noktaya karşılık gelen İtfaiye için elde edilen 5 dakika zaman aralıklı su kullanım profili

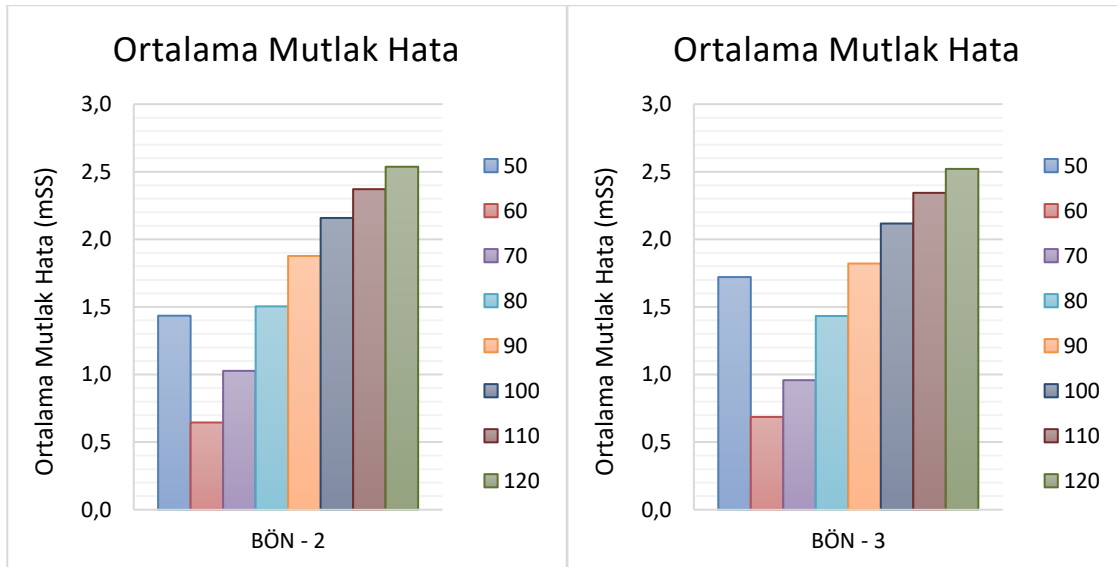


Şekil 4.6. Hidrolik model kalibrasyonu süresince SCADA istasyonundan elde edilen 5 dakika zaman aralıklı basınç profili

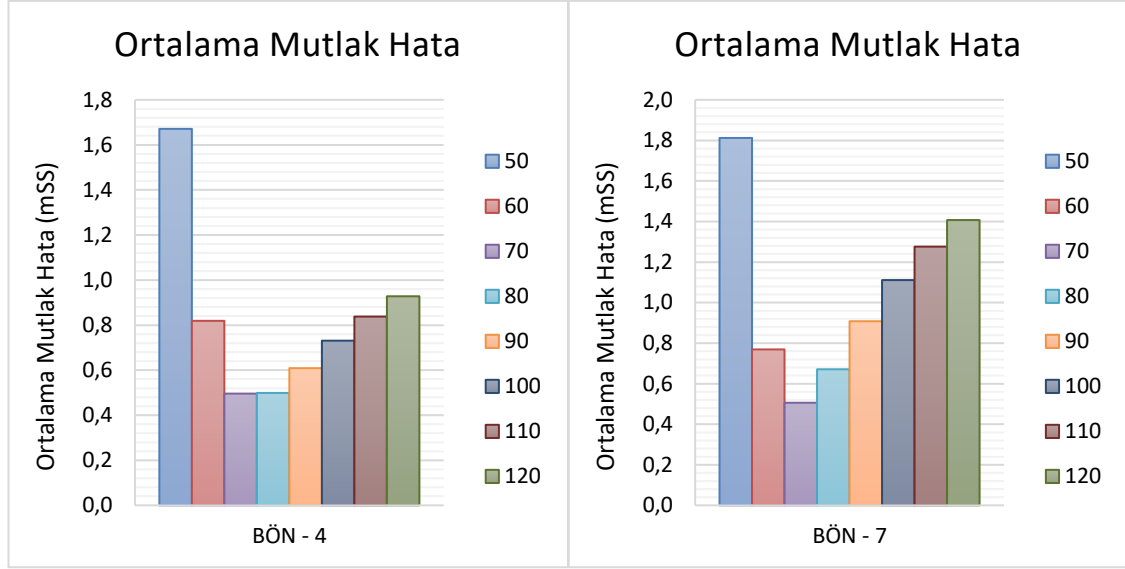
4.1.3. Pürüzlülük katsayısının belirlenmesi

EPANET hidrolik modelinde Hazen-Williams (H-W) hidrolik eşitliği kullanılmaktadır. H-W hidrolik eşitliğinde boru cidar pürüzlülük katsayısı farklı boru türleri ve borunun yaşına göre değişik aralıklarda olabilmektedir. Kaleiçi alt bölgesi büyük bir çoğunlukla (%90,99) HDPE borulardan oluşmaktadır ve boruların %90,99'u 1 Ocak 2008 tarihinde kullanıma alınmıştır. Boruların %6,28'i 2003 yılında montaj yapılmış olup, boruların %2,73'lük kısmının ise faaliyete alınma tarihi ve dolayısıyla yaşı bilinmemektedir. H-W pürüzlülük katsayısının yeni HDPE borular için 140-150, yeni koruge metal borular için 60 değerinde alınması önerilmektedir (Anonim 4). Ancak boru yaşının artması ile birlikte bu değerin düşeceği ve yük kayıplarının artacağı belirtilmektedir.

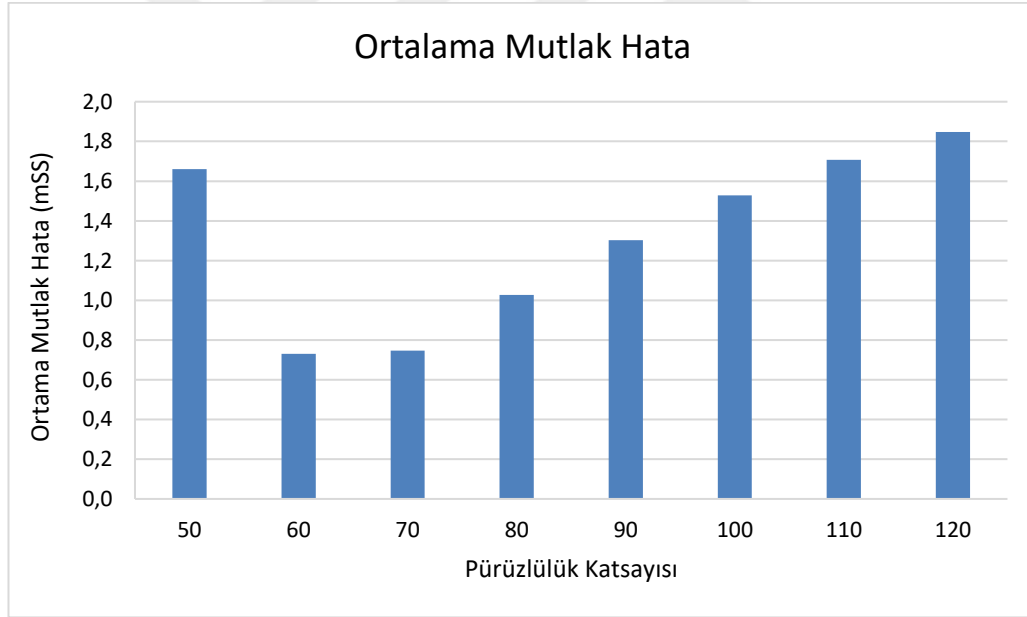
Hidrolik model kalibrasyonunda yersel yük kayıpları modelleme pratikliği açısından ayrı ayrı ele alınmayıp, H-W pürüzlülük katsayısına gömülü olarak ele alınmaktadır. Tüm bu nedenlerden dolayı H-W pürüzlülük katsayısının kalibrasyon ile belirlenmesine yönelik çalışmada yeni borular için tanımlanan 140-150 aralığı yerine literatürde belirtilen 50-120 aralığı dikkate alınmıştır. Hidrolik modelleme çalışmasında H-W katsayısı her bir denemede 10 sayı arttırılmıştır. Her bir basınç ölçüm noktası için farklı pürüzlülük katsayıları için elde edilen mutlak hata miktarları Şekil 4.7'de, ortalama mutlak hata miktarları ise Şekil 4.8'de sunulmaktadır. Farklı pürüzlülük katsayıları için hidrolik modelden elde edilen basınç tahminleri ile basınç ölçümlerine ilişkin karşılaştırmalar Şekiller 4.9-4.14'te verilmektedir. Model tahminleri "Node Seviyesi"nde gerçekleştirmekte ise de basınç ölçümleri "Basınç Ölçüm Kotu" seviyesinde yapılmaktadır (Çizelge 4.1). Bu sebeple model tahminleri ve basınç ölçümleri karşılaştırılırken bu seviye farklılıkları dikkate alınmıştır.



Şekil 4.7. 20-25 Ağustos 2015 tarihleri arasında farklı pürüzlülük katsayılarındaki model tahminleri ile basınç ölçümleri arasındaki ortalama mutlak hatalar



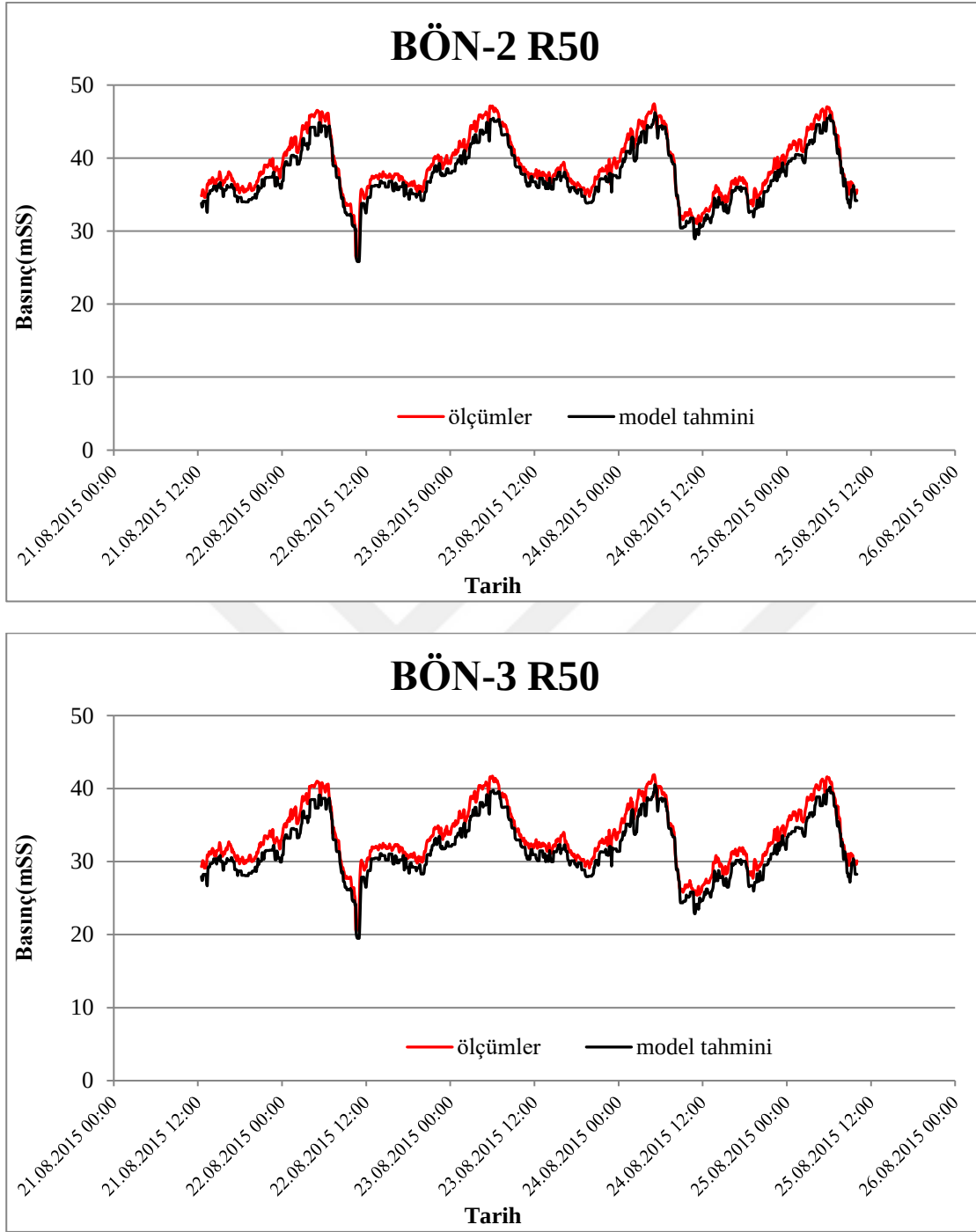
Şekil 4.7'nin devamı. 20-25 Ağustos 2015 tarihleri arasında farklı pürüzlülük katsayılarındaki model tahminleri ile basınç ölçümleri arasındaki ortalama mutlak hatalar



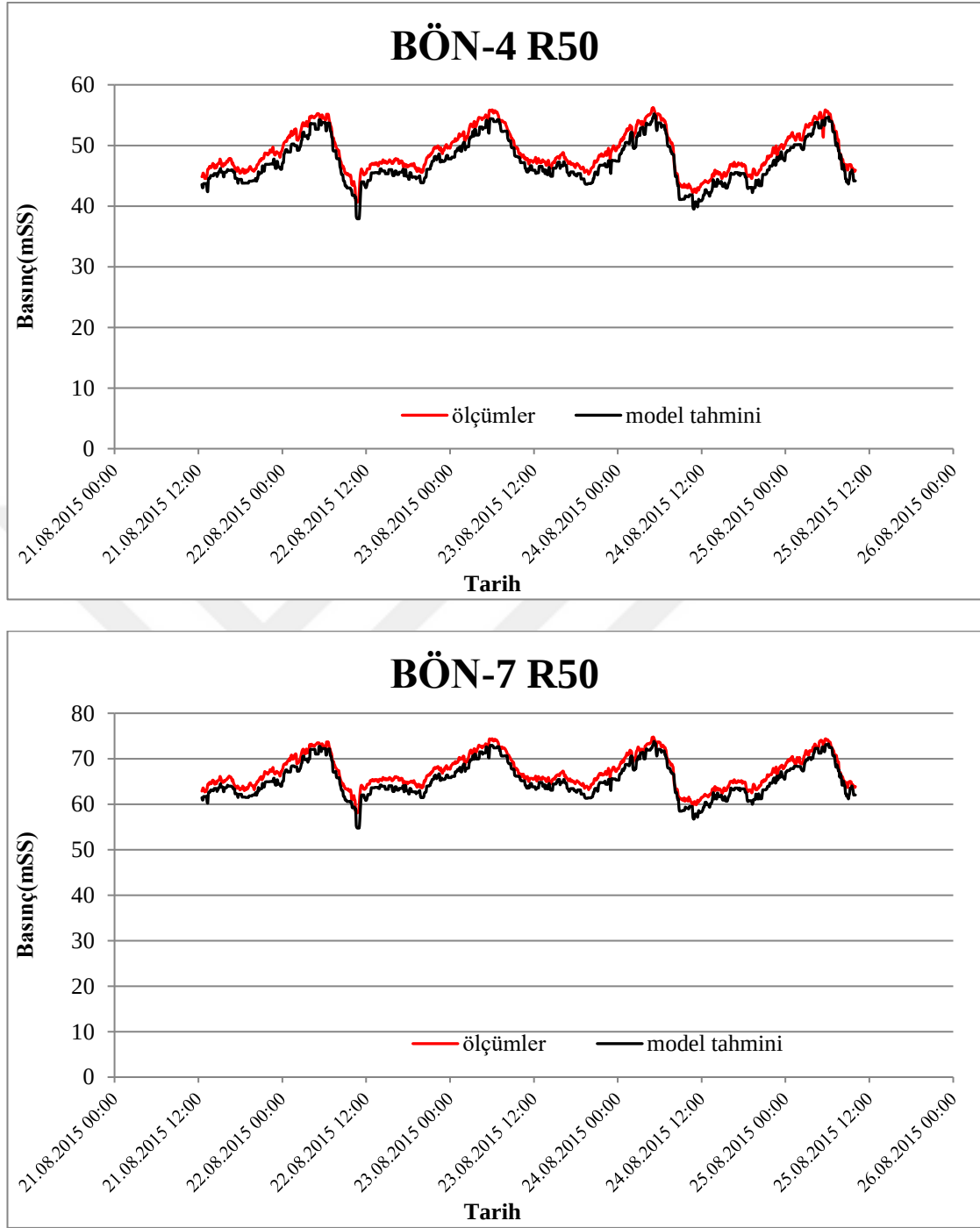
Şekil 4.8. Farklı pürüzlülük katsayıları için elde edilen Ortalama Mutlak Hata değerleri

Çizelge 4.2. Farklı pürüzlülük katsayılarına göre elde edilen Ortalama Mutlak Hata sonuçları

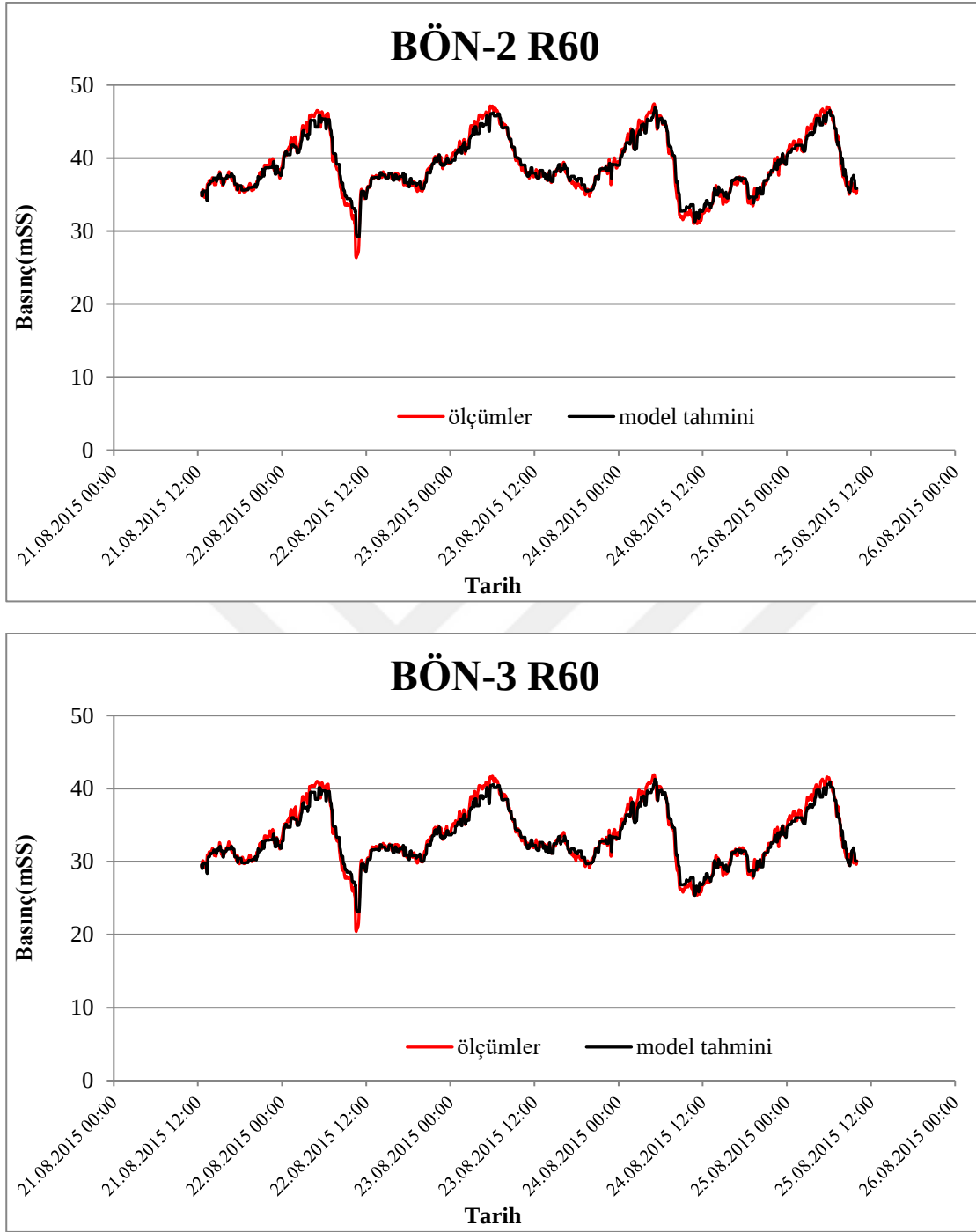
Pürüzlülük Katsayısı	50	60	70	80	90	100	110	120
Ortalama Mutlak Hata (mSS)	1.660	0.730	0.747	1.027	1.303	1.529	1.707	1.848



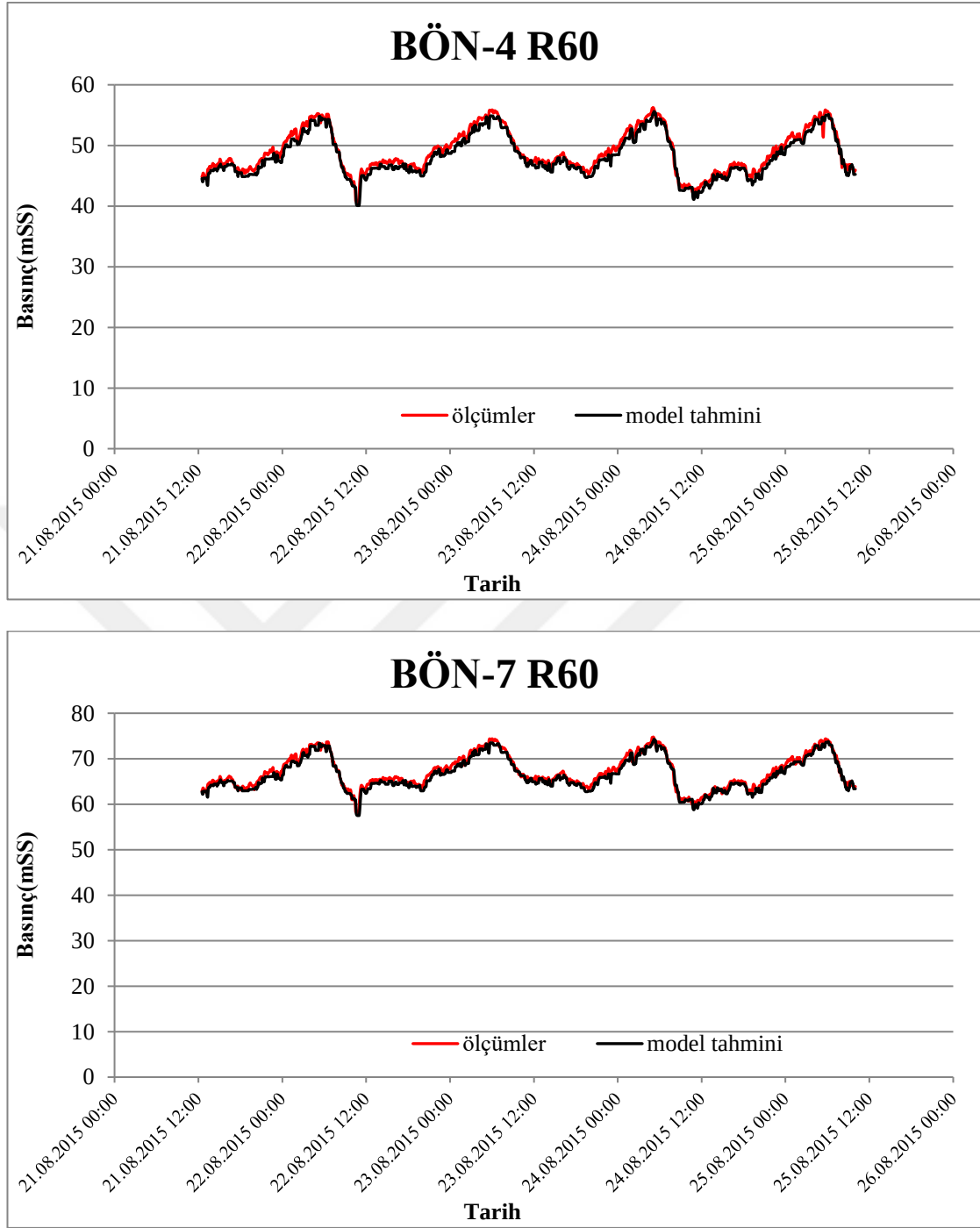
Şekil 4.9. Pürüzlülük katsayısı 50 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması



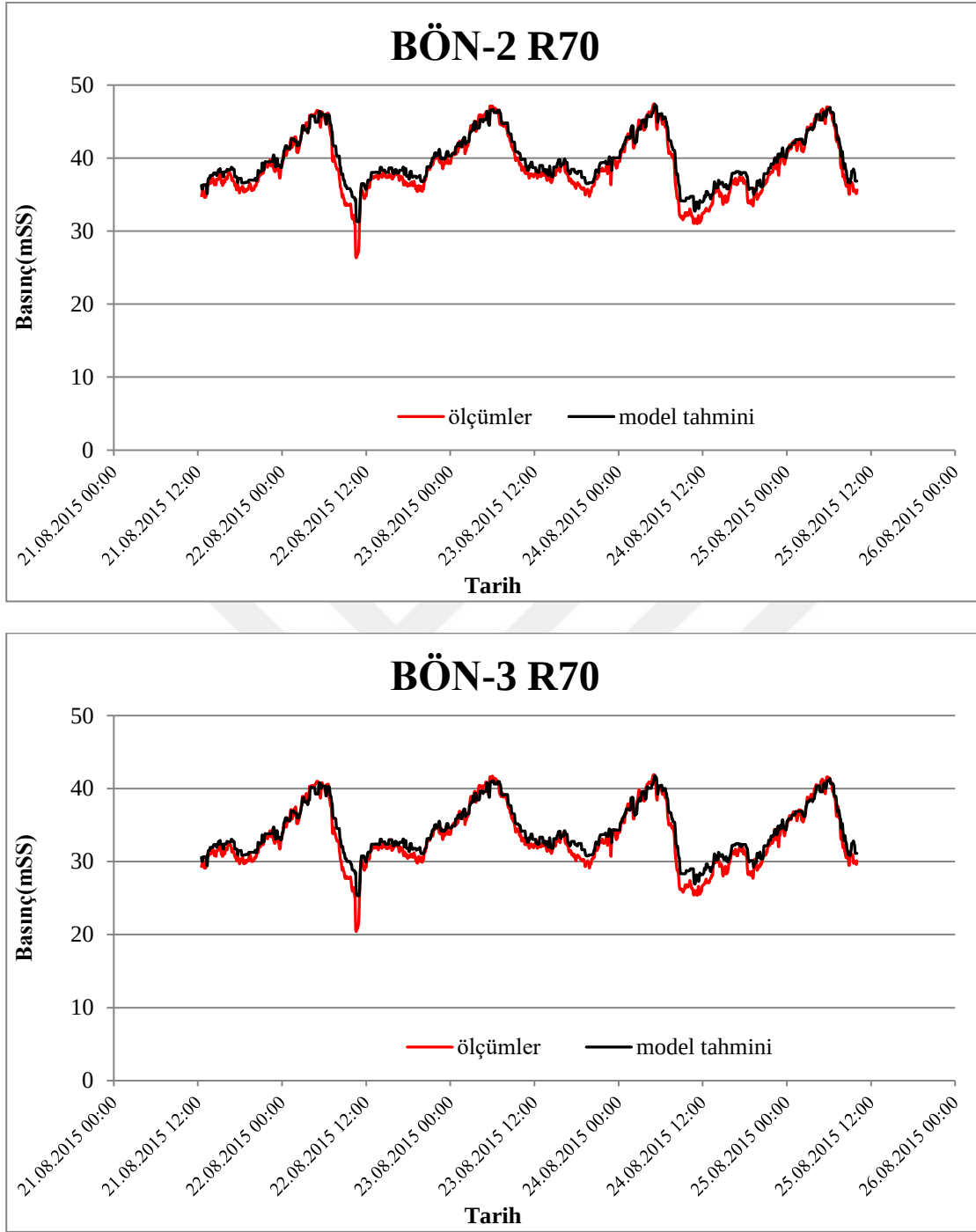
Şekil 4.9'nın devamı. Pürüzlülük katsayısı 50 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması



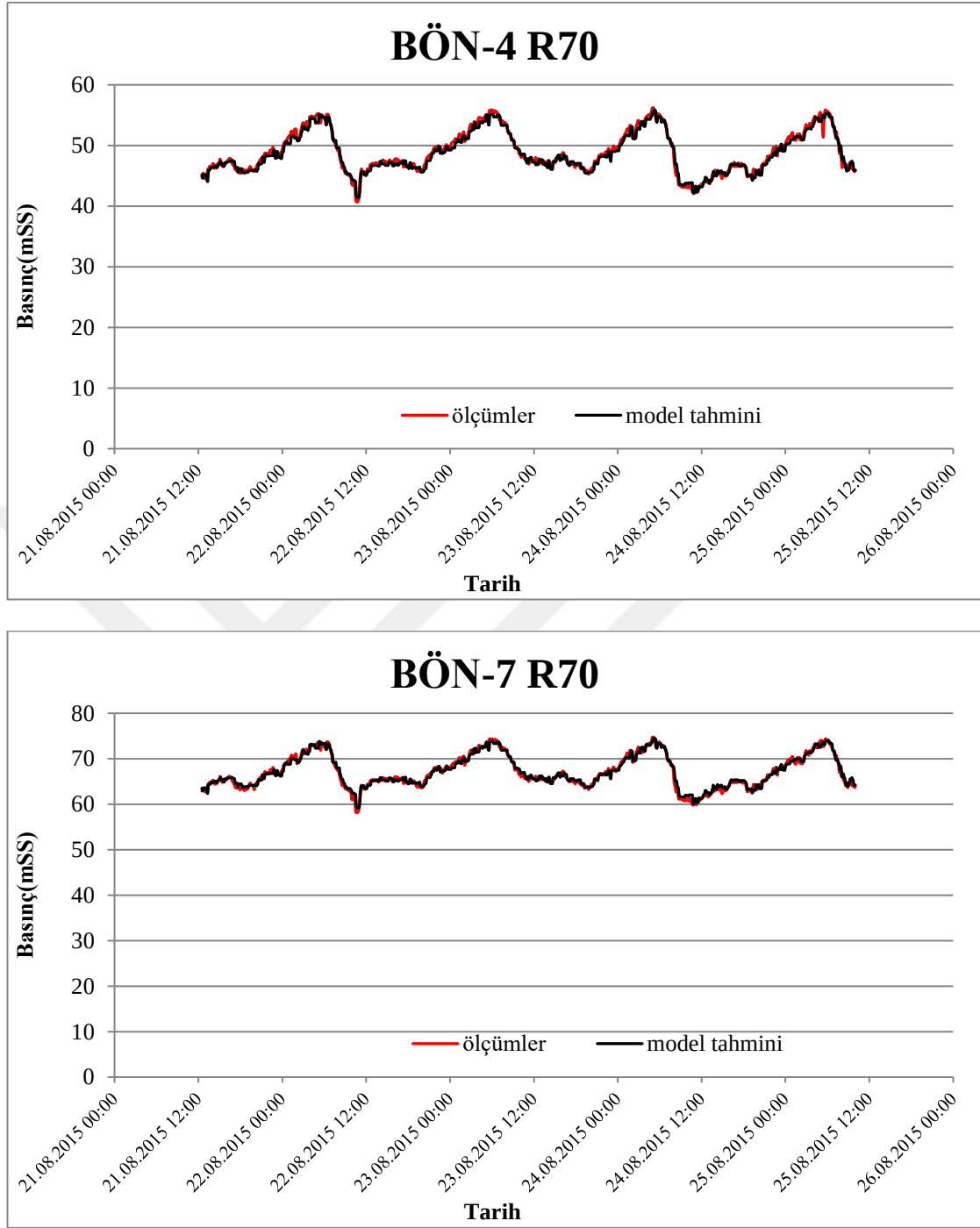
Şekil 4.10. Pürüzlülük katsayısı 60 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması



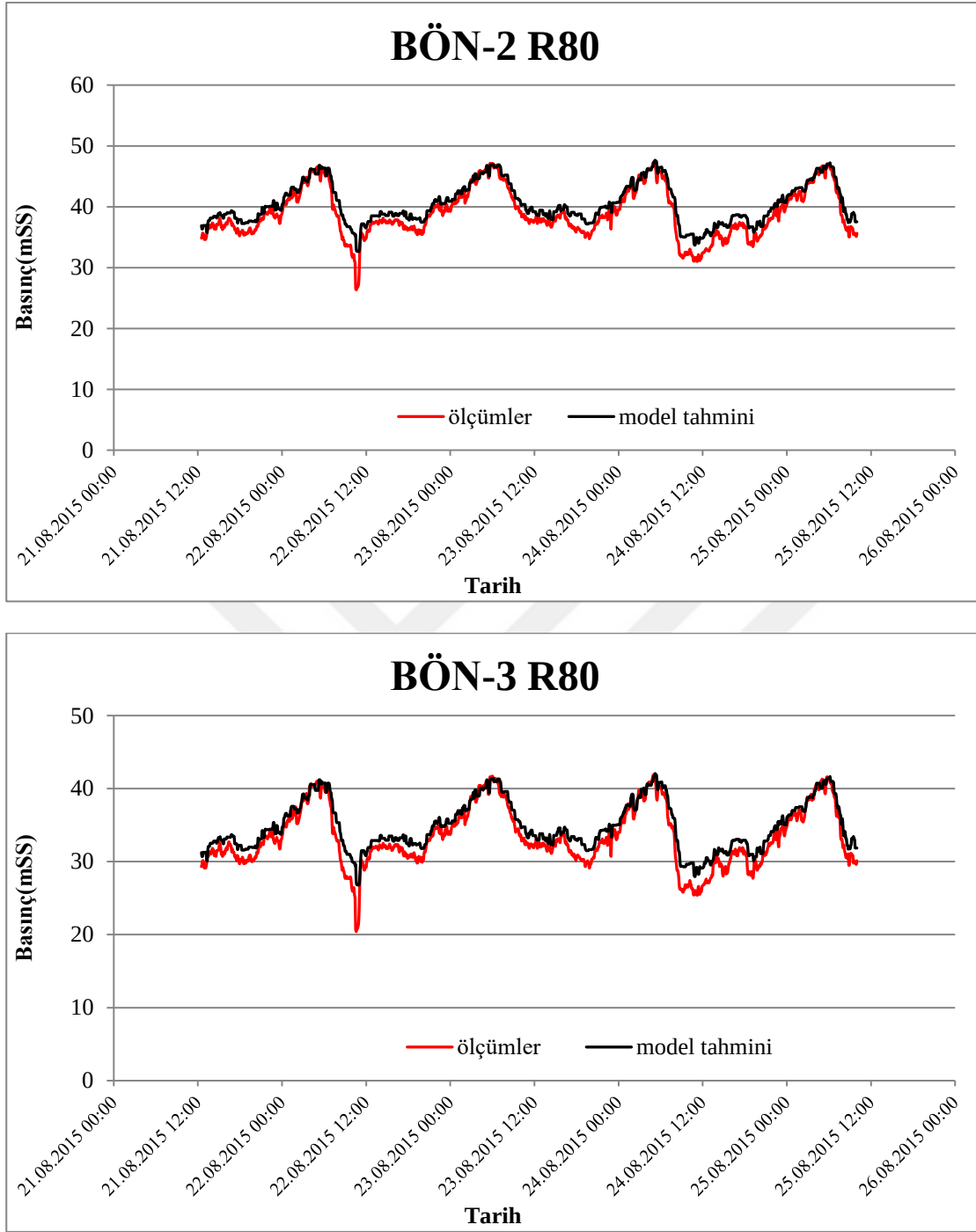
Şekil 4.10'un devamı Pürüzlülük katsayısı 60 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması



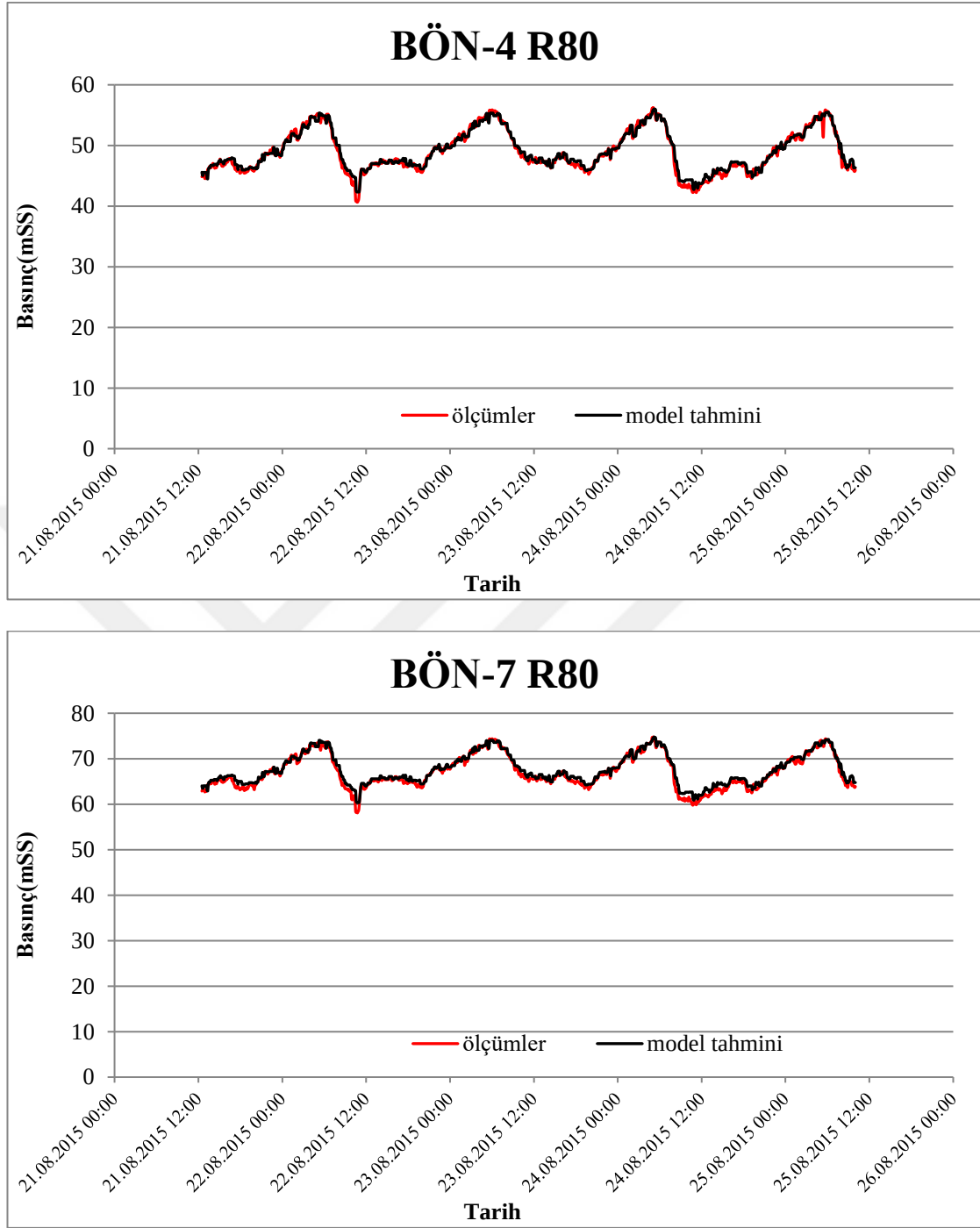
Şekil 4.11. Pürüzlülük katsayısı 70 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması



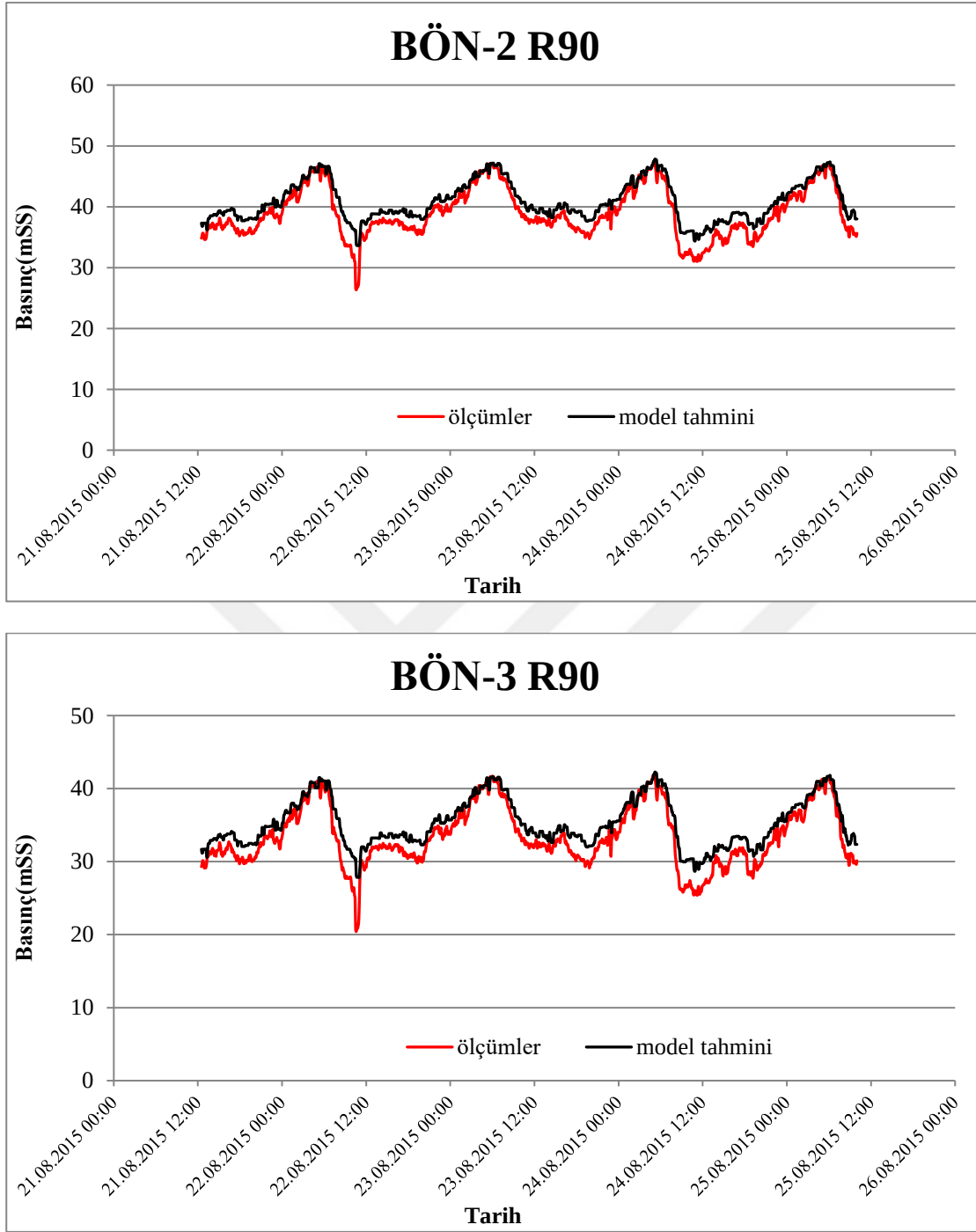
Şekil 4.11'in devamı Pürüzlülük katsayısı 70 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması



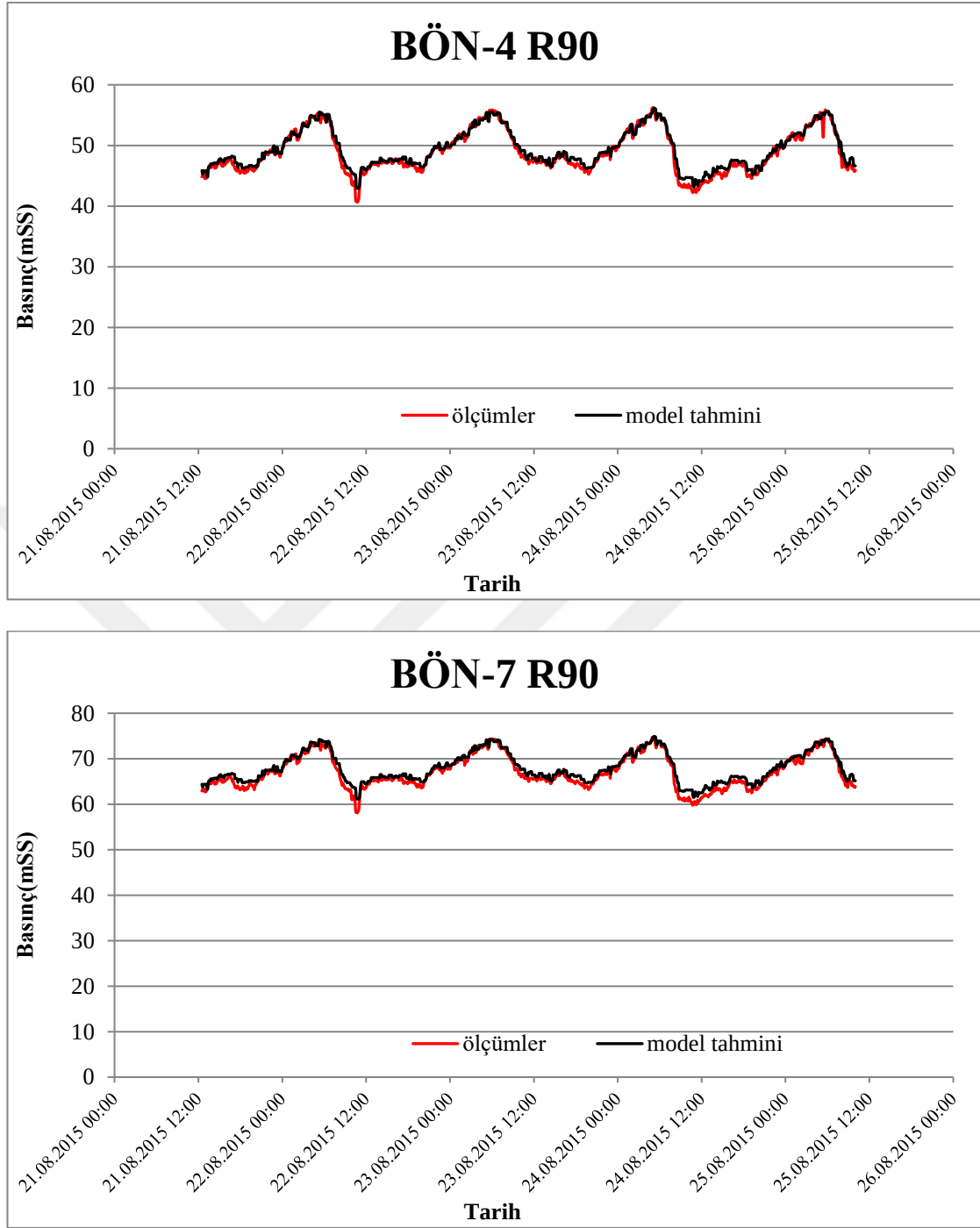
Şekil 4.12. Pürüzlülük katsayısı 80 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması



