

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

**İÇME SUYU DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE SERBEST BAKİYE KLOR  
KONSANTRASYONLARININ DETERMİNİSTİK VE VERİYE DAYALI  
MODELLEME TEKNİKLERİ KULLANARAK YÖNETİMİ**

**İbrahim Ethem KARADİREK**

**DOKTORA TEZİ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**2014**

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

**İÇME SUYU DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE SERBEST BAKİYE KLOR  
KONSANTRASYONLARININ DETERMİNİSTİK VE VERİYE DAYALI  
MODELLEME TEKNİKLERİ KULLANARAK YÖNETİMİ**

**İbrahim Ethem KARADİREK**

**DOKTORA TEZİ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Bu tez Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi  
tarafından 2010.03.0121.021 nolu proje ile desteklenmiştir.**

**2014**

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

**İÇME SUYU DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE SERBEST BAKİYE KLOR  
KONSANTRASYONLARININ DETERMİNİSTİK VE VERİYE DAYALI  
MODELLEME TEKNİKLERİ KULLANARAK YÖNETİMİ**

**İbrahim Ethem KARADİREK**

**DOKTORA TEZİ  
ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu tez 13/12/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Habib MUHAMMETOĞLU  
Prof. Dr. Bülent TOPKAYA  
Prof. Dr. Mehmet KİTİŞ  
Prof. Dr. İsmail TORÖZ  
Prof. Dr. Vedat UYAK

## ÖZET

### İÇME SUYU DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE SERBEST BAKİYE KLOR KONSANTRASYONLARININ DETERMİNİSTİK VE VERİYE DAYALI MODELLEME TEKNİKLERİ KULLANARAK YÖNETİMİ

**İbrahim Ethem KARADİREK**

**Doktora Tezi, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı**  
**Danışman: Prof. Dr. Habib MUHAMMETOĞLU**  
**İkinci Danışman: Prof. Dr. Selçuk SOYUPAK**  
**Aralık, 2014, 124 Sayfa**

Etkili olması, uygulama kolaylığı, ucuz ve kolay bulunabilir olması sebepleri ile klor içme sularında en çok kullanılan dezenfektandır. Klor, su içerisindeki ve boru cidarındaki organik ve inorganik maddeler ile reaksiyona girer. Bu reaksiyonlar sonucu klor su dağıtım şebekelerinde bozunmaya uğrar ve bu bozunmalar sırasıyla klor ana akım bozunması ( $K_b$ ) klor boru cidar bozunması olarak adlandırılır ( $K_w$ ). Su dağıtım şebekelerinde klor bulunmaması veya klor konsantrasyonlarının çok düşük olması olası kontaminasyon durumunda su kaynaklı hastalık riskini artırmaktadır. Diğer taraftan su dağıtım şebekelerinde yüksek klor konsantrasyonları ise dezenfeksiyon yan ürünleri oluşumu ile ilişkili olup, bu yan ürünlerin bazıları kanserojen etkiye sahiptir. Ayrıca bu yan ürünler insanlar ve hayvanlar üzerinde olumsuz akut ve kronik etkiler gösterirler. Bu nedenle halk sağlığı üzerindeki riskleri en aza indirmek için su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonları belirli limitler arasında tutulmalıdır. Su dağıtım şebekeleri, hidrolik ve su kalitesi parametrelerinin zamansal ve mekansal değişim gösterdiği dinamik sistemlerdir. Bu nedenle su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının yönetimi ancak dinamik modelleme çalışmaları ile gerçekleştirilebilir.

Bu çalışma Konyaaltı içme suyu dağıtım şebekesinde deterministik ve yapay sinir ağları (YSA), özbağımlı otoregresif modeller (ARX), özbağımlı otoregresif hareketli ortalamalı modeller (ARMAX) ve proses modelleri gibi veriye dayalı modelleme yaklaşımlarını kullanarak klor konsantrasyonlarının yönetimi amacı ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda deterministik modelleme yaklaşımını kullanarak su dağıtım şebekesinde görülebilecek olağan dışı durumları göz önünde bulunduran sekiz farklı yönetim senaryosu geliştirilmiştir. Deterministik ve veriye dayalı modelleme yaklaşımlarında modelleme, kalibrasyon ve doğrulama çalışmaları için gerekli veriler online izleme ile analiz ve ölçüm sonuçlarından elde edilmiştir.

Çalışma, su dağıtım şebekelerinde fiziksel bileşenlere ait verilerin bulunmadığı durumlarda veriye dayalı modelleme yaklaşımlarının klor konsantrasyonlarının modellenmesinde bir alternatif olabileceği gerçekliğini doğrular sonuçlar üretmiştir. Aynı zamanda çalışma kapsamında online izleme çalışmalarının klor konsantrasyonlarının modellenmesi ve yönetimi çalışmaları için oldukça iyi veri

sağladığı tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda klor dozlama istasyonunda yaz aylarında dozlanması gereken klor konsantrasyonu 0,50 mg/L, kış aylarında 0,40 mg/L ve diğer dönemlerde ise 0,40 – 0,50 mg/L dozlanması gerektiği tespit edilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Deterministik modelleme, Klor modelleme, Su dağıtım şebekeleri, Veriye dayalı modelleme.

**JÜRİ:** Prof. Dr. Habib MUHAMMETOĞLU(Danışman)  
Prof. Dr. Bülent TOPKAYA  
Prof. Dr. Mehmet KİTİŞ  
Prof. Dr. İsmail TORÖZ  
Prof. Dr. Vedat UYAK

## ABSTRACT

### MANAGEMENT OF FREE RESIDUAL CHLORINE CONCENTRATIONS IN WATER DISTRIBUTION NETWORKS USING DETERMINISTIC AND DATA-DRIVEN MODELING TECHNIQUES

**Ibrahim Ethem KARADIREK**

**PhD Thesis in Environmental Engineering**  
**Supervisor: Prof. Dr. Habib MUHAMMETOGLU**  
**Co-Supervisor: Prof. Dr. Selçuk SOYUPAK**  
**December, 2014, 124 Pages**

Chlorine is the most common disinfectant for drinking water since it is cheap, effective, easy to apply and widely available. Chlorine reacts with both organic and inorganic compounds present in water and also with pipe wall. As a result of these reactions chlorine decay in water distribution networks can be classified under the name of chlorine bulk decay ( $K_b$ ) and chlorine wall decay ( $K_w$ ), respectively. As a result of absence of chlorine or very low chlorine concentrations in water distribution networks, the risk of waterborne diseases increases in case of water contamination. On the other hand, the presence of high chlorine concentrations in water distribution networks is associated with the formation of disinfection by-products and some of these disinfection by-products may cause cancer. Further, they may have other chronic and acute adverse health effects to human beings and animals. Consequently, chlorine concentrations should be kept within certain limits to minimize health risks. Water distribution networks are dynamic systems where hydraulic and water quality parameters show changes spatially and temporally. Therefore chlorine management can be achieved by only dynamic modeling studies.

This study was conducted to manage chlorine dosing rates in Konyaalti water distribution network using deterministic and data-driven modeling techniques such as artificial neural network (ANN), auto regressive with exogenous input (ARX), auto regressive moving average with exogenous input (ARMAX) and process models. For this purpose, eight management scenarios that take into consideration extreme conditions in Konyaalti water distribution network were investigated using deterministic. The data sets required to set, calibrate and verify the deterministic and data-driven models were derived from the online continuous monitoring, sampling program and lab work.

The study showed that data-driven modeling can be considered as a potential alternative to model chlorine concentrations in cases where the physical properties of water distribution networks, that enable deterministic modelling, are not available. The study revealed that online monitoring provides excellent data sets for chlorine modeling and management that ends up with automatic application of chlorine dosing. As a result

of the study, the required residual chlorine concentration at the feeding station was determined as 0.40 mg/L in winter season while it was determined as 0.50 mg/L in summer season and 0.40 – 0.50 mg/L in the other seasons.

**KEYWORDS:** Chlorine modeling, Data - driven modeling, Deterministic modeling, Water distribution networks.

**COMMITTEE:** Prof. Dr. Habib MUHAMMETOGLU (Supervisor)  
Prof. Dr. Bülent TOPKAYA  
Prof. Dr. Mehmet KİTİŞ  
Prof. Dr. İsmail TORÖZ  
Prof. Dr. Vedat UYAK

## ÖNSÖZ

Su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının yönetimi halk sağlığı açısından oldukça önemlidir. Su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının göreceli düşük olduğu veya klorun hiç bulunmadığı durumlarda muhtemel kontaminasyon vakaları halk sağlığını olumsuz etkilemekteyken, yüksek klor konsantrasyonları ise genellikle kanserojen etkiye sahip dezenfeksiyon yan ürünlerinin oluşumuna neden olmaktadır. Bu nedenle su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının belirli sınır değerler arasında tutulması gerekmektedir. Bu çalışmada su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının yönetimi amacıyla deterministik ve veriye dayalı modelleme yaklaşımları kullanılmış ve elde edilen sonuçlar aktarılmıştır.