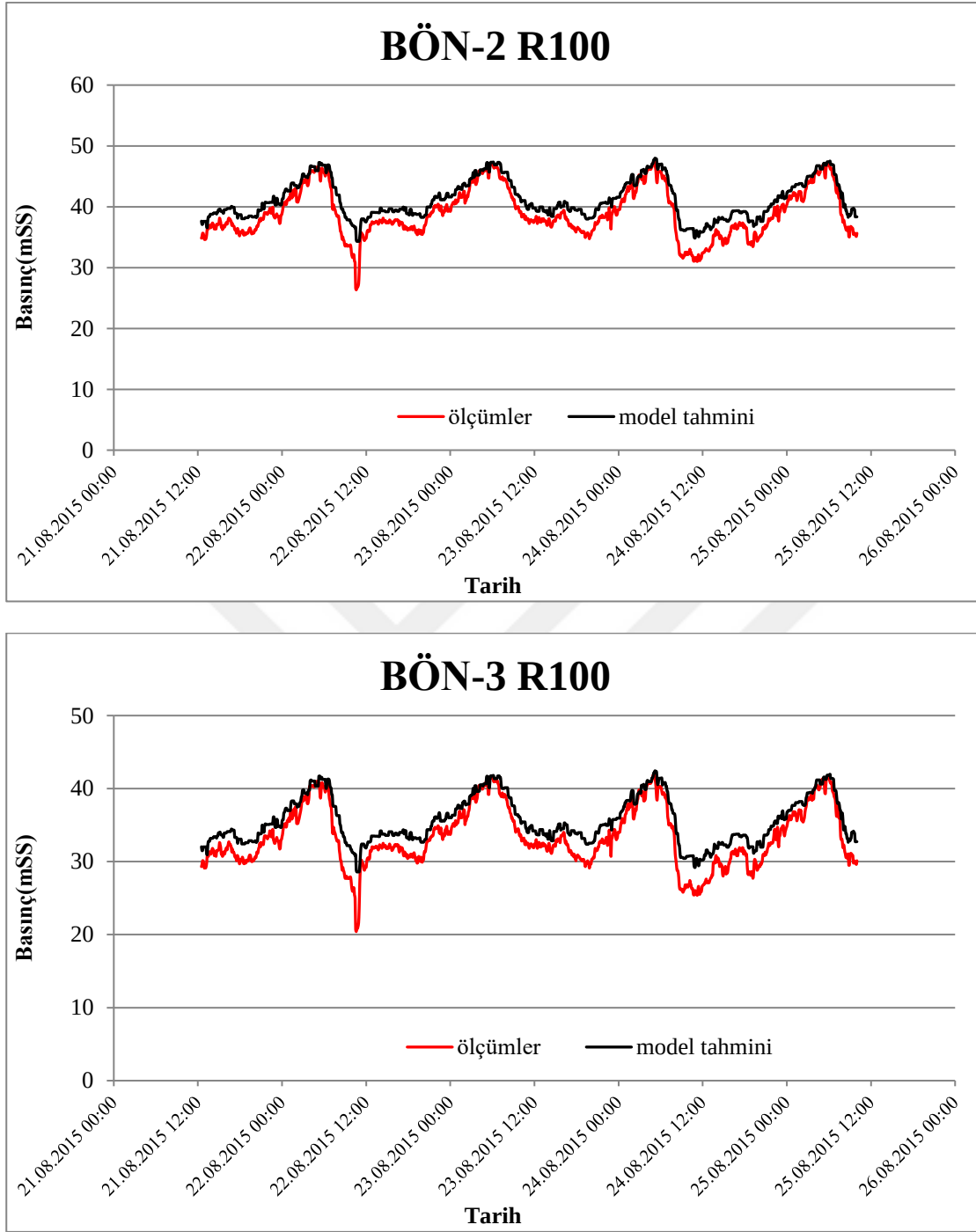
Şekil 4.12'nin devamı. Pürüzlülük katsayısı 80 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması



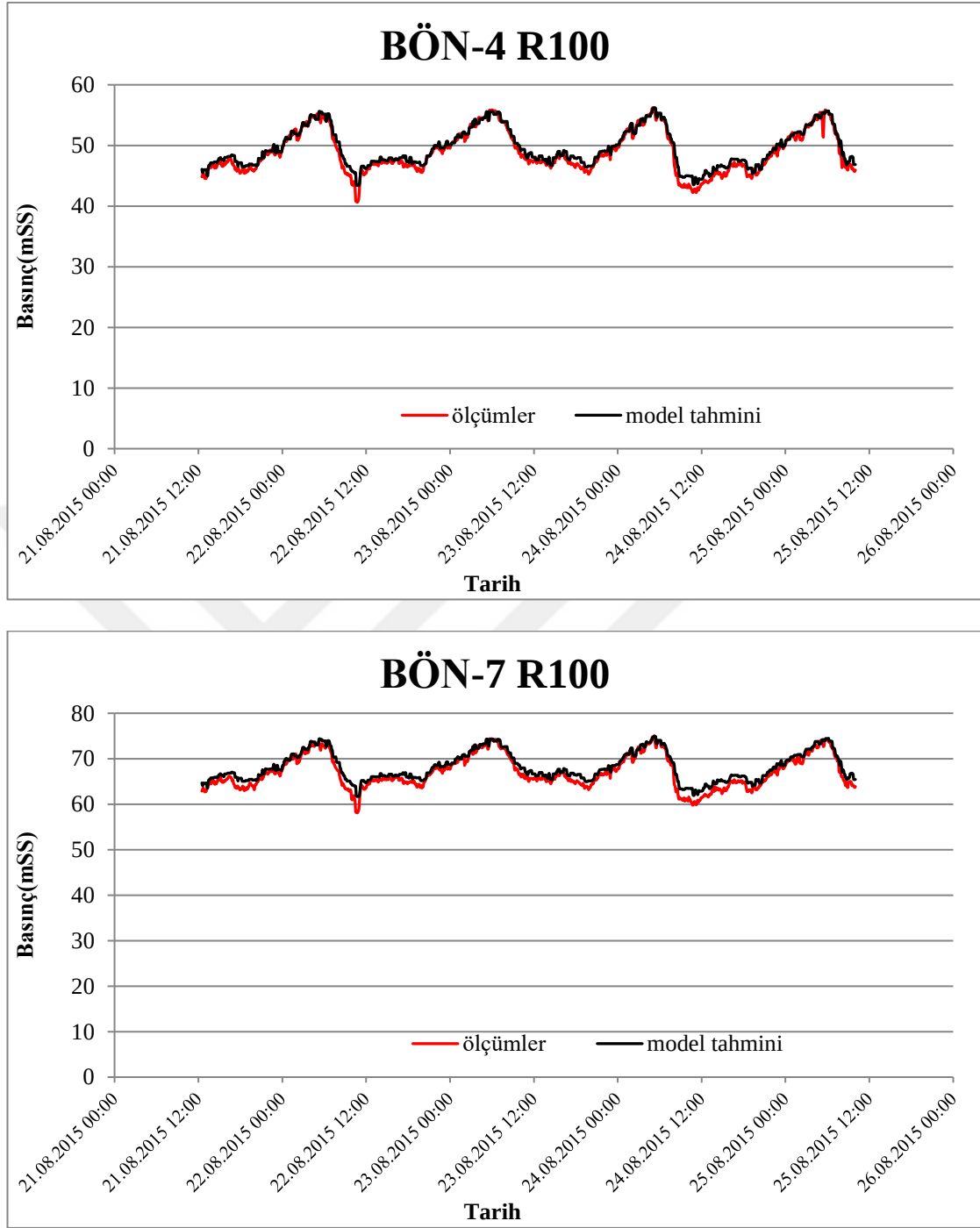
Şekil 4.13. Pürüzlülük katsayısı 90 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.13'ün devamı. Pürüzlülük katsayısı 90 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması



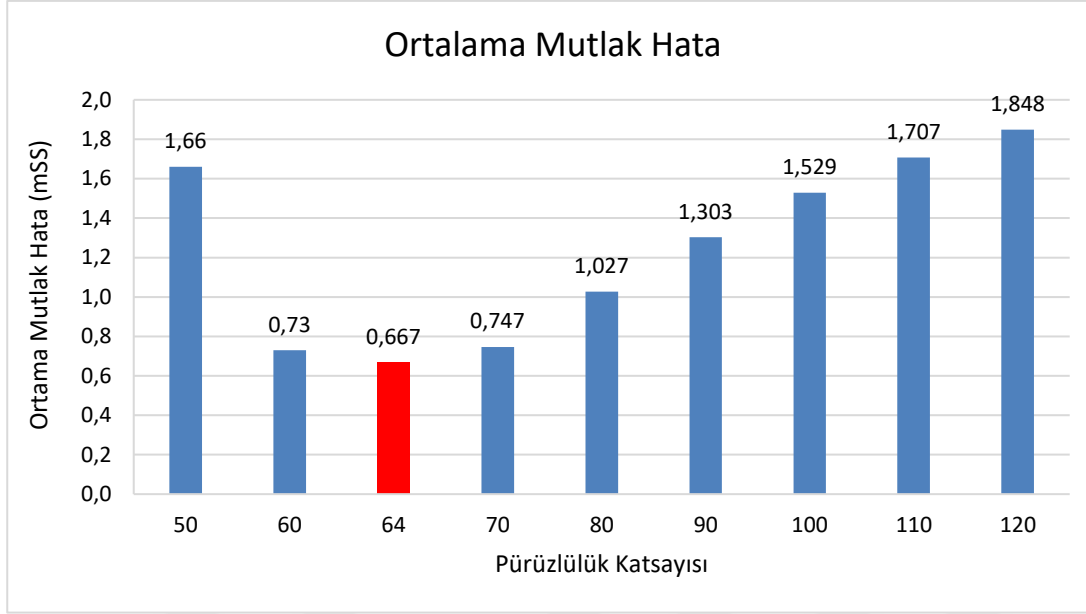
Şekil 4.14. Pürüzlülük katsayısı 100 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması



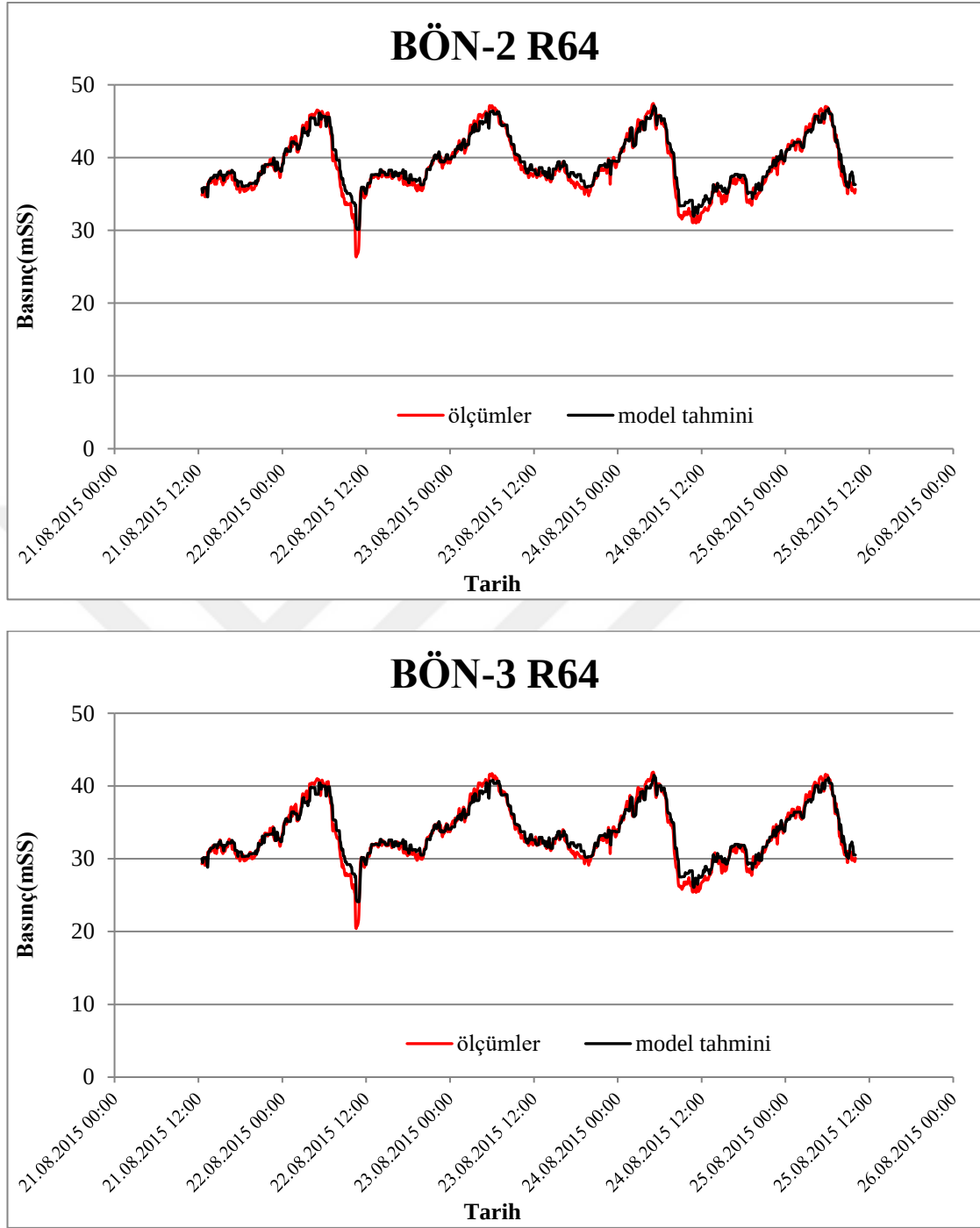
Şekil 4.14'ün devamı. Pürüzlülük katsayısı 100 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması

4.1.3.1. En düşük ortalama mutlak hata için pürüzlülük katsayısı

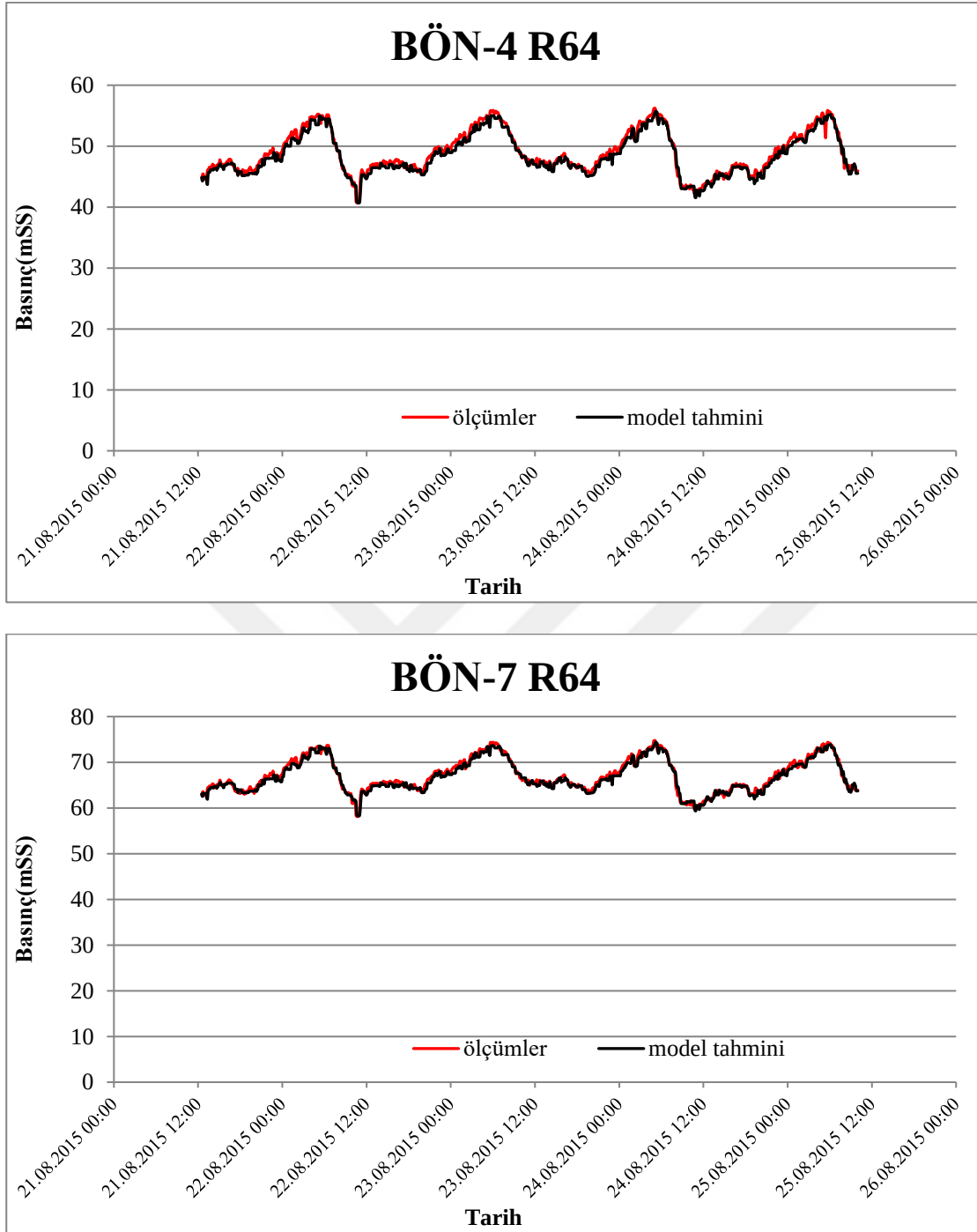
En düşük Ortalama Mutlak Hata pürüzlülük katsayısı $R=64$ için elde edilmiştir ve Ortalama Mutlak Hata 0,667 mSS olarak bulunmuştur. Sonuçlar Şekiller 4.15 ve 4.16'da gösterilmektedir.



Şekil 4.15. En düşük Ortalama Mutlak Hata pürüzlülük katsayısı $R=64$ için elde edilmiştir (Ortalama Mutlak Hata = 0,667 mSS)



Şekil 4.16. Pürüzlülük katsayısı 64 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması

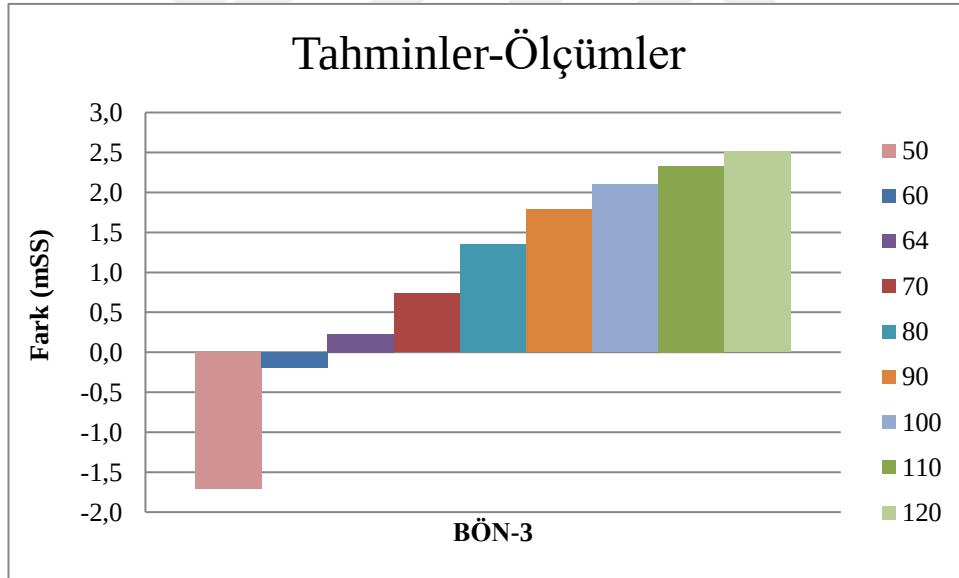
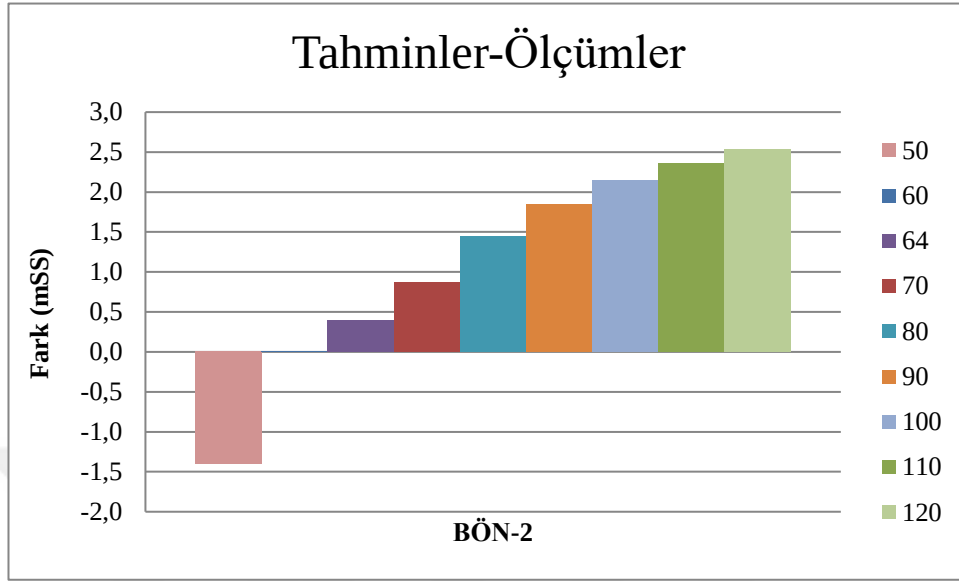


Şekil 4.16'nin devamı. Pürüzlülük katsayısı 64 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması

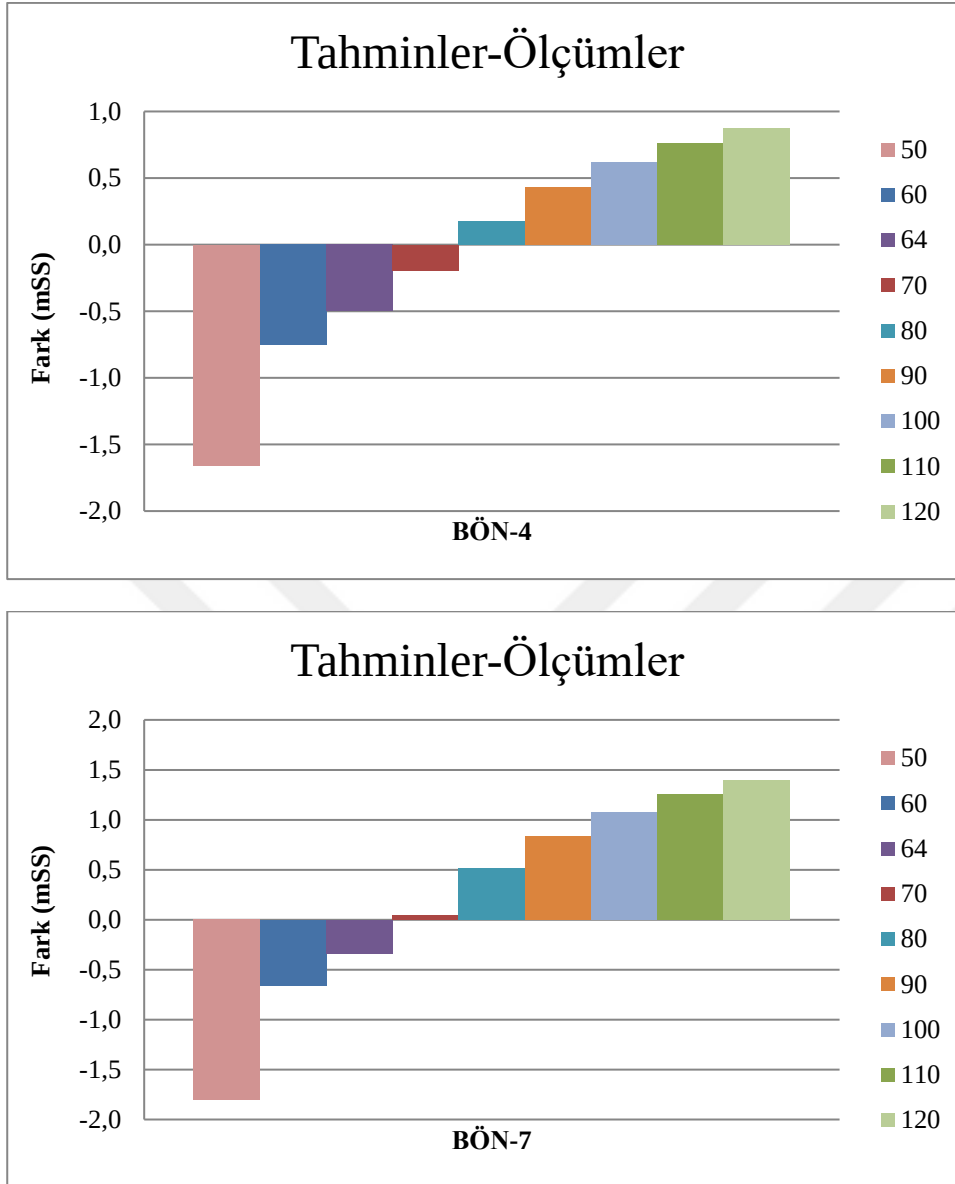
4.1.3.2. EPANET modelinden elde edilen basınç tahminleri arasındaki basınç farkları

Kaleiçi alt bölgesinde 4 farklı noktada (BÖN-2, BÖN-3, BÖN-4, BÖN-7) gerçekleştirilen basınç ölçümleri ile farklı H-W boru pürüzlülük katsayıları kullanılması halinde EPANET modelinden elde edilen basınç tahminleri arasındaki basınç farkları Şekil 4.17'de sunulmaktadır. Boru pürüzlülük katsayısı EPANET modelinde 64 değerinin

üzerinde tanımlandığında, modelin basınç değerlerini genellikle daha yüksek tahmin ettiği (over-prediction) görülmektedir.



Şekil 4.17. Farklı basınç ölçüm noktalarında ölçülen basınç değerleri ile modelin basınç tahminleri arasındaki farklar



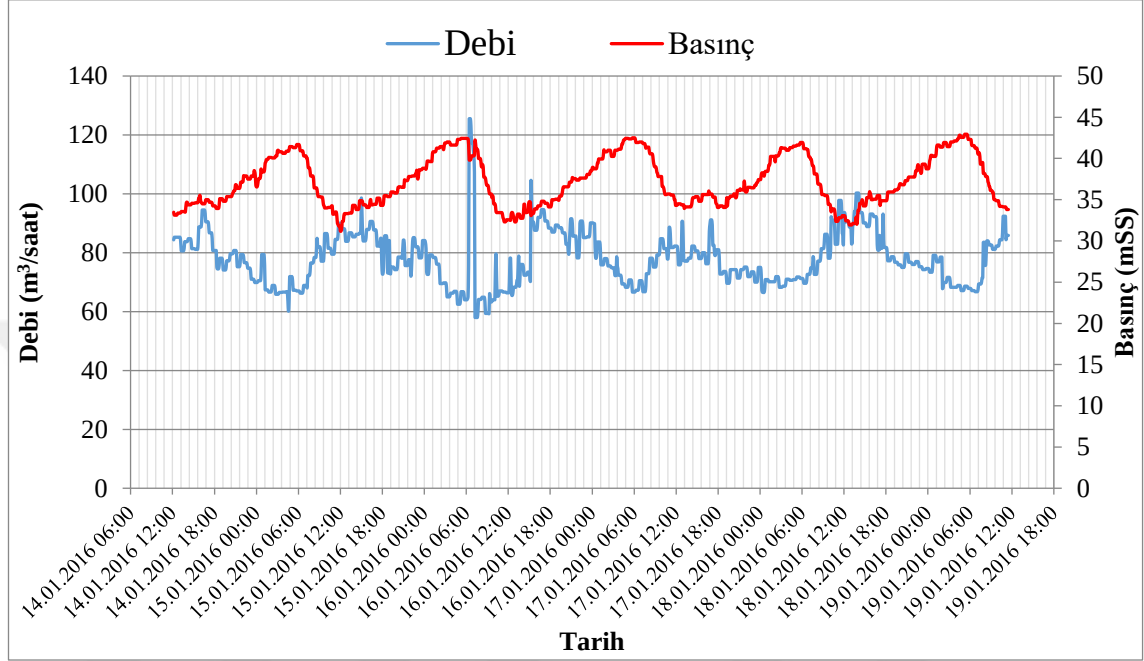
Şekil 4.17'nin devamı. Farklı basınç ölçüm noktalarında ölçülen basınç değerleri ile modelin basınç tahminleri arasındaki farklar

4.2. EPANET Modeli ile Hidrolik Model Kalibrasyonu (Kalibrasyon 2)

4.2.1. Giriş

İkinci kalibrasyon çalışmasının amacı modelden elde edilen basınç tahminleri ile Kaleiçi çalışma bölgesinde anlık basınç ölçümleri yapılan 5 farklı basınç ölçüm noktasından elde edilen basınç ölçümlerini kıyaslayarak şebekede meydana gelen boru pürüzlülük katsayısını bulmaktır. Bu amaçla ikinci bir simülasyon için 14 Ocak 2016 günü saat 12:10 ile 19 Ocak 2016 günü saat 11:30 tarihleri arasında 5 dakika zaman aralıklarında çalışma bölgesinden elde edilen veri setleri kullanılmıştır. Belirtilen tarihler arasında farklı su kullanıcılarına yönelik olarak sahada saatlik sayaç okumaları gerçekleştirilmiştir. 14 Ocak 2016 günü modelin ısınma süresi olarak alınmış ve 15 Ocak 2016 günü saat 12:10 ile 19 Ocak 2016 günü saat 11:30 arasındaki model tahminleri ile

ölçümler arasında karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca 16 Ocak 2016 tarihinde 50 dakika süreyle bölge içinde bulunan yangın muslukları açılarak yapay debi artışı sağlanmıştır. Belirtilen debi artışına bağlı olarak su basıncında düşme kaydedilmiştir. Yapay olarak gerçekleştirilen debi artışı için modelin tahmin becerisi incelenmiştir. Hidrolik modelin ikinci kalibrasyon çalışması süresince Kaleiçi SCADA istasyonunda ölçülen debi ve basınç değerleri Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18. 14-19 Ocak 2016 tarihleri arasında SCADA istasyonunda izlenen debi ve basınç ölçümleri

Kaleiçi pilot çalışma bölgesinde basınç ölçümleri, farklı kot seviyelerine göre seçilmiş 7 noktada yapılabilmektedir. Ancak tez çalışmasında mevcut 5 adet portatif basınç metre bulunduğu için şebeke üzerinde eş zamanlı olarak maksimum 5 noktada basınç ölçümleri yapılabilmektedir. Kaleiçi pilot bölgesinde basınç ölçümleri yangın dolapları içerisine eklenen özel bölmelere yerleştirilen basınç metreler ile yapılmaktadır. Yangın dolapları içerisine yerleştirilen basınç metrelerin kotları (deniz seviyesinden yüksekliği) yüksek hassasiyetli GPS seti ve uzman bir harita mühendisi ile arazi çalışması neticesinde belirlenmiştir. Hidrolik modelin ikinci kalibrasyon çalışması için de BÖN-1, BÖN-2, BÖN-3, BÖN-4 ve BÖN-7 kısaltmaları ile verilen basınç ölçüm noktalarında portatif basınç metreler ile yapılan basınç ölçümleri kullanılmıştır. Basınç ölçümlerinin gerçekleştirildiği noktanın kotu (Basınç Ölçüm Kotu), zemin kotu ve şebekedeki boru kotları (Node Seviyesi) Çizelge 4.3’te verilmektedir. Şebekedeki boru kotları (Node Seviyesi), BÖN-7 istasyonu dışındaki istasyonlarda zemin kotunun 1 metre aşağısı olarak alınmıştır. BÖN-7 istasyonu için boru yüzeyde olmasından dolayı boru kotu ile zemin kotu eşit olarak alınmıştır.

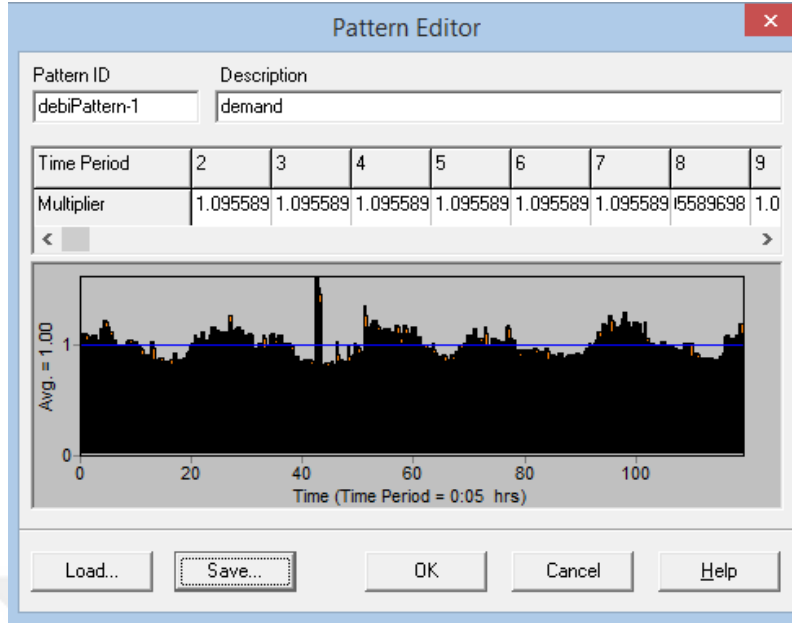
Çizelge 4.3. Ölçüm istasyonlarının zemin kotları, boru kotları ve basıncın ölçüm noktalarının kotları

Ölçüm İstasyonları	Model Node ID ¹	Node Seviyesi ² (m)	Zemin Kotu (m)	Basınc Ölçüm Kotu (m)
SCADA	-	38,360	39,360	38,360
BÖN-1	S492	31,700	32,700	33,905
BÖN-2	S232	32,100	33,100	33,540
BÖN-3	S623	37,603	38,603	39,317
BÖN-4	S468	24,162	25,162	25,902
BÖN-7	S490	5,300	5,300	5,790

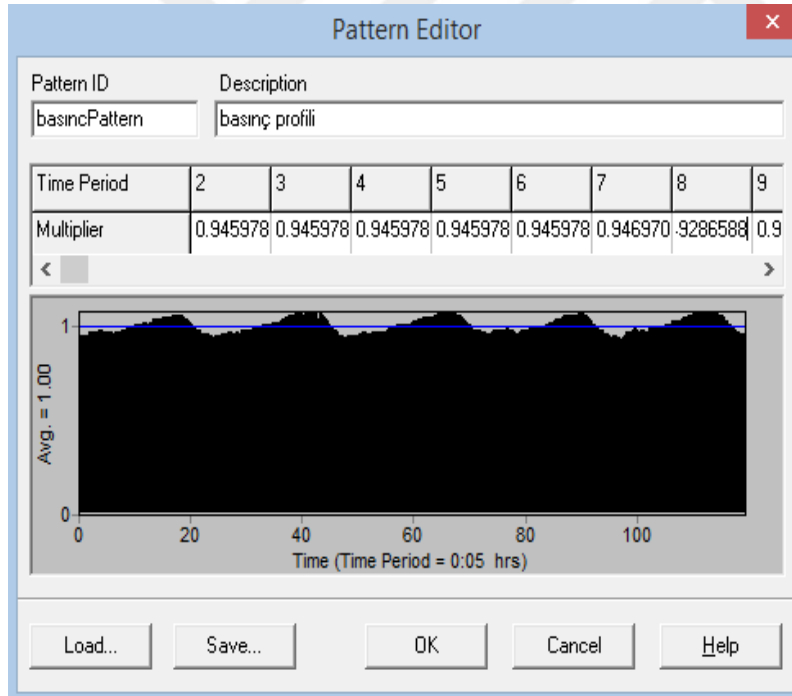
¹ EPANET modelinde tanımlanan düğüm noktası tanımı, ² Düğüm noktasındaki boru kotu

4.2.2. Model uygulaması

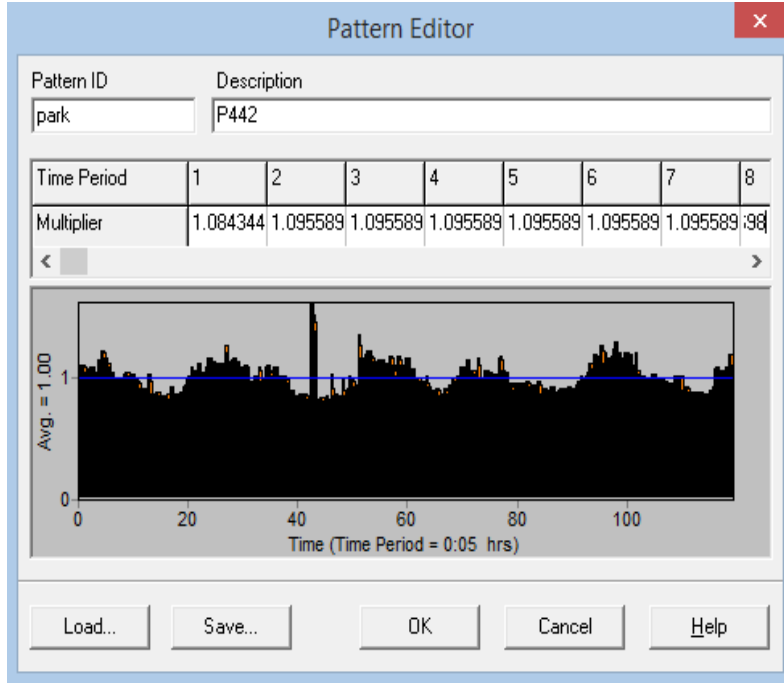
Tez çalışması kapsamında temel su kullanımının ve zamansal değişiminin belirlenmesi için sayaç okumaları ve SCADA ölçümlerinden faydalanılmıştır. Boru cidar sürtünme katsayısı kalibrasyon çalışması süresince deneme-yanılma metodu kullanılarak tahmin edilmiştir. Kalibrasyon çalışması için Kaleiçi çalışma bölgesinden seçilen farklı su kullanıcılarının saatlik su tüketimleri belirlenmiş ve su tüketimi bilinen su kullanıcıları için noktasal su ihtiyacı ile saatlik su tüketim profilleri hidrolik modelde tanımlanmıştır. Saatlik su tüketimi bilinmeyen aboneler için ASAT Tahakkuk Birimi'nden Ocak 2016 ayına ilişkin tüketim miktarları temin edilmiş ve zamansal su tüketim profili SCADA istasyonundan elde edilen 5 dakika zaman aralıklı debi profiline göre hesaplanmıştır (Şekil 4.19). SCADA istasyonunda izlenen basınç profili de 5 dakika zaman aralıklı olarak modele tanıtılmıştır (Şekil 4.20). Saatlik su kullanım miktarları sahada tespit edilen aboneler için modele girilen 5'er dakikalık su tüketim profili Şekil 4.21'de sunulmaktadır.



Şekil 4.19. Hidrolik model kalibrasyonu süresince SCADA istasyonundan elde edilen 5 dakika zaman aralıklı debi profili



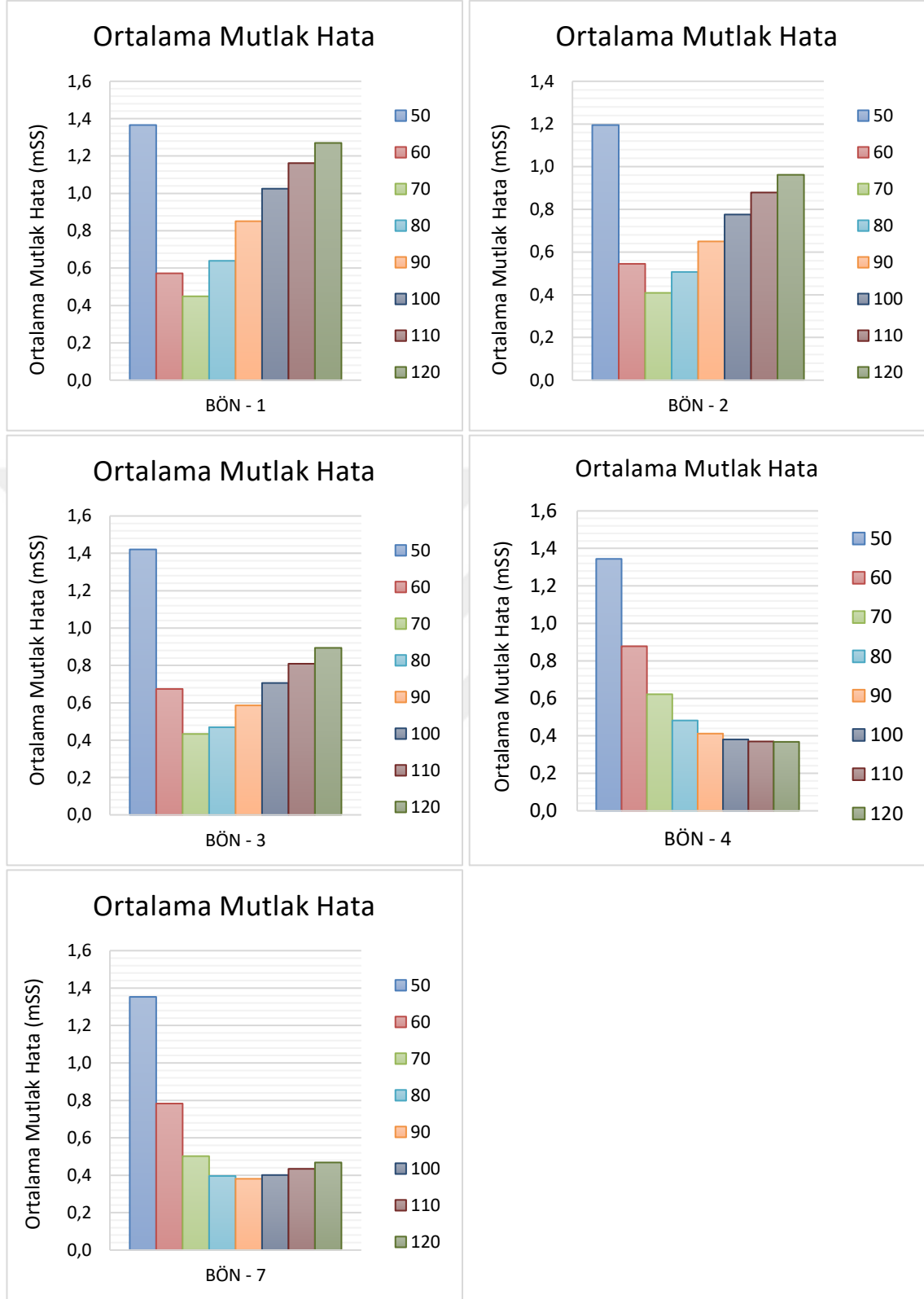
Şekil 4.20. Hidrolik model kalibrasyonu süresince SCADA istasyonundan elde edilen 5 dakika zaman aralıklı basınç profili



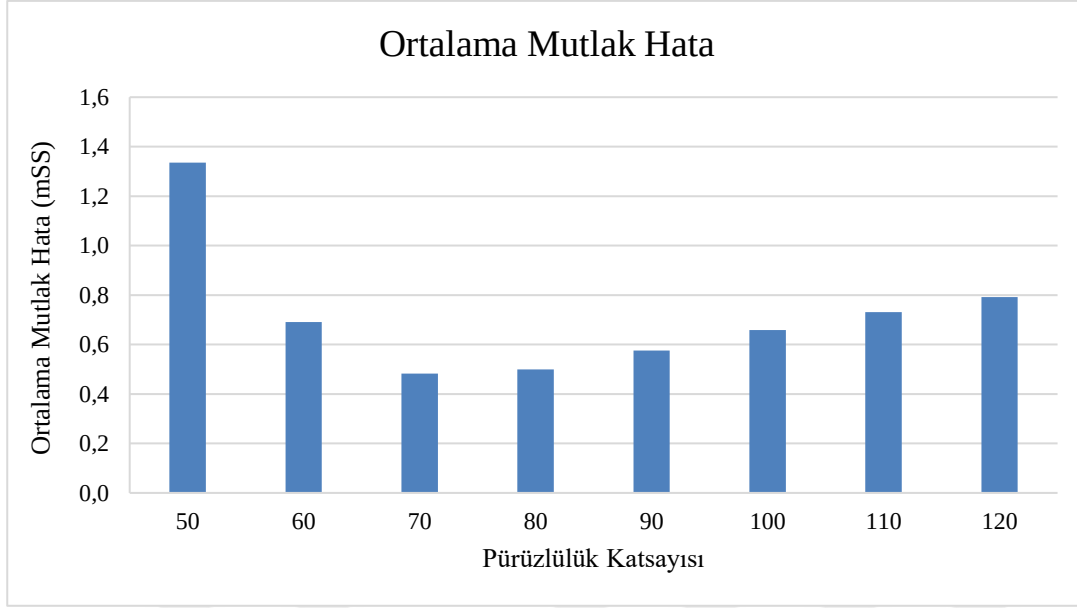
Şekil 4.21. Hidrolik model kalibrasyonu süresince EPANET modelinde P442 numaralı noktaya karşılık gelen park için elde edilen 5 dakika zaman aralıklı su kullanım profili

4.2.3. Pürüzlülük katsayısının belirlenmesi

Hidrolik model Kalibrasyon 2 çalışmasında da H-W katsayısı (R) 50 ile 120 arasında ve her bir denemede 10 arttırılarak model çalıştırılmıştır. Her bir basınç ölçüm noktasında (BÖN) farklı pürüzlülük katsayıları için elde edilen mutlak hata miktarları Şekil 4.22’de, tüm BÖN istasyonları için ortalama mutlak hata miktarları ise Şekil 4.23’te sunulmaktadır. Farklı pürüzlülük katsayıları için hidrolik modelden elde edilen basınç tahminleri ile basınç ölçümlerine ilişkin karşılaştırmalar Şekiller 4.24-4.27’de verilmektedir. Model tahminleri "Node Seviyesi"nde gerçekleştirmektedir ancak basınç ölçümleri "Basınç Ölçüm Kotu" seviyesinde yapılmaktadır (Bkz Çizelge 4.3). Bu sebeple model tahminleri ve basınç ölçümleri karşılaştırılırken bu seviye farklılıkları dikkate alınmıştır.