Doktora çalışmama başladığım ilk andan itibaren akademik hayatıma yön vermemi sağlayan, bana birlikte çalışma fırsatı sunan, her an yanımda hissettiğim çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Habib Muhammetoğlu'na, bilgi birikimleri ile çalışma süresince bana yol gösteren ikinci danışman hocam Prof. Dr. Selçuk Soyupak'a teşekkür ederim. Çalışmamın her aşamasında değerli bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Ayşe Muhammetoğlu'na, tez çalışmam süresince bana yol gösteren değerli doktora tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Bülent Topkaya ve Prof. Dr. Mehmet Kitiş'e teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmam kapsamında yardım ve desteklerini esirgemeyen TÜBİTAK 107G088 nolu projenin tüm çalışanlarına, gerek bilgi ve tecrübelerini paylaşan gerekse saha çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen ASAT personeline ve bu süreçte yardım ve desteklerini esirgemeyen Akdeniz Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nün tüm öğretim elemanlarına teşekkür ederim.

Hayatımın her evresinde ve eğitim hayatımda maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi iletir, bu süreçte her zaman yanımda olan nişanlım Jeoloji Yüksek Mühendisi Selin Hökerek'e destek ve sabırları için teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvii
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI.....	4
2.1. İçme Suyu Dağıtım Şebekeleri.....	4
2.2. İçme Sularının Dezenfeksiyonu .....	5
2.3. Klor Bozunma Kinetikleri.....	7
2.4. Deterministik Modelleme Yaklaşımı .....	9
2.4.1. EPANET hidrolik ve su kalitesi modeli.....	10
2.5. Veriye Dayalı Modelleme Yaklaşımı.....	11
2.5.1. Yapay sinir ağları tabanlı modelleme yaklaşımı .....	11
2.5.2. Sistem tanımlamaya dayalı modelleme yaklaşımı .....	13
2.6. Konu ile İlgili Geçmişte Yapılan Çalışmalar .....	16
2.7 Konu ile İlgili Bu Tez’de Yapılan Çalışmalar .....	21
3. MATERYAL VE METOT .....	24
3.1. Antalya İçme Suyu Dağıtım Sistemi ve Pilot Çalışma Bölgesi .....	24
3.2. Serbest Bakiye Klor Konsantrasyonlarının Deterministik Modelleme Yaklaşımı ile Modellenmesi.....	28
3.2.1. Model girdi dosyalarının hazırlanması.....	28
3.2.2. Klor ana akım bozunma katsayısının belirlenmesi .....	29
3.2.3. Model kalibrasyonu ve doğrulaması .....	29
3.2.4. Deterministik modelleme yaklaşımı ile yönetim ve senaryo analiz çalışmaları .....	38
3.3. Serbest Bakiye Klor Konsantrasyonlarının Veriye Dayalı Modelleme Yaklaşımları ile Modellenmesi .....	39
3.3.1. Model girdi verilerinin temini.....	39
3.3.2. Yapay sinir ağları tabanlı modelleme yaklaşımı .....	40
3.3.3. Sistem tanımlama yöntemine dayalı modelleme yaklaşımları.....	41

4. BULGULAR.....	43
4.1. Saha ve Laboratuvar Ölçüm ve Analizleri.....	43
4.2. EPANET Modeli ile Hidrolik Model Kalibrasyon Çalışması.....	47
4.2.1. EPANET modeli ile kalibrasyonu tamamlanmış hidrolik model tahminleri	48
4.3. EPANET Modeli ile Su Kalitesi Modeli Kalibrasyon Çalışması .....	51
4.3.1. EPANET modeli ile kalibrasyonu tamamlanmış su kalitesi modeli tahminleri birinci periyodu .....	57
4.3.2. EPANET modeli ile kalibrasyonu tamamlanmış su kalitesi modeli tahminleri ikinci periyodu .....	59
4.3.3. EPANET modeli ile kalibrasyonu tamamlanmış su kalitesi modeli tahminleri üçüncü periyodu .....	61
4.3.4. EPANET modeli ile kalibrasyonu tamamlanmış su kalitesi modeli tahminleri dördüncü periyodu .....	63
4.4. EPANET Modeli ile Su Kalitesi Modeli Doğrulama Çalışmaları .....	64
4.4.1. EPANET modeli ile su kalitesi modeli doğrulama çalışması birinci periyodu .....	64
4.4.2. EPANET modeli ile su kalitesi modeli doğrulama çalışması ikinci periyodu .....	67
4.4.3. EPANET modeli ile su kalitesi modeli doğrulama çalışması üçüncü periyodu .....	68
4.4.4. EPANET modeli ile su kalitesi modeli doğrulama çalışması dördüncü..... periyodu .....	72
4.5. EPANET Modeli ile Klor Konsantrasyonu Yönetim ve Senaryo Analiz Çalışmaları .....	76
4.5.1. EPANET modeli ile klor konsantrasyonu yönetim ve senaryo analiz çalışmaları birinci yönetim senaryosu.....	78
4.5.2. EPANET modeli ile klor konsantrasyonu yönetim ve senaryo analiz çalışmaları ikinci yönetim senaryosu .....	81
4.5.3. EPANET modeli ile klor konsantrasyonu yönetim ve senaryo analiz çalışmaları üçüncü yönetim senaryosu.....	82
4.5.4. EPANET modeli ile klor konsantrasyonu yönetim ve senaryo analiz çalışmaları dördüncü yönetim senaryosu periyodu.....	84
4.5.5. EPANET modeli ile klor konsantrasyonu yönetim ve senaryo analiz çalışmaları beşinci yönetim senaryosu.....	85
4.5.6. EPANET modeli ile klor konsantrasyonu yönetim ve senaryo analiz çalışmaları altıncı yönetim senaryosu .....	87
4.5.7. EPANET modeli ile klor konsantrasyonu yönetim ve senaryo analiz çalışmaları yedinci yönetim senaryosu .....	88
4.5.8. EPANET modeli ile klor konsantrasyonu yönetim ve senaryo analiz çalışmaları sekizinci yönetim senaryosu.....	90

4.6. Serbest Bakiye Klor Konsantrasyonlarının Veriye Dayalı Modelleme Yaklaşımları ile Modellenmesi .....	91
4.6.1. YSA tabanlı modelleme yaklaşımları birinci periyodu.....	91
4.6.2. YSA tabanlı modelleme yaklaşımları ikinci periyodu.....	95
4.6.3. Sistem tanımlama yöntemine dayalı modelleme yaklaşımları.....	98
5. TARTIŞMA .....	104
6. SONUÇ .....	111
7. KAYNAKLAR .....	115
ÖZGEÇMİŞ	

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

%	Yüzde
°C	Derece santigrat
µg	Mikrogram
µs	Mikrosiemens
AR	Otoregresif modeller
ARMA	Otoregresif hareketli ortalamalı modeller
ARMAX	Özbağlanımlı otoregresif hareketli ortalamalı modeller
ARX	Özbağlanımlı otoregresif modeller
BF	En iyi uyum kriteri
BJ	Box - Jenkins modelleri
CBS	Coğrafi bilgi sistemi
CFU	Koloni oluşturma birimi
CHBr <sub>2</sub> Cl	Dibromoklorometan
CHBr <sub>3</sub>	Bromoform
CHBrCl <sub>2</sub>	Bromodiklorometan
Cl	Klor
Cl <sub>2</sub>	Klor gazı
C <sub>w</sub>	Boru cidarında klor konsantrasyonu
DYÜ	Dezenfeksiyon yan ürünleri
FPE	Nihai sonuç hatası
gün <sup>-1</sup>	1/gün
H	Hidrojen
H <sub>2</sub> O	Su
HOCl	Hipokloröz asit
K <sub>b</sub>	Klor ana akım bozunma katsayısı
K <sub>w</sub>	Klor boru cidar bozunma katsayısı
Km	Kilometre
L	Litre
m	metre
m <sup>3</sup>	metreküp
mg	Miligram
MISO	Çok girdi - tek çıktı
MLP	Çok katmanlı algılayıcı
MSE	Ortalama hata karesi
NH <sub>4</sub>	Amonyum
NM	Nanometre
NO <sub>2</sub>	Nitrit
NO <sub>3</sub>	Nitrat
O	Oksijen
OCl	Hipoklorit iyonu
ON	Ölçüm noktası
R	Regresyon
Rp	Boru cidar pürüzlülük katsayısı
r <sub>h</sub>	Hidrolik yarıçap

RMSE	Ortalama hata karekökü
SISO	Tek girdi - tek çıktı
SSE	Hata kareleri toplamı
SUVA <sub>254</sub>	254 NM dalga boyunda spesifik UV absorbanans değeri
UV	Ultraviyole (mor ötesi ışınım)
YSA	Yapay sinir ağları

### **Kısaltmalar**

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ASAT	Antalya B.Şehir Belediyesi Su ve Atıksu İdaresi
HAA	Haloasetik asitler
SCADA	Veri tabanlı izleme ve kontrol sistemi
THM	Trihalometanlar
US - EPA	Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı
WHO	Dünya sağlık örgütü