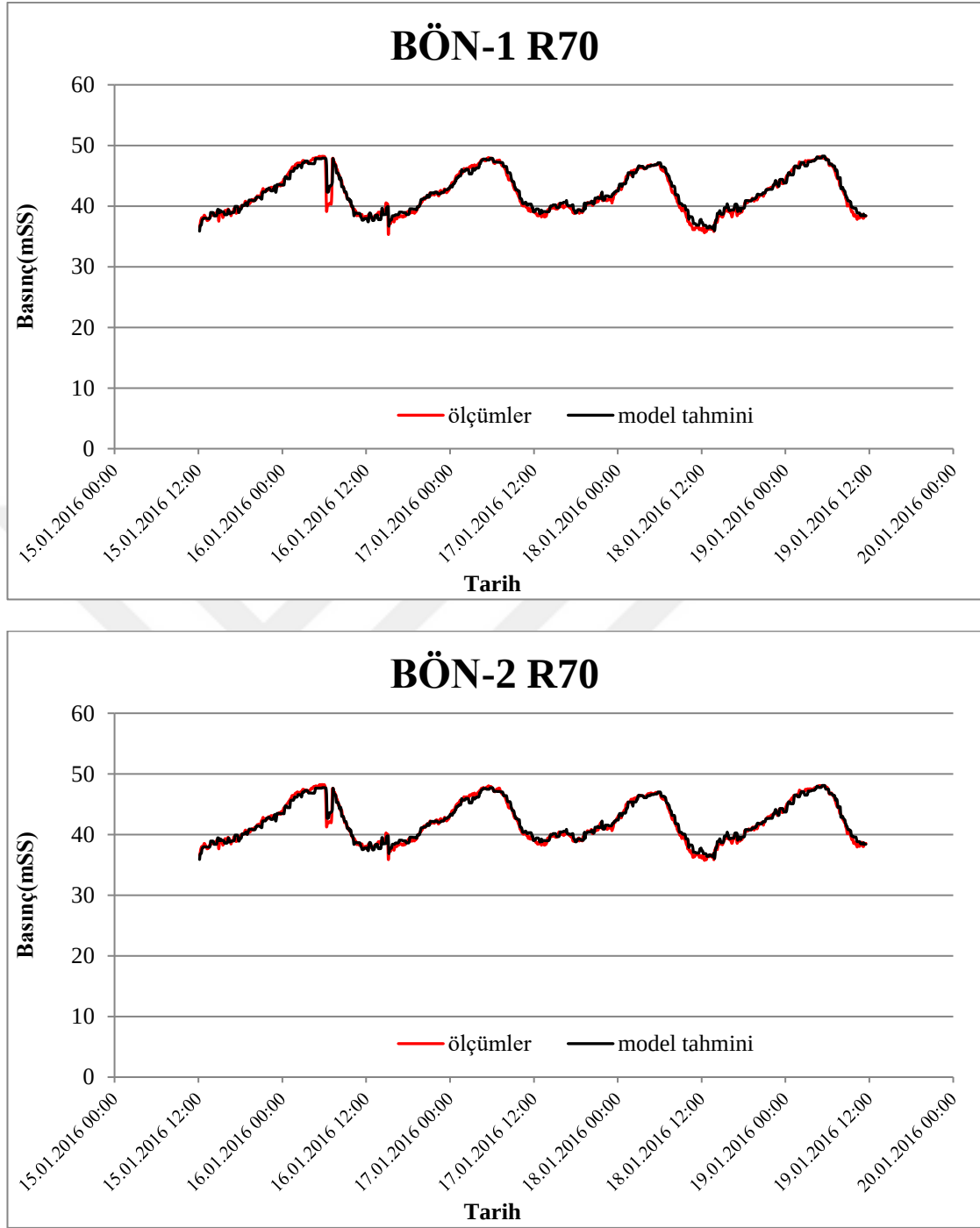
Şekil 4.22. Farklı pürüzlülük katsayılarındaki model tahminleri ile basınç ölçümleri arasındaki ortalama mutlak hatalar



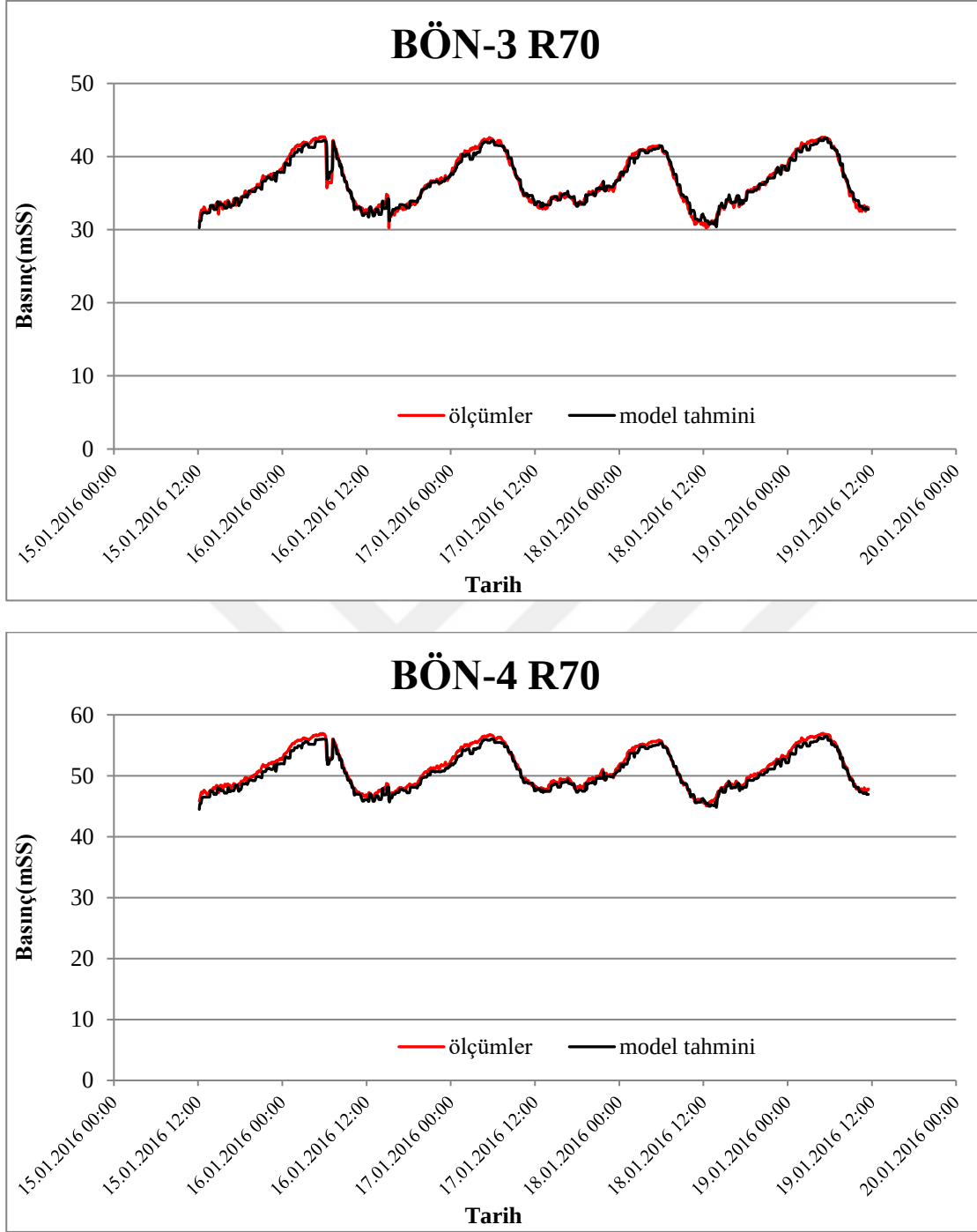
Şekil 4.23. Farklı pürüzlülük katsayıları için tüm BÖN istasyonlarından elde edilen Ortalama Mutlak Hata değerleri

Çizelge 4.4. Farklı pürüzlülük katsayılarına göre elde edilen Ortalama Mutlak Hata sonuçları

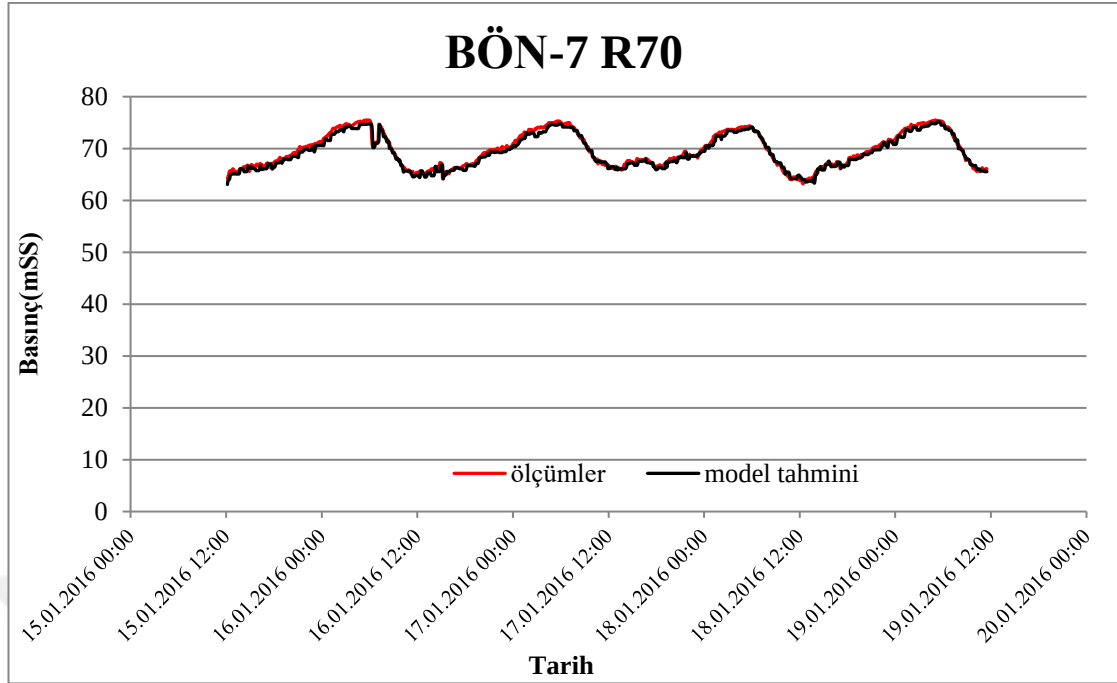
Pürüzlülük Katsayısı	50	60	70	80	90	100	110	120
Ortalama Mutlak Hata (mSS)	1.336	0.691	0.483	0.499	0.576	0.658	0.731	0.792



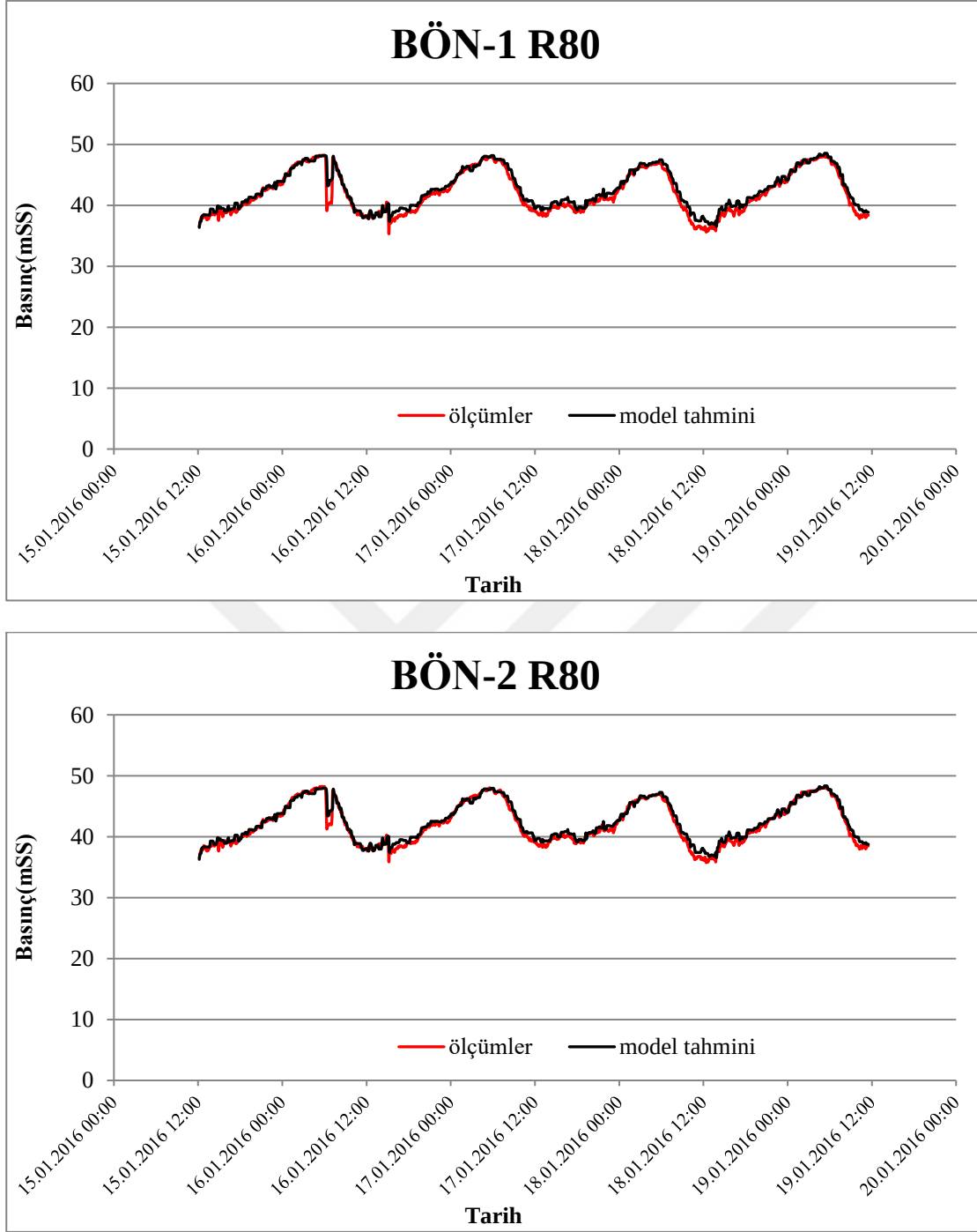
Şekil 4.24. Pürüzlülük katsayısı 70 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki basınç ölçümleri ile model tahminlerinin karşılaştırılması



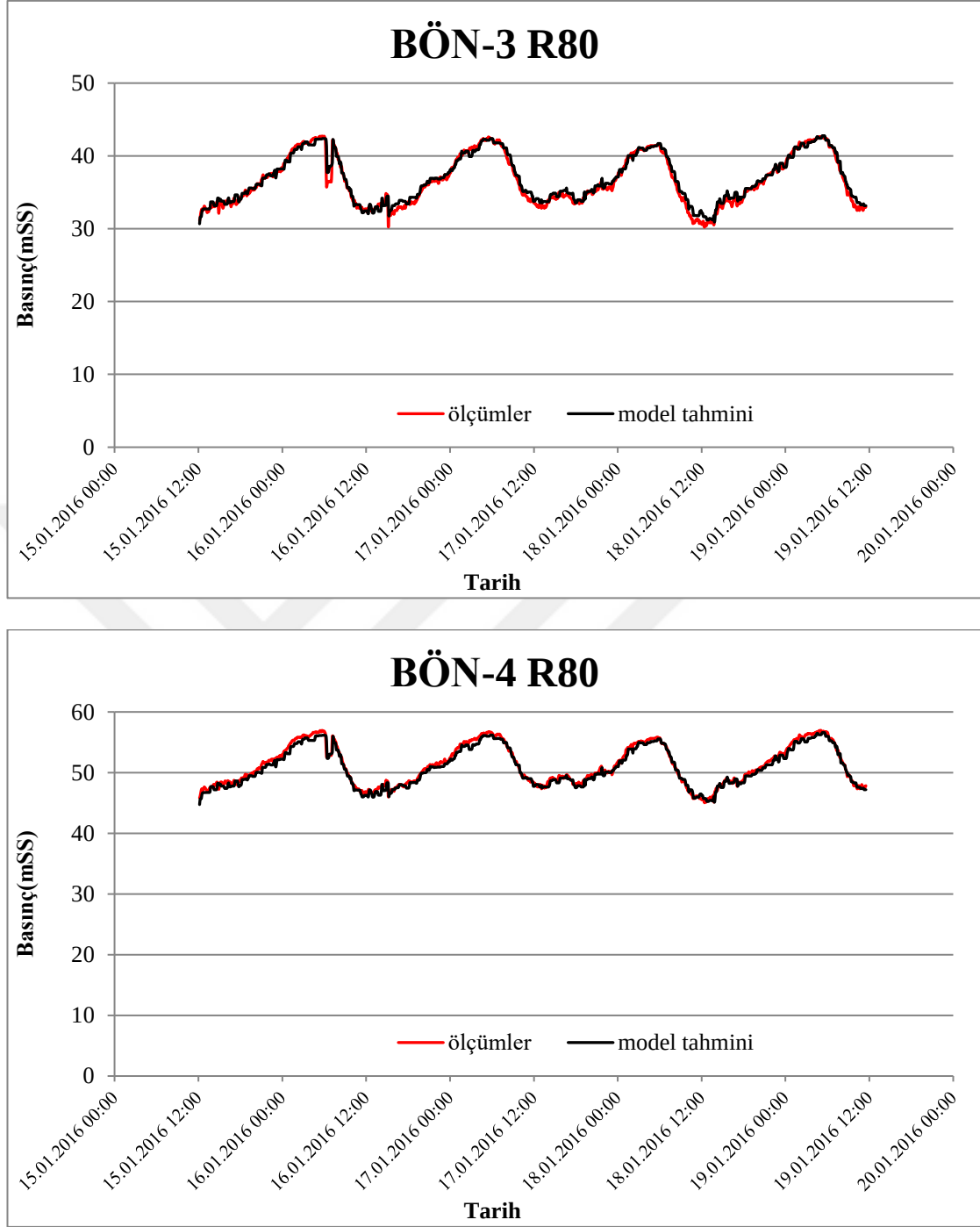
Şekil 4.24'ün devamı. Pürüzlülük katsayısı 70 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki basınç ölçümleri ile model tahminlerinin karşılaştırılması



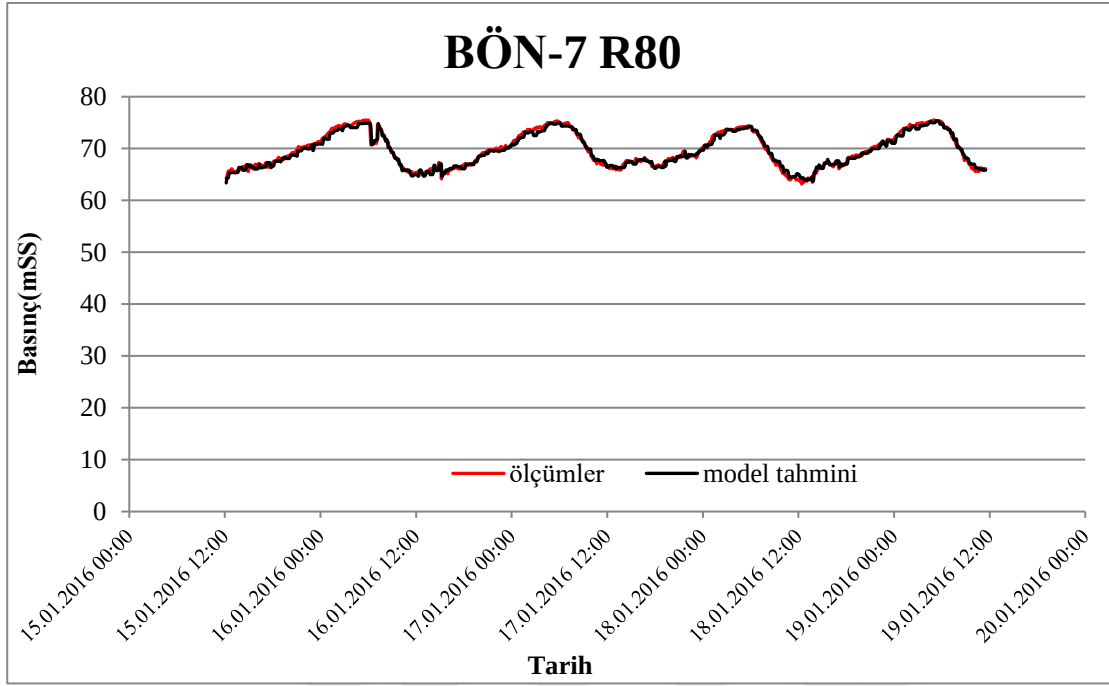
Şekil 4.24'ün devamı. Pürüzlülük katsayısı 70 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki basınç ölçümleri ile model tahminlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.25. Pürüzlülük katsayısı 80 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki basınç ölçümleri ile model tahminlerinin karşılaştırılması



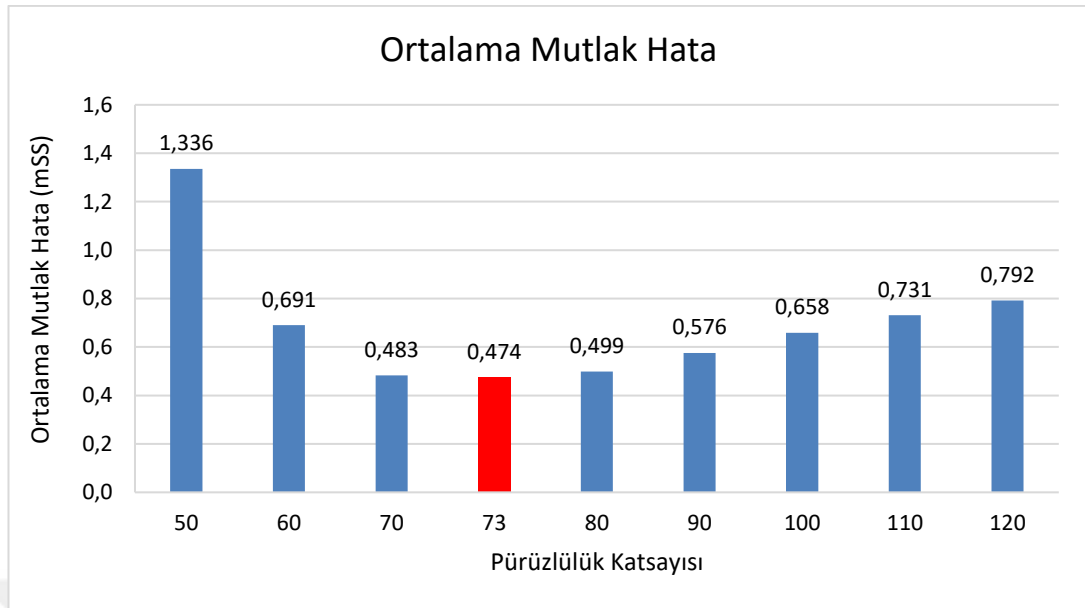
Şekil 4.25'in devamı. Pürüzlülük katsayısı 80 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki basınç ölçümleri ile model tahminlerinin karşılaştırılması



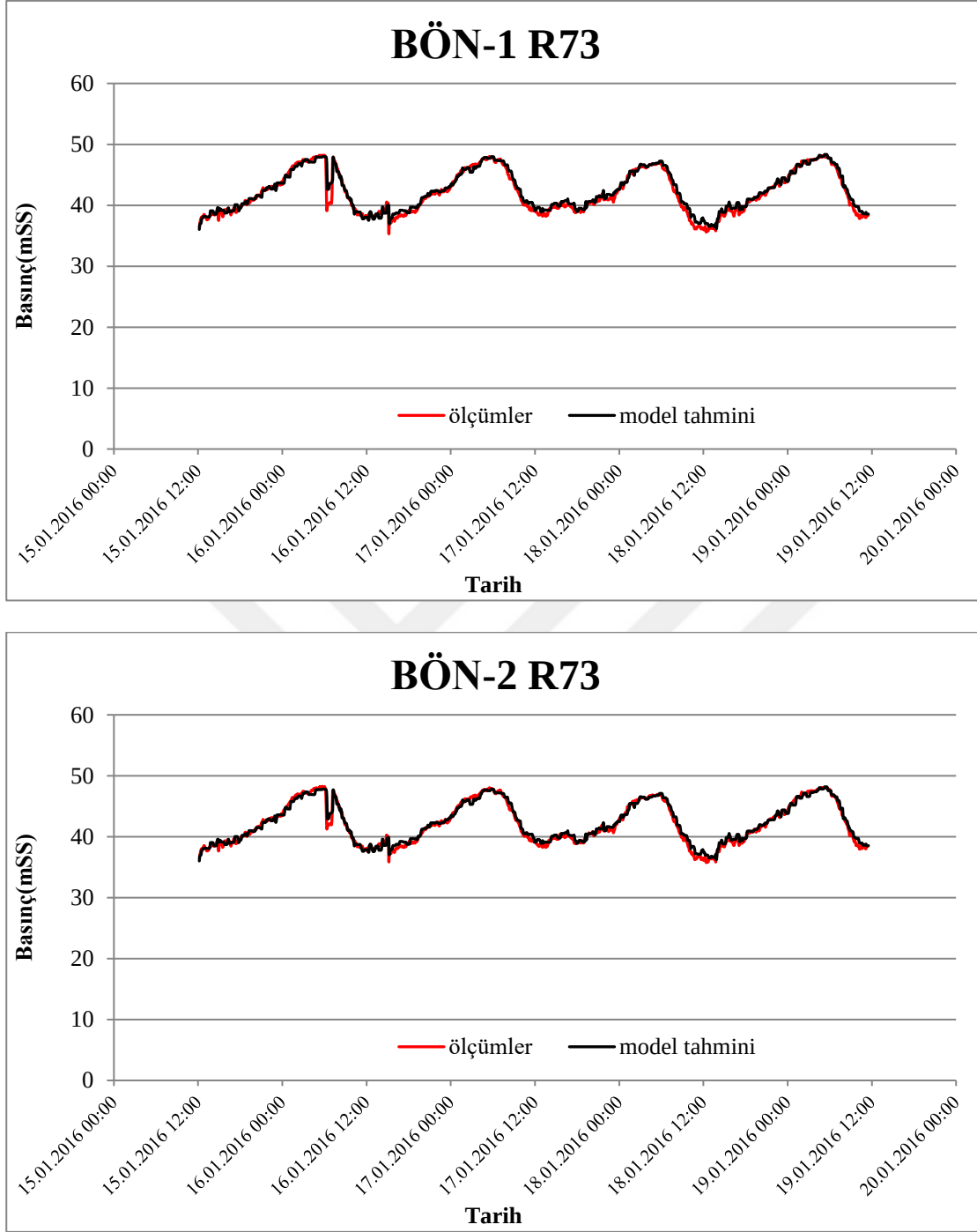
Şekil 4.25'in devamı. Pürüzlülük katsayısı 80 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki basınç ölçümleri ile model tahminlerinin karşılaştırılması

4.2.3.1. En düşük ortalama mutlak hata için pürüzlülük katsayısı

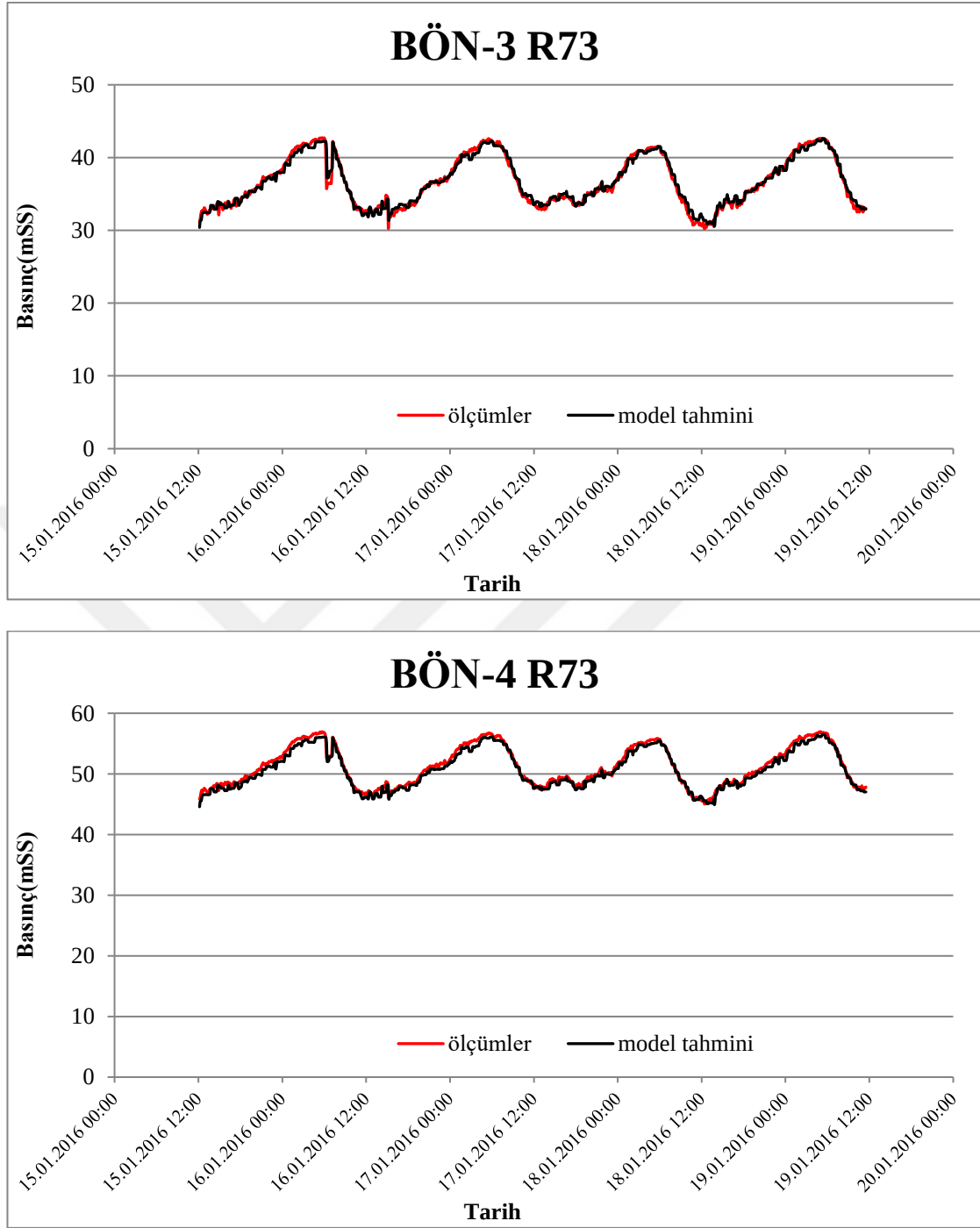
Kalibrasyon 1 çalışmasında hidrolik modelde en az tahmin hatası sürtünme katsayısı=64 değeri için elde edilmişti (ortalama mutlak hata=0,667 mSS). Kalibrasyon 2 çalışması için en az model tahmin hatası sürtünme katsayısı = 73 için (ortalama mutlak hata=0,474 mSS) bulunmuştur. Sonuçlar Şekiller 4.26 ve 4.27'de gösterilmektedir.



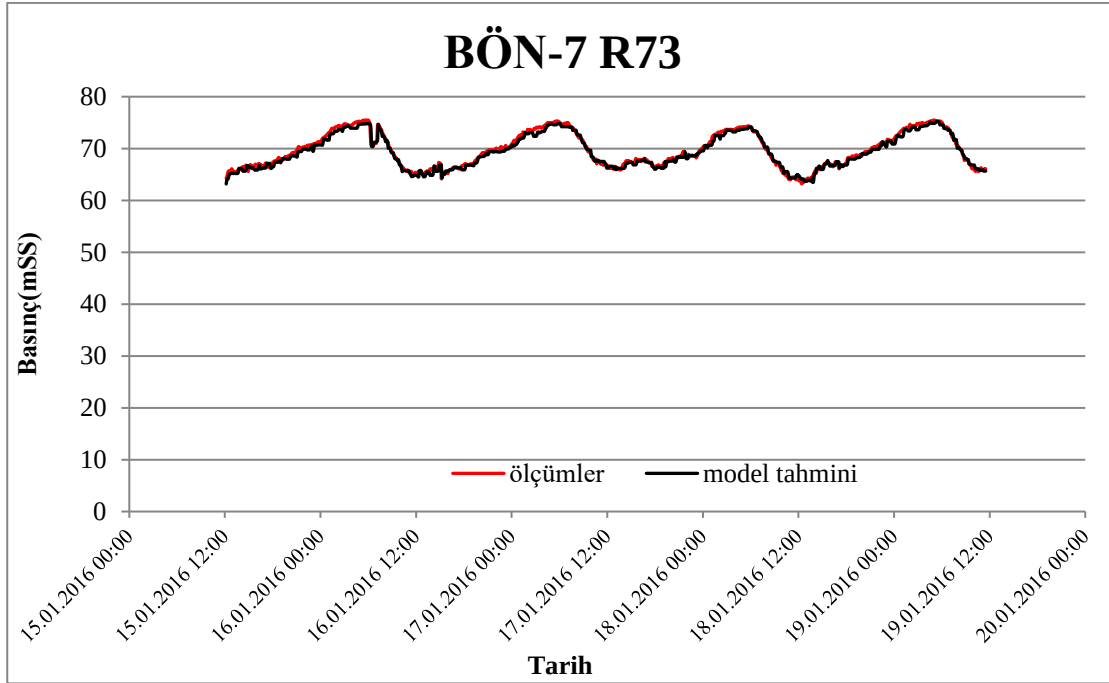
şekil 4.26. En düşük Ortalama Mutlak Hata pürüzlülük katsayısı $R=73$ için elde edilmiştir, Ortalama Mutlak Hata = 0,474 mSS



Şekil 4.27. Pürüzlülük katsayısı 73 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki basınç ölçümleri ile model tahminlerinin karşılaştırılması



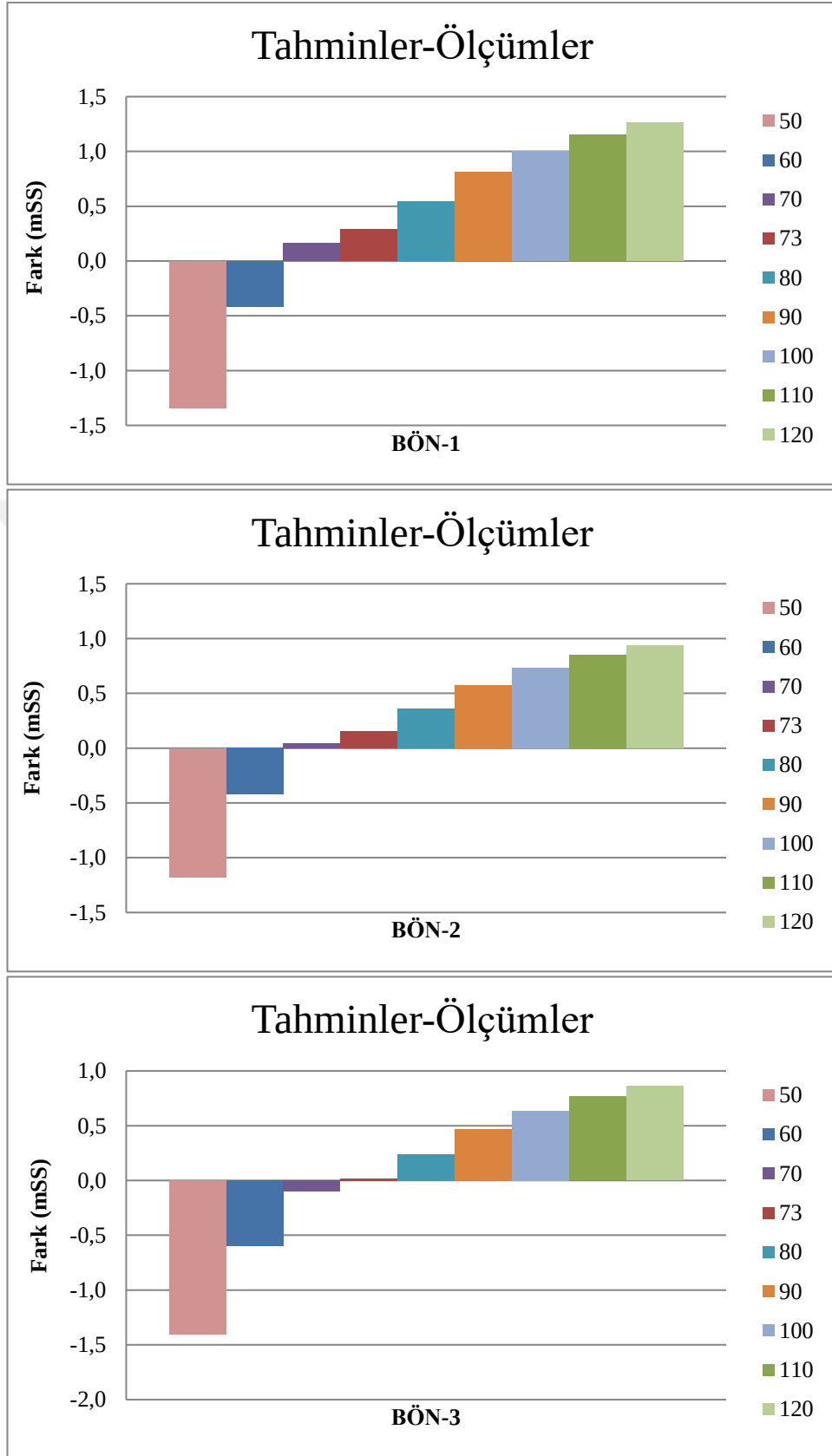
Şekil 4.27'nin devamı. Pürüzlülük katsayısı 73 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki basınç ölçümleri ile model tahminlerinin karşılaştırılması



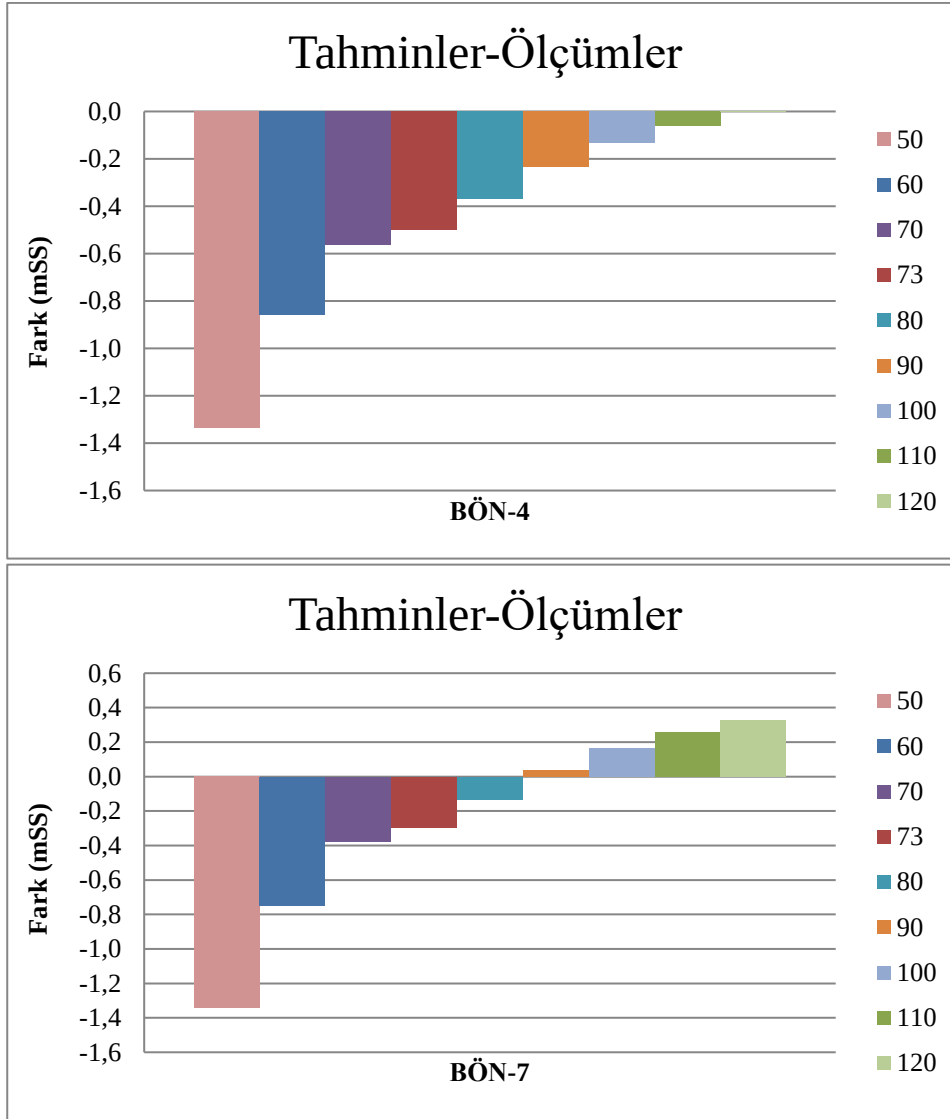
Şekil 4.27'nin devamı. Pürüzlülük katsayısı 73 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki basınç ölçümleri ile model tahminlerinin karşılaştırılması

4.2.3.2. EPANET modelinden elde edilen basınç tahminleri arasındaki basınç farkları

Kaleiçi alt bölgesinde 5 farklı noktada (BÖN-1, BÖN-2, BÖN-3, BÖN-4, BÖN-7) gerçekleştirilen basınç ölçümleri ile EPANET modelinden elde edilen basınç tahminleri arasındaki basınç farkları Şekil 4.28'de sunulmaktadır. EPANET modelinde boru pürüzlülük katsayısı 90 değerinin üzerinde tanımlandığında, modelin basınç değerlerini genellikle daha yüksek tahmin ettiği (over-prediction) görülmektedir.



Şekil 4.28. Farklı basınç ölçüm noktalarında ölçülen basınç değerleri ile modelin basınç tahminleri



Şekil 4.28'in devamı. Farklı basınç ölçüm noktalarında ölçülen basınç değerleri ile modelin basınç tahminleri

Hidrolik modelin Kalibrasyon-1 ve Kalibrasyon-2 çalışmaları için farklı pürüzlülük katsayıları için elde edilmiş olan Ortalama Mutlak Hata değerleri birleştirilerek Çizelge 4.5'te birlikte değerlendirilmiştir. Kalibrasyon çalışmasına ait tüm hata değerleri birlikte incelendiğinde en düşük model hatası, sürtünme katsayısı = 68 için (ortalama mutlak hata=0,59 mSS) bulunmuştur.

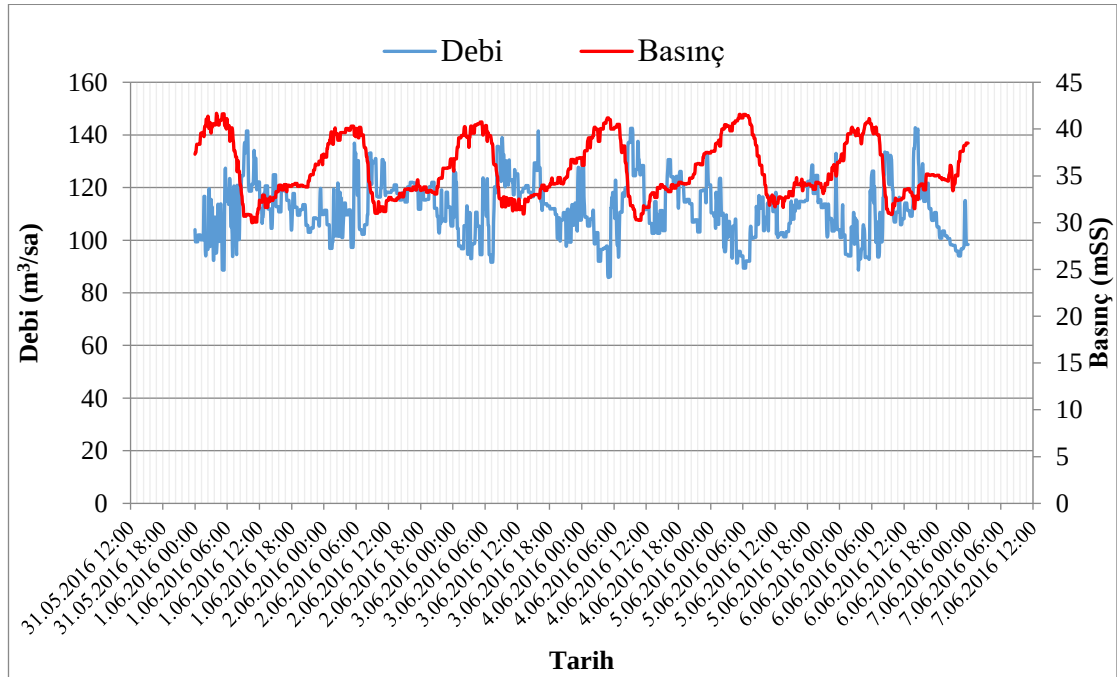
Çizelge 4.5. Kalibrasyon-1 ve Kalibrasyon-2 çalışmaları için elde edilen model tahmin hatalarının birlikte incelenmesi (Ortalama Mutlak Hata – OMH)

Pürüzlülük Katsayısı	50	60	64	68	70	73	80	90	100	110	120
Kalibrasyon-1 OMH (mSS)	1,66	0,73	0,667	0,705	0,747	0,822	1,027	1,303	1,529	1,07	1,848
Kalibrasyon-2 OMH (mSS)	1,336	0,691	0,566	0,500	0,483	0,474	0,499	0,576	0,658	0,731	0,792
OMH (mSS)	1,48	0,71	0,61	0,59	0,60	0,63	0,73	0,90	1,04	1,16	1,26

4.3. EPANET Modeli ile Hidrolik Model Verifikasyonu

4.3.1. Giriş

Hidrolik model verifikasyon çalışması için 1 Haziran 2016 günü saat 00:00 ile 6 Haziran 2016 günü 23:55 arasında kalan zaman arasında farklı su kullanıcılarına yönelik olarak özellikle fazla su tüketimi olan Antalya Büyükşehir Belediyesi itfaiye önü park sayacının sahada saatlik sayaç okumaları gerçekleştirilmiştir. 1 Haziran 2016 günü modelin ısınma süresi olarak alınmış (24 saat) ve 2 Haziran 2016 günü saat 00:00 ile 6 Haziran 2016 günü saat 23:55 arasındaki model tahminleri ile ölçümler arasında karşılaştırma yapılmıştır. Saha ölçümleri 2 Haziran 2016 saat 10:10 ile 3 Haziran 2016 saat 20:25 te yapılmış ve 5 günlük model çalışması için su kullanım profiline entegre edilmiştir. Hidrolik model verifikasyon çalışması süresince Kaleiçi SCADA istasyonunda ölçülen debi ve basınç değerleri Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.29. 1-6 Haziran 2016 tarihleri arasında SCADA istasyonunda izlenen debi ve basınç ölçümleri

Kaleiçi çalışma bölgesinde basınç ölçümleri, farklı kot seviyelerine göre seçilmiş 7 noktada yapılabilmektedir. Ancak tez çalışması kapsamında mevcut olan 5 adet portatif basınç metre ile şebeke üzerinde aynı zamanda 5 noktada basınç ölçümleri yapılabilmektedir. Hidrolik model verifikasyonu çalışması için BÖN-1, BÖN-2, BÖN-3, BÖN-4 ve BÖN-7 kısaltmaları ile verilen basınç ölçüm noktalarında portatif basınç metreler ile yapılan basınç ölçümleri kullanılmıştır. Basınç ölçümlerinin gerçekleştirildiği noktanın kotu (Basınç Ölçüm Kotu), zemin kotu ve boru kotları (Node Seviyesi) Çizelge 4.6’da verilmektedir.