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Farklı tiplerdeki su dağıtım şebekeleri, a) Dal şebeke sistemi, b) Ağ şebeke sistemi, c) Ağ ve dal şebeke sistemi birleşimi (Jespersion 2001) .....	4
Şekil 2.2. Farklı sıcaklık ve pH değerlerinde HOCl ve OCl dağılımı (EPA 1990) .....	8
Şekil 2.3. Yapay sinir ağlarının genel yapısı .....	12
Şekil 3.1. Antalya şehri içme suyu üretim ve dağıtım sistemi (TÜBİTAK 2011).....	24
Şekil 3.2. Konyaaltı su dağıtım şebekesi ve temel bileşenleri (TÜBİTAK 2011, Soyupak vd. 2011, Karadirek vd. 2012a).....	26
Şekil 3.3. Konyaaltı su dağıtım şebekesi alt bölgeleri ve online su kalitesi ölçüm istasyonları (Karadirek vd. 2012a).....	27
Şekil 3.4. Su kalitesi ölçüm ve analiz çalışmaları için numune alım noktaları (TÜBİTAK 2011).....	28
Şekil 3.5. a) Coğrafi bilgi sistemi verilerine ait verilerin görseli b) Coğrafi bilgi sistemi verileri kullanılarak elde edilen deterministik modelleme yaklaşımı girdi verileri görseli (TÜBİTAK, 2011) .....	29
Şekil 3.6. Pilot çalışma bölgesi su dağıtım şebekesinin EPANET 2.0 gösterimi (Karadirek vd. 2012a) .....	30
Şekil 3.7. a) Alt bölge – 6, b) Alt bölge – 18 coğrafi bilgi sistemi verilerine ait görseller (TÜBİTAK 2011).....	31
Şekil 3.8. a) Alt bölge – 2, b) Alt bölge – 4, c) Alt bölge – 6, d) Alt bölge – 8'e ait coğrafi bilgi sistemi verilerine ait görseller (TÜBİTAK 2011) .....	33
Şekil 3.9. a) 17-a Alt bölge, b) 17-b Alt bölge, c) 18. Alt bölgeye ait coğrafi bilgi sistemi verilerine ait görseller (TÜBİTAK 2011).....	35
Şekil 3.10. Model doğrulama çalışmalarında fiziksel olarak ikiye ayrılan pilot çalışma bölgesi .....	36
Şekil 3.11. Model doğrulama çalışmalarında kontrol numunesi alınan noktaların konumları .....	38
Şekil 3.12. Veriye dayalı modelleme yaklaşımlarında veri elde etmek amacı ile kullanılan online ölçüm istasyonları .....	40
Şekil 4.1. 2008 – 2011 yılları arasında pilot çalışma bölgesindeki 27 farklı ölçüm noktasında 15 ölçüm sonucu elde edilen su sıcaklığı değerleri (TÜBİTAK 2011, Karadirek vd. 2014a).....	44

Şekil 4.2. Pilot çalışma bölgesine 2010 yılında terfi edilen aylık ortalama debi değerleri (TÜBİTAK 2011, Karadirek vd. 2014a).....	46
Şekil 4.3. 6. Alt bölge 112 nolu düğüm noktasında 23.12.2009 - 28.12.2009 tarihleri arasında farklı pürüzlülük katsayıları için elde edilen ortalama mutlak hata değerleri (TÜBİTAK 2011) .....	47
Şekil 4.4. 18. Alt bölge S1243 nolu düğüm noktasında 05.04.2010 – 06.04.2010 tarihleri arasında farklı pürüzlülük katsayıları için elde edilen ortalama mutlak hata değerleri (TÜBİTAK 2011) .....	48
Şekil 4.5. 6. Alt bölgede 23.12.2009 - 28.12.2009 tarihleri arasında ölçülen debi değerleri (Başlangıç ve bitiş tarihi ve saati: 23.12.2009, 16:00 28.12.2009, 16:00) (TÜBİTAK 2011) .....	49
Şekil 4.6.18. Alt bölgede 05.04.2010 – 06.04.2010 tarihleri arasında 36 saat süre ile elde edilen debi ve su basıncı değerleri (TÜBİTAK 2011) .....	49
Şekil 4.7. 6. Alt bölge 112 nolu düğüm noktasında 23.12.2009 - 28.12.2009 tarihleri için elde edilen su basıncı model tahminleri ve ölçümler (Başlangıç tarihi ve saati: 23.12.2009, 16:00) (TÜBİTAK 2011).....	50
Şekil 4.8. 18. Alt bölgede S1243 nolu düğüm noktasında 05.04.2010 – 06.04.2010 tarihleri arasında elde edilen su basıncı model tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011).....	50
Şekil 4.9. Farklı $K_w$ değerleri için elde edilen ortalama mutlak hata değerleri (TÜBİTAK 2011).....	51
Şekil 4.10. a) 2. Alt bölgede, b) 4. Alt bölgede, c) 6. Alt bölgede ve d) 8. Alt bölgede 09.11.2009 - 10.11.2009 tarihleri arasında ölçülen debi değerleri (TÜBİTAK 2011).....	57
Şekil 4.11. a) 2. Alt bölgede, b) 4. Alt bölgede, c) 6. Alt bölgede ve d) 8. Alt bölgede 09.11.2009 - 10.11.2009 tarihleri arasında ölçülen klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011).....	58
Şekil 4.12. a) 2. Alt bölge 40 nolu düğüm noktasında, b) 2. Alt bölge 74 nolu düğüm noktasında, c) 4. Alt bölge 23 nolu düğüm noktasında, d) 6. Alt bölge 112 nolu düğüm noktasında, e) 8. Alt bölge 371 nolu düğüm noktasında 09.11.2009 - 10.11.2009 tarihleri için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011).....	59
Şekil 4.13. a) 2. Alt bölgede, b) 4. Alt bölgede, c) 6. Alt bölgede ve d) 8. Alt bölgede 23.11.2009 - 24.11.2009 tarihleri arasında ölçülen debi değerleri (TÜBİTAK 2011).....	60
Şekil 4.14. a) 2. Alt bölgede, b) 4. Alt bölgede, c) 6. Alt bölgede ve d) 8. Alt bölgede 23.11.2009 - 24.11.2009 tarihleri arasında ölçülen klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011).....	60