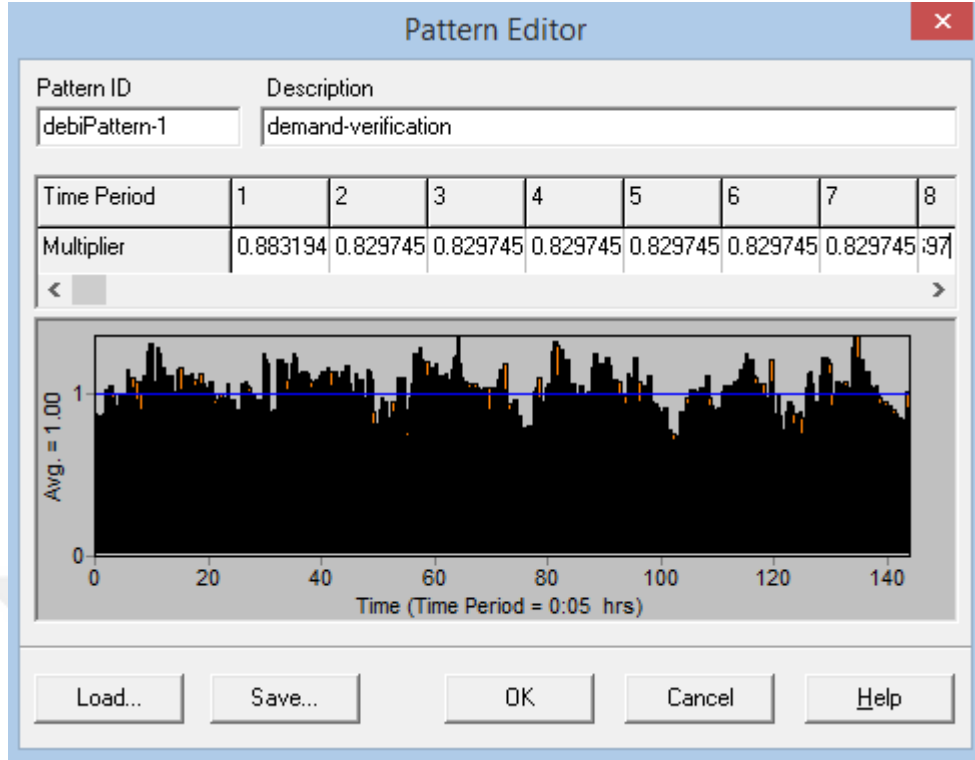
Çizelge 4.6. Ölçüm istasyonlarının zemin kotları, boru kotları ve basıncın ölçüm noktalarının kotları

Ölçüm İstasyonları	Model Node ID ¹	Node Seviyesi ² (m)	Zemin Kotu (m)	Basınç Ölçüm Kotu (m)
SCADA	-	38,360	39,360	38,360
BÖN-1	S492	31,700	32,700	33,905
BÖN-2	S232	32,100	33,100	33,540
BÖN-3	S623	37,603	38,603	39,317
BÖN-4	S468	24,162	25,162	25,902
BÖN-7	S490	5,300	5,300	5,790

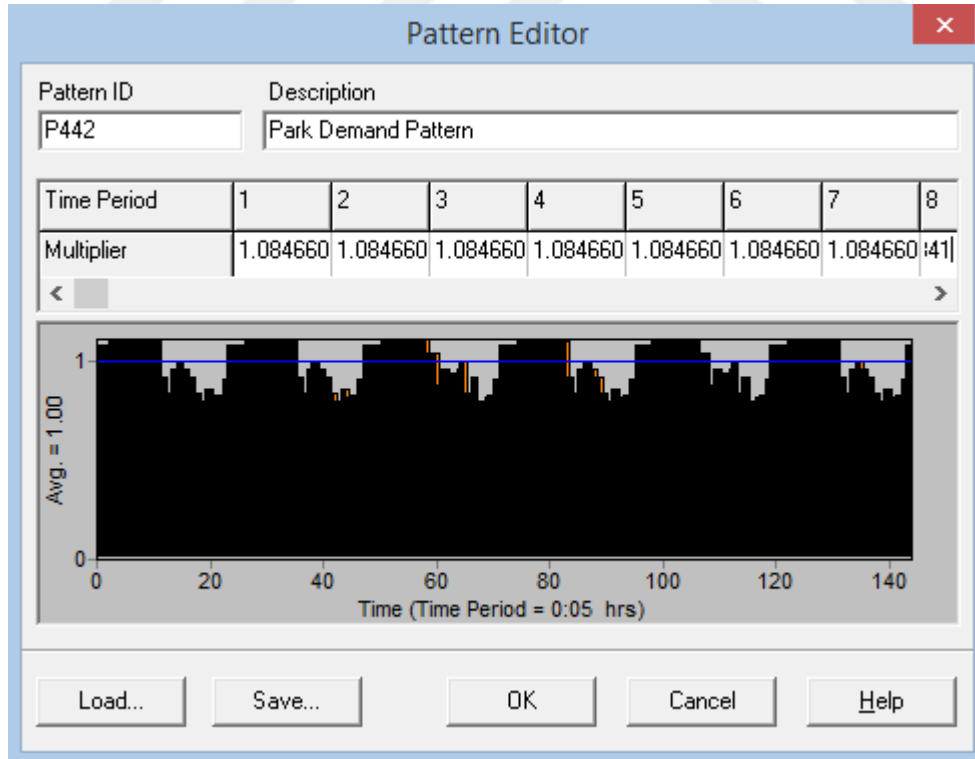
¹ EPANET modelinde tanımlanan düğüm noktası tanımı, ² Düğüm noktasındaki boru kotu

4.3.2. Model uygulaması

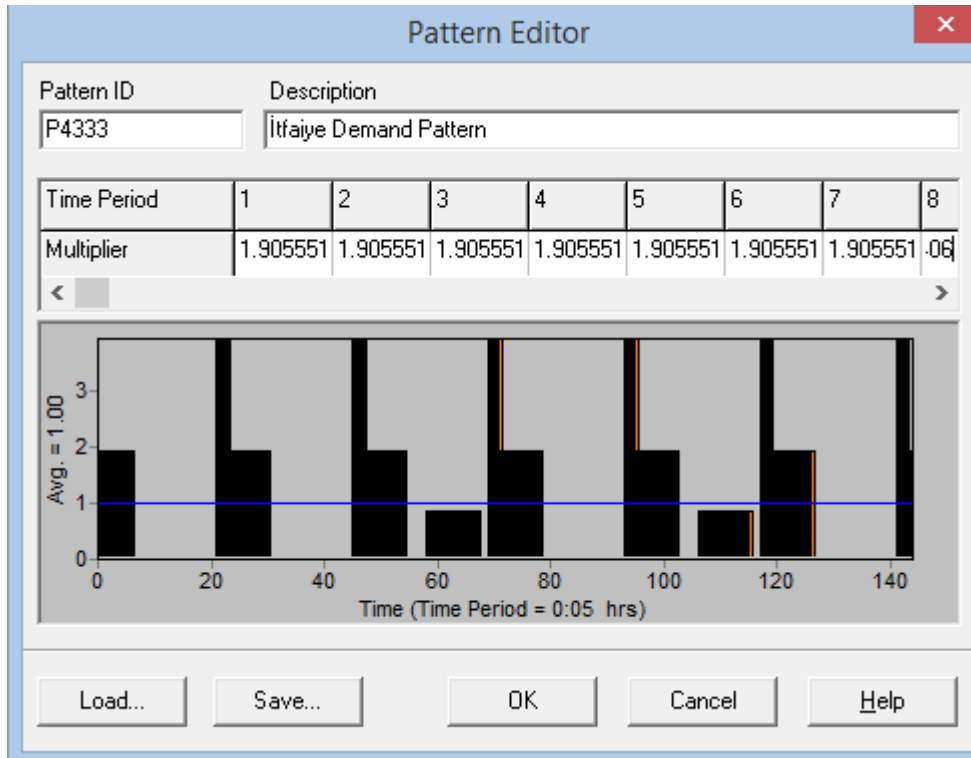
Modelin verifikasyon çalışmalarında Kaleiçi çalışma bölgesinden seçilen farklı su kullanıcılarının saatlik su tüketimleri belirlenmiş ve su tüketimi bilinen su kullanıcıları için noktasal su ihtiyacı ile saatlik su tüketim profilleri hidrolik modele tanıtılmıştır. Saatlik su tüketimi bilinmeyen aboneler için ASAT Tahakkuk Birimi’nden Haziran 2016 ayına ilişkin tüketim miktarları temin edilmiş ve zamansal su tüketim profili SCADA istasyonundan elde edilen 5 dakika zaman aralıklı debi profiline göre hesaplanmıştır (Şekil 4.30). Saatlik su kullanım miktarları sahada tespit edilen aboneler için modele girilen 5’er dakikalık su tüketim profilleri Şekiller 4.31-4.32’de sunulmaktadır. SCADA istasyonunda izlenen basınç profili de 5 dakika zaman aralıklı olarak modele tanıtılmıştır (Şekil 4.33).



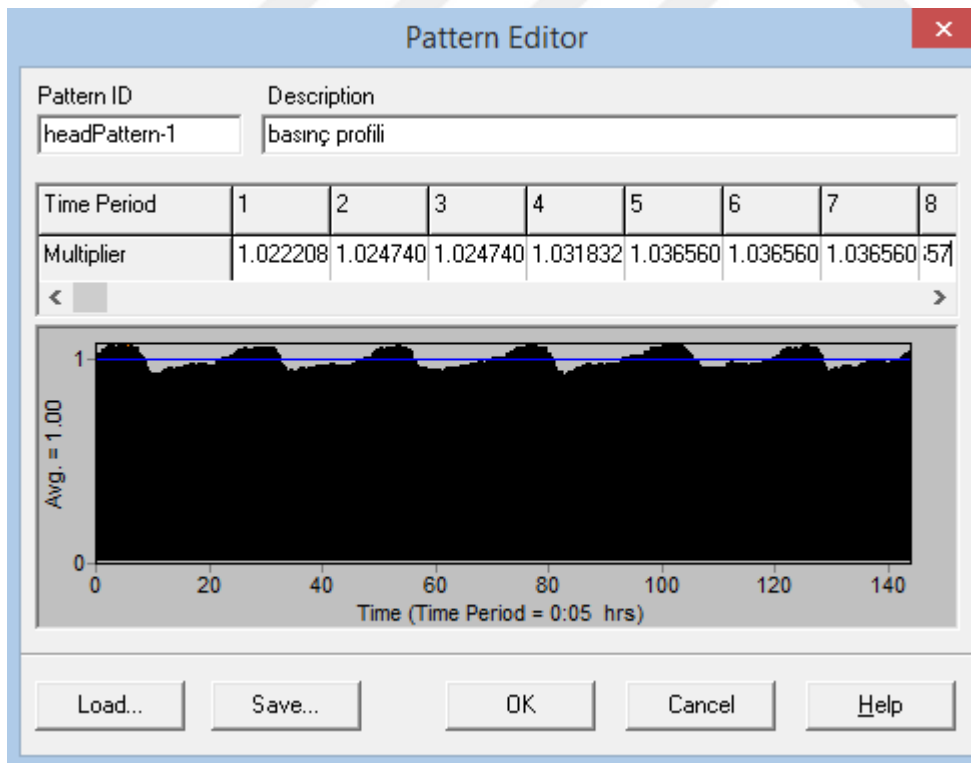
Şekil 4.30. Hidrolik model verifikasyon süresince SCADA istasyonundan elde edilen 5 dakika zaman aralıklı debi profili



Şekil 4.31. Hidrolik model verifikasyon süresince EPANET modelinde P442 numaralı noktaya karşılık gelen Park için elde edilen 5 dakika zaman aralıklı su kullanım profili



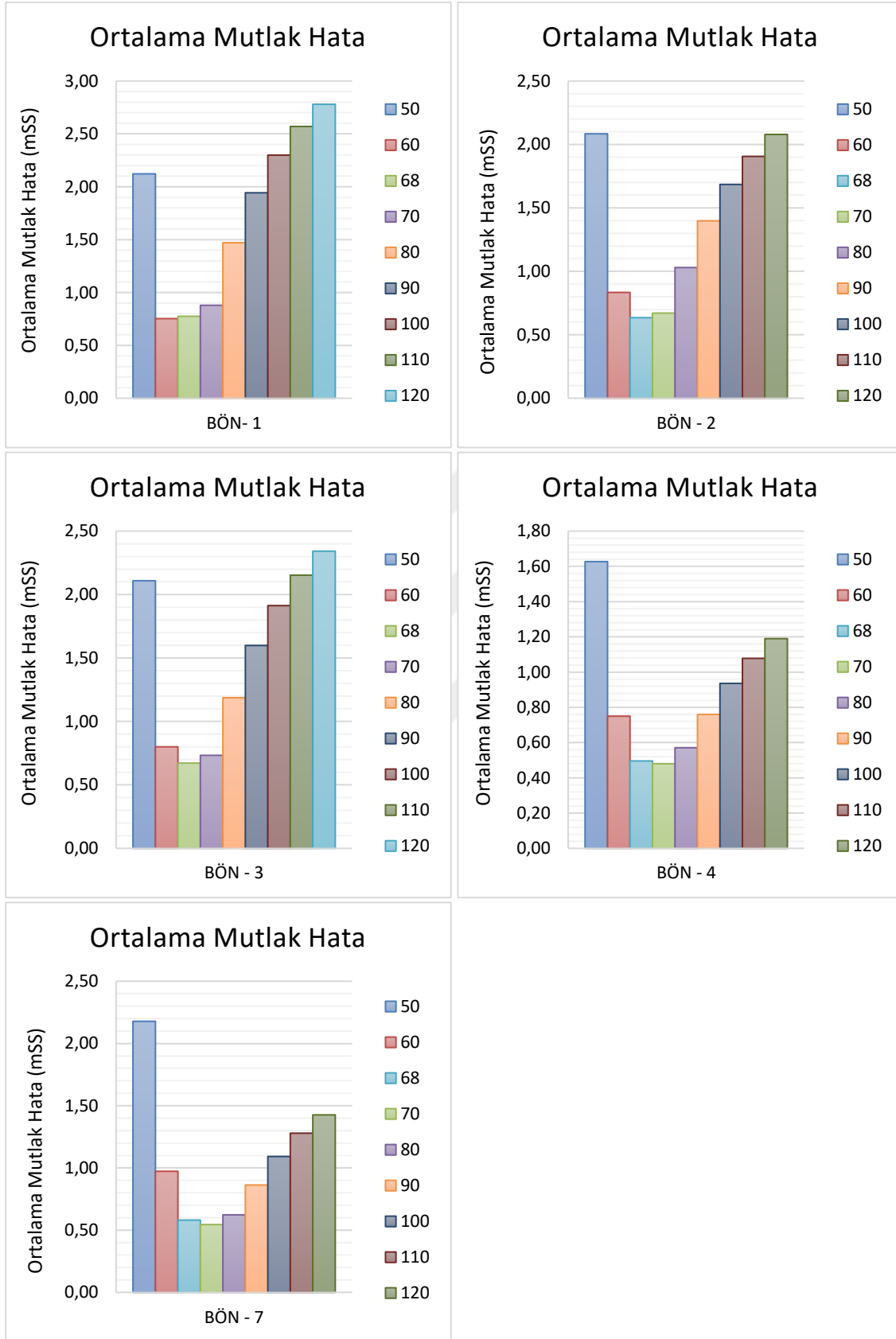
Şekil 4.32. Hidrolik model verifikasyon süresince EPANET modelinde P4333 numaralı noktaya karşılık gelen İtfaiye için elde edilen 5 dakika zaman aralıklı su kullanım profili



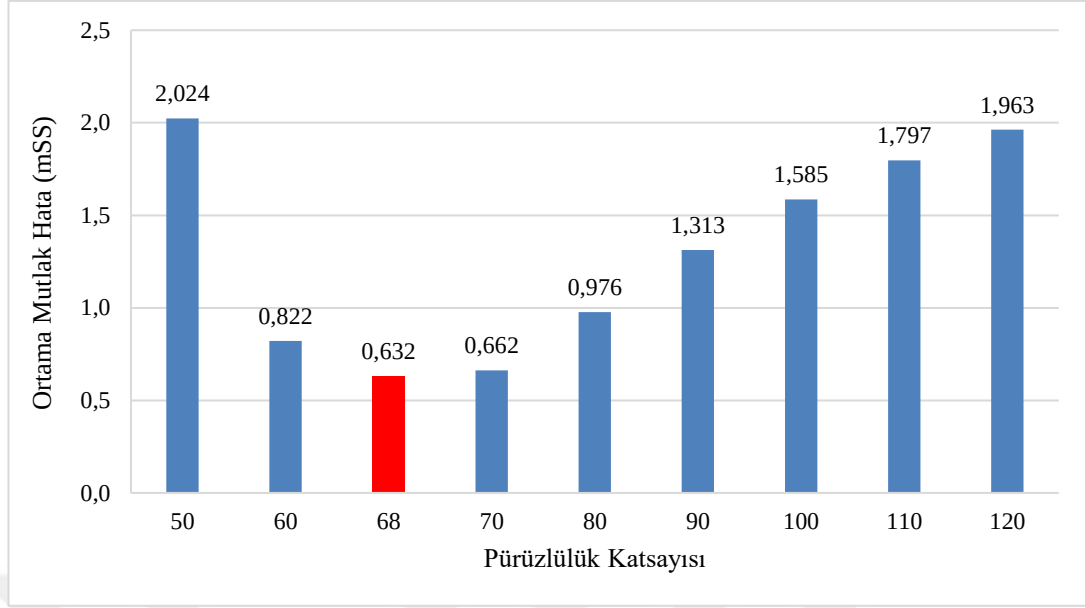
Şekil 4.33. Hidrolik model verifikasyon süresince SCADA istasyonundan elde edilen 5 dakika zaman aralıklı basınç profili

4.3.3. Pürüzlülük katsayısının doğrulanması

Hidrolik model verifikasyon çalışmasında da H-W katsayısı 50 ile 120 arasında ve her bir denemede 10 arttırılarak model çalıştırılmıştır. Her bir basınç ölçüm noktasında (BÖN) farklı pürüzlülük katsayıları için elde edilen mutlak hata miktarları Şekil 4.34'te, tüm BÖN istasyonları için ortalama mutlak hata miktarları ise Şekil 4.35'te sunulmaktadır. Model verifikasyon çalışması sonucunda pürüzlülük katsayısı = 68 için ortalama mutlak hata 0,632 m olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.7). Pürüzlülük katsayıları 80 ve 90 için hidrolik modelden elde edilen basınç tahminleri ile basınç ölçümlerine ilişkin karşılaştırmalar Şekiller 4.36-4.37'de verilmektedir.



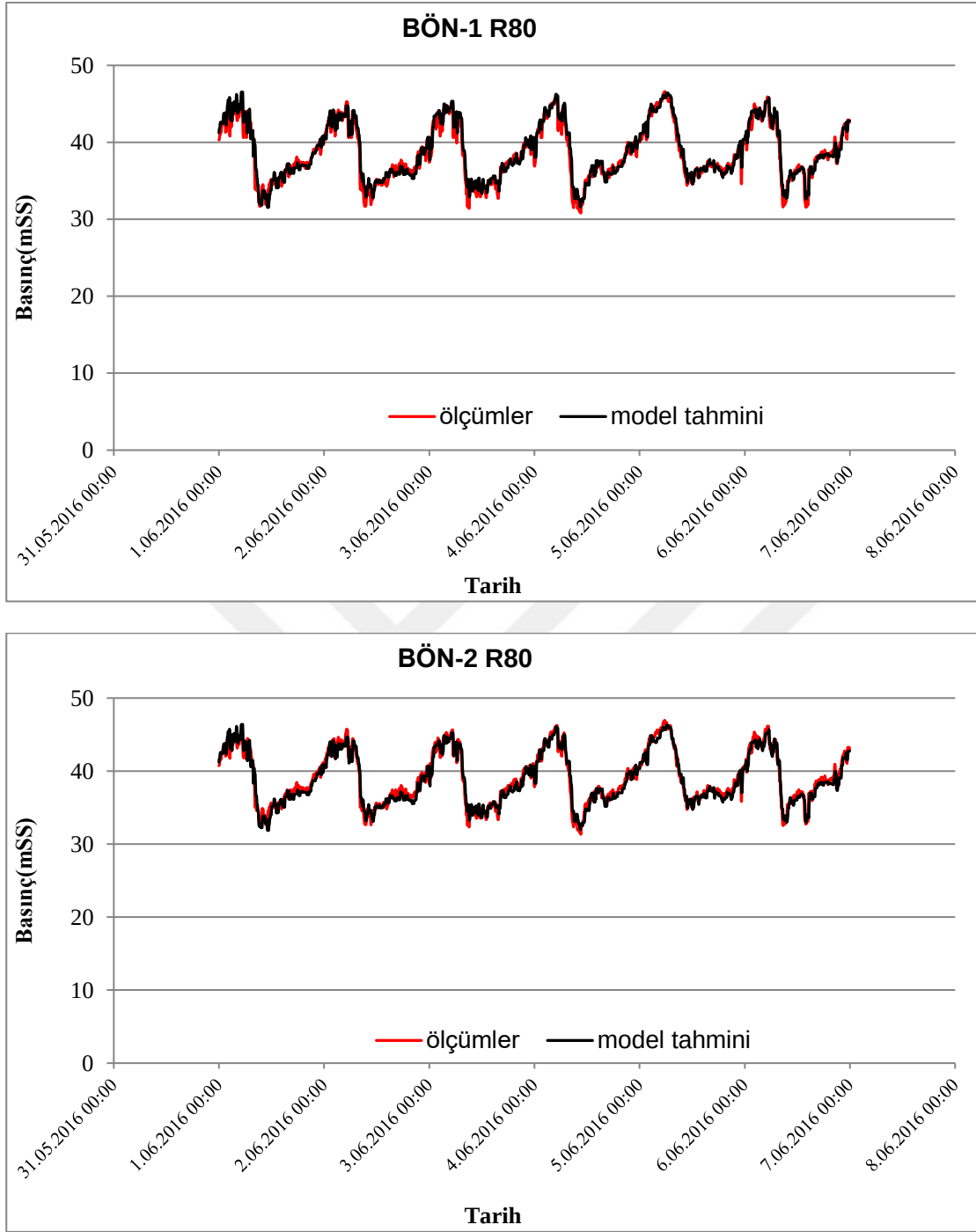
Şekil 4.34. 1-6 Haziran 2016 tarihleri arasında farklı pürüzlülük katsayılarındaki model tahminleri ile basınç ölçümleri arasındaki ortalama mutlak hatalar



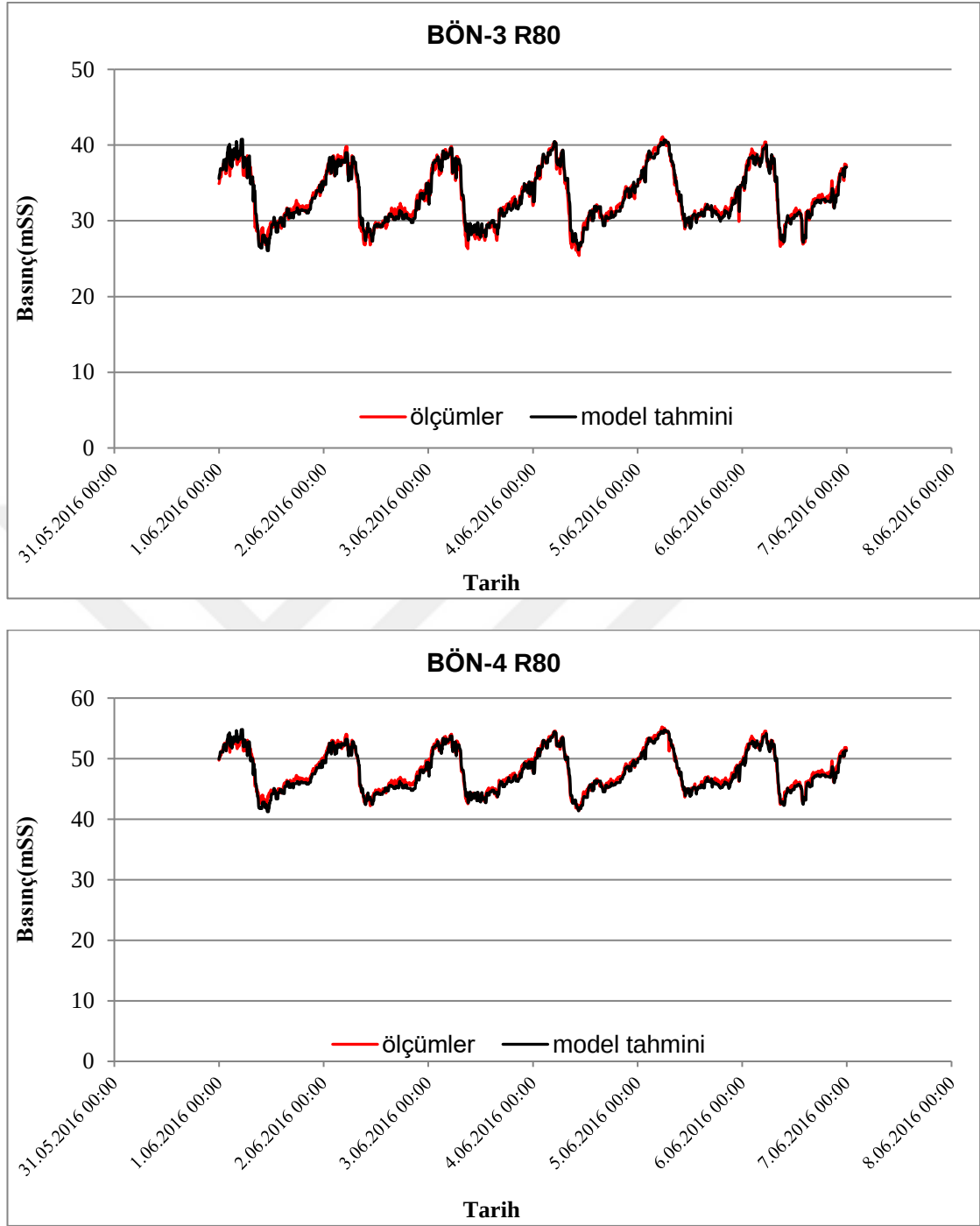
Şekil 4.35. Farklı pürüzlülük katsayıları için elde edilen Ortalama Mutlak Hata değerleri

Çizelge 4.7. Model verifikasyonu sonucunda farklı pürüzlülük katsayılarına göre Ortalama Mutlak Hata değerleri

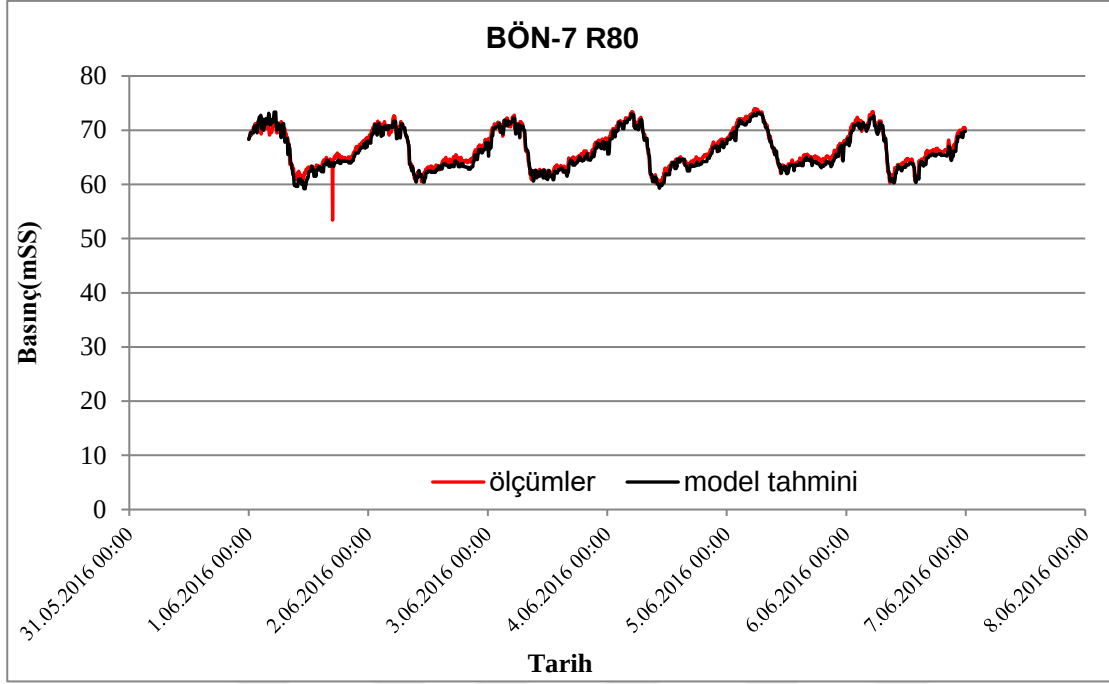
Pürüzlülük Katsayısı	50	60	68	70	80	90	100	110	120
Ortalama Mutlak Hata (mSS)	2,024	0,822	0,632	0,662	0,976	1,313	1,585	1,797	1,963



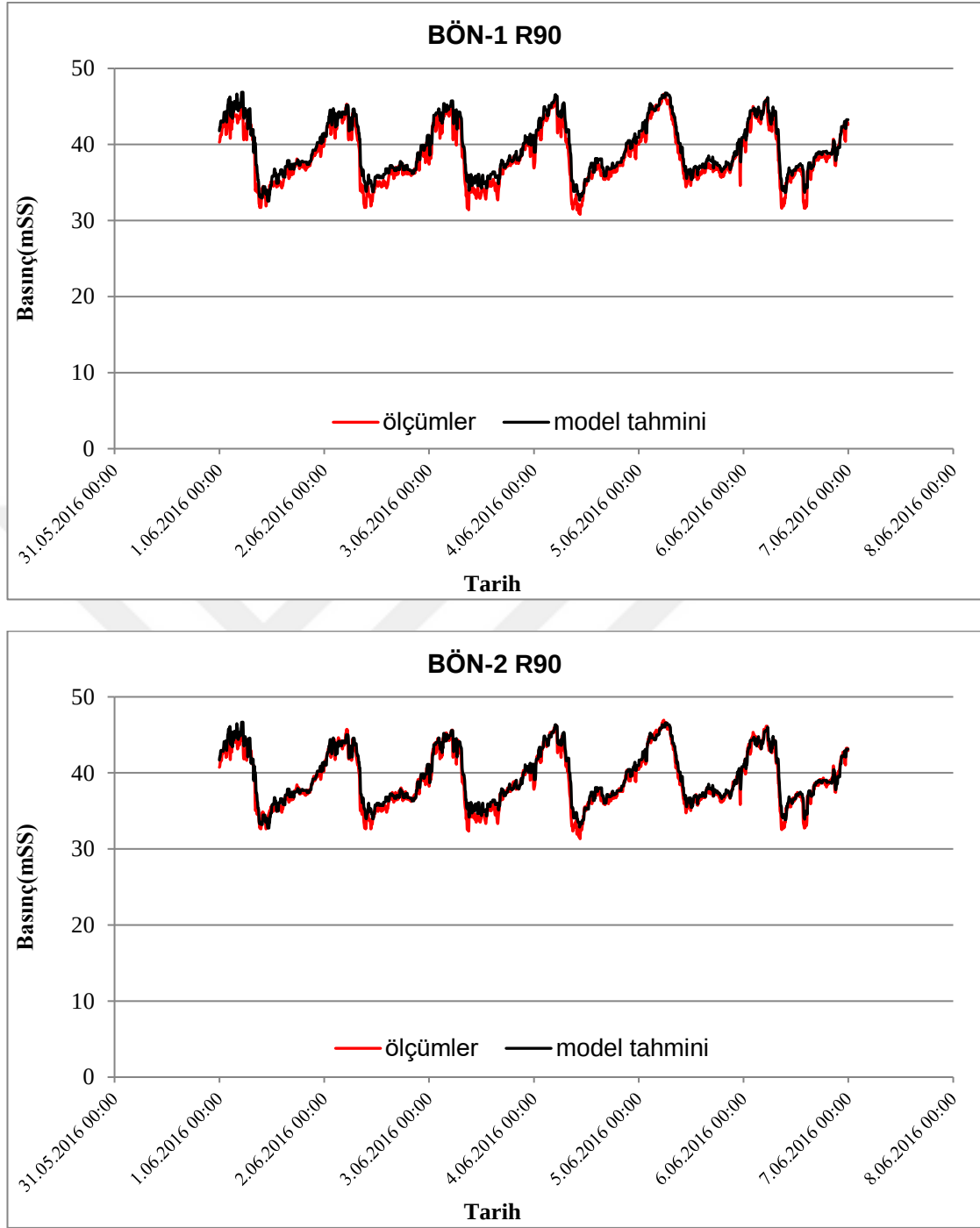
Şekil 4.36. Pürüzlülük katsayısı 80 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması



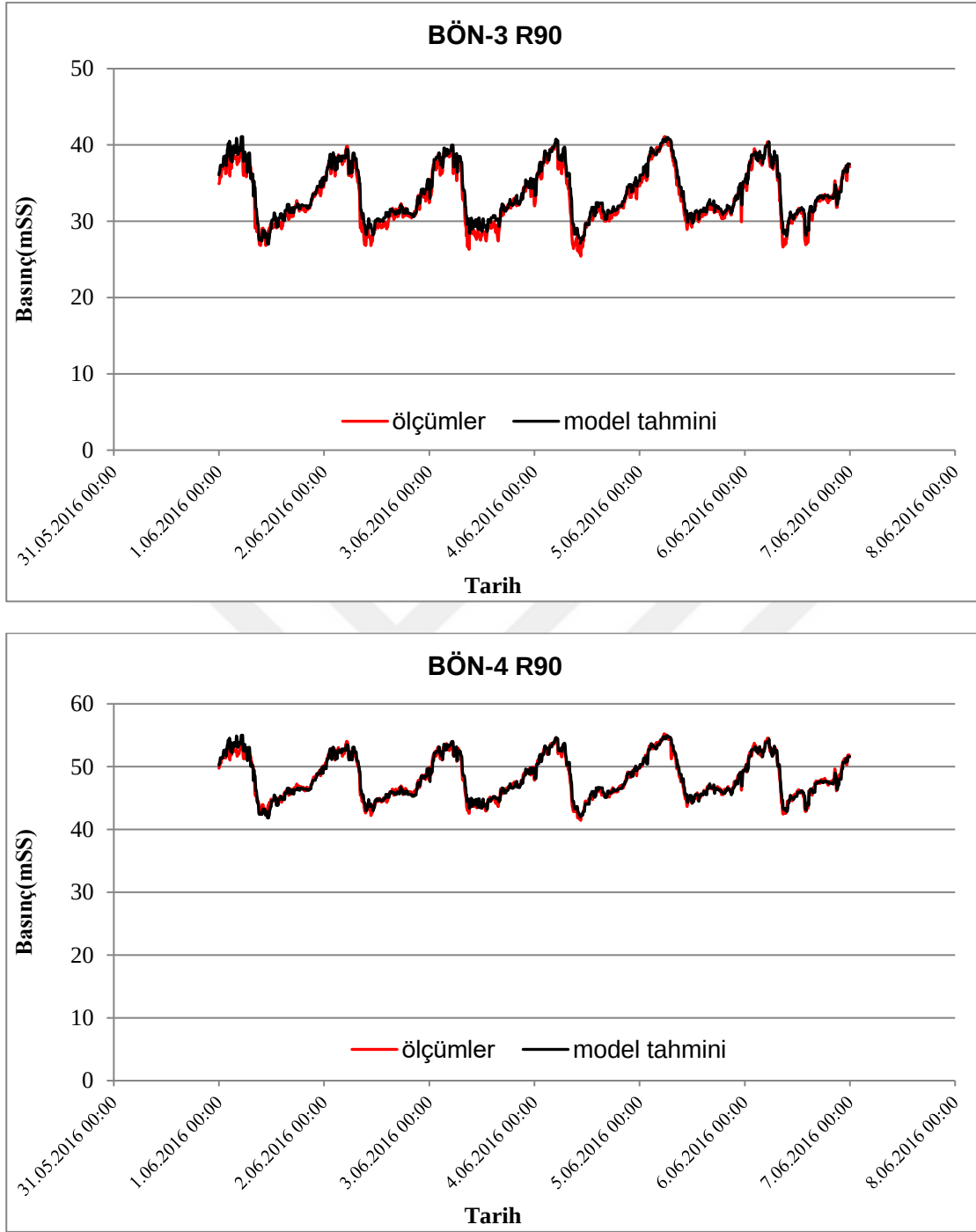
Şekil 4.36'nın devamı. Pürüzlülük katsayısı 80 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması



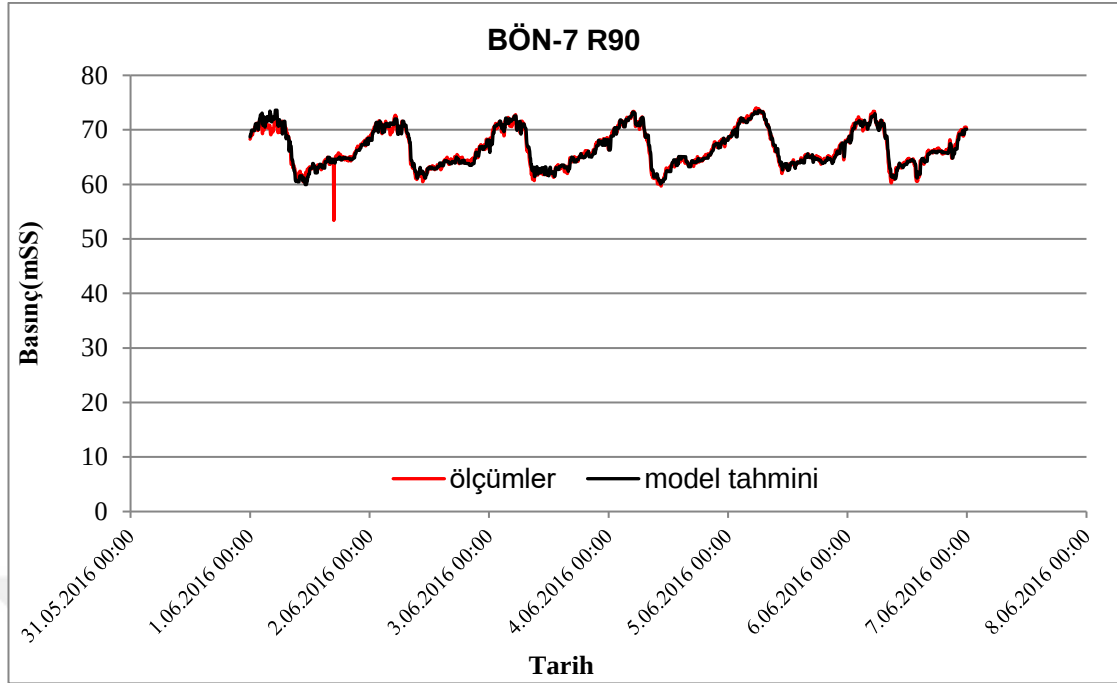
Şekil 4.36'nın devamı. Pürüzlülük katsayısı 80 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması



şekil 4.37. Pürüzlülük katsayısı 90 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.37'nin devamı. Pürüzlülük katsayısı 90 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması

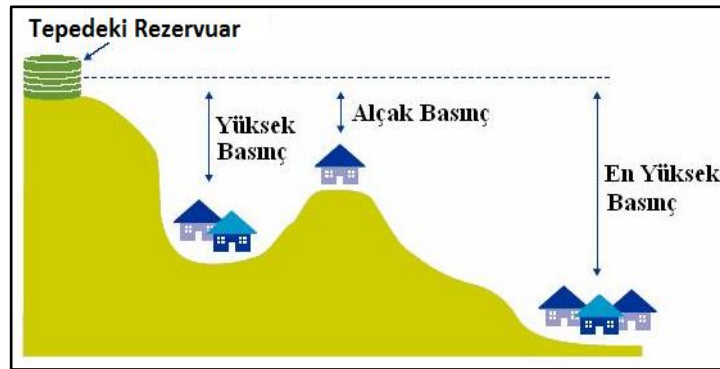


Şekil 4.37'nin devamı. Pürüzlülük katsayısı 90 olarak alındığında farklı basınç ölçüm noktalarındaki ölçümler ile model tahminlerinin karşılaştırılması

4.4. EPANET Modeli İle Kaleiçi Bölgesi İçin Basınç Yönetimi Çalışması

4.4.1. Giriş

İçme suyu dağıtım şebekesindeki su basıncı, boru kotları, depo ve diğer şebeke elemanlarının kotları ile beraber terfi yüksekliği ve su tüketimindeki değişimlere bağlıdır. Su tüketimindeki değişimler, su hızının ve dolayısıyla hidrolik kayıpların değişmesine neden olur. Sonuç olarak, su basıncı mekânsal ve zamansal değişimler gösterir. Şebekenin bazı noktalarındaki su basıncı seviyesi, tüm yıl boyunca belirli limit değerleri aşabilir (Şekil 4.38). İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerindeki Su Kayıplarının Kontrolü Yönetmeliği'nde içme suyu şebekeleri için topografik yapının uygun olduğu yerlerde izin verilen maksimum statik su basıncı 60 mSS olarak tanımlanmıştır.

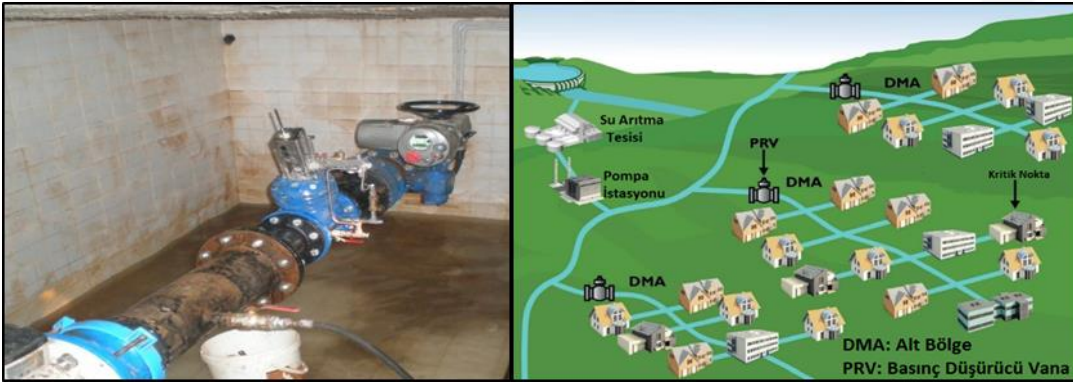


Şekil 4.38. İçme suyu şebekesinin farklı bölümlerinde farklı basınç seviyelerinin oluşumu

Basınç yönetimi uygulaması için içme suyu dağıtım şebekesinde uygun büyüklükte DMA'lar oluşturulmalıdır. Su basıncı genellikle DMA girişinde ve minimum ve maksimum basıncın olduğu kritik noktalarda ölçülmektedir. Kritik noktaların hidrolik model uygulaması ile tahmin edilmesi mümkündür.

4.4.1.1. Fazla basıncı azaltma yöntemleri

İçme suyu dağıtım şebekelerindeki fazla basıncın düşürülmesi için PRV kullanılması yaygındır (Şekil 4.39). Fazla basıncın düşürülmesi için bir türbin veya PAT kullanılması halinde enerji üretilmesi de mümkündür. İçme suyu dağıtım şebekeleri için topografik yapının uygun olduğu yerlerde izin verilen en yüksek statik su basıncı 60 mSS iken, gerekli olan minimum su basıncı seviyesi ise İller Bankası İçmesuyu Tesisleri Etüt, Fizibilite ve Projelerinin Hazırlanmasına Ait Teknik Şartname'ye göre 20 mSS belirtilmiştir. Buna göre, şebekede kritik noktalardaki su basıncının minimum 20 mSS olması gereklidir.