- Şekil 4.15. a) 2. Alt bölge 74, b) 4. Alt Bölge 23, c) 6. Alt bölge 112, d) 8. Alt bölge 371 nolu düğüm noktalarında 23.11.2009 - 24.11.2009 tarihleri için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler..... 61
- Şekil 4.16. a) 2. Alt bölgede, b) 4. Alt bölgede, c) 6. Alt bölgede ve d) 8. Alt bölgede 06.12.2009 - 07.12.2009 tarihleri arasında ölçülen debi değerleri (TÜBİTAK 2011)..... 62
- Şekil 4.17. a) 2. Alt bölgede, b) 4. Alt bölgede, c) 6. Alt bölgede ve d) 8. Alt bölgede 23.11.2009 - 24.11.2009 tarihleri arasında ölçülen klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011)..... 62
- Şekil 4. 18. 2. Alt bölge 40, b) 4. Alt Bölge 23, c) 6. Alt bölge 112, d) 8. Alt bölge 371 nolu düğüm noktalarında 06.12.2009 - 07.12.2009 tarihleri için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011) ..... 63
- Şekil 4.19. 6. Alt bölgede 23.12.2009 - 28.12.2009 tarihleri arasında ölçülen a) debi değerleri b) klor konsantrasyonları (Başlangıç ve bitiş tarihi ve saati: 23.12.2009, 16:00 28.12.2009, 16:00) (TÜBİTAK 2011) ..... 64
- Şekil 4.20. 6. Alt bölge 112 nolu düğüm noktasında 23.12.2009 - 28.12.2009 tarihleri için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (Başlangıç tarihi ve saati: 24.12.2009, 02:00) (TÜBİTAK 2011) ..... 64
- Şekil 4.21. a) 2. Alt bölgede, b) 4. Alt bölgede, c) 6. Alt bölgede ve d) 8. Alt bölgede 22.02.2010 – 23.02.2010 tarihleri arasında ölçülen debi değerleri (TÜBİTAK 2011)..... 65
- Şekil 4.22. a) 2. Alt bölgede, b) 4. Alt bölgede, c) 6. Alt bölgede ve d) 8. Alt bölgede 22.02.2010 - 23.02.2010 tarihleri arasında ölçülen klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011)..... 65
- Şekil 4.23. a) 2. Alt bölge 40 nolu düğüm noktasında, b) 2. Alt bölge 74 nolu düğüm noktasında, c) 4. Alt bölge 23 nolu düğüm noktasında, d) 6. Alt bölge 112 nolu düğüm noktasında, e) 8. Alt bölge 371 nolu düğüm noktasında 09.11.2009 - 10.11.2009 tarihleri için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011)..... 66
- Şekil 4.24. 12.04.2010 – 13.04.2010 tarihleri arasında ölçülen a) 17-a. Alt bölgede debi, b) 17-a. Alt bölgede klor konsantrasyonları, c) 17-b. alt bölgede debi, d) 17-b alt bölgede klor konsantrasyonları, e) 18. Alt bölgede debi, f) 18. Alt bölgede klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011) ..... 67
- Şekil 4.25. a) 17-a. Alt bölge T165 nolu düğüm noktasında, b) 17-b. Alt bölge T1114 nolu düğüm noktasında, c) 18. Alt bölge S1243 nolu düğüm noktasında 12.04.2009 - 13.04.2009 tarihleri için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011)..... 68