Şekil 4.39. DMA girişine yerleştirilen bir PRV ile su basıncı istenilen seviyeye indirilebilir

4.4.2. Kaleiçi çalışma bölgesindeki mevcut basıncın değerlendirilmesi

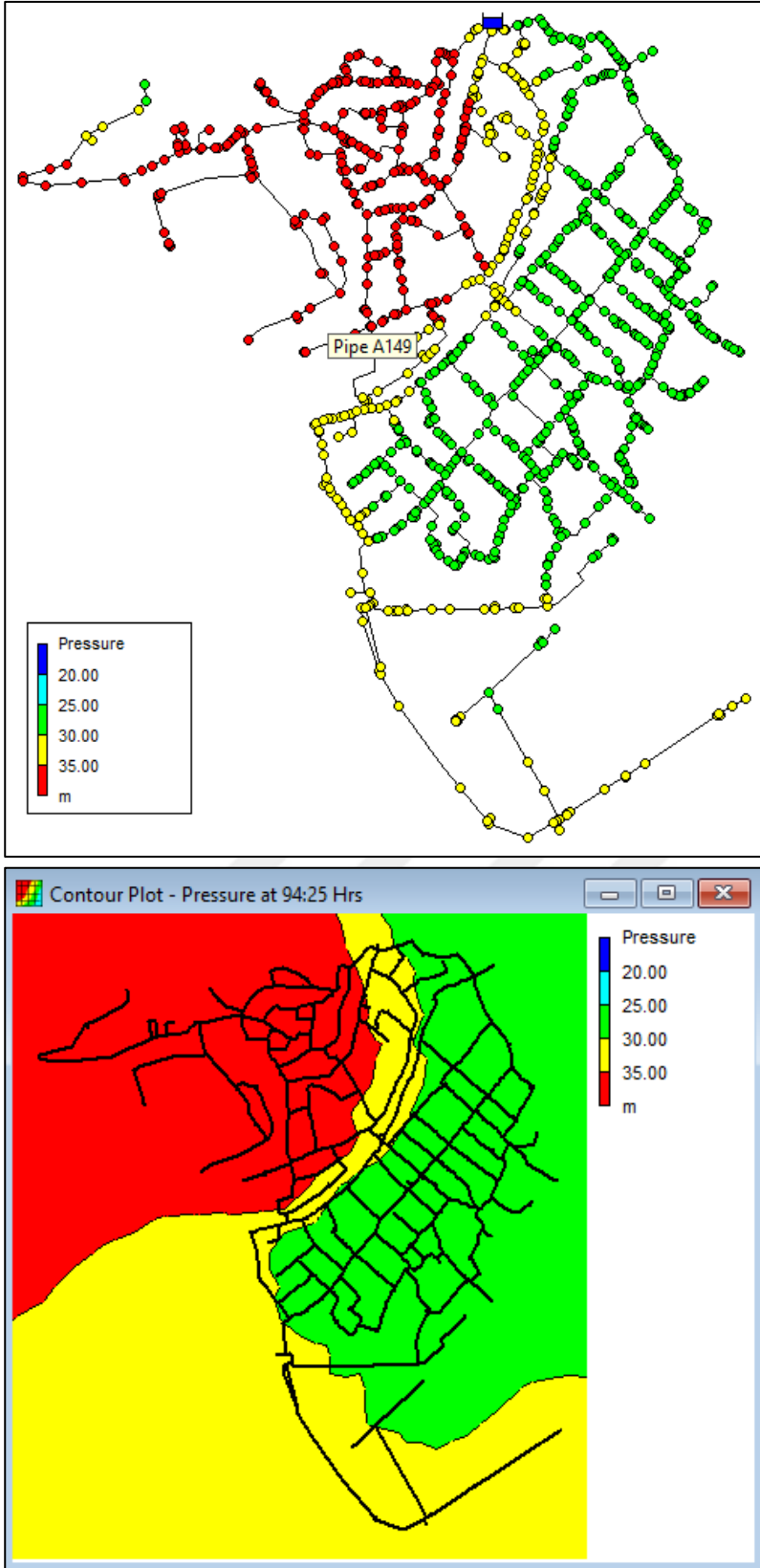
Kaleiçi alt bölgesinde EPANET modeli kullanılarak farklı dönemler için hidrolik modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Kaleiçi çalışma bölgesi için gerçekleştirilen hidrolik modelleme çalışması sonucunda, modelden elde edilen minimum, maksimum ve yangın musluğu açılış anlarındaki basınç değerleri incelenmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır. Değerlendirme amacıyla Kaleiçi bölgesi için hidrolik modelden Ağustos 2015, Ocak 2016 ve Haziran 2016 dönemlerine ilişkin minimum, maksimum ve yangın musluğunun açıldığı anlardaki basınç değerleri elde edilmiştir. Kaleiçi bölgesi girişinde bulunan SCADA istasyonunda ölçülen debi ve basınç değerleri günlük ve mevsimsel olarak büyük değişimler göstermektedir. Bu nedenle, SCADA istasyonunda izlenen minimum ve maksimum su basıncı değerlerine özel önem verilmektedir.

Kalibrasyon 1 çalışması kapsamında 20 - 25 Ağustos 2015 dönemi için gerçekleştirilen hidrolik model uygulamasından elde edilen minimum, maksimum basınç durumları ve yangın musluğu açılması anındaki basınç değerleri Şekiller 4.40-4.42'de gösterilmektedir.

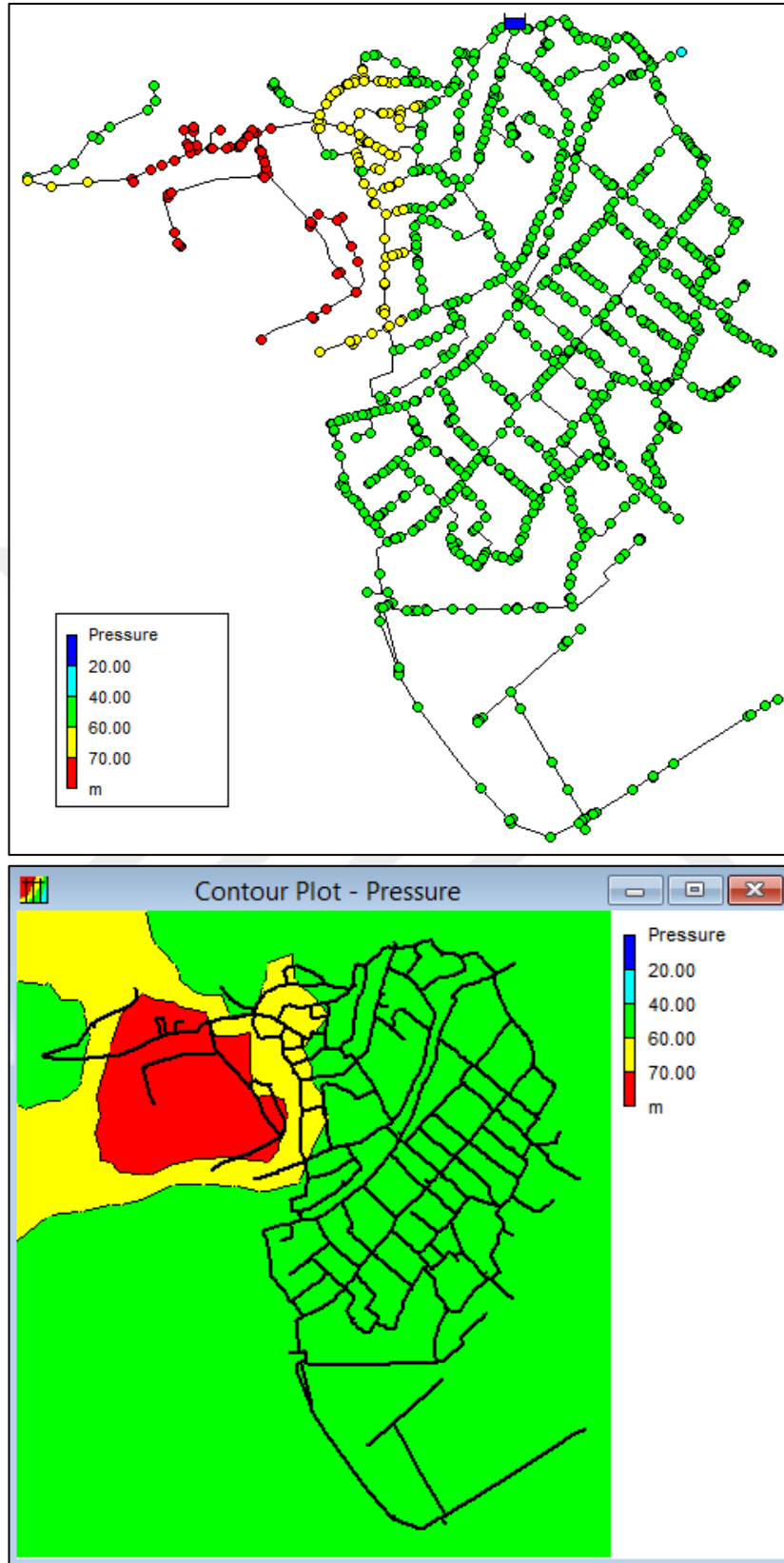
Kalibrasyon 2 alışması kapsamında 14 - 19 Ocak 2016 dönemi için gerçekleştirilen hidrolik model uygulamasından elde edilen minimum, maksimum basınç durumları ve yangın musluğu açılması anındaki basınç değerleri şekiller 4.43-4.45'te gösterilmektedir.

Verifikasyon (Doğrulama) alışması kapsamında 1 - 6 Haziran 2016 dönemi için gerçekleştirilen hidrolik model uygulamasından elde edilen minimum ve maksimum basınç durumları için basınç değerleri şekiller 4.46-4.47'de gösterilmektedir.

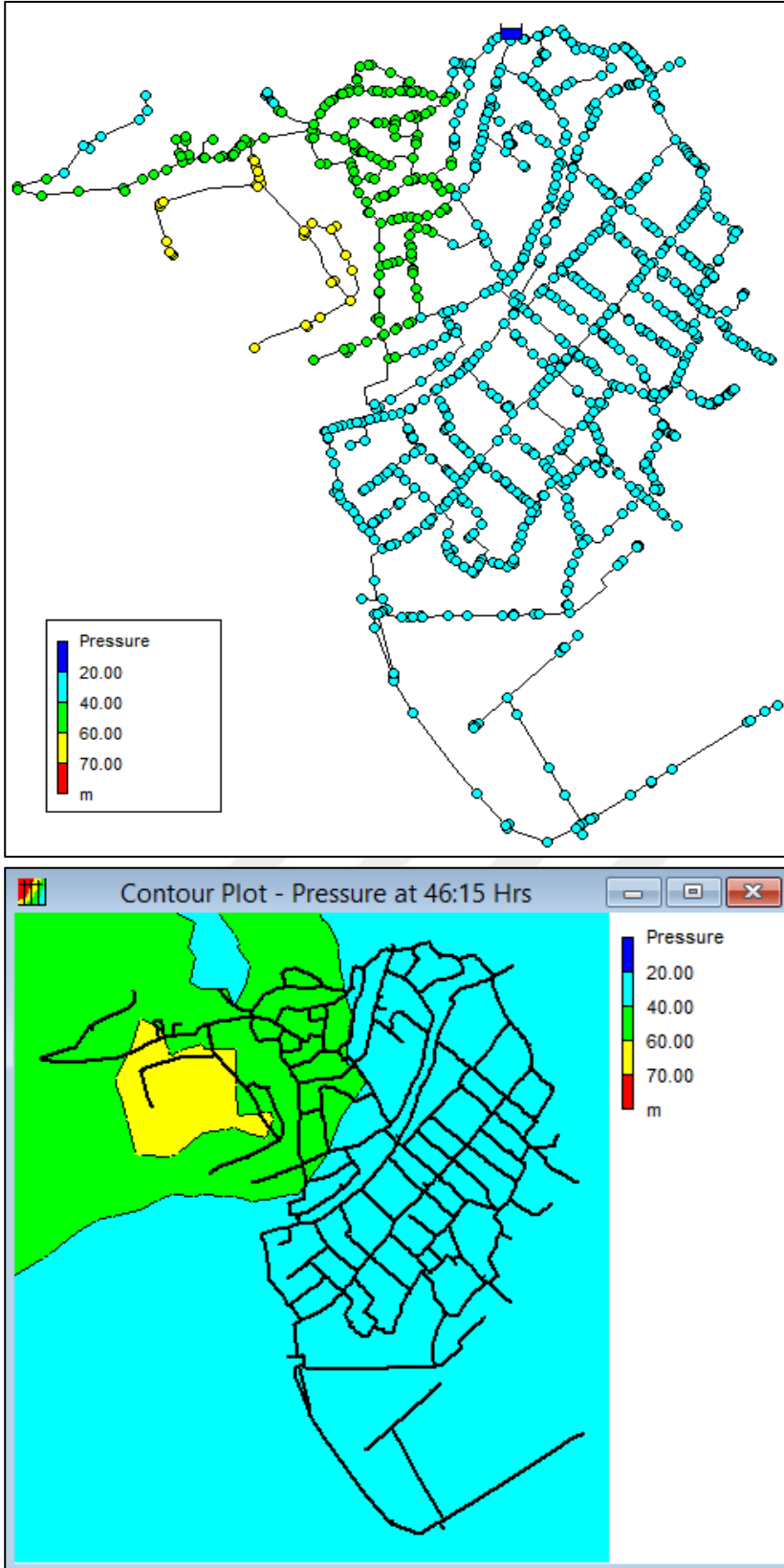




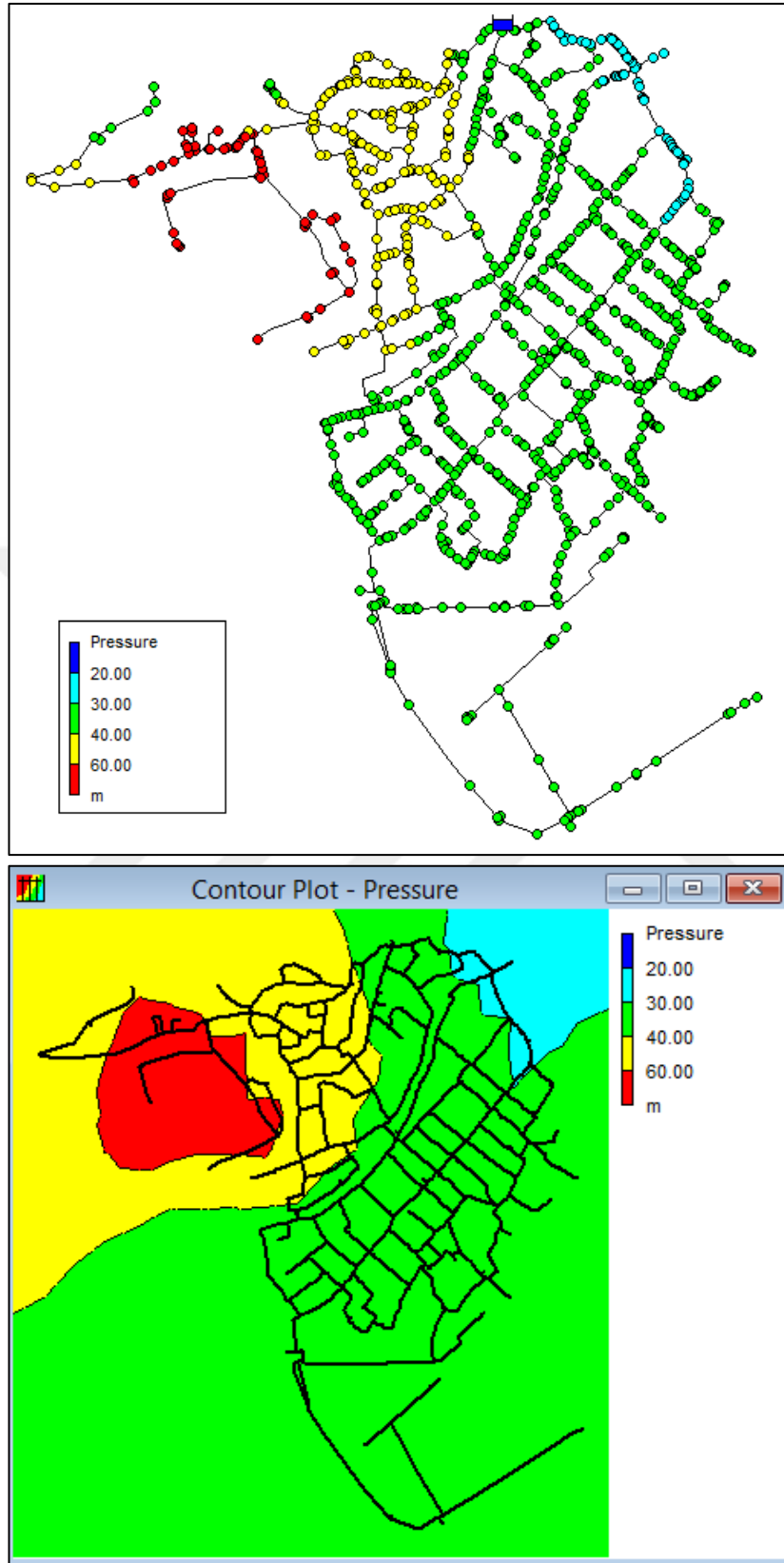
Şekil 4.40. SCADA istasyonunda ölçülen minimum basınç durumunda şebekedeki basınç dağılımı (24/08/2015 saat:10:55, SCADA basıncı: 30,88 mSS, SCADA debisi: 148,375 m³/sa)



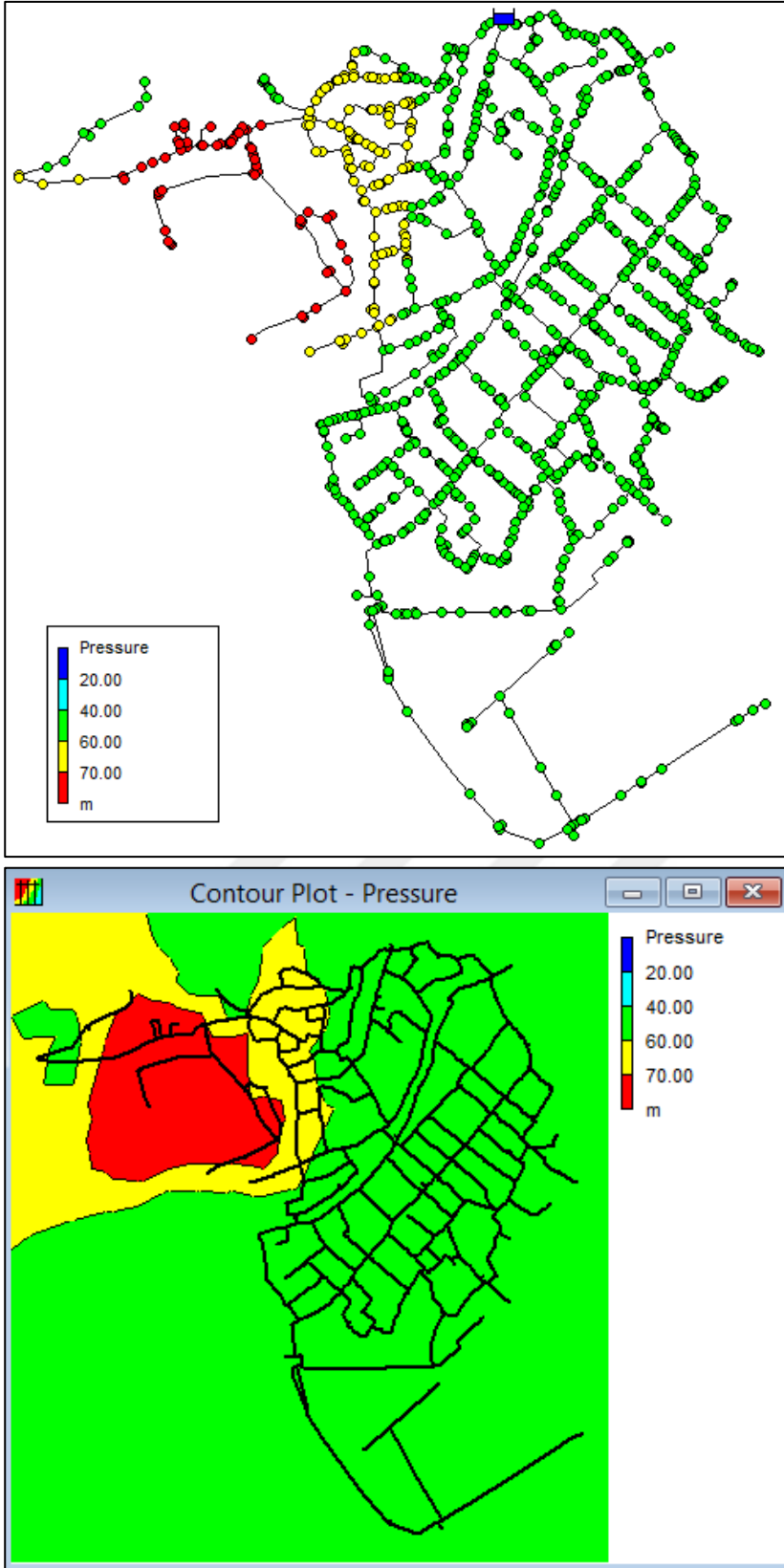
Şekil 4.41. SCADA istasyonunda ölçülen maksimum basınç durumunda şebekede basınç dağılımı (24/08/2015 saat: 05:15, SCADA basıncı: 42,44 mSS, SCADA debisi: 75,6 m³/sa)



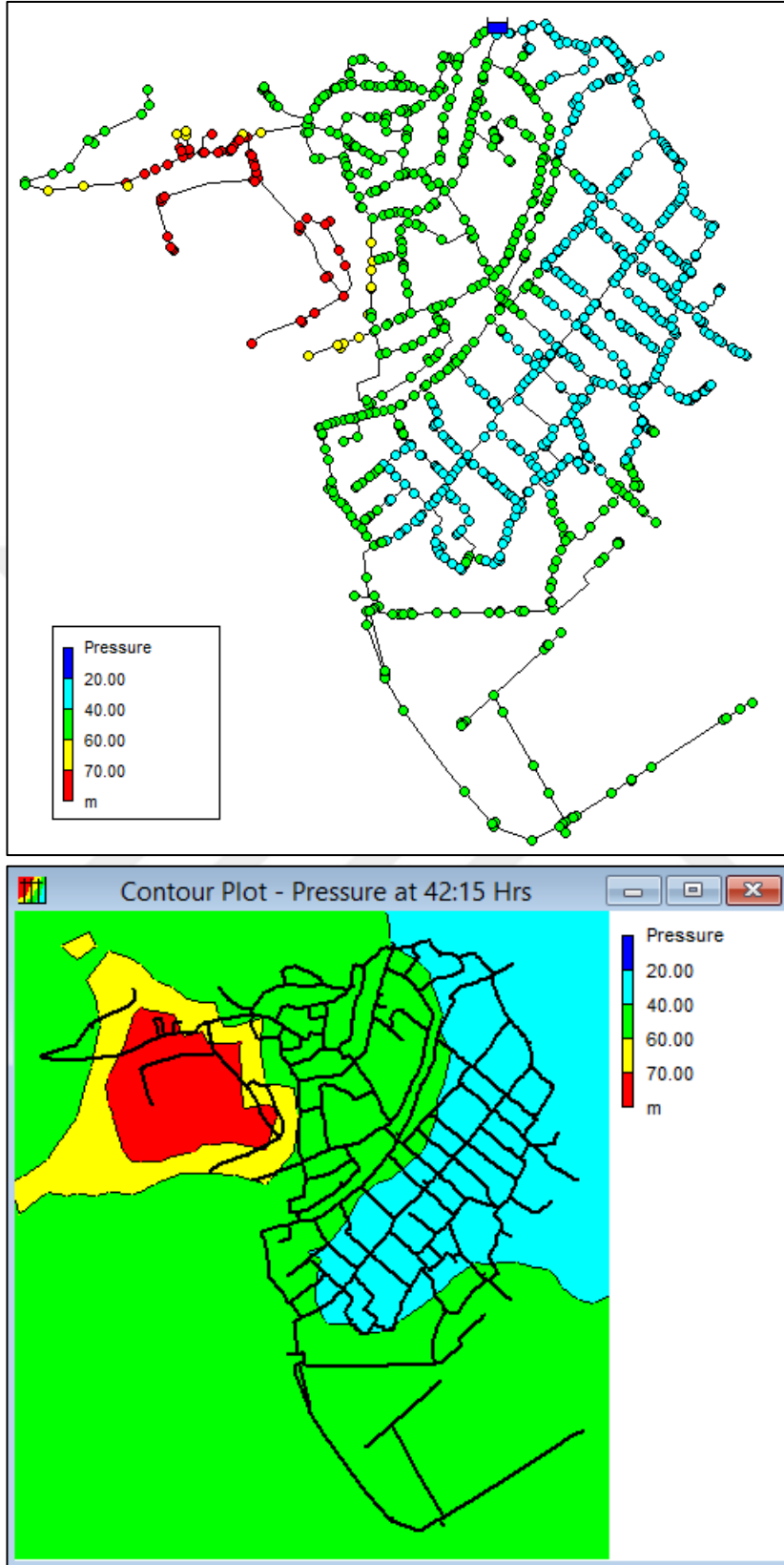
Şekil 4.42. Yangın musluğunun açıldığı esnada SCADA’da izlenen basınç ve şebekede basınç dağılımı (22/08/2015 saat: 10:45, SCADA basıncı: 31,31 mSS, SCADA debisi: 177,5 m³/sa)



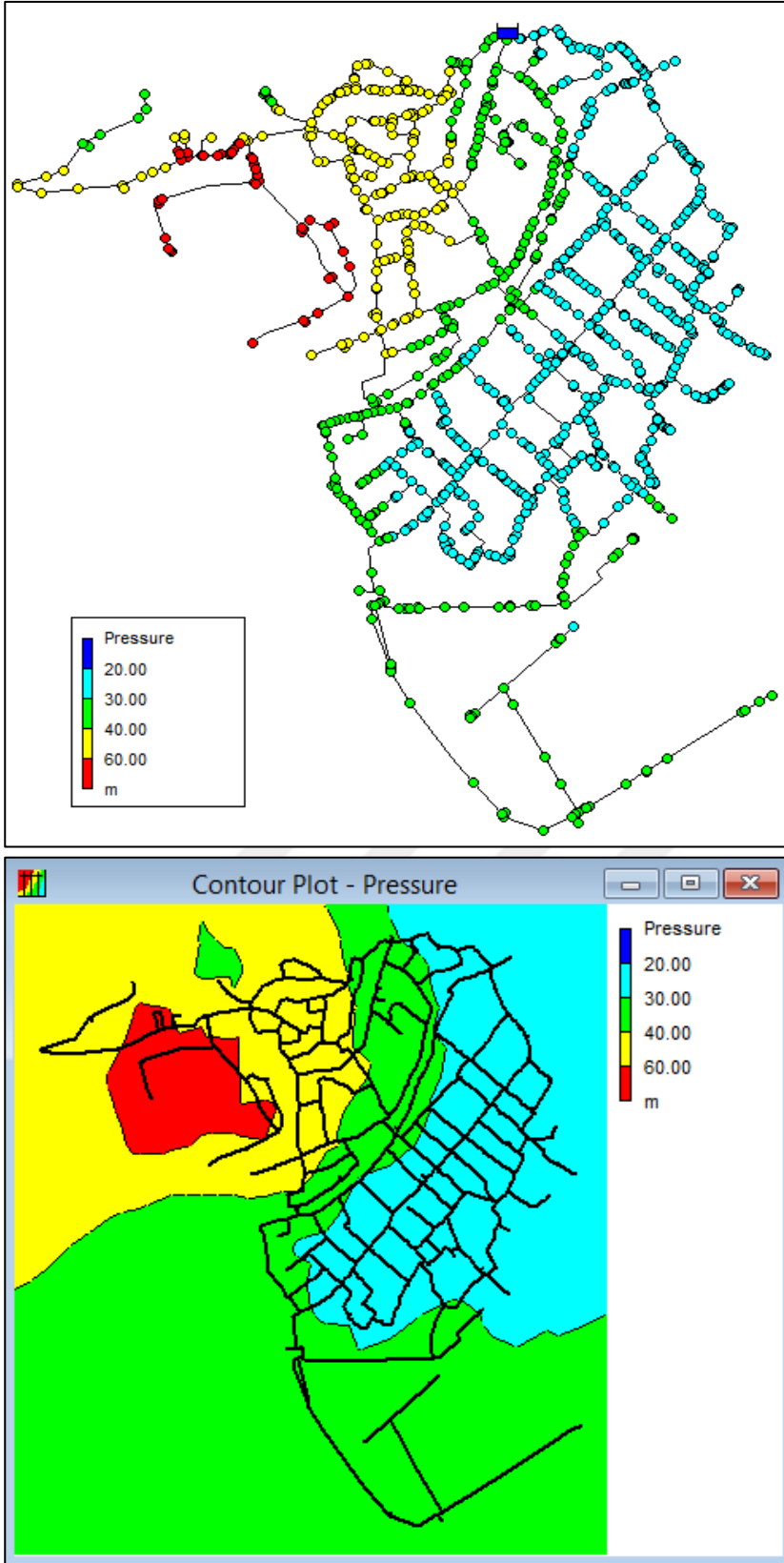
Şekil 4.43. SCADA istasyonunda ölçülen minimum basınç durumunda şebekedeki basınç dağılımı (15/01/2016 saat:12:10, SCADA basıncı: 31,43 mSS, SCADA debisi: 89,44 m³/sa)



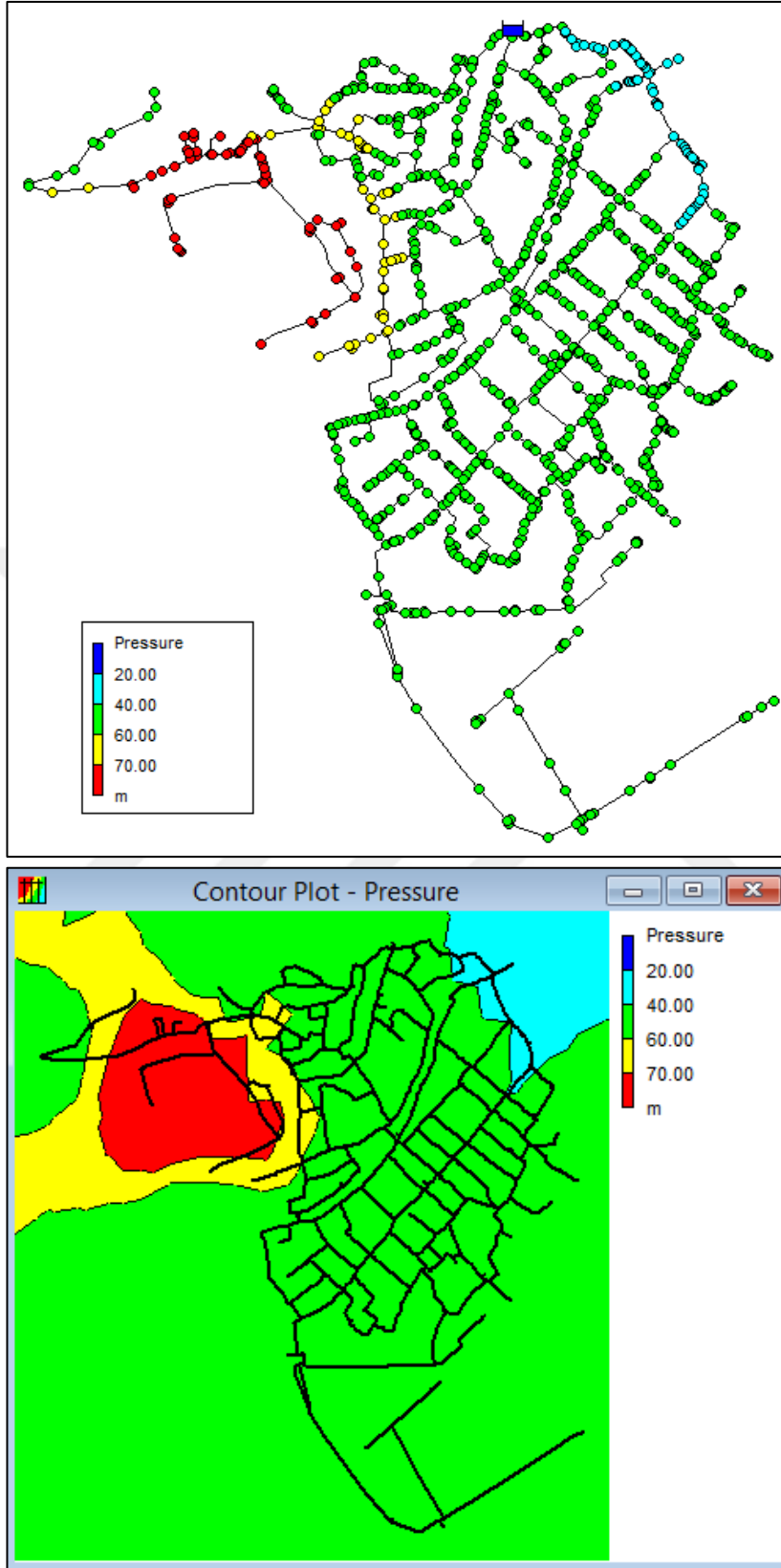
Şekil 4.44. Şekil 9. SCADA istasyonunda ölçülen maksimum basınç durumunda şebekedeki basınç dağılımı (19/01/2016 saat: 05:15, SCADA basıncı: 42,94 mSS, SCADA debisi: 68,625 m³/sa)



şekil 4.45. Yangın musluğunun açıldığı esnada SCADA’da izlenen basınç ve şebekede basınç dağılımı (16/01/2016 saat: 06:25, SCADA basıncı: 39,81 mSS, SCADA debisi 125,5 m³/sa)



Şekil 4.46. SCADA istasyonunda ölçülen minimum basınç durumunda şebekedeki basınç dağılımı (04/06/2016 saat:10:35, SCADA basıncı: 30,25 mSS, SCADA debisi: 130.625 m³/sa)

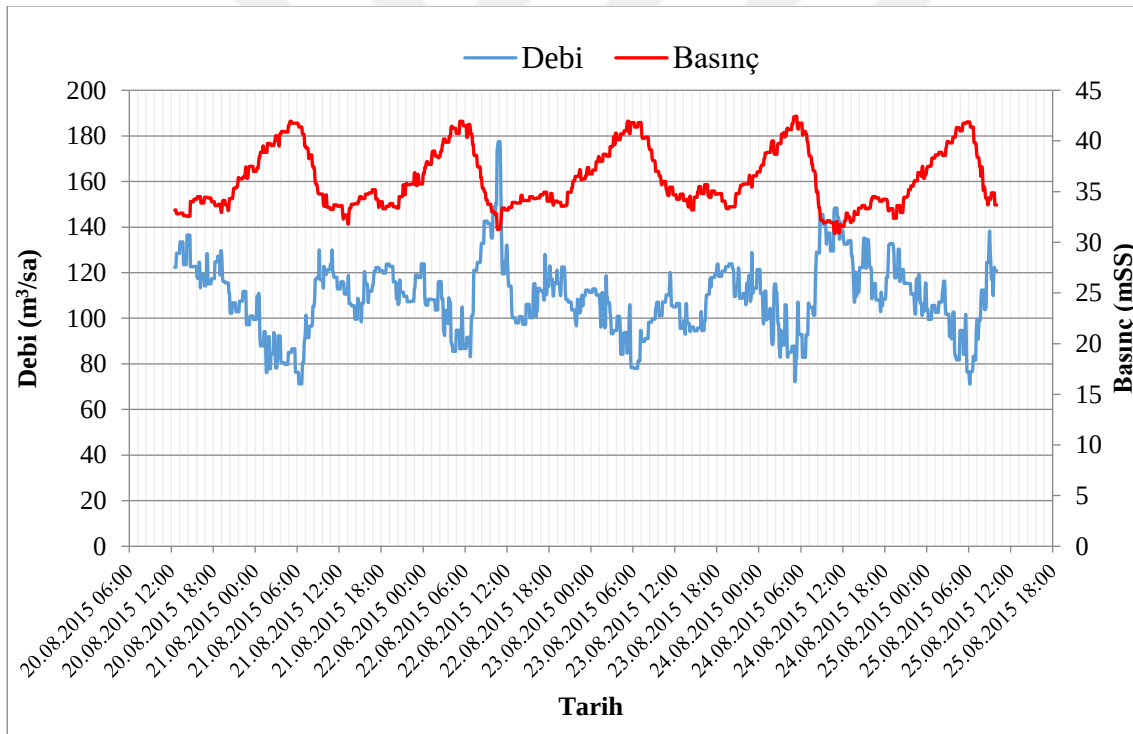


şekil 4.47. SCADA istasyonunda ölçölen maksimum basınç durumunda şebekedeki basınç dağılımı (05/06/2016 saat: 05:20, SCADA basıncı: 41,56 mSS, SCADA debisi: 95,75 m³/sa)

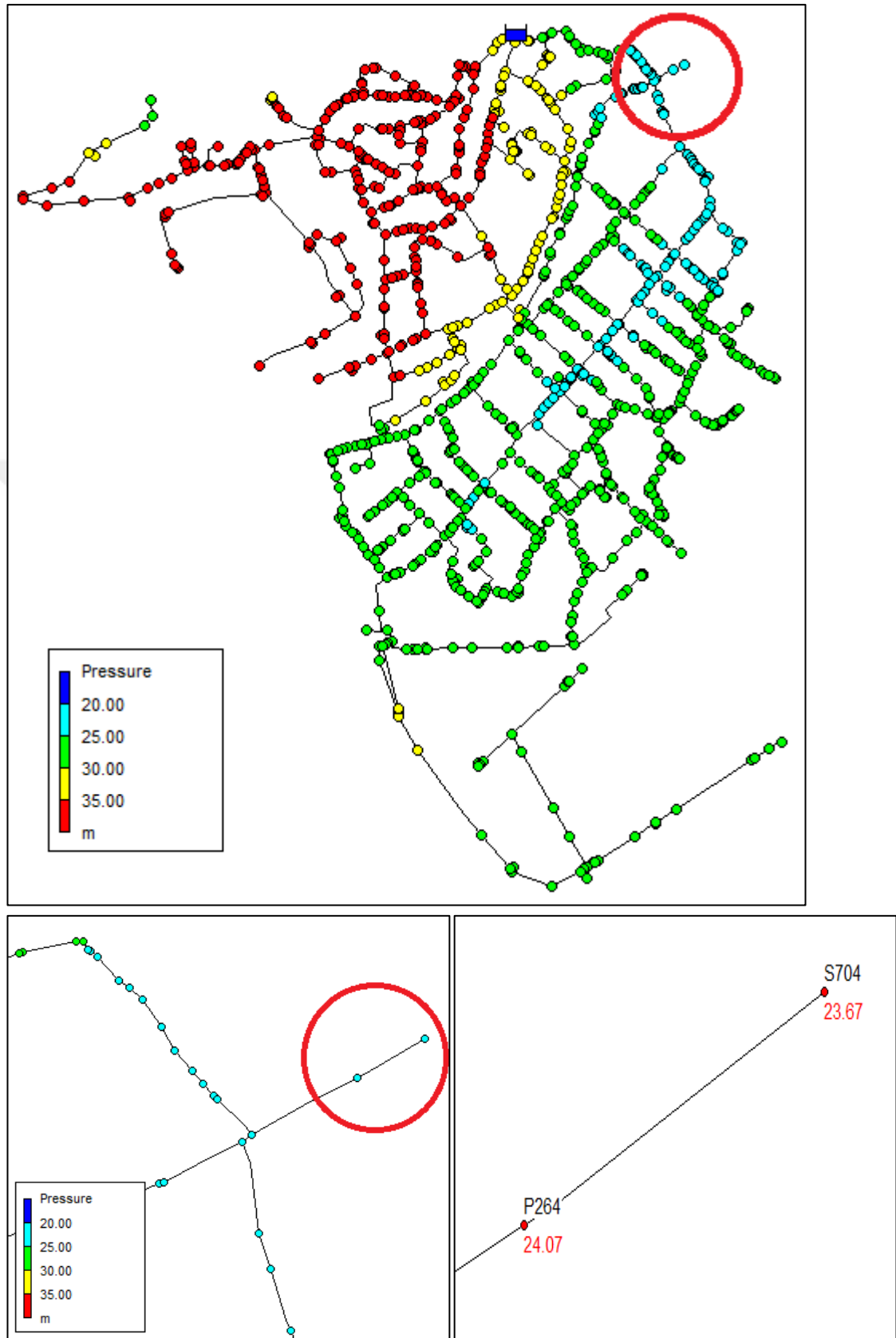
4.4.3. Şebekedeki kritik noktanın ve fazla basınç seviyesinin belirlenmesi

Basınç yönetimi, gereksiz ve fazla olan şebeke basıncı nedeniyle oluşan yüksek su kayıplarını ve boru patlama sayısını azaltmak için uygulanır. Bu uygulamada aboneler için gerekli ve yasal mevzuatlara göre düzenlenmiş yeterli olan minimum basınç düzeyinde şebekenin işletilmesi sağlanır (McKenzie 2001). Kaleiçi bölgesinde şebekede basınç yönetimi sağlamak için hidrolik model sonuçlarından kritik basınç noktası (en az basınç) belirlenmiştir.

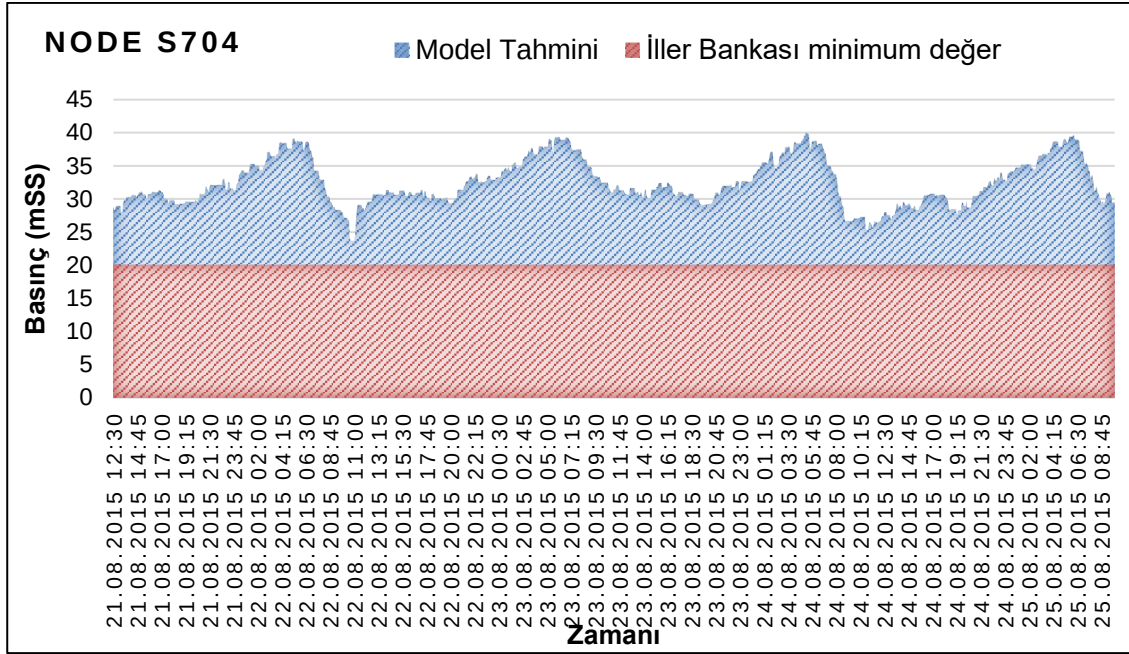
Kalibrasyon 1 çalışması kapsamında 20 - 25 Ağustos 2015 dönemi için gerçekleştirilen hidrolik model uygulaması süresince şebekedeki **kritik basınç noktasının** yeri tespit edilmiştir. 20-25 Ağustos 2015 tarihleri arasında SCADA istasyonunda izlenen debi ve basınç ölçümleri Şekil 4.48’de, Kalibrasyon 1 çalışması süresince Kaleiçi bölgesinde tespit edilen kritik nokta ve minimum basınç değeri Şekil 4.49’da gösterilmektedir. **Kalibrasyon 1** çalışması için Kaleiçi bölgesinde kritik nokta (Node S704) için tahmin edilen basınç profili ve İller Bankası Teknik Şartnamesi’nde belirtilen minimum basınç seviyesi Şekil 4.50’de, kritik noktadaki fazla basınç Şekil 4.51’de sunulmaktadır.