Şekil 4.26. Çalışma bölgesi doğu yakasında 12.05.2010 tarihinde ölçülen debi değerleri ve klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011).....	69
Şekil 4.27. Çalışma bölgesi doğu yakası 2156 nolu düğüm noktasında (2. alt bölge girişi, ON-68) 12.05.2010 tarihi için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011).....	70
Şekil 4.28. Çalışma bölgesi doğu yakası 6327 nolu düğüm noktasında (6. alt bölge girişi, ON-70) 12.05.2010 tarihi için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011).....	71
Şekil 4.29. Çalışma bölgesi doğu yakası 2147 nolu boruda (2. alt bölge girişi, ON-68) 12.05.2010 tarihi için elde edilen debi tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011) .....	71
Şekil 4.30. Çalışma bölgesi doğu yakası 6164 nolu boruda (6. alt bölge girişi, ON-70) 12.05.2010 tarihi için elde edilen debi tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011) .....	72
Şekil 4.31. Çalışma bölgesinde 14.09.2010 - 15.09.2010 tarihleri arasında ölçülen debi değerleri ve klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011).....	73
Şekil 4.32. Çalışma bölgesi S1243 nolu düğüm noktasında 14.09.2010 - 15.09.2010 tarihleri için elde edilen klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011).....	75
Şekil 4.33. Çalışma bölgesi 1200015 nolu düğüm noktasında 14.09.2010 - 15.09.2010 tarihleri için elde edilen klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011).....	76
Şekil 4.34. 2008 – 2011 yılları arasında pilot çalışma bölgesindeki 27 farklı ölçüm noktasında 15 ölçüm sonucu elde edilen klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011) .....	77
Şekil 4.35. S1243 nolu düğüm noktası için 21.07.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011) .	79
Şekil 4.36. Pilot çalışma bölgesinde 21.07.2010 tarihinde saat 23:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011) .....	79
Şekil 4.37. S1243 nolu düğüm noktası için 21.07.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011) .	80
Şekil 4.38. Pilot çalışma bölgesinde 21.07.2010 tarihinde saat 23:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011) .....	80
Şekil 4.39. S1243 nolu düğüm noktası için 02.06.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011) .	81

Şekil 4.40. Pilot çalışma bölgesinde 02.06.2010 tarihinde saat 06:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011) .....	82
Şekil 4.41. S1243 nolu düğüm noktası için 02.12.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011) .	83
Şekil 4.42. Pilot çalışma bölgesinde 02.12.2010 tarihinde saat 23:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011) .....	83
Şekil 4.43. S1243 nolu düğüm noktası için 21.07.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011) .	84
Şekil 4.44. Pilot çalışma bölgesinde 21.07.2010 tarihinde saat 23:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011) .....	85
Şekil 4.45. S1243 nolu düğüm noktası için 02.06.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011) .	86
Şekil 4.46. Pilot çalışma bölgesinde 02.06.2010 tarihinde saat 06:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011) .....	86
Şekil 4.47. S1243 nolu düğüm noktası için 02.12.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011) .	87
Şekil 4.48. Pilot çalışma bölgesinde 02.12.2010 tarihinde saat 23:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011) .....	88
Şekil 4.49. S1243 nolu düğüm noktası için 21.07.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011) .	89
Şekil 4.50. Pilot çalışma bölgesinde 21.07.2010 tarihinde saat 23:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011) .....	89
Şekil 4.51. S1243 nolu düğüm noktası için 03.12.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011) .	90
Şekil 4.52. Pilot çalışma bölgesinde 03.12.2010 tarihinde saat 23:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011) .....	91
Şekil 4. 53. 01.11.2010 – 12.11.2010 tarihleri arasında Boğaçay Pompa İstasyonu'nda ve ON-68 nolu online ölçüm istasyonunda elde edilen su kalite parametreleri .....	92