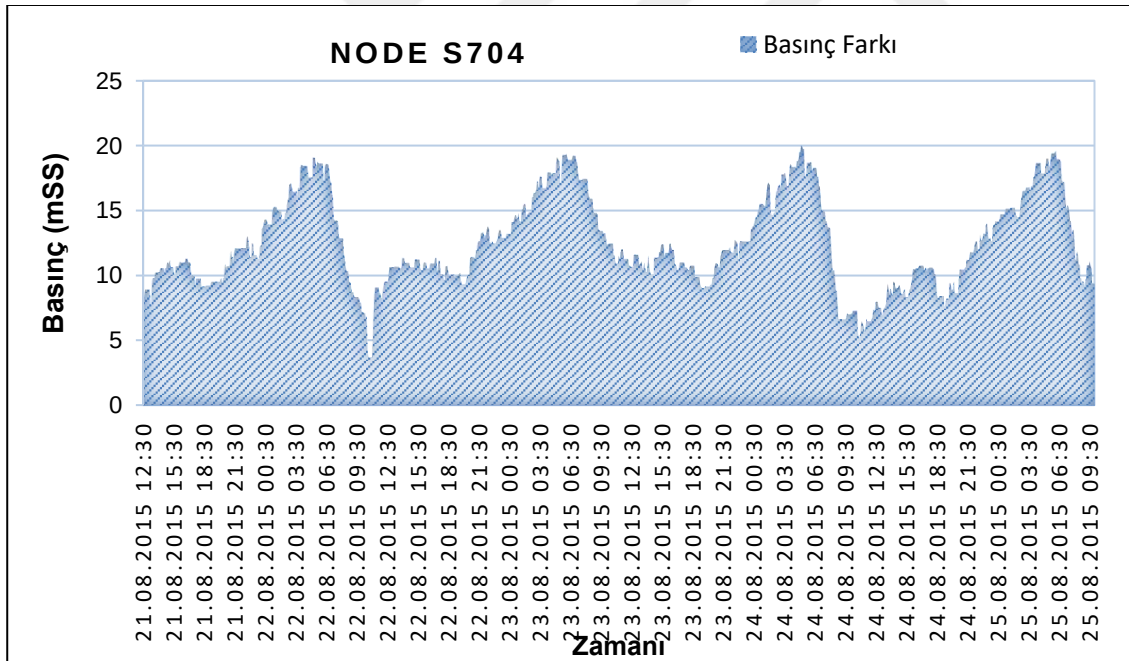
Şekil 4.48. 20-25 Ağustos 2015 tarihleri arasında SCADA istasyonunda izlenen debi ve basınç ölçümleri



Şekil 4.49. Kaleiçi bölgesi Kalibrasyon 1 çalışması için kritik nokta ve minimum basınç değeri tespiti (22/08/2015, saat 10:45-11:00 arasında, minimum basınç = 23,67 mSS)



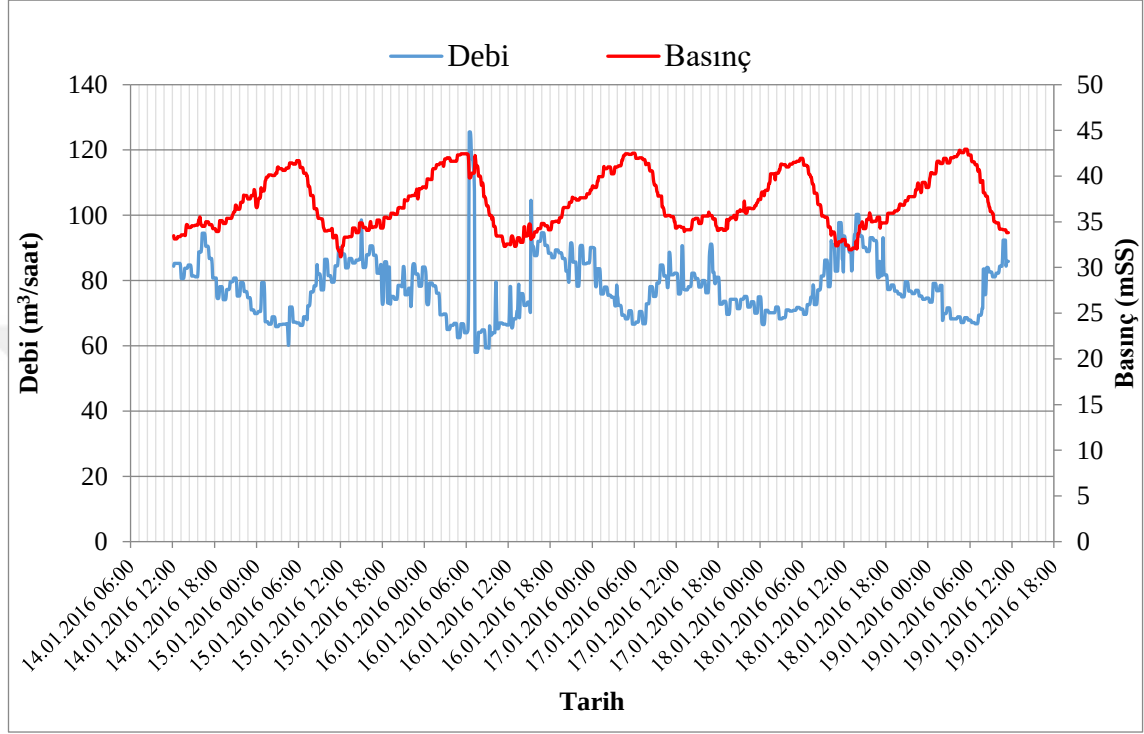
Şekil 4.50. Kaleiçi bölgesinde kritik nokta (Node S704) için tahmin edilen basınç profili ve İller Bankası Teknik Şartnamesi'nde belirtilen minimum basınç seviyesi (20 mSS)



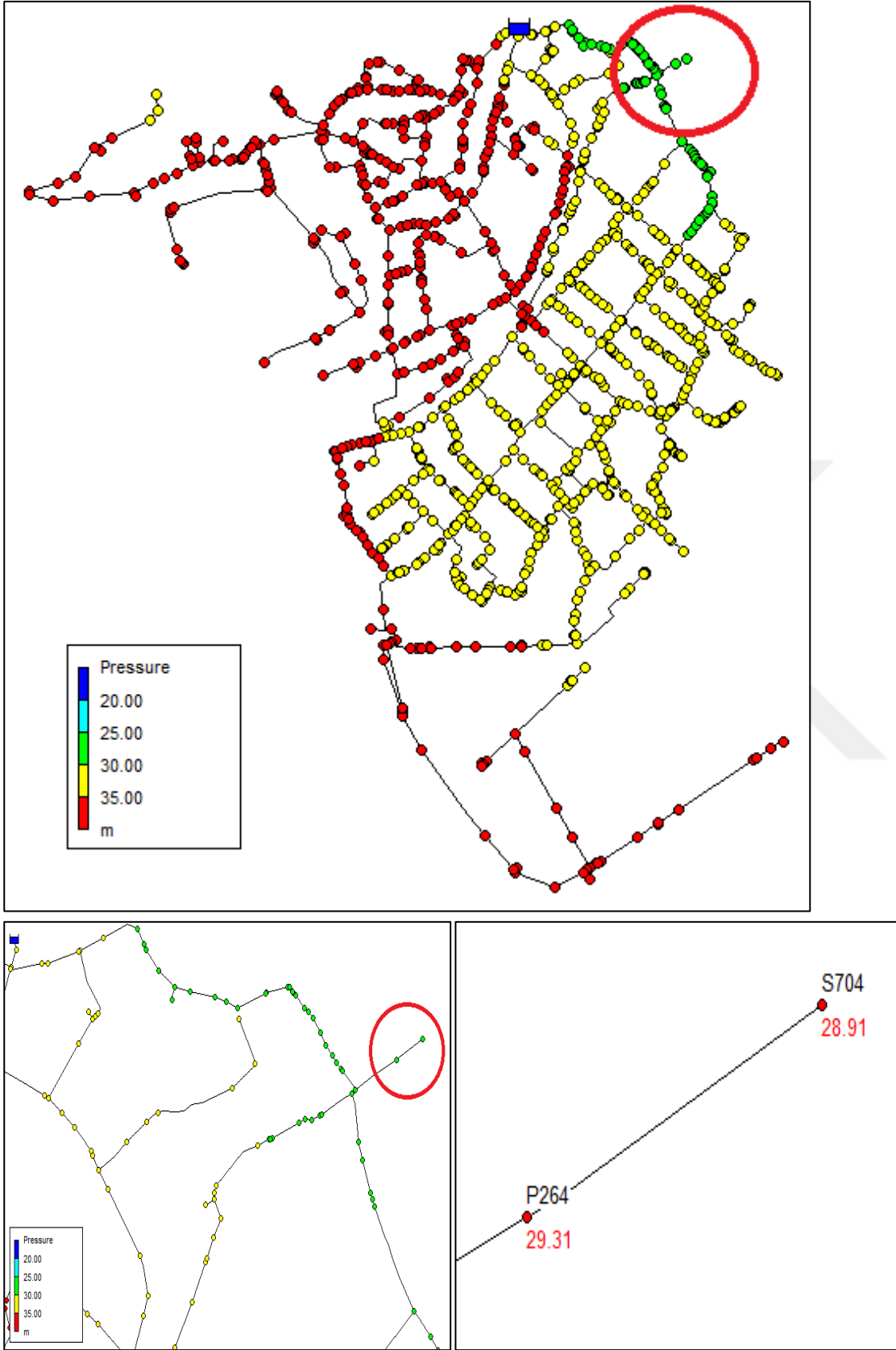
Şekil 4.51. Kaleiçi bölgesinde kritik nokta (Node S704) için hidrolik modelden elde edilen fazla basınç profili

Kalibrasyon 2 çalışması kapsamında 14 - 19 Ocak 2016 dönemi için gerçekleştirilen hidrolik model uygulaması süresince şebekedeki **kritik basınç noktasının** yeri tespit edilmiştir. 14 - 19 Ocak 2016 tarihleri arasında SCADA istasyonunda izlenen debi ve basınç ölçümleri Şekil 4.52'de, Kalibrasyon 2 çalışması süresince Kaleiçi bölgesinde tespit edilen kritik nokta ve minimum basınç değeri Şekil

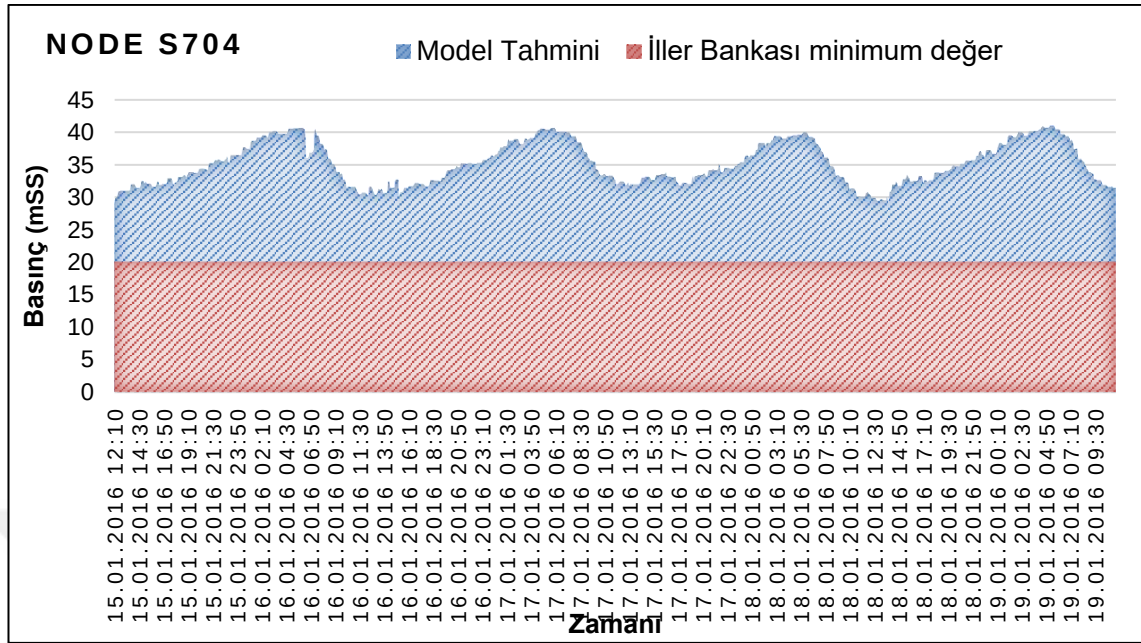
4.53'te gösterilmektedir. Kalibrasyon 2 çalışması için Kaleiçi bölgesinde kritik nokta (Node S704) için tahmin edilen basınç profili ve İller Bankası Teknik Şartnamesi'nde belirtilen minimum basınç seviyesi Şekil 4.54'te, kritik noktadaki fazla basınç Şekil 4.55'te sunulmaktadır.



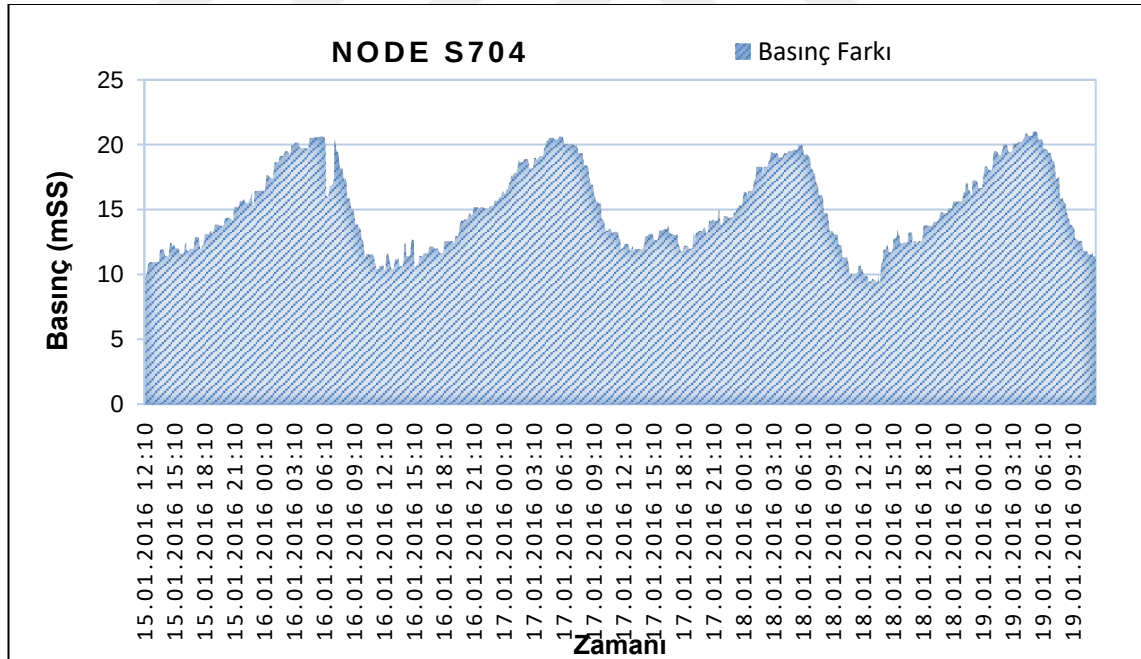
Şekil 4.52. 14-19 Ocak 2016 tarihleri arasında SCADA istasyonunda izlenen debi ve basınç ölçümleri



Şekil 4.53. Kaleiçi bölgesi Kalibrasyon 2 çalışması için kritik nokta ve minimum basınç değeri tespiti (15/01/2016, saat 12:10'da, minimum basınç = 28,91 mSS)



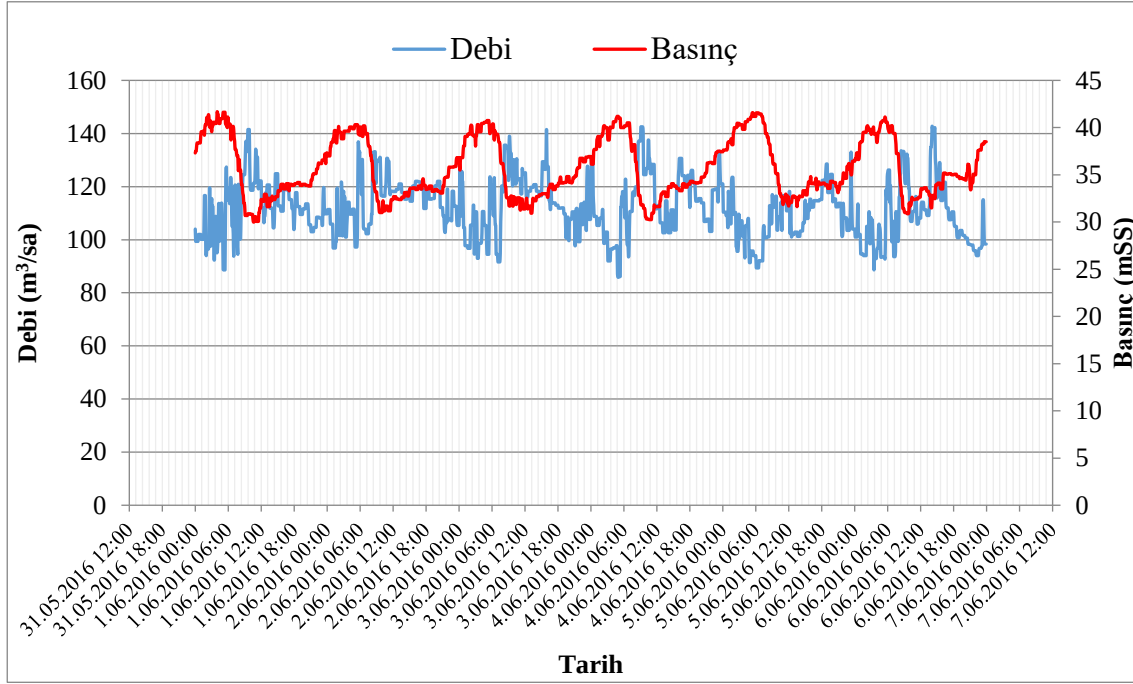
Şekil 4.54. Kaleiçi bölgesinde kritik nokta (Node S704) için tahmin edilen basınç profili ve İller Bankası Teknik Şartnamesi'nde belirtilen minimum basınç seviyesi (20 mSS)



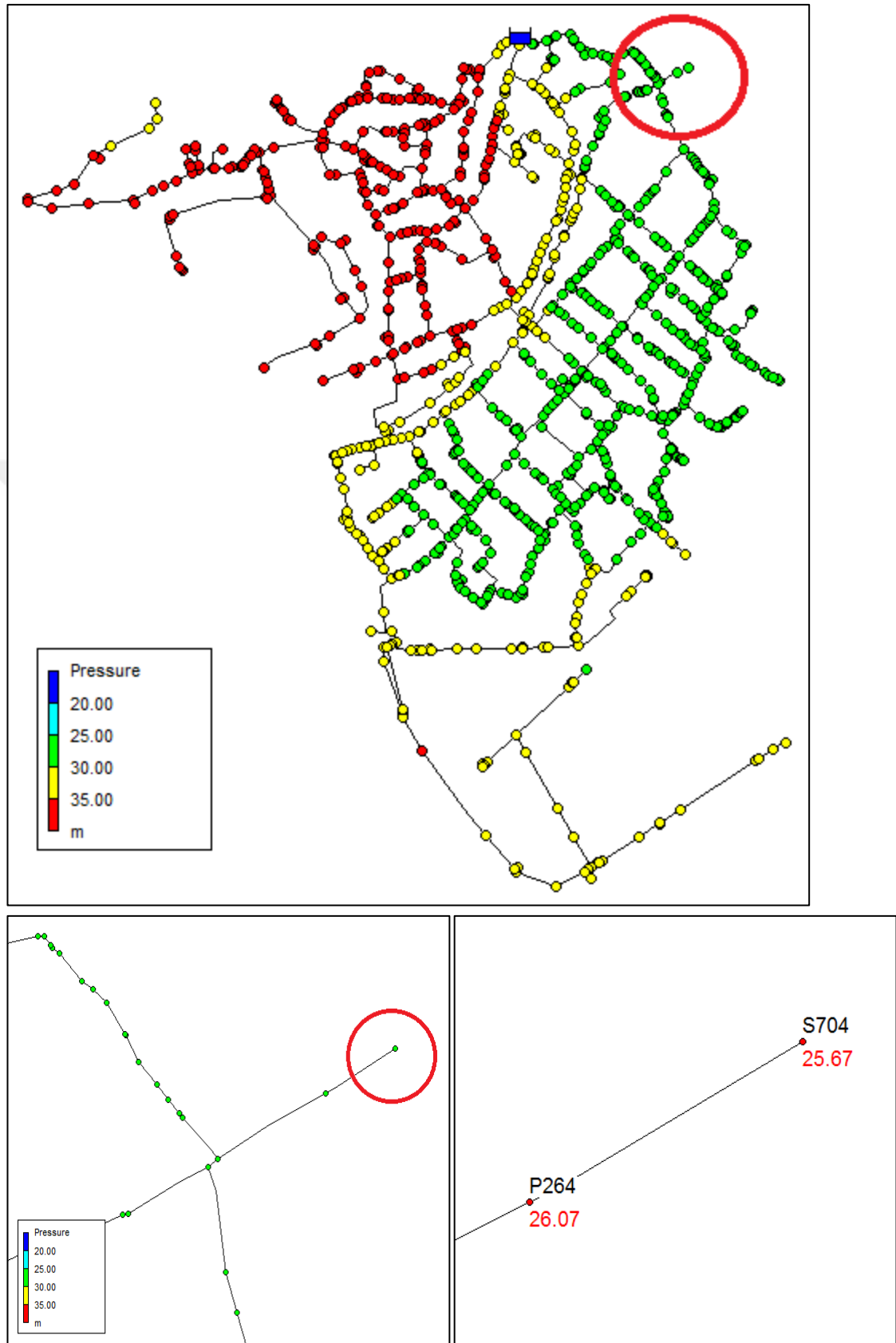
Şekil 4.55. Kaleiçi bölgesinde kritik nokta (Node S704) için hidrolik modelden elde edilen fazla basınç profili

Verifikasyon (Doğrulama) çalışması kapsamında 1 - 6 Haziran 2016 dönemi için gerçekleştirilen hidrolik model uygulaması süresince şebekedeki **kritik basınç noktasının** yeri tespit edilmiştir. 1 - 6 Haziran 2016 tarihleri arasında SCADA

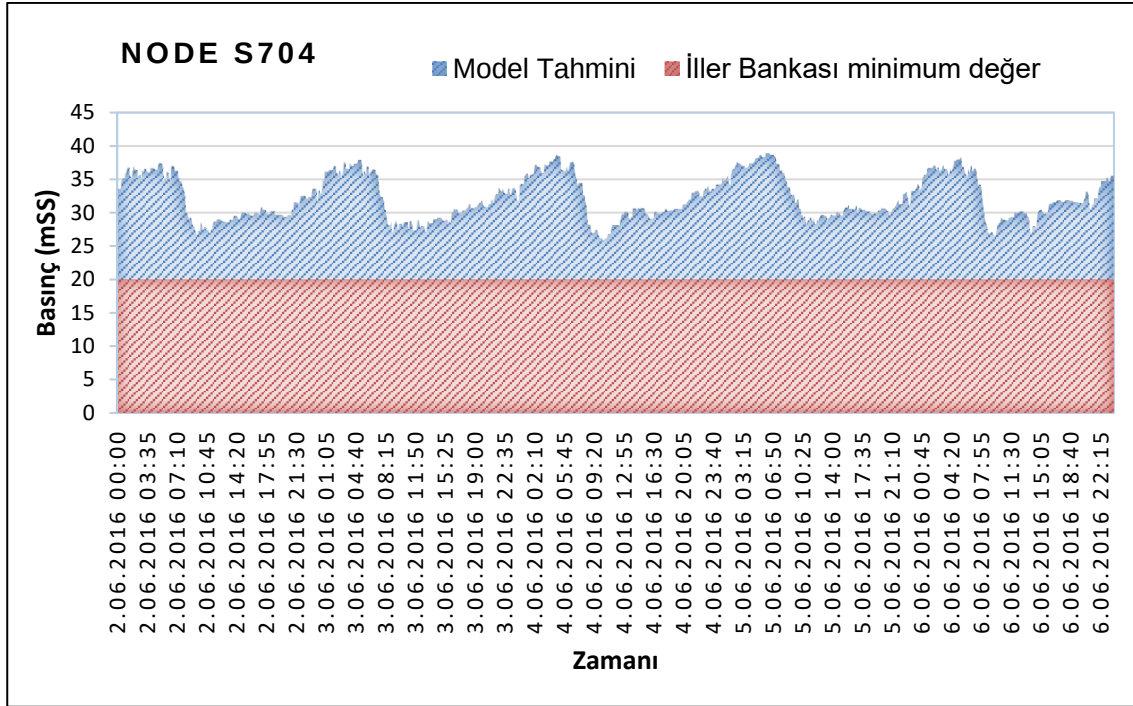
istasyonunda izlenen debi ve basınç ölçümleri Şekil 4.56'da, Verifikasyon çalışması süresince Kaleiçi bölgesinde tespit edilen kritik nokta ve minimum basınç değeri Şekil 4.57'de gösterilmektedir. Verifikasyon çalışması için Kaleiçi bölgesinde kritik nokta (Node S704) için tahmin edilen basınç profili ve İller Bankası Teknik Şartnamesi'nde belirtilen minimum basınç seviyesi Şekil 4.58'de, kritik noktadaki fazla basınç Şekil 4.59'da sunulmaktadır.



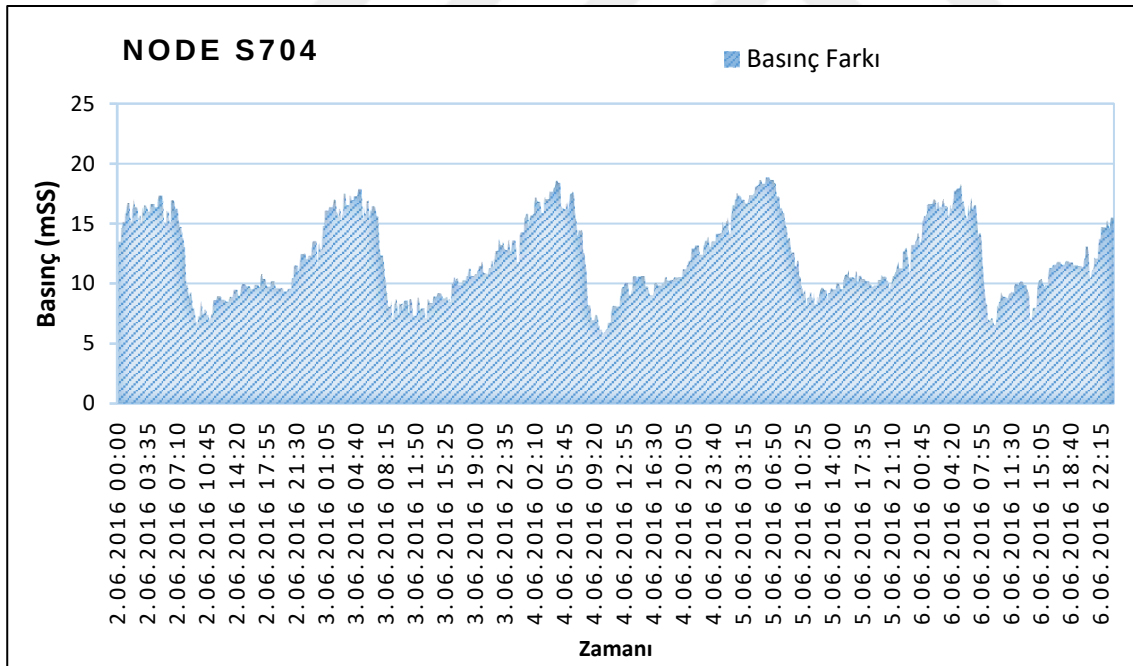
Şekil 4.56. 1-6 Haziran 2016 tarihleri arasında SCADA istasyonunda izlenen debi ve basınç ölçümleri



Şekil 4.57. Kaleiçi bölgesi verifikasyon çalışması için kritik nokta ve minimum basınç değeri tespiti (04/06/2016 saat 10:25-10:30 arası, minimum basınç = 25,67 mSS)



Şekil 4.58. Kaleiçi bölgesinde kritik nokta (Node S704) için tahmin edilen basınç profili ve İller Bankası Teknik Şartnamesi'nde belirtilen minimum basınç seviyesi (20 mSS)



Şekil 4.59. Kaleiçi bölgesinde kritik nokta (Node S704) için hidrolik modelden elde edilen fazla basınç profili

4.5. Enerji Üretimi

4.5.1. Kaleiçi bölgesinde fazla basınçtan PAT ile enerji üretimi

Tez çalışması kapsamında Antalya Kaleiçi bölgesi içme suyu dağıtım şebekesindeki fazla su basıncının düşürülmesi ve enerji üretilmesi amacı ile tam ölçekli bir PAT sistemi kurulması ve işletilmesi durumundaki enerji potansiyeli Haziran 2016 - Ekim 2017 dönemine ait veriler kullanılarak araştırılmıştır. PAT sistemi ile potansiyel enerji üretimi için gerekli verim katsayısı ve PAT debi/SCADA debi oranı için Antalya-Anfaş bölgesinde daha önce kurulan tam ölçekli PAT sistemi verileri referans alınmıştır. Buna göre PAT sistemi için minimum ve maksimum verim değerleri sırasıyla 0,50 ve 0,70 kabul edilmiş olup PAT debi/SCADA debi oranı ise 0,90 alınmıştır. İncelenen dönem içinde hidrolik model ile belirlenen fazla basınç yüksekliği miktarı Kasım-Nisan dönemi için 9 mSS, diğer aylar için 5 mSS olarak belirlenmiştir. Kaleiçi bölgesindeki su tüketimleri kış-ilkbahar döneminde (Kasım-Nisan) nispeten azalmakta olduğu için fazla basınç miktarı daha yüksek gerçekleşmektedir. Enerji hesabı için aşağıda verilen eşitlik kullanılmıştır:

$$P = Q \rho g H e_o \quad (4.1)$$

Verilen eşitlikte;

P: PAT sisteminde üretilen güç (watt)

H: PAT sistemindeki mevcut yükseklik (mSS) (Kış/ilkbahar ayları için 9 mSS, yaz ayları için 5 mSS)

Q: PAT sisteminden geçen suyun debisi (m^3/sn) (SCADA debi miktarının %90'ı alınmıştır)

ρ : suyun yoğunluğu (kg/m^3)

g: yerçekimi ivmesi (m/s^2)

e_o : güç üretim tesisinin toplam verimliliğidir.

Hesaplama dikkate alınan verim miktarları Çizelge 4.8'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.8. PAT sistemi için tanımlanan toplam verimlilik değerlerinin debi ile değişimi

Debi aralığı Q (m^3/sa)	<80	80<Q<100	100<Q<120	120<Q<140	>140
PAT sistemi verimi	50	60	70	60	50

Çizelge 4.9'da Haziran 2016 – Ekim 2017 dönemi için Kaleiçi bölgesi SCADA istasyonunda ölçülen debi ve basınç değerleri verilmiştir. Kaleiçi bölgesi için Haziran 2016 - Ekim 2017 dönemine ait debi ve basınç değerleri dikkate alınarak mevcut fazla

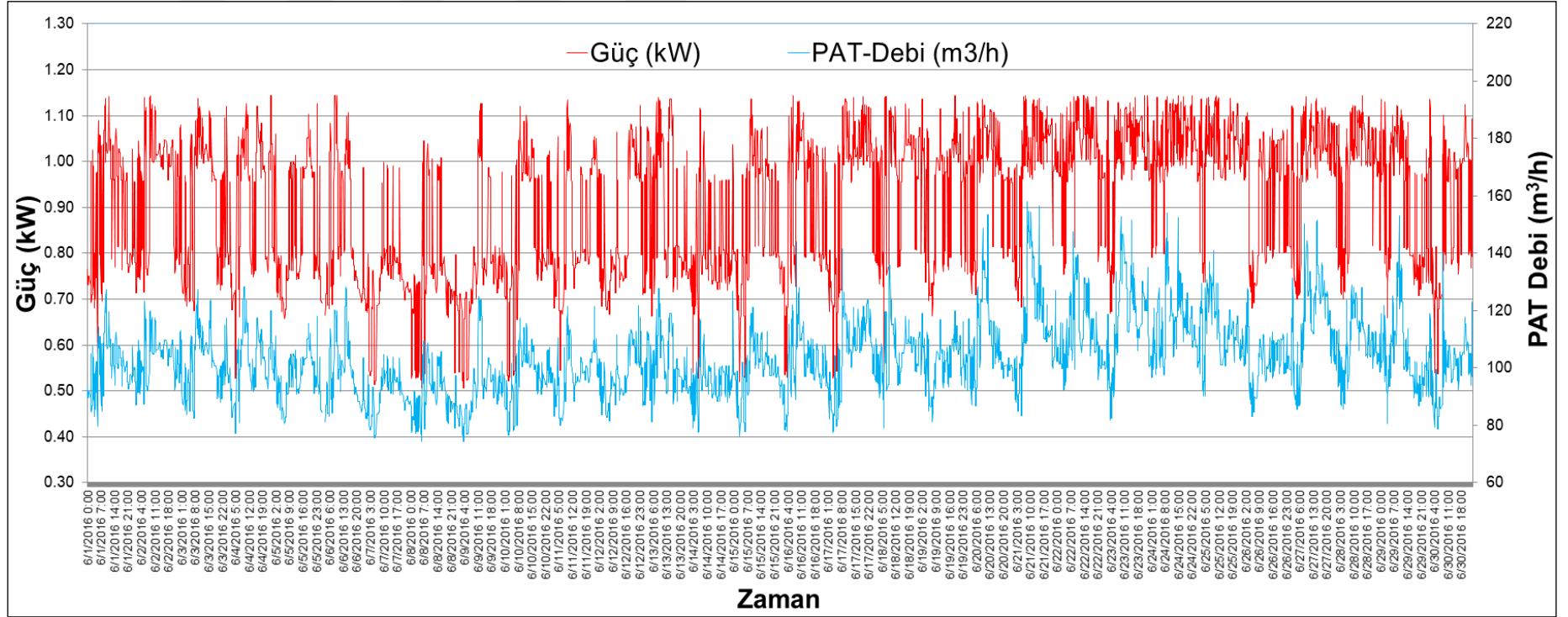
basıncın PAT sistemi ile azaltılması durumunda üretilebilecek potansiyel enerji Çizelge 4.10'da sunulmaktadır. Haziran 2016 - Ekim 2017 dönemine ait veriler kullanılarak hesaplanan potansiyel enerjinin debi değişimine bağlı olarak değişimleri Şekiller 4.60-4.76'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.9. Kaleiçi bölgesinde debi ve basınç değerlerinin değişimi

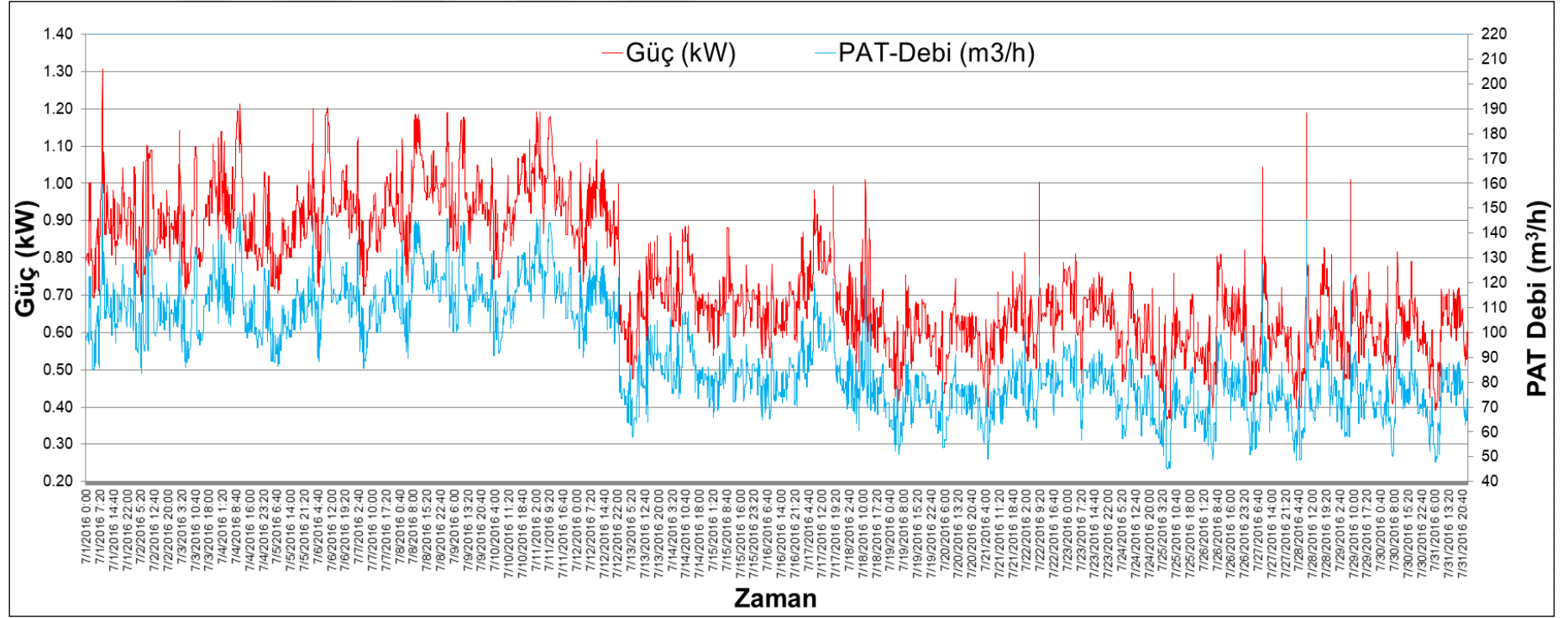
Dönem	SCADA Debi (m ³ /sa)			SCADA Basınç (mSS)		
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Minimum	Maksimum	Ortalama
Haziran 2016	82,50	175,63	114,63	28,66	43,25	36,31
Temmuz 2016	50,13	177,75	101,12	22,24	45,39	37,43
Ağustos 2016	49,13	158,63	85,92	31,72	45,49	38,45
Eylül 2016	49,50	129,70	84,65	20,81	46,21	39,47
Ekim 2016	57,50	153,63	92,10	19,48	45,70	39,17
Kasım 2016	85,00	178,63	107,89	33,05	45,80	39,88
Aralık 2016	73,75	120,88	94,87	34,37	46,10	40,90
Ocak 2017	36,34	201,05	95,85	14,38	46,21	40,60
Şubat 2017	69,18	197,20	102,24	10,81	46,41	40,29
Mart 2017	71,25	149,11	101,42	25,40	45,49	39,47
Nisan 2017	39,94	219,25	89,40	20,81	46,00	39,47
Mayıs 2017	80,88	143,63	105,42	20,50	45,49	39,37
Haziran 2017	84,25	257,04	113,69	30,40	45,19	39,07
Temmuz 2017	92,63	187,25	130,64	31,52	43,76	37,13
Ağustos 2017	98,50	192,00	143,36	30,91	44,27	37,23
Eylül 2017	109,10	191,81	143,84	29,48	43,76	37,23
Ekim 2017	104,75	178,13	137,31	25,09	43,66	37,54
Ortalama	72,61	177,14	108,49	25,27	45,19	38,77

Çizelge 4.10. Kaleiçi bölgesinde fazla basınçtan PAT sistemi ile üretilebilecek potansiyel güç

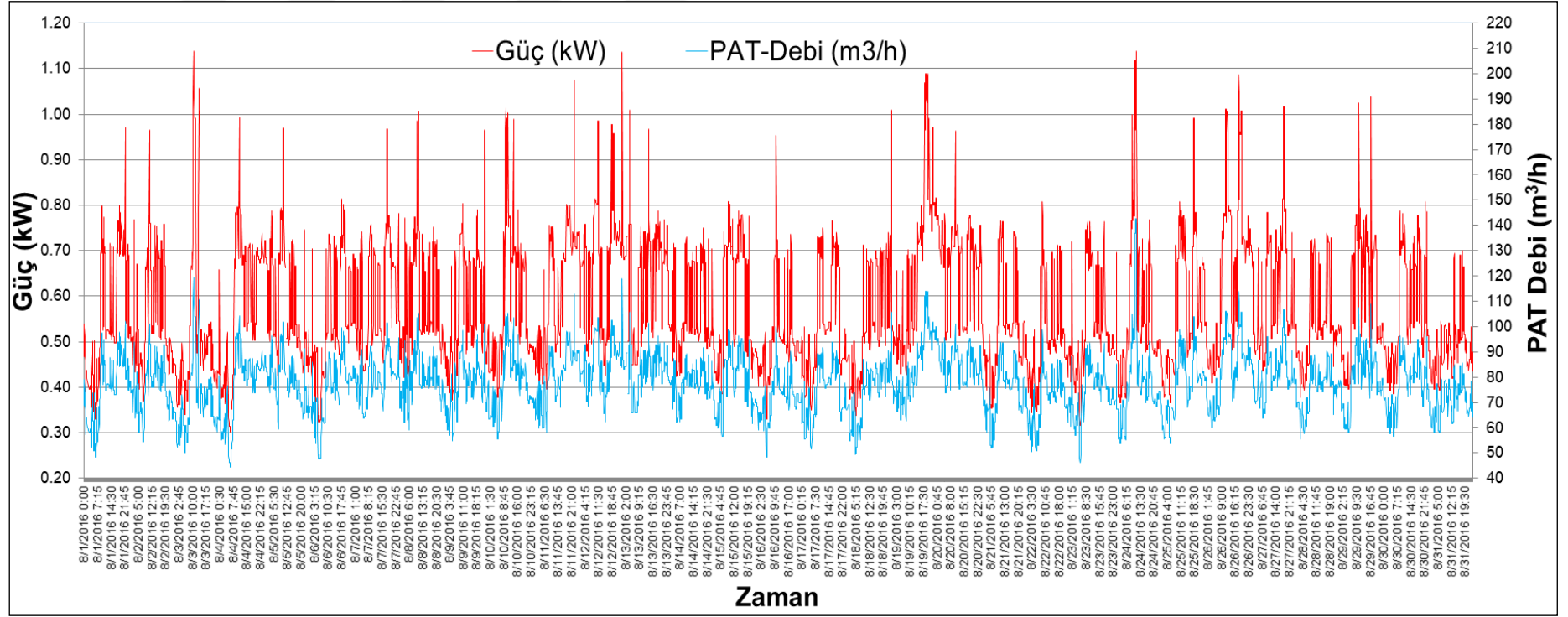
Dönemler	Potansiyel Güç (kWh)			PAT Debi (m ³ /sa)			Basınç Farkı (mSS)	Verim Ortalama
	Minimum	Maksimum	Ortalama	Minimum	Maksimum	Ortalama		
Haziran 2016	0,506	1,144	0,908	74,25	158,06	103,17	5	0,64
Temmuz 2016	0,307	1,144	0,742	45,11	159,98	91,01	5	0,58
Ağustos 2016	0,301	1,138	0,577	44,21	142,76	77,33	5	0,54
Eylül 2016	0,303	1,113	0,565	44,55	116,73	76,19	5	0,54
Ekim 2016	0,353	1,144	0,650	51,75	138,26	82,89	5	0,57
Kasım 2016	0,938	2,057	1,515	76,50	160,76	97,10	9	0,63
Aralık 2016	0,814	1,868	1,216	66,38	108,79	85,39	9	0,58
Ocak 2017	0,401	2,219	1,241	32,70	180,95	86,27	9	0,58
Şubat 2017	0,763	2,176	1,378	62,26	177,48	92,02	9	0,61
Mart 2017	0,786	2,059	1,367	64,13	134,20	91,28	9	0,60
Nisan 2017	0,441	2,420	1,107	35,94	197,33	80,46	9	0,58
Mayıs 2017	0,496	1,144	0,807	72,79	129,26	94,88	5	0,62
Haziran 2017	0,517	1,576	0,914	75,83	231,33	102,34	5	0,65
Temmuz 2017	0,681	1,148	1,033	83,36	168,53	117,58	5	0,65
Ağustos 2017	0,725	1,177	1,054	88,65	172,80	129,03	5	0,60
Eylül 2017	0,803	1,176	1,053	98,19	172,63	129,46	5	0,60
Ekim 2017	0,336	1,144	1,050	49,35	160,31	123,44	5	0,63
Ortalama	0,567	1,520	1,010	62,70	159,42	97,63		0,60



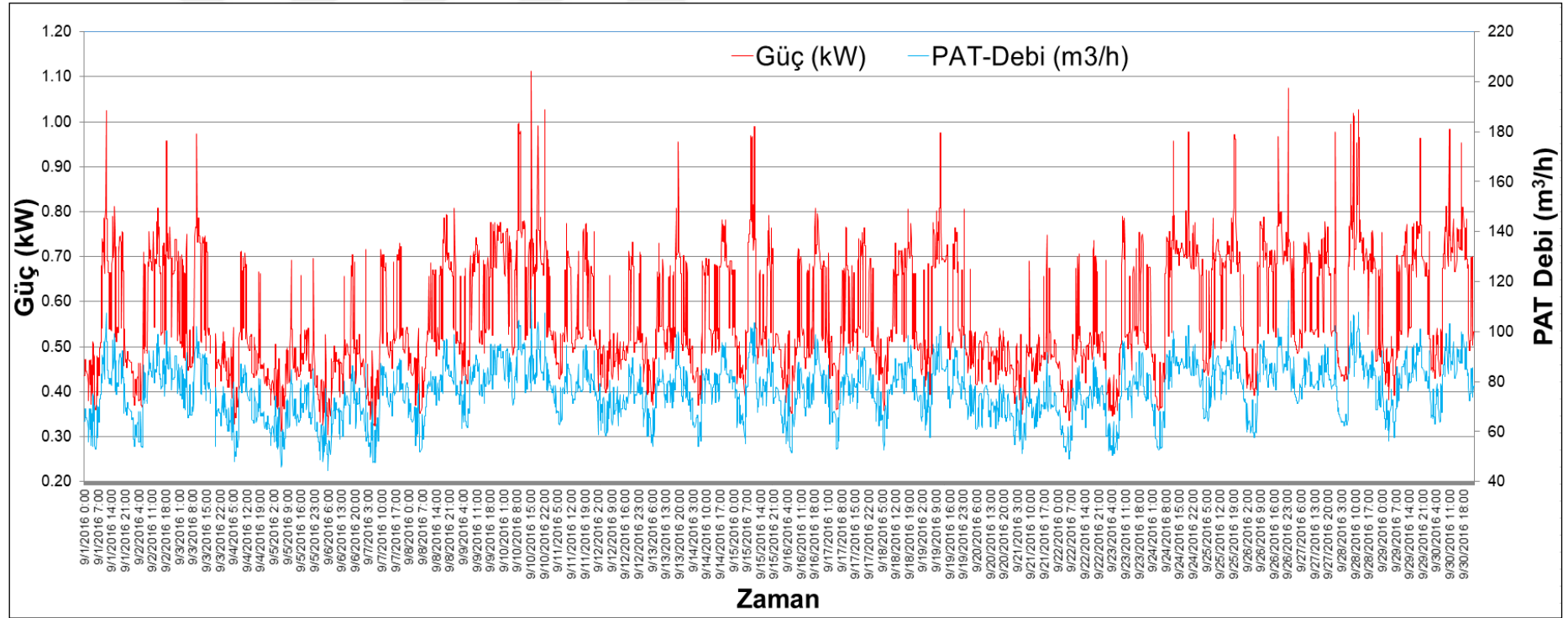
Şekil 4.60. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Haziran 2016 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi



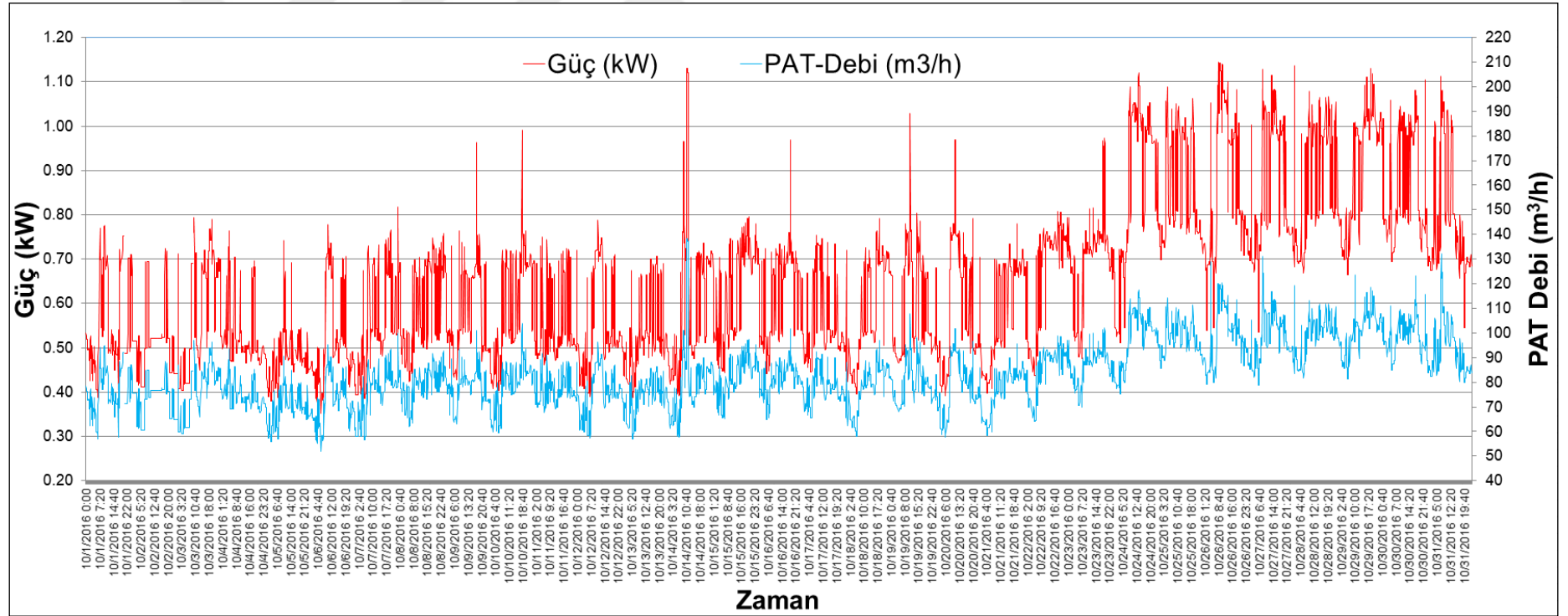
Şekil 4.61. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Temmuz 2016 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi



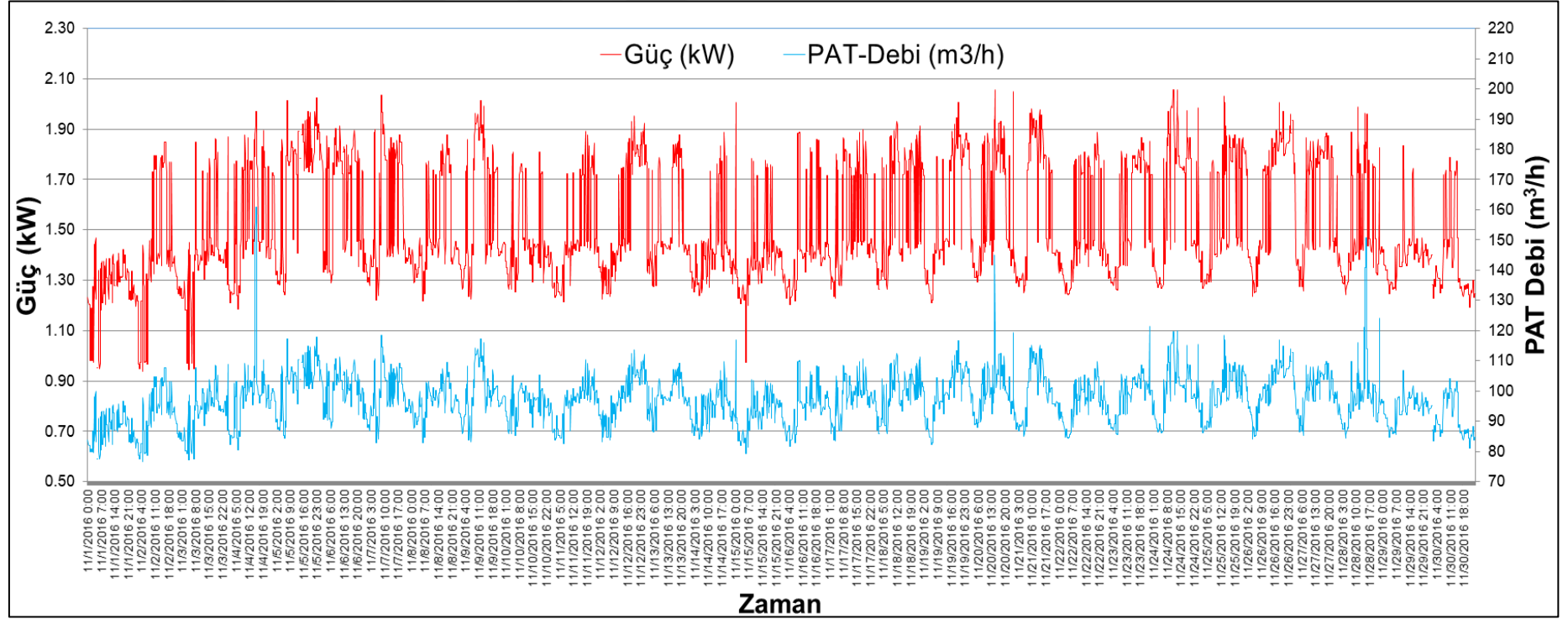
Şekil 4.62. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Ağustos 2016 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi



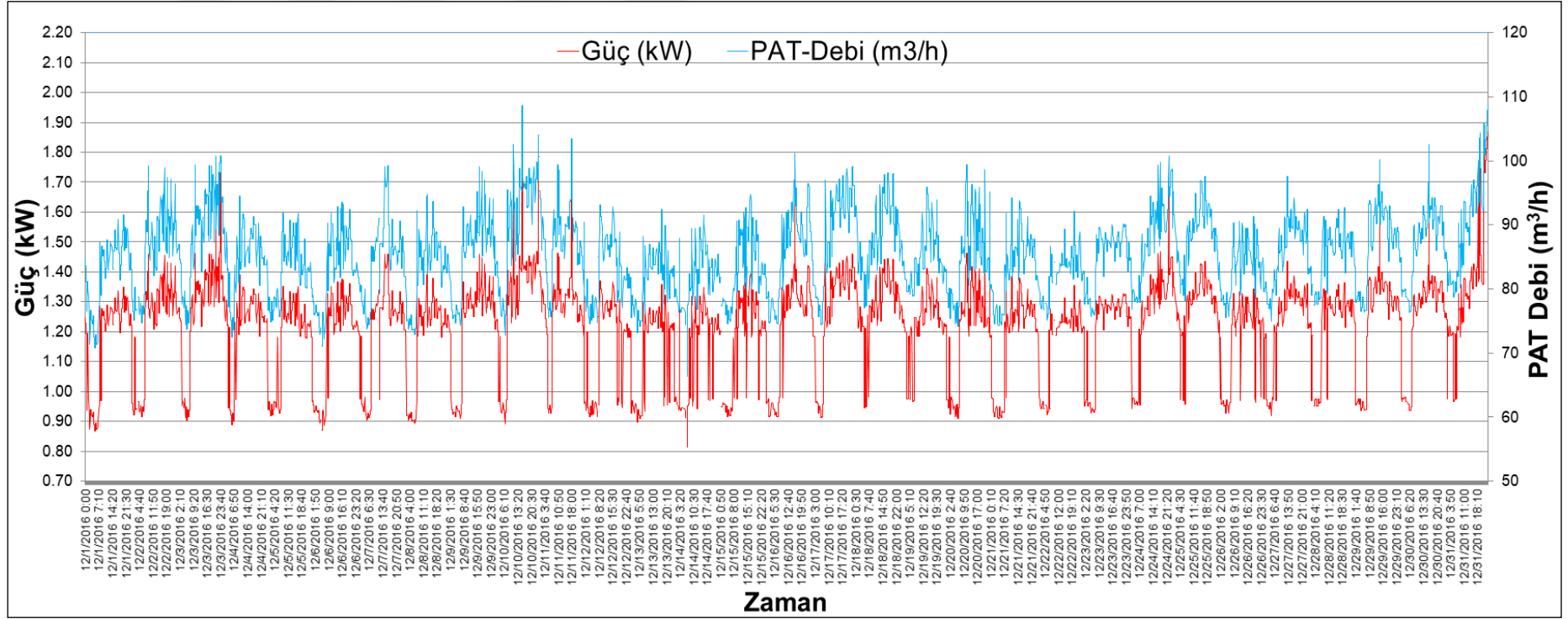
Şekil 4.63. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Eylül 2016 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi



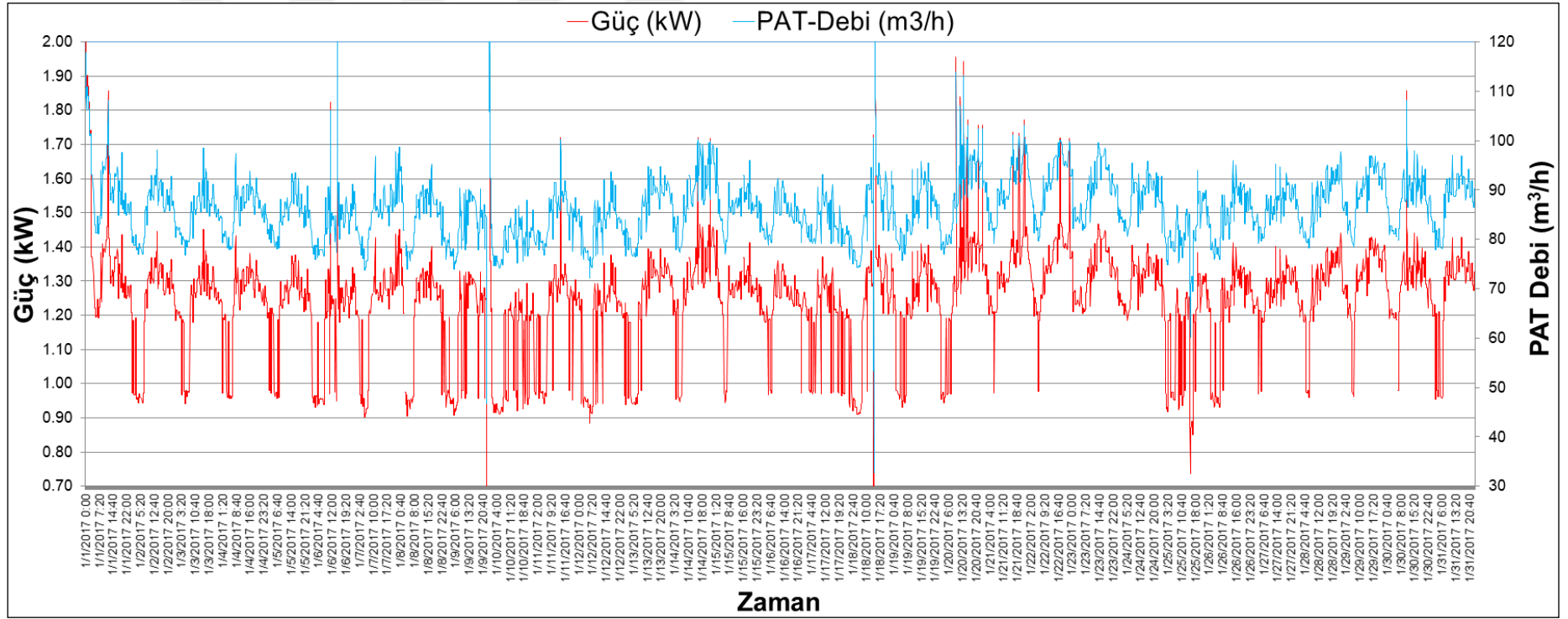
Şekil 4.64. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Ekim 2016 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi



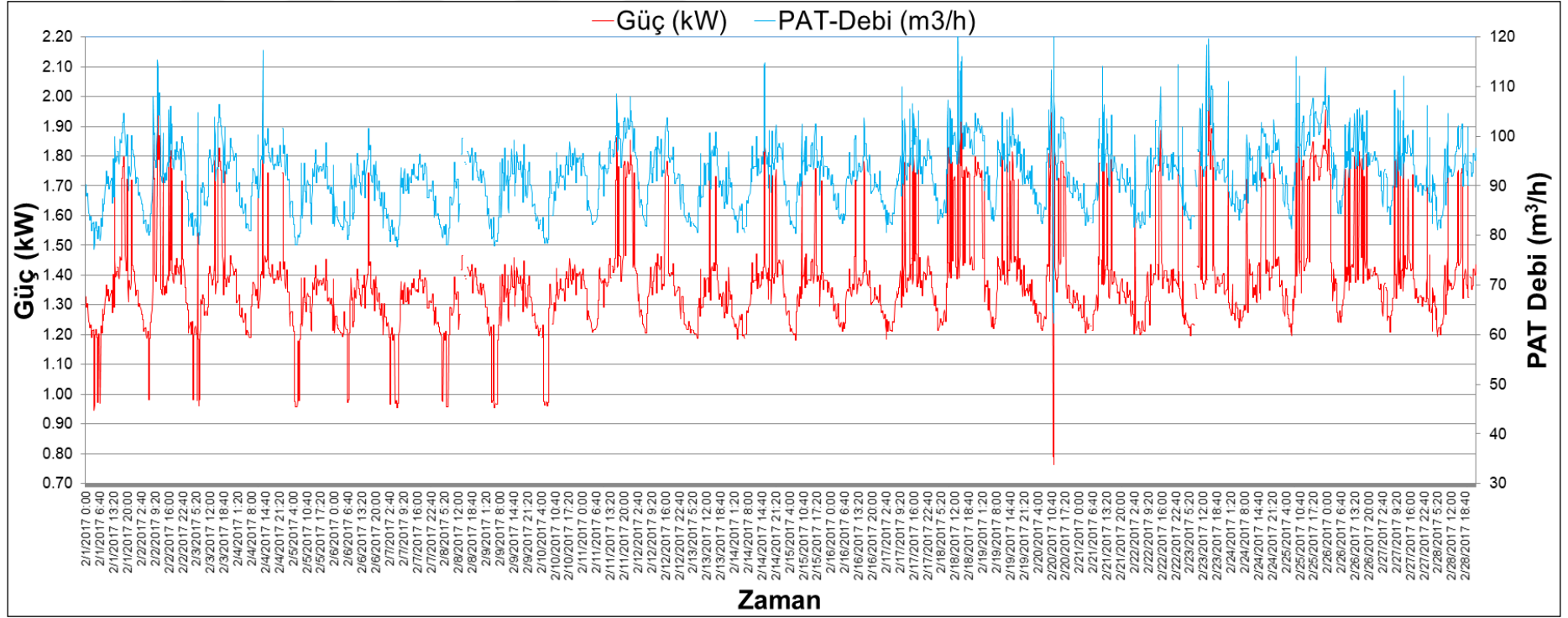
Şekil 4.65. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Kasım 2016 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi



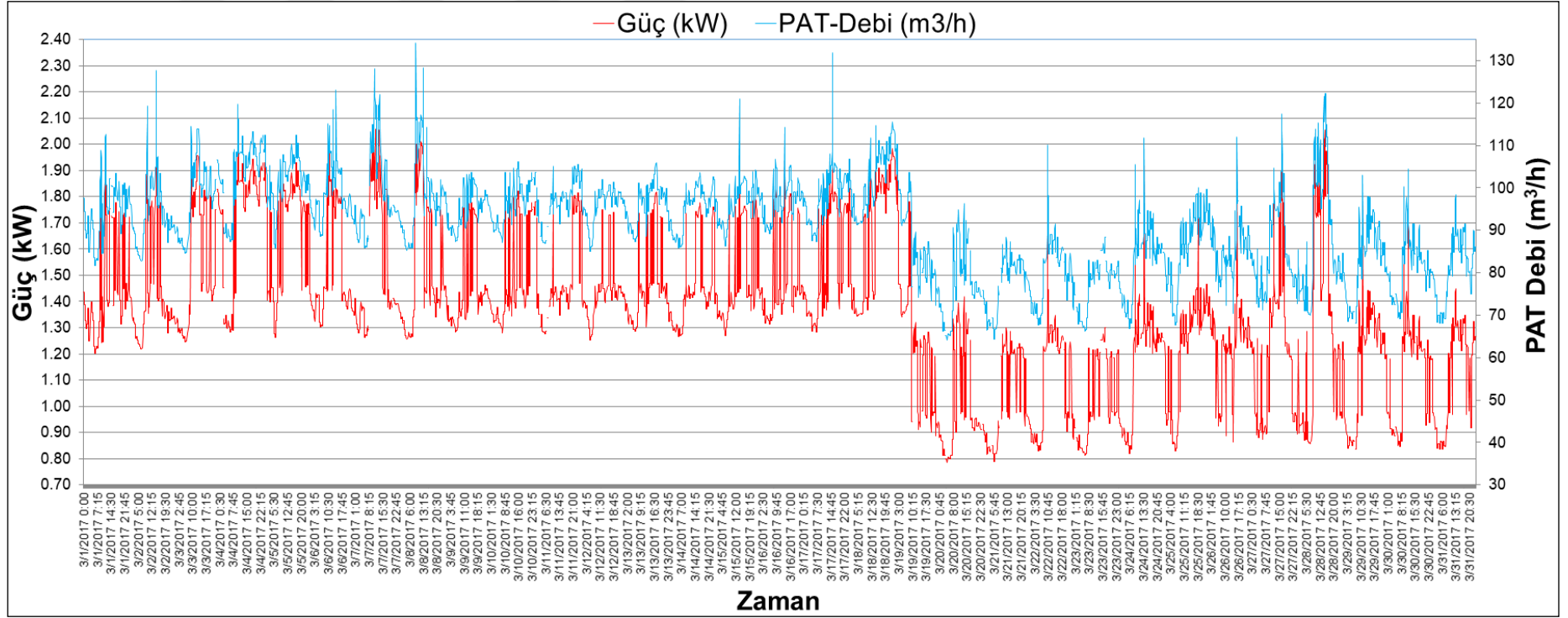
Şekil 4.66. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Aralık 2016 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi



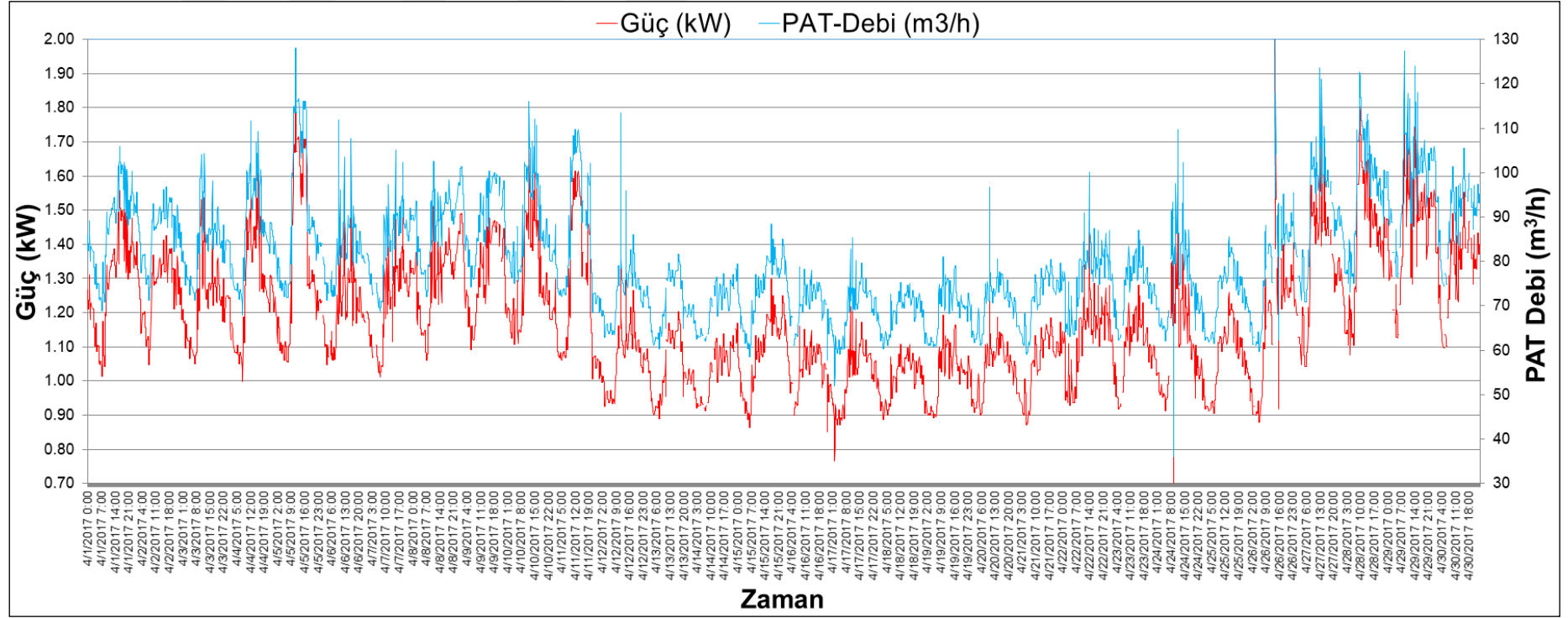
Şekil 4.67. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Ocak 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi



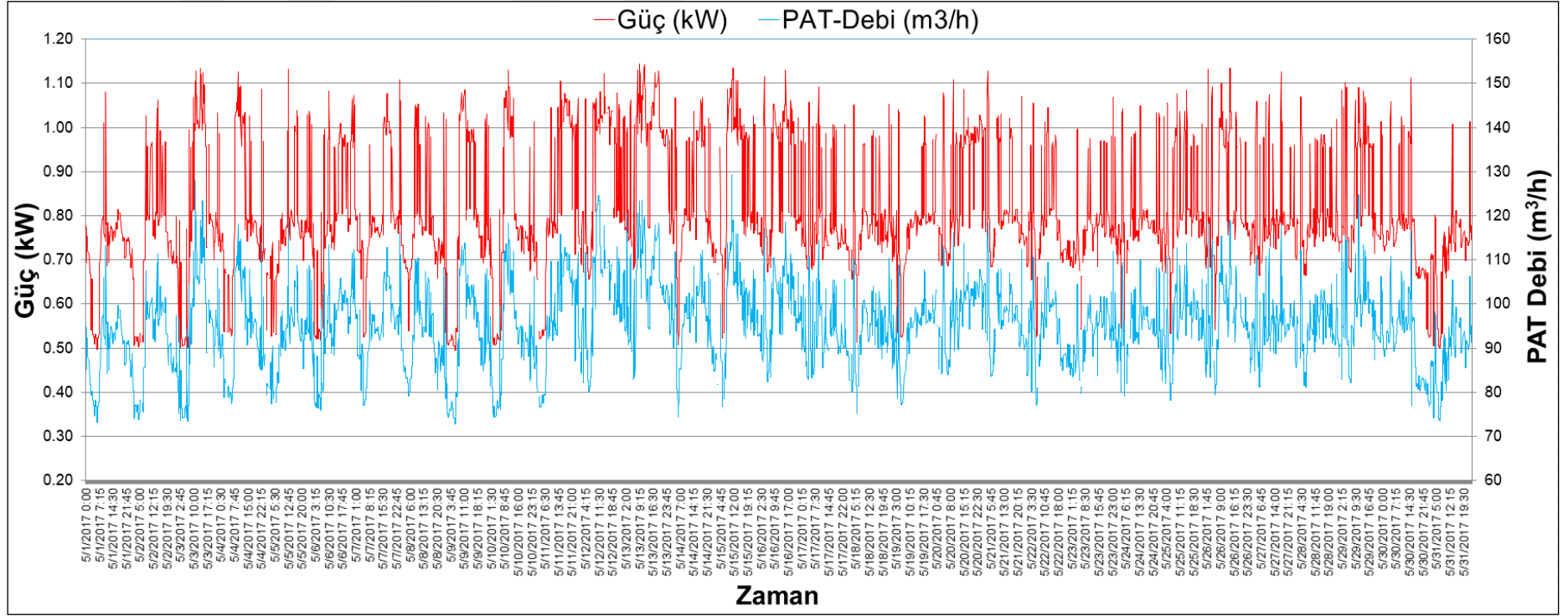
Şekil 4.68. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Şubat 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi



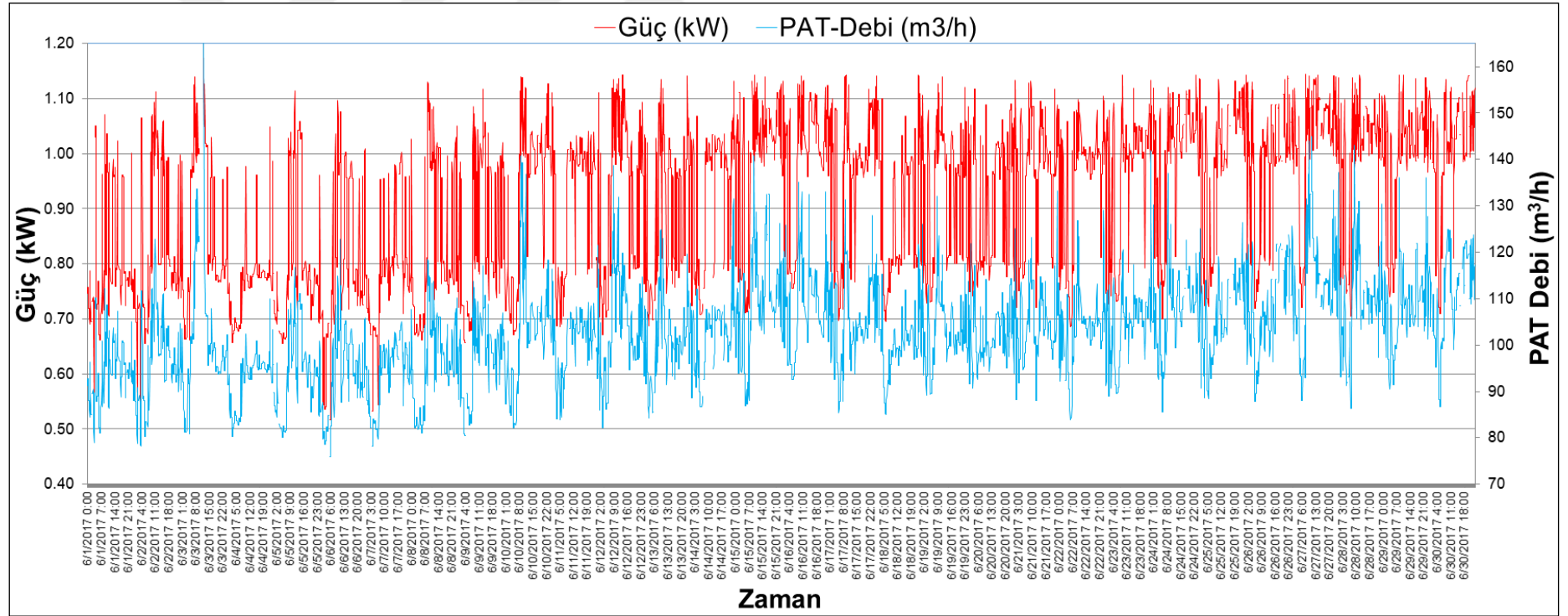
Şekil 4.69. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Mart 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi



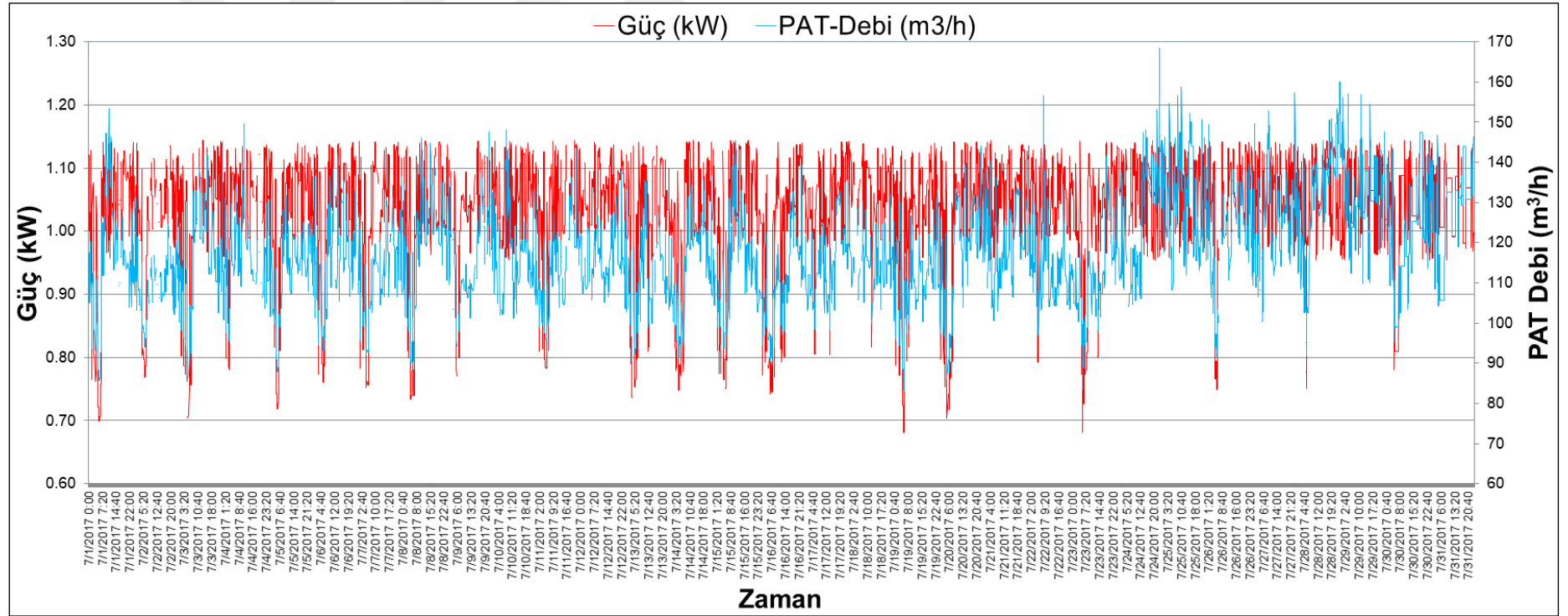
Şekil 4.70. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Nisan 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi



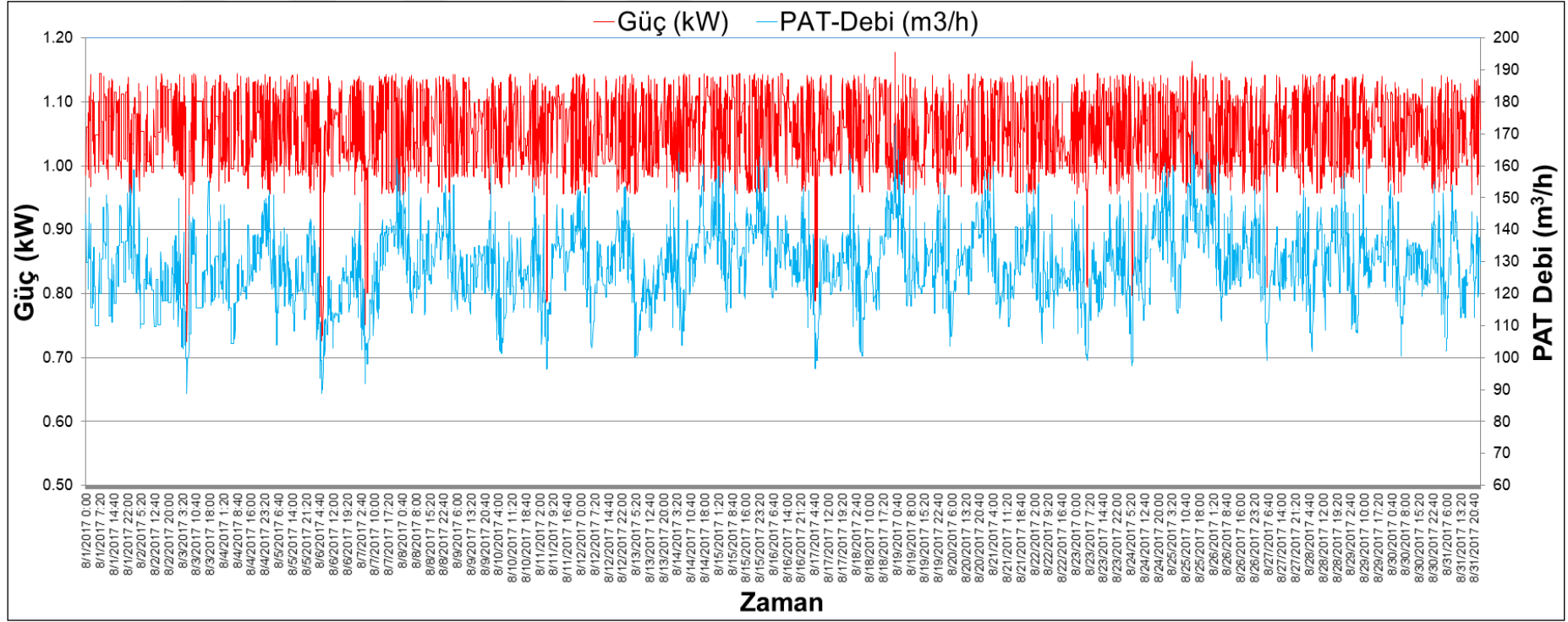
Şekil 4.71. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Mayıs 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi



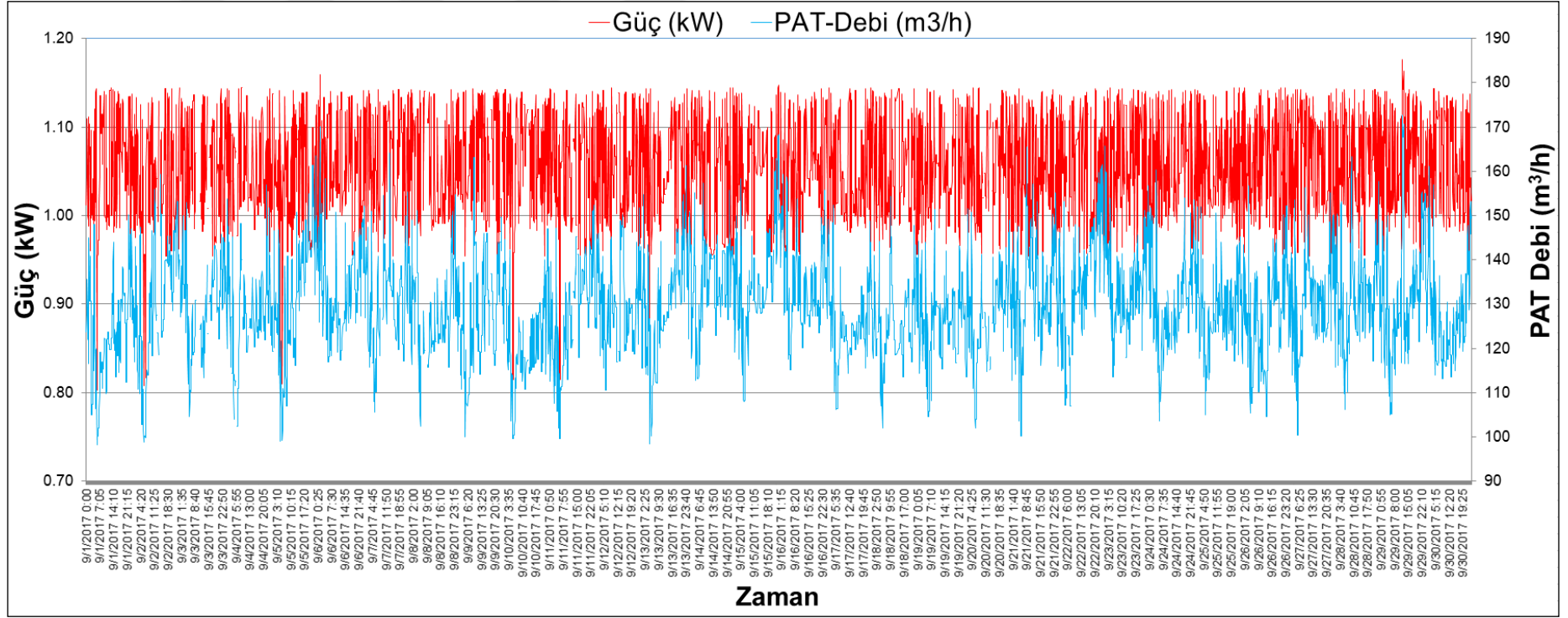
Şekil 4.72. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Haziran 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi



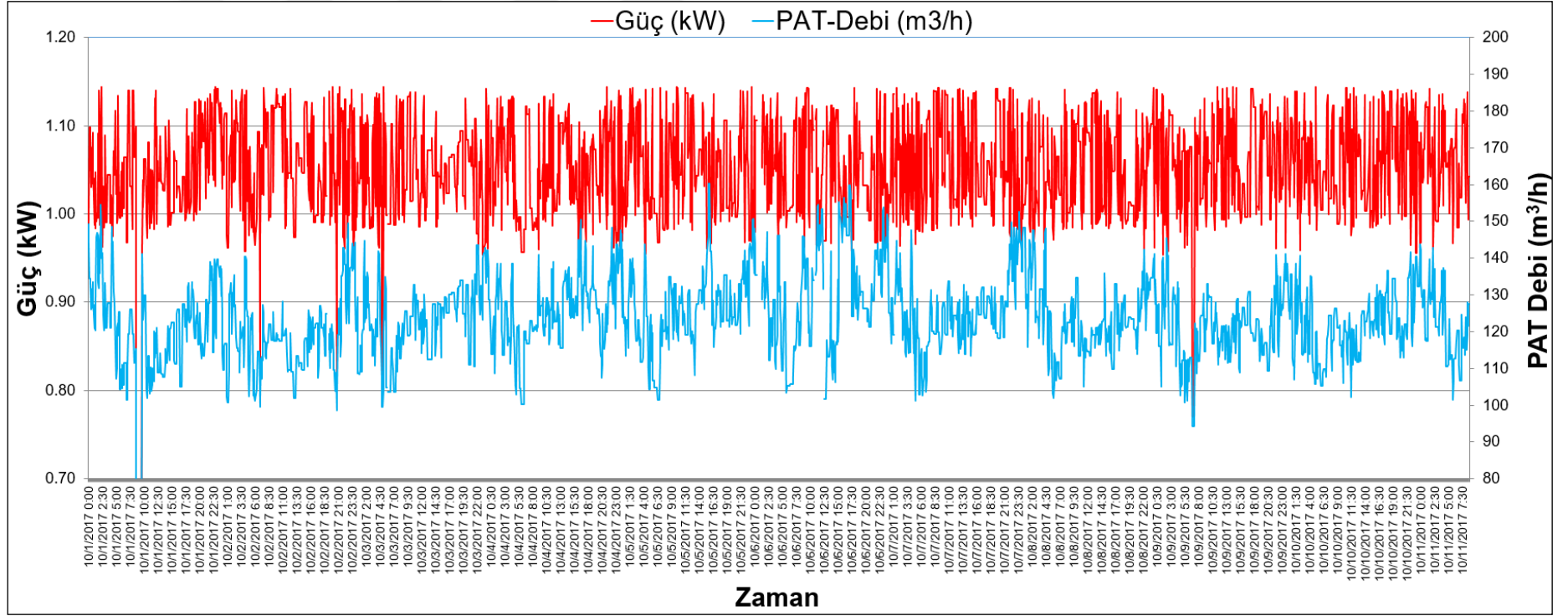
Şekil 4.73. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Temmuz 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi



Şekil 4.74. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Ağustos 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi

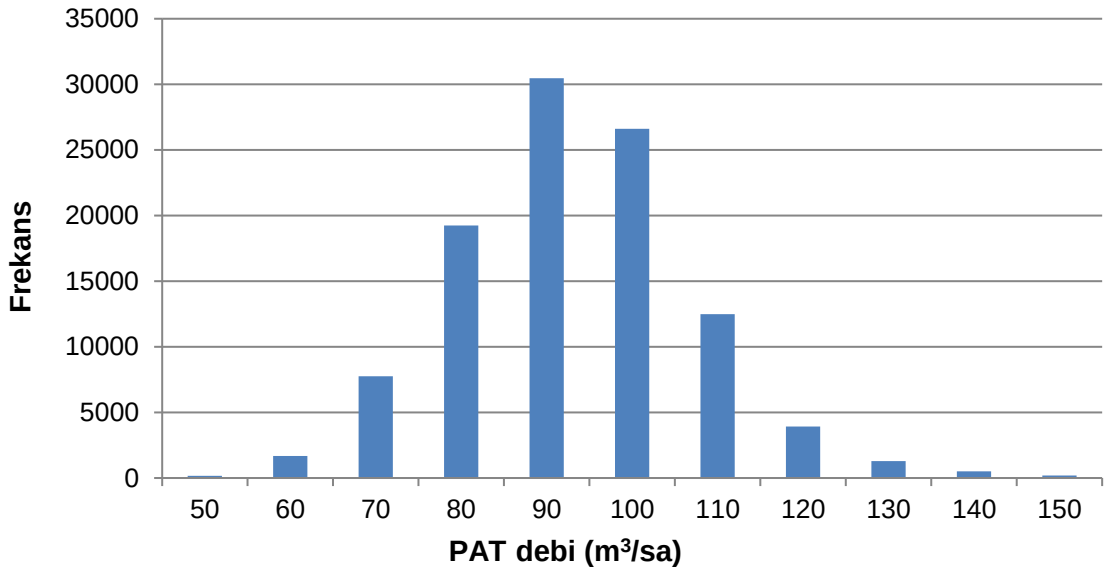


Şekil 4.75. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Eylül 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi

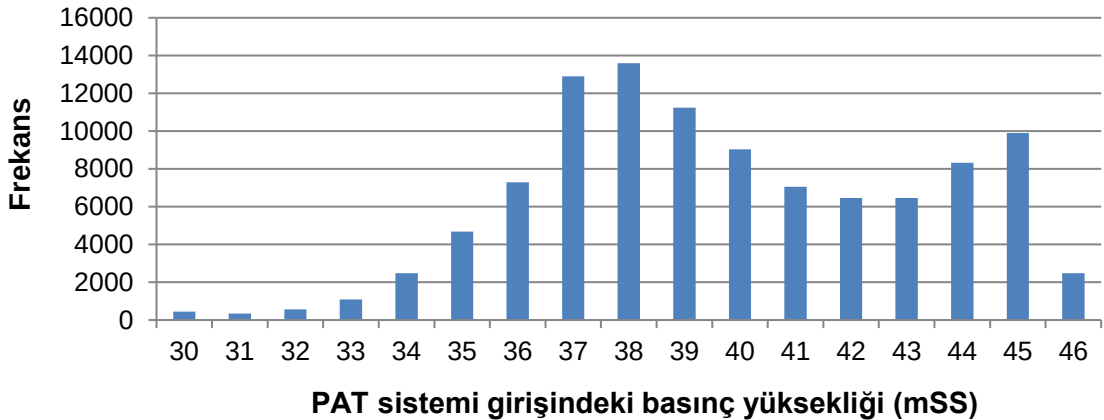


Şekil 4.76. Kaleiçi bölgesi PAT sistemi için Ekim 2017 dönemi verileri ile hesaplanan potansiyel güç üretiminin değişimi

Kaleiçi bölgesine yönelik Haziran 2016 - Ekim 2017 dönemine ait veriler ile gerçekleştirilen çalışmada şebekedeki fazla basınç yüksekliğinin kış/ılkbahar ayları için 9 mSS, yaz ayları için de 5 mSS olması nedeni ile olası bir PAT sistemi kurulması halinde elde edilebilecek güç değerleri 0,3 ila 2,4 kW arasında değişim göstermektedir. Üretilen güç için önemli olan iki parametre PAT sisteminden geçen debi ve fazla basınç yüksekliğidir. Kaleiçi bölgesi için Haziran 2016 - Ekim 2017 dönemine ait SCADA debileri minimum 36 m³/sa ile maksimum 257 m³/sa değerleri arasında değişim göstermekte olup izlenen dönem için ortalama debi yaklaşık 109 m³/sa'tır. Kaleiçi bölgesi için Haziran 2016 - Ekim 2017 dönemine ait veriler ile hesaplanan ortalama güç üretimi ise yaklaşık 1 kWh, ortalama verim ise 0,60 olarak belirlenmiştir. Haziran 2016-Mayıs 2017 dönemini içine alan bir yıllık dönemde PAT sisteminden geçmesi beklenen debilerin frekans dağılımı Şekil 4.77'de sunulmuştur. Buna göre, PAT sisteminden geçen debinin %92,52 oranında 70-110 m³/sa aralığında olması beklenmektedir. Benzer şekilde PAT sistemi girişindeki basınç yüksekliği değerlerinin frekans dağılımı Şekil 4.78'de sunulmuştur.

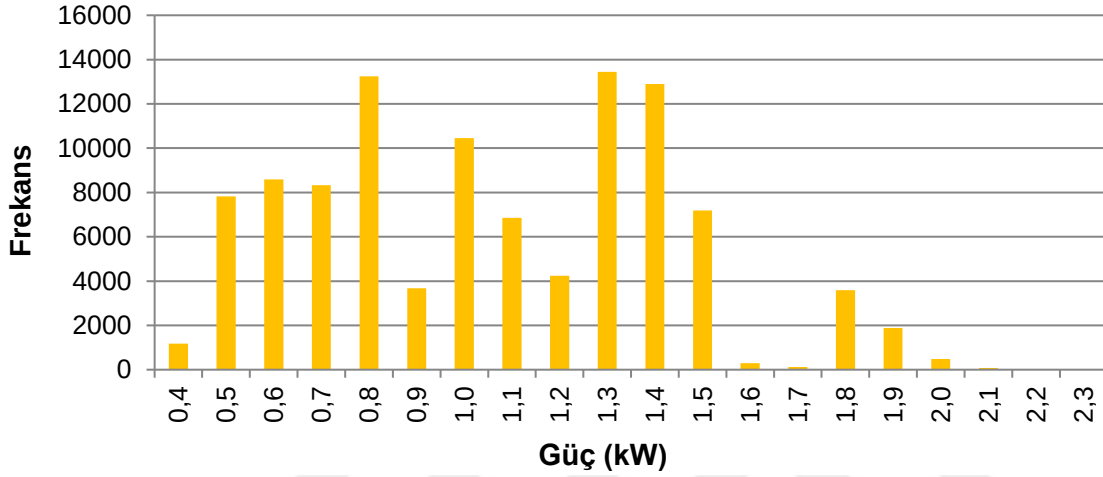


Şekil 4.77. PAT sisteminden geçmesi beklenen debilerin frekans dağılımı



Şekil 4.78. PAT sistemi girişindeki basınç yüksekliği değerlerinin frekans dağılımı

PAT sistemi girişindeki basınç yüksekliği değerlerinin %92,88 oranında 35 ila 45 mSS arasında olduğu görülmektedir. Haziran 2016-Mayıs 2017 dönemini içine alan bir yıllık dönemde PAT sisteminde üretilebilecek potansiyel gücün frekans dağılımı Şekil 4.79'da sunulmuştur. Bu dağılıma göre üretilen gücün %92,7 oranında 0,5 ila 1,5 kW arasında olduğu görülmektedir. Kaleiçi bölgesinde PAT sisteminin kurulmasına ilişkin nihai kararın alınabilmesi için potansiyel güç değerleri ile birlikte sistemin işletilmesi sonucunda elde edilebilecek su kayıpları tasarrufunun da ortaya konulması gereklidir. Bu veriler ışığında fayda-maliyet analizi yapılarak sistemin geri ödeme süresi hesaplanmalıdır.



Şekil 4.79. PAT sisteminde üretilebilecek potansiyel gücün frekans dağılımı

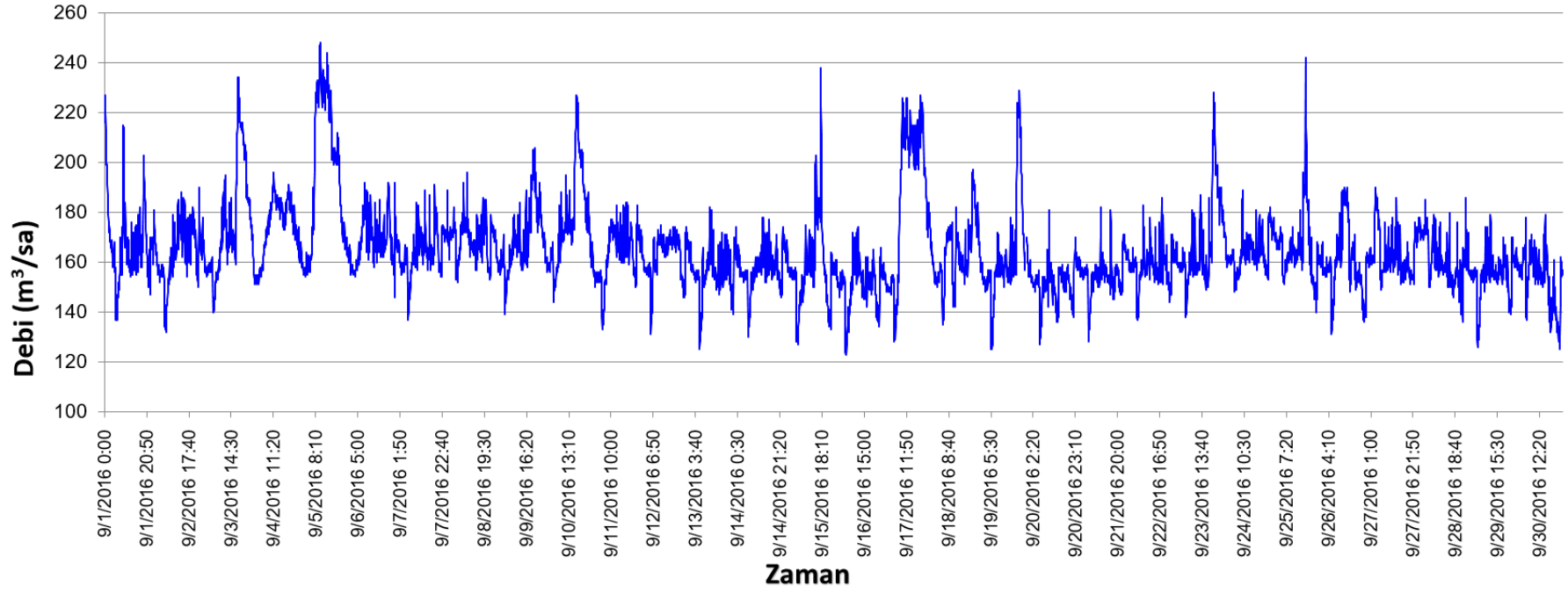
4.6. Anfaş Bölgesindeki PAT Sistemine ait Verilerin Değerlendirilmesi

Anfaş-Expo içme suyu şebekesinde bypass hattı üzerinde kurulan ve 26 Ocak 2016 tarihinde devreye alınan PAT sistemi ile Türkiye’de ilk kez içme suyu şebekesinde enerji kazanımı uygulaması gerçekleştirilmiştir. Haziran 2016 - Mayıs 2017 dönemini içine alan 1 yıllık süre için performansı sahada sürekli izlenmiştir. Tez çalışması kapsamında da 1 yıllık işletim süresine ait işletim verileri değerlendirilerek sunulmuştur. PAT sistemi için 1 Haziran 2016 – 30 Mayıs 2017 dönemine ait ortalama işletim verileri Çizelge 4.11’de verilmiştir. Bir yıllık işletim süresi içinde PAT sistemi ile azaltılan ortalama basınç 8,2 mSS (0,80 bar) (tasarım için maksimum basınç farkı 10,2 mSS (1 bar) olarak belirlenmiştir), PAT sisteminden geçen ortalama debi yaklaşık 164 m³/sa, sistem içinde PAT sisteminden geçen debinin toplam debiye oranı %93 (debinin kalan kısmı PRV bulunan alt borudan geçmektedir), PAT sisteminde üretilen ortalama güç 2,34 kWh ve PAT sistemi için ortalama verim %63 olarak izlenmiştir. Eylül 2016 döneminde PAT sisteminden geçen debinin zamansal değişimi Şekil 4.80’de, PAT sisteminde üretilen gücün zamansal değişimi Şekil 4.81’de, PAT sisteminde elde edilen verimin zamansal değişimi Şekil 4.82’de ve PAT sisteminde elde edilen verim değerlerinin frekans dağılımı Şekil 4.83’te sunulmaktadır. Eylül 2016 döneminde PAT sisteminden geçen debi 123 – 248 m³/sa, SCADA sisteminde ölçülen toplam debi 123 – 335 m³/sa aralığında ölçülmüş olup, PAT sisteminden geçen debinin SCADA sisteminde ölçülen toplam debiye oranı 0,68 – 1,00 aralığında hesaplanmıştır. Eylül 2016 döneminde PAT sisteminde üretilen güç 0,35 – 5,92 kWh aralığında izlenmiş, minimum verim %16, ortalama verim %59 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.83’te sunulan verim değerlerinin

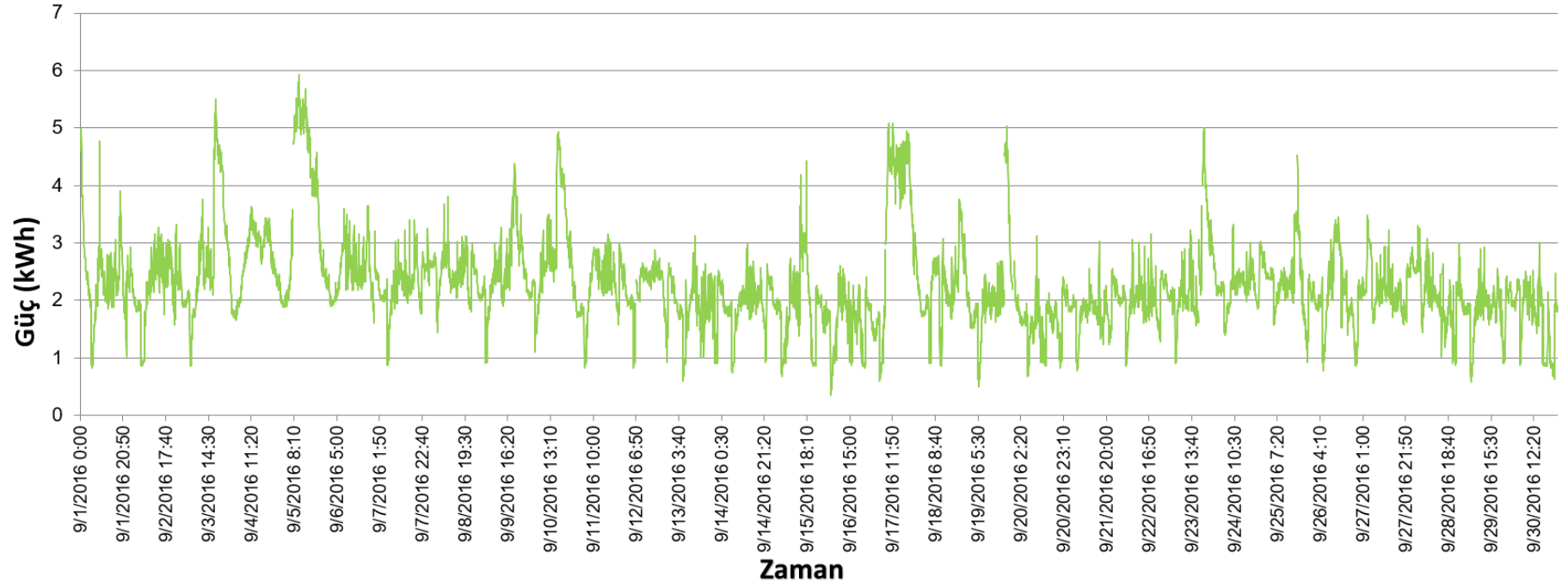
frekans dağılımı incelendiğinde, en yüksek frekans verisinin %60 verim için elde edildiği görülmektedir.

Çizelge 4.11. Anfaş-Expo uygulama sahasında yer alan PAT sistemi için 1 Haziran 2016 – 30 Mayıs 2017 dönemine ait ortalama işletim verileri

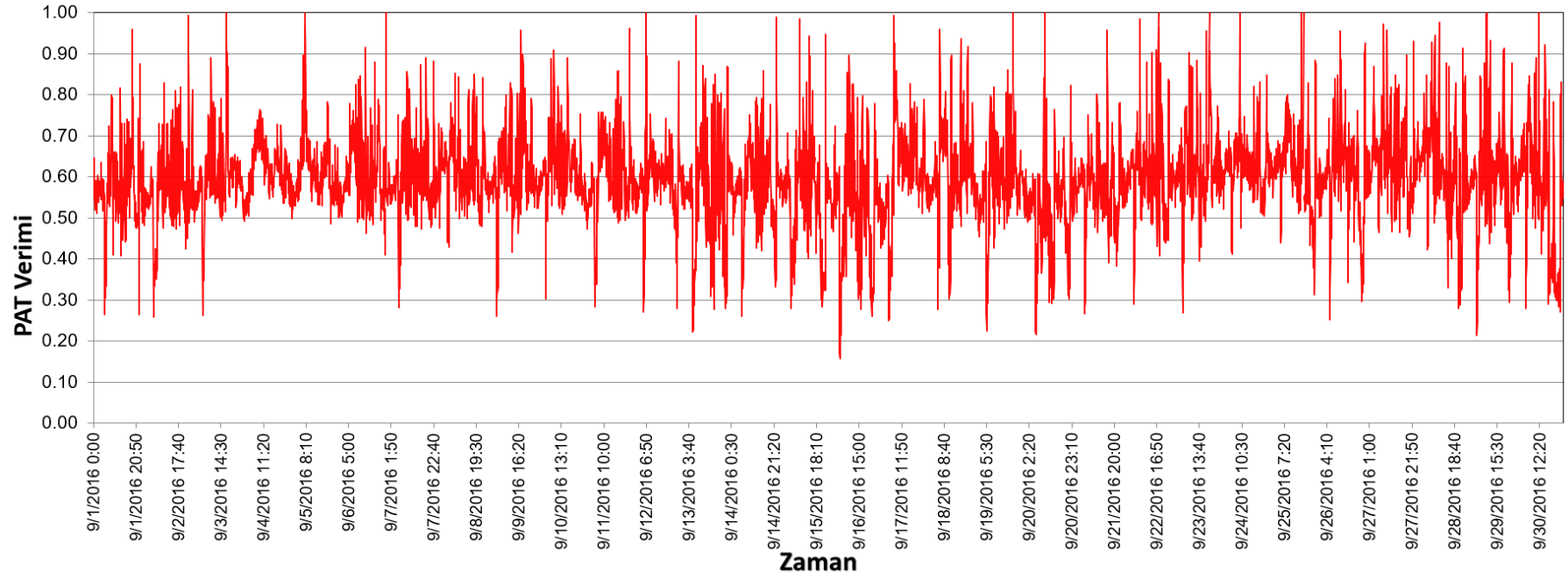
Aylar	Basınç Farkı (mSS)	PAT Debi (m ³ /sa)	SCADA Debi (m ³ /sa)	Debi oranı	Güç (kWh)	Verim (%)
Haziran 2016	8,36	169,78	186,30	0,91	2,51	63
Temmuz 2016	8,98	170,27	185,00	0,92	2,54	60
Ağustos 2016	9,79	171,54	183,90	0,93	2,64	57
Eylül 2016	8,36	164,53	174,95	0,93	2,27	59
Ekim 2016	7,34	160,29	167,09	0,95	2,07	63
Kasım 2016	7,24	146,69	155,31	0,94	1,79	60
Aralık 2016	7,34	158,15	170,00	0,93	2,25	69
Ocak 2017	7,75	167,12	180,68	0,93	2,61	73
Şubat 2017	7,55	160,76	172,68	0,93	2,36	70
Mart 2017	7,96	165,71	183,44	0,91	2,56	69
Nisan 2017	8,36	167,38	187,20	0,89	2,62	68
Mayıs 2017	9,18	175,26	200,57	0,87	2,97	67
Ortalama	8,19	163,55	175,40	0,93	2,34	63



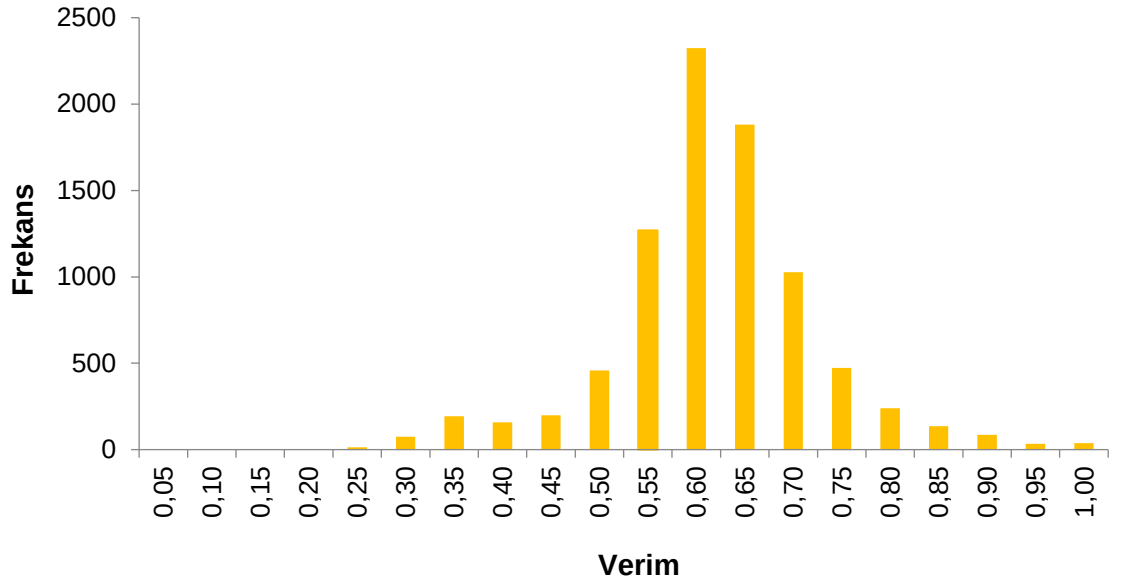
Şekil 4.80. Eylül 2016 döneminde PAT sisteminden geçen debinin zamansal değişimi



Şekil 4.81. Eylül 2016 döneminde PAT sisteminde üretilen gücün zamansal değişimi



Şekil 4.82. Eylül 2016 döneminde PAT sisteminde elde edilen verimin zamansal değişimi



şekil 4.83. Eylöl 2016 dñneminde PAT sisteminde elde edilen verim değerlerinin frekans dağılımı

5. SONUÇLAR

İçme suyu dağıtım şebekelerinde çok düşük ve yüksek su basıncı seviyeleri işletim açısından uygun değildir. Düşük basınç seviyelerinde su abonelere ulaşamamakta ve müşteri memnuniyetsizliği yaşatmaktadır. İçme suyu dağıtım şebekelerinde gözlenen fazla basınç ise su kayıplarının artmasına, şebeke elemanlarının daha kısa sürede yıpranarak bozulmasına, malzeme ve ekipmanların ömrünün kısalmasına ve şebeke arızalarının (boru patlama sıklığının artması vb.) artmasına sebep olmaktadır. Tüm bu olumsuzluklar ise önemli düzeyde onarım masraflarına ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu tür zararları en aza indirmek amacıyla su iletim hatları için genellikle maksimum su basıncı 100 mSS ile sınırlandırılmakta, içme suyu dağıtım şebekelerinde ise maksimum 60 mSS basınca izin verilmektedir. Ülkemizde içme suyu dağıtım şebekelerinde İller Bankası Şartnamesi'ne göre nüfusu 50.000'e kadar olan küçük şehirlerde minimum işletme basıncı 20 mSS, 50.000'den fazla olan şehirlerde ise 30 mSS olmalıdır. İller Bankası Şartnamesi'ne göre izin verilen maksimum basınç ise 60 mSS olacak şekilde sınırlandırılmıştır (İlbank 2013).

İçme suyu dağıtım şebekelerinde fazla basınçtan enerji kazanımı potansiyelini incelemek amacıyla mevcut durum sürekli olarak izlenerek debi ve su basıncı verilerinin değerlendirilmesi önemlidir. Bir içme suyu dağıtım şebekesinde güç üretim potansiyelinin araştırılması için ilk olarak şebekedeki basınç seviyeleri hidrolik model uygulaması ile incelenmelidir. Bu uygulama için öncelikle şebekenin fiziki özellikleri ve diğer ilgili veri setleri (boru uzunlukları, çaplar, düğüm noktalarının koordinatları vb.) tanımlanmalıdır. Hidrolik model uygulaması ile şebekedeki basınç değerlerinin zamansal ve mekânsal değişimleri tespit edilebilmektedir. Model aracılığıyla, şebekede tasarım açısından sağlanması zorunlu olan maksimum ve minimum basınç seviyeleri için kontroller yapılabilmekte, işletim açısından optimum işletim basıncı seviyeleri belirlenebilmekte ve fazla basınç miktarı tespit edilmektedir.

İçme suyu şebekelerinde hidrolik model uygulaması yapılırken, hidrolik model içinde yer alan veri girdilerinin en doğru şekilde tanımlanması gereklidir. Bunun için şebekedeki su tüketimleri düzenli ve sürekli olarak ölçülmelidir. Modelin kalibrasyon aşamasında boru pürüzlülük katsayısı için en ideal değer bulunmalıdır. Modelden elde edilen tahminlerin saha ölçümleri ile karşılaştırılması ve model tahmin hatasının belirlenmesi zorunludur. Bu amaçla da model kalibrasyonu ve verifikasyonu dönemleri için şebekede basınç ölçümlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

İçme suyu dağıtım şebekelerinde hidrolik modelleme çalışması, özellikle gelişmiş ülkeler için yaygın bir uygulamadır. Bu amaçla en yaygın şekilde kullanılan model ise Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı tarafından geliştirilen US-EPA EPANET hidrolik modelidir.

İçme suyu temin sistemlerinde oluşan fazla basıncı düşürmek amacıyla basınç kırıcı vanalar, maslak veya hazne yapıları kullanılmaktadır. Şebekelerde yaygın olarak gözlenen fazla su basıncının kontrol edilmesi ve yönetimi şebeke işletimi açısından çok önemlidir. Şebekedeki basınç düzeyleri sürekli optimum seviyede tutularak, fazla basıncın oluşması önlenmelidir. Şebekelerde fazla basıncı düşürmek için yaygın olarak PRV'ler kullanılmaktadır. Son dönemde PAT sistemleri kullanılarak hem fazla basıncın düşürülmesi, hem de enerji üretimi potansiyeli önemli bir alternatif olarak dikkat

çekmektedir. Türbin veya PAT sistemleri ile enerji üretiminde kırılan basınç düzeyi, debi ve kullanılan türbin veya PAT sisteminin verimi etkilidir.

Dünyada su kayıplarını azaltmak için çeşitli uygulamalar yürütülmektedir. Basınç yönetimi, içme suyu dağıtım şebekelerinde su kayıplarının azaltılması için uygulanabilir en basit yöntemdir. Basınç yönetimi ile şebekedeki fazla basınç düşürülür ve optimum basınç seviyesi belirlenerek şebeke için işletim basıncı tespit edilir. Tüm şebekedeki su basıncı değerlerinin maksimum (60 mSS) ile şebeke içindeki kritik nokta için tanımlanan minimum (20 mSS) değerler arasında kalması sağlanır. İçme suyu dağıtım şebekelerinde fazla basıncın PRV yerine PAT sistemi ile düşürülmesi, sürdürülebilir içme suyu dağıtım şebekeleri açısından bir alternatif olmuş ve enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynağı olarak mikro ölçekte destek sağlayabilecek potansiyele sahiptir.

Bu tez çalışmasında hidrolik modelleme ile içme suyu dağıtım şebekelerindeki fazla basıncın düşürülmesi analiz edilmiş ve bu süreçteki enerji üretim potansiyeli incelenmiştir. Çalışma kapsamında Anfaş bölgesinde yer alan tam ölçekli bir PAT sisteminde basıncın düşürülmesi ile elde edilen enerji düzeyi uzun vadeli olarak irdelenmiştir. Ek olarak, Kaleiçi bölgesi içme suyu dağıtım şebekesi için önerilen potansiyel bir PAT sistemi ile basıncın düşürülmesi sürecindeki enerji üretim potansiyeli incelenmiştir. Tez çalışması ile elde edilen temel sonuçlar aşağıda sunulmaktadır:

1. Tez çalışması kapsamında Antalya'nın merkezinde yer alan ve önemli bir turizm potansiyeli oluşturan Kaleiçi için bölgesi içme suyu dağıtım şebekesinde US-EPA EPANET hidrolik modeli kullanılarak hidrolik modelleme çalışması yapılmıştır. Kaleiçi bölgesi için hidrolik modelin kalibrasyon ve verifikasyon uygulamaları sahadan elde edilen farklı veri setleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaleiçi bölgesi için Ağustos 2015 (yaz) ve Ocak 2016 (kış) olmak üzere 2 farklı dönemde model kalibrasyonu, Haziran 2016 dönemi için de model doğrulama çalışması yapılmıştır.
2. Hidrolik model Kalibrasyon-1 çalışması ile basınç tahminleri için en düşük ortalama mutlak hata, boru pürüzlülük katsayı değeri 64 için elde edilmiştir ve ortalama mutlak hata değeri 0,667 mSS olarak hesaplanmıştır. Hidrolik model Kalibrasyon-2 çalışması ile basınç tahminleri için en düşük ortalama mutlak hata, boru pürüzlülük katsayı değeri 73 için elde edilmiştir ve ortalama mutlak hata değeri 0,474 mSS olarak hesaplanmıştır. Her iki kalibrasyon dönemi için model tahmin hataları birlikte incelendiğinde, en düşük model tahmin hatası sürtünme katsayısı değeri 68 için elde edilmiştir ve ortalama mutlak hata 0,59 mSS olarak hesaplanmıştır.
3. Hidrolik model verifikasyonu çalışması için sürtünme katsayısı değeri 68 için hidrolik model uygulaması gerçekleştirildiğinde, ortalama mutlak hata 0,632 mSS olarak hesaplanmıştır.
4. Hidrolik model kullanılarak Kaleiçi bölgesinde şebekede oluşan maksimum ve minimum basınç seviyeleri zamansal ve mekânsal olarak incelenmiştir. Şebekede kritik basınç noktasının yeri tespit edilmiş ve kritik noktada oluşan basınç seviyeleri belirlenmiştir. Şebekedeki fazla basınç yüksekliği hidrolik model ile Kasım-Nisan dönemi için 9 mSS, diğer aylar için 5 mSS olarak belirlenmiştir.

5. Kaleiçi bölgesi içme suyu dağıtım şebekesindeki fazla su basıncının düşürülmesi ve enerji üretilmesi amacı ile tam ölçekli bir PAT sistemi kurulması ve işletilmesi durumundaki enerji potansiyeli Haziran 2016 - Ekim 2017 dönemine ait veriler kullanılarak araştırılmıştır. PAT sistemi ile potansiyel güç üretimi için gerekli verim katsayısı ve PAT debi/SCADA debi oranı için Antalya-Anfaş bölgesinde daha önce kurulan tam ölçekli PAT sistemi verileri referans alınmıştır. Buna göre PAT sistemi için minimum ve maksimum verim değerleri sırasıyla 0,50 ve 0,70 kabul edilmiş olup PAT debi/SCADA debi oranı ise 0,90 alınmıştır.
6. Kaleiçi bölgesi içme suyu dağıtım şebekesinde fazla basıncın PAT sistemi ile azaltılması durumunda mevcut potansiyel enerji üretimi hesaplanmıştır. İncelenen dönem içinde elde edilebilecek güç değerleri 0,3 ila 2,4 kW arasında değişim göstermektedir. Üretilen güç için önemli olan iki parametre PAT sisteminden geçen debi ve fazla basınç yüksekliğidir. Kaleiçi bölgesi için Haziran 2016 - Ekim 2017 dönemine ait SCADA debileri minimum 36 m³/sa ile maksimum 257 m³/sa değerleri arasında değişim göstermekte olup izlenen dönem için ortalama debi yaklaşık 109 m³/sa'tir. Kaleiçi bölgesi için Haziran 2016 - Ekim 2017 dönemine ait veriler ile hesaplanan ortalama güç üretimi ise yaklaşık 1 kWh, ortalama verim ise 0,60 olarak belirlenmiştir.
7. Anfaş-Expo içme suyu şebekesinde bypass hattı üzerinde kurulan ve 26 Ocak 2016 tarihinde devreye alınan PAT sistemi ile Türkiye'de ilk kez içme suyu şebekesinde enerji kazanımı uygulaması gerçekleştirilmiştir. Haziran 2016 - Mayıs 2017 dönemini içine alan 1 yıllık süre için performansı sahada sürekli izlenmiştir. Tez çalışması kapsamında da 1 yıllık işletim süresine ait işletim verileri değerlendirilerek sunulmuştur. Bir yıllık işletim süresi içinde PAT sistemi ile azaltılan ortalama basınç 8,2 mSS (0,80 bar) (tasarım için maksimum basınç farkı 10,2 mSS (1 bar) olarak belirlenmiştir), PAT sisteminden geçen ortalama debi yaklaşık 164 m³/sa, sistem içinde PAT sisteminden geçen debinin toplam debiye oranı %93 (debinin kalan kısmı PRV bulunan alt borudan geçmektedir), PAT sisteminde üretilen ortalama güç 2,34 kWh ve PAT sistemi için ortalama verim %63 olarak izlenmiştir.

İçme suyu şebekelerindeki fazla basıncın düşürülmesi ile şebekedeki boru patlaması, arıza sayısı ve onarım/tamirat bedellerinde önemli düşüşler oluşmaktadır. Şebekelerin optimum işletim basıncında işletilmesi ile şebeke ve mekanik ekipman ömrü uzamakta, böylece şebeke yenileme işlemleri geciktirilmektedir. Benzer şekilde şebekelerdeki fazla basıncın düşürülmesi ile su kayıpları azaltılmakta ve buna bağlı olarak su kaynakları daha uzun süreler taleplerin karşılanması için yeterli olmakta ve yeni kaynak bulunması ve yatırımları geciktirilmektedir. İçme suyu dağıtım şebekelerinde PAT sistemi kullanılarak fazla basıncın düşürülmesi çalışmalarında fayda maliyet analizi yapılarak geri ödeme süresinin hesaplanması gerekmektedir. Bu sayede yapılan çalışmanın fizibilitesi gerçekçi olarak değerlendirilebilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abd Rahman, N., Muhammad, N. S., Wan Mohtar, W. H. M. 2018. Evolution of research on water leakage control strategies: where are we now? *Urban Water Journal*, 1–15. DOI:10.1080/1573062x.2018.1547773
- Agarwal T. 2012. Review of Pump as Turbine (PAT) for Micro-Hydropower, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 2, Issue 11.
- Agathoklis, A., Symeon, C. 2017. Component holistic condition assessment of water distribution networks. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, May 2017Aqua 66(7):jws2017121, DOI: 10.2166/aqua.2017.121
- Albert, O. 2018. Pump as Turbine Symmetry Prediction Method for Pump as Turbine Characteristics. Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology.
- Anonim 1: https://www.erbakan.edu.tr/storage/files/department/elektrikelektronikmuhendisligi/Editor/DERS/YElkEnrUrt/Hidroelektrik_Enerji_Türbinleri.pdf [Son erişim tarihi: 06.04.2019].
- Anonim 2: <http://water.usgs.gov/edu/hyhowworks.html> [Son erişim tarihi: 06.04.2019].
- Anonim 3: <https://www.worldpumps.com/waste-wastewater/features/pumps-as-turbines-in-the-water-industry/> [Son erişim tarihi: 03.04.2019]
- Anonim 4: https://www.engineeringtoolbox.com/hazen-williams-coefficientsd_798.html [Son erişim tarihi: 15.04.2019]
- Araujo, L., Ramos, H., Coelho, S. 2006. Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management. *Water Resources Management*, 20(1): 133–149.
- ASAT, 2018. ASAT 2017 yılı Faaliyet Raporu, Antalya.
- Bonthuys, G.J., Van Dijk M., Cvazzini, G. 2019. Leveraging water infrastructure asset management for energy recovery and leakage reduction, *Sustainable Cities and Society*, 46, 101434.
- BM 2009. UN News (5 February 2009), Majority of world population face water shortages unless action taken, <https://news.un.org/en/story/2009/02/290142-majority-world-population-face-water-shortages-unless-action-taken-warns-migiro>.
- Carravetta, A., Del Giudice, G., Fecarotta, O., Ramos, H.M. 2012. Energy production in water distribution networks: a PAT design strategy, *Water Resources Management*, 26, 3947–3959.
- Choulot, A., Denis, V., Punys, P. 2012. Integration of small hydro turbines into existing water infrastructures, hydropower - practice and application, Dr. Hossein Samadi-Boroujeni (ed.), ISBN: 978-953-51-0164-2.
- Cosgrove, W. J., and D. P. Loucks, 2015. Water management: current and future challenges and research directions. *Water Resources Research*, 51(6): 4823–4839.
- Coşkun, D. Ç., Çapar, G., Korkmaz, A., İritaş, Ö., Karaaslan Y. ve Selek, B. 2018. İçmesuyu şebekelerinde görülen su kayıplarının dünyada ve ülkemizdeki durumu.

- Anahtar, Haziran 2018 Sayı: 354.
- Council, N.W. 1980. Leakage control policy and practice. Technical Working Group on Wastewater, Department of Environment, Belfast, U.K.
- Crespo Chacón, M., Rodriguez Diaz, J., Garcia Morillo, J., and McNabola, A. 2019. Pump as turbine selection methodology for energy recovery in irrigation networks: minimising the payback period. *Water*, 11(1), 149. DOI:10.3390/w11010149
- De Marchis, M., Fontanazza, C., Freni G., Messineo, A., Milici, B., Napoli, E., Notaro, V., Puleo, V. and Scopa, A. 2014. Energy recovery in water distribution networks. Implementation of pumps as turbine in a dynamic numerical model, *Procedia Engineering*, Vol. 70, 439-448.
- De Paola, F., and Giugni, M. 2012. Leakages and pressure relation: an experimental research. *Drinking Water Engineering and Science*, 5 (1): 59–65. DOI:10.5194/dwes-5-59-2012.
- Derakhshan, S. and Nourbakhsh, A. 2008. Experimental study of characteristic curves of centrifugal pumps working as turbines in different specific speeds. *Experimental Thermal And Fluid Science*, 32(3):800–807.
- EPA, 2010. Control and mitigation of drinking water losses in distribution systems, 2-5.
- ESHA, 2010. Mhyllab, Acciona Energy, Dulas, IMP PAN, IWHW, Studio Frozio, WMF, Wasser Tirol, Energy Recovery in Existing Infrastructures with Small Hydropower Plants. Multipurpose Schemes – Overview and Examples. FP6, SHAPES.
- Fernández García, I., Ferras, D. and Mc Nabola, A. 2019. Potential of energy recovery and water saving using micro hydropower in rural water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(3), 05019001. DOI:10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001045
- Ferrante, M. 2012. Experimental investigation of the effects of pipe material on the leak head-discharge relationship. *Journal of Hydraulic Engineering* 138(8): 736–743. DOI:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000578.
- Folkman, S. 2018. Water main break rates in the usa and canada: a comprehensive study. Mechanical and aerospace engineering faculty publications. Paper 174. https://digitalcommons.usu.edu/mae_facpub/174
- Fontana, N., Giugni, M. and Portolano, D. 2012. Losses reduction and energy production in water-distribution networks, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000179, 237-244.
- Fontana, N., Giugni, M., Glielmo, L. and Marini, G. 2016. Real time control of a prototype for pressure regulation and energy production in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142:7, 04016015.
- Fontana, N., Giugni, M., Glielmo, L., Marini, G. and Zollo, R. 2018. Hydraulic and electric regulation of a prototype for real time control of pressure and hydropower generation in a water distribution network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144:11, 04018072.

- Fontana, N., Giugni, M., Glielmo, L., Marini, G. and Zollo, R. 2019. Operation of a prototype for real time control of pressure and hydropower generation in water distribution networks, *Water Resources Management*, 33, 697–712.
- Fontana, M. E. and Morais, D. C. 2016. Decision model to control water losses in distribution networks. *Production* 26 (4): 688–697. DOI:10.1590/0103-6513.201815.
- Garcia, I.F., Ferra, D. and Mc. Nabola, A. 2019. Potential of energy recovery and water saving using micro-hydropower in rural water distribution networks, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145:3, 05019001.
- Girard, M. and Stewart, R.A. 2007. Implementation of pressure and leakage management strategies on the gold coast, Australia: case study, *Journal Water Resources Planning and Management*, 133(3): 210-217.
- Giugni, M., Fontana, N and Portolano, D. 2009. Energy savings policy in water distribution networks. proceedings of the international conference on renewable energies and power quality (ICREPQ'09), Valencia, Spain.
- Giustolisi, O., Berardi, L., Laucelli, D., Savic, D., Walski, T. and Brunone, B. 2014. Battle of background leakage assessment for water networks. *Procedia Engineering*, 89: 4–12. DOI:10.1016/j.proeng.2014.11.153.
- Giustolisi, O., Ugarelli, R.M., Berardi, L., Laucelli, D.B. and Simone, A. 2017. Strategies for the electric regulation of pressure control valves. *J. Hydroinform.*, 19, 621–639.
- Güçlü, G. 2014. İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerinde Su Kayıpları konulu sunum. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Türkiye’de Su Yönetimi ve Geleceği adlı Eğitim, 27-29 Kasım 2014, Afyonkarahisar.
- Hunaidi, O. 2000. Detecting leaks in water distribution pipes. *Construction Technology Update*, 40: 1–6.
- Isbasoiu, E.C., Bucur, D.M., Ghergu, C.M. and Dunca, G. 2007. Using standard pumps as turbines. CEEEX2007 Conf., Technical Publishing House, Bucharest, Romania, 96.1–96.6
- İlbank, 2013. İçmesuyu Tesisleri Etüt, Fizibilite Ve Projelerinin Hazırlanmasına Ait Teknik Şartname, Ankara.
- Jafari, R., Khanjani, M. J. and Esmaeilian, H. R. 2015. Pressure management and electric power production using pumps as turbines. *Journal- American Water Works Association*, 107(7), e351–e363. DOI:10.5942/jawwa.2015.107.0083
- Jain, S.V. and Patel, R.N. 2014. Investigations on pump running in turbine mode: A review of the state-of-the-art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 841-868.
- Kanakoudis, V. K. 2004. Vulnerability based management of water resources systems. *J. Hydroinform.*, 6, 133–156.
- Kanakoudis, V. and Gonelas, K. 2014. Applying pressure management to reduce water losses in two Greek cities’ WDSs: Expectations, problems, results and revisions. *Procedia Engineering*, 1, 318–325.

- Kanakoudis, V. and Gonelas, K. 2016. Non-revenue water reduction through pressure management in Kozani's water distribution network: From theory to practice. *Desalin. Water Treatment*, 57, 11436–11446.
- Kanakoudis, V. and Muhammetoglu, H. 2014. Urban water pipe networks management towards nonrevenue water reduction: two case studies from Greece and Turkey. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 42(7), 880-892.
- Kanakoudis, V. and Tsitsifli, S. 2016. Socially fair domestic water pricing: Who is going to pay for the non-revenue water? *Desalin. Water Treatment*, 57, 11599–11609
- Kanakoudis, V., Tsitsifli, S., Gonelas, K., Papadopoulou, A., Kouziakis, C. and Lappos, S. 2016. Determining a socially fair drinking water pricing policy: The case of Kozani, Greece. *Procedia Engineering*, 162, 486–493.
- 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(9), 2555–2568. DOI:10.1007/s11269-012-0032-2
- Krivchenko, G. 1994. *Hydraulic Machines: Turbines and Pumps*, Lewis, Boca Raton, Fla., USA.
- Lambert, A., and Hirner, W. 2000. *Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures. IWA The blue pages*, IWA Publishing, London.
- Lambert, A. O. 1994. Accounting for Losses: The Bursts and Background Concept. *Water and Environment Journal* 8 (2): 205–214. DOI:10.1111/j.1747-6593.1994.tb00913.x.
- Lima, G.M., Luvizotto, E. and Brentan, B.M. 2017. Selection and location of Pumps as Turbines substituting pressure reducing valves, *Renewable Energy*, 109, 392-405.
- Loots, I., Van Dijk, M., Van Vuuren, S. J., Bhagwan, J. N. and Kurtz, A. 2014. Conduit hydropower potential in the city of tshwane water distribution system: a discussion of potential applications, financial and other benefits, *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 56:3, 2–13.
- Lydon, T., Coughlan, P. and McNabola, A. 2017. Pressure management and energy recovery in water distribution networks: Development of design and selection methodologies using three pump-as-turbine case studies. *Renewable Energy*, 114, 1038–1050. doi:10.1016/j.renene.2017.07.120
- Malcolm, F., Wyeth, G., Ghazali, Z. B. M., Istandar A., and Singh, S. 2008. *The manager's non-revenue water handbook: a guide to understanding water losses*. Ranhill utilities berhad.
- Manila Water Company, 2018. Accessed 03 March 2019. <https://www.manilawater.com/customer/about-us/our-story>
- Mckenzie, R. 2001. Development of A Pragmatic Approach To Evaluate The Potential Savings From Pressure Management in Potable was Distributions in South Africa: Presmac. Report TT152/01 published by the South African Water Research Commission.

- Miyaoka, S. I., and Funabashi, M. 1984. Optimal control of water distribution systems by network flow theory. *IEEE transactions on automatic control* 29 (4): 303–311.
- MNRW: The Manager's Non-Revenue Water Handbook For Africa, A Guide To Understanding Water Losses, 2010. USAID, World Bank Institute, 123.
- Mora-Rodríguez, J., Delgado Galván X., Ramos, H. M. and López-Jiménez P. A. 2014. An overview of leaks and intrusion for different pipe materials and failures. *Urban Water Journal*, 11 (1): 1–10. DOI:10.1080/1573062x.2012.739630.
- Möderl, M., Sitzenfrei, R., Mair, M., Jarosch, H. and Rauch, W. 2012. Identifying hydropower potential in water distribution systems of alpine regions. In *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2012*, Albuquerque, New Mexico, 20–24 May 2012.
- Muhammetoğlu, A., Muhammetoğlu H., Güngör, A., Karadirek, İ.E., Bektaş, E.H., Boyacılar, M. 2016. Sürdürülebilir içmesuyu temini sistemleri için yenilenebilir enerji kazanımı Potansiyelinin Araştırılması (TÜBİTAK Proje No: 114Y203).
- Muhammetoğlu, A. ve Muhammetoğlu, H. 2017. İçmesuyu temin ve dağıtım sistemlerindeki su kayıplarının kontrolü El Kitabı. Orman ve Su İşleri Bakanlığı.
- Muhammetoglu, A., Karadirek, İ.E., Ozen, O. and Muhammetoglu, H. 2017a. Full-scale PAT application for energy production & pressure reduction in a water distribution network, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143:8, DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000795.
- Muhammetoglu, A., Nursen, C., Karadirek İ.E., and Muhammetoglu, H. 2017b. Evaluation of performance and environmental benefits of a full-scale pump as turbine system in Antalya water distribution network. *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(1), 130-141.
- Muhammetoğlu, A., Muhammetoğlu, H., Adıgüzel, A., İritaş, Ö., and Karaaslan Y. 2018. Managment of water losses in water supply and distibution networks in Turkey. *Turkish Journal Of Water Science and Management*, 2(1): 58-75.
- NHA, 2016. National Hydropower Association, a vision for growth and value, Annual Report.
- Nicola F., Maurizio G., Luigi G., Gustavo M. and Francesca V. 2017. A lab prototype of pressure control in water distribution network. *International Federation of Automatic Control Papers online*, 50(1): 15373–15378.
- Nicolini, M. and Zovatto, L. 2009. Optimal location and control of pressure reducing valves in water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(3): 178–187.
- Noack, C., and Ulanicki, B. 2008. Modelling of soil diffusibility on leakage characteristics of buried pipes. In *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, 1–9.
- Nourhan S., Rawya K., Walid E. and Amr F. 2017. Pressure control for minimizing leakage in water distribution systems. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4): 601-612.
- Pahlow, M., Snowball, J. and Fraser, G. 2015. Water footprint assessment to inform

- water management and policy making in South Africa. *Water SA* 41 (3): 300–313. DOI:10.4314/wsa.v41i3.02.
- Palancı, İ. 2011. Alt Bölgeler Oluşturularak ve SCADA Sistemi Kullanılarak Su Kayıplarının Yönetimi: Antalya-Konyaaltı Bölgesi Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi.
- Pérez-Sánchez, M., Sánchez-Romero, F.J., Ramos, H.M. and López-Jiménez, P.A. 2017. Energy recovery in existing water networks: towards greater sustainability, *Water*, 9:97. DOI:10.3390/w9020097.
- Pilcher, R., Hamilton, S., Chapman, H., Field, D., Ristovski, B., and Stapely, S. 2007. Leak location and repair guidance notes, Version 1, *IWA Publishing*, London
- Prabhata, K. S. and Ashok K. S. 2008. Design of water supply network, 2 p.
- Pugliese, F., De Paola, F., Fontana, N., Marini, G., & Giugni, M. 2018. Optimal Selection of Pumps As Turbines in Water Distribution Networks. *Proceedings*, 2(11), 685. DOI:10.3390/proceedings2110685.
- Ramos, H. and Borga, A. 1999. Pumps as turbines: an unconventional solution to energy production, *Urban Water*, 1:3, 261-263.
- Rossman, L. A. 2000. EPANET 2.0 Users Manuel, Water Supply and Water Resources Division. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency.
- Rossi, M., Righetti, M., and Renzi, M. 2016. Pump-as-turbine for Energy Recovery Applications: The Case Study of An Aqueduct. *Energy Procedia*, 101, 1207–1214. DOI:10.1016/j.egypro.2016.11.163.
- Samora, I., Manso, P., Franca, M.J., Schleiss, A.J. and Ramos, H.M. 2016a. Energy recovery using micro-hydropower technology in water supply systems: the case study of the city of Fribourg, *Water*, 8: 344, DOI: 10.3390/w8080344.
- Samora, I., Manso, P., Franca, M.J., Schleiss, A.J. and Ramos, H.M. 2016b. Opportunity and economic feasibility of inline microhydropower units in water supply networks, *Journal of Water Resources Planning and Management*, DOI:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000700.
- Sharma K. 1985. Small Hydroelectric Project Use of Centrifugal Pumps as Turbines. Technical Report, Kirloskar, Electric Co. Bangalore, India.
- Simbeye, I. 2010. Managing Non-Revenue Water. NRW-Sourcebook for Trainers. WAVE Pool. *InWEnt - Internationale Weiterbildung and Entwicklung* 2010. 102 pages, Erişim tarihi: Mart 2019. http://www.water-impact-guidebook.net/fileadmin/0_guidebook/resources_exercises/D-Good_Practices/47-NRW_resourcebook.pdf
- Stepanoff A. 1997. Centrifugal and Axial Flow Pumps, Design and Applications, John Wiley and Sons, Inc. New York, USA.
- Stuart, H. and Bambos, C. 2013. Leak detection: technology and implementation. In: Stuart, H. and Daniel K. (Eds.), *Technology: how far can we go?*, Chapter 9, pp. 94-95.
- Şevik, S. 2012. Şebeke suyu basıncının su tüketimi üzerindeki etkileri. *Türk Tesisat*

- Mühendisleri Derneği, 51-52.
- Telci, I.T. and Aral, M.M. 2018. Optimal energy recovery from water distribution systems using smart operation scheduling, *Water*, 10:1464, doi:10.3390/w10101464.
- Thornton, J., and Lambert, A.O. 2005. Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: consumption relationships. IWA Special Conference “Leakage 2005”, September 12-14, Halifax, Canada.
- Thornton, J., Sturm, R. and Kunkel, G. 2008. Water loss control. McGraw Hill Professional, 51-59.
- Tiryakioğlu, O. 1999. Antalya'da Yeraltısuyu Kalitesinin Grafik Tabanlı İncelenmesi ve Kirlenme Kontrolünde Bir Matematik Model Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi.
- TÜBİTAK, 2008. İçme Suyu Dağıtım Şebekelerinde Optimum Klorlama Uygulamalarının Matematiksel Modeller Kullanılarak Gerçekleştirilmesi ve Dezenfeksiyon sistemlerinin Yönetimi Projesi Proje Öneri Raporu. Antalya: TÜBİTAK (Proje No. 107G088).
- Van Dijk, M., Cavazzini, G., Bonthuys, G., Santolin, A. and Van Delft, J. 2018. Integration of water supply, conduit hydropower generation and electricity demand, *Proceedings*, 2:689, DOI:10.3390/proceedings2110689.
- Van Zyl, J. E., and Clayton, C. R. I. 2007. The Effect of pressure on leakage in water distribution systems. *Proceedings of the institution of civil engineers water management* 160 (2): 109–114. Thomas telford ltd. DOI:10.1680/wama.2007.160.2.109.
- Ziegler, D., Sorg, F., Fallis, P., Hübschen, K., Happich, L., Baader, J., Trujillo, R., Mutz, D., Oertlé, E., Klingel, P. and Knobloch, A. 2011. Guidelines for water loss reduction; A focus on pressure management, 61 p.
- Walski, T.M., Chase, D.V., Savic, D.A., Grayman, W., Beckwith, S. and Koelle, E. 2003. Advanced water distribution modeling and management. Civil and Environmental Engineering and Engineering Mechanics Faculty Publications, Paper 18.
- White, J. 2011. Recovering energy from an existing conduit, *Int. Water Power Dam Constr.*, 63, 18–20.
- Williams, A. 1996a. Pumps as turbines for low cost micro hydro power. *Renewable Energy*, 9 (14),1227–1234.
- Williams, A. 1996b. Pumps as turbines: a user's guide. Intermediate Technology Pub. Ltd., London.
- World Bank, 2016. The World Bank and the International Water Association to Establish a Partnership to Reduce Water Losses. <http://www.worldbank.org/en/news/press-release/2016/09/01/the-world-bank-and-the-international-water-association-to-establish-a-partnership-to-reduce-water-losses> [son erişim tarihi: 06.04.2019].
- World Bank, 2018. High and Dry: Climate Change, Water, and the Economy. <http://www.worldbank.org/en/topic/water/publication/high-and-dry-climate-change-water-and-the-economy>. [son erişim tarihi: 06.04.2019].

ÖZGEÇMİŞ

BARIŞ ŞEKER
barisjk35@gmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans (Tezli) 2016-2019	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği, Bölümü, Antalya
Yüksek Lisans (Tezsiz) 2017-2019	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, Antalya
Lisans 2012-2016	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Antalya
Lise 2005-2009	Kurtuluş Lisesi Güzelyurt, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Çevre Mühendisi 2017-2019	Yeşilmavi Atık Toplama ve Geri Dönüşüm Kemer, Antalya
Proje Asistanı 2016-2017	Turistik Bölgelerde Otomatik Okuma Sayaçları Kullanılarak Fiziki Su Kayıplarının Yüksek Hassasiyetle Belirlenmesi ve Yönetimi: Antalya- Kaleiçi Uygulaması (TÜBİTAK Projesi)

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Muhammetoğlu A., Şeker B., Muhammetoğlu H. (2018) “Antalya İçme Suyu Dağıtım Şebekesinde Kurulan Pompa Türbin Sistemi için İşletim Verilerinin İncelenmesi”, International Symposium on Urban Water and Wastewater Management, October 25-27, 2018, Denizli, Turkey.
- 2- Şeker B., Muhammetoğlu A., Muhammetoğlu H. (2018) “Evaluation of Energy Recovery Potential of a Small Water Distribution Network using a Pump as Turbine System: Antalya-Kaleici Case Study”, 4th International Conference on Recycling and Reuse, October 24-26, 2018, İstanbul, Turkey.