- Şekil 4.54. MISO modelleme yaklaşımı ile 01.11.2010 – 12.11.2010 tarihleri arasında ON-68 nolu istasyon için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının ve ölçümlerin kıyaslanması ..... 93
- Şekil 4.55. SISO modelleme yaklaşımı ile 01.11.2010 – 12.11.2010 tarihleri arasında ON-68 nolu istasyon için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının ve ölçümlerin kıyaslanması ..... 94
- Şekil 4.56. 23.09.2009 - 02.10.2009 tarihleri arasında Boğaçay Pompa İstasyonu'nda ve ON-69 nolu online ölçüm istasyonunda elde edilen su kalite parametreleri 96
- Şekil 4.57. MISO modelleme yaklaşımı ile 23.09.2009 - 02.10.2009 tarihleri arasında ON-69 nolu istasyon için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının ve ölçümlerin kıyaslanması ..... 97
- Şekil 4.58. SISO modelleme yaklaşımı ile 23.09.2009 - 02.10.2009 tarihleri arasında ON-69 nolu istasyon için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının ve ölçümlerin kıyaslanması ..... 98
- Şekil 4.59. 10.01.2012 – 02.02.2012 tarihleri arasında kaynak (Boğaçay) ve Gökdere istasyonlarında elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları..... 99
- Şekil 4.60. 01.02.2012 – 02.02.2012 tarihleri arasında ARX453 model yapısının 5 adım sonrası tahminleri ve ölçümlerin kıyaslanması ..... 100
- Şekil 4.61. 01.02.2012 – 02.02.2012 tarihleri arasında ARMAX2334 model yapısının 5 adım sonrası tahminleri ve ölçümlerin kıyaslanması ..... 101
- Şekil 4.62. 01.02.2012 – 02.02.2012 tarihleri arasında P3DU2 model yapısının 5 adım sonrası tahminleri ve ölçümlerin kıyaslanması ..... 103
- Şekil 4.63. Geliştirilen veriye dayalı matematiksel dinamik modellerin 5 adım sonrası tahminleri ile ölçümlerin kıyaslanması ..... 103

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Su kaynaklı olarak gerçekleşen salgın hastalıklar olayları ile ilgili seçilmiş bazı örnekler.....	6
Çizelge 2.2. Su dağıtım şebekelerinde klor bozunma katsayılarının tespiti için gerçekleştirilmiş bazı çalışmalar (Rossman 2006 ve Brown vd. 2011'den derlenmiştir.) .....	18
Çizelge 2.3. Farklı çalışma sahalarında klor konsantrasyonlarının modellenmesi için EPANET hidrolik ve su kalitesi modelinin kullanıldığı bazı çalışmalar .....	21
Çizelge 3.1. Antalya şehri içme suyu dağıtım sistemi basınç bölgeleri ve su kaynakları (Palancı 2011) .....	25
Çizelge 3.2. Hidrolik model kalibrasyonu için sahadan alınan kontrol numune istasyonlarına ait detaylar.....	32
Çizelge 3.3. EPANET model tahminlerinin kalibrasyonu için sahadan alınan kontrol numune istasyonlarına ait detaylar (TÜBİTAK 2011).....	34
Çizelge 3.4. Su kalitesi modeli doğrulama çalışmaları amacı ile sahadan alınan kontrol numunelerinin konum bilgileri (TÜBİTAK 2011).....	37
Çizelge 4.1. Konyaaltı su dağıtım şebekesi su kalitesi ölçüm sonuçlarının ilgili yönetmelikler ile kıyaslanması (Karadirek vd. 2014a) .....	45
Çizelge 4.2. Klor ana akım bozunma katsayısı çalışmalarına ait sonuçların istatistiksel değerlendirmesi (Karadirek vd. 2014a).....	46
Çizelge 4.3. Birinci kalibrasyon periyodunda dört alt bölgede farklı Kw değerleri için elde edilen hata değerleri (TÜBİTAK 2011) .....	52
Çizelge 4.4. İkinci kalibrasyon periyodunda üç alt bölgede farklı Kw değerleri için elde edilen hata değerleri (TÜBİTAK 2011).....	53
Çizelge 4.5. Üçüncü kalibrasyon periyodunda dört alt bölgede farklı Kw değerleri için elde edilen hata değerleri (TÜBİTAK 2011) .....	54
Çizelge 4.6. Dördüncü kalibrasyon periyodunda 6 numaralı alt bölgede farklı Kw değerleri için elde edilen hata değerleri (TÜBİTAK 2011).....	55
Çizelge 4.7. Dört kalibrasyon periyodu sonrasında tüm alt bölgelerde farklı Kw değerleri için elde edilen hataların toplamı (TÜBİTAK 2011).....	56
Çizelge 4.8. Çalışma bölgesinde dozlanacak klor konsantrasyonlarının tespiti için oluşturulan yönetim senaryoları (TÜBİTAK 2011, Karadirek vd. 2014a)..	78
Çizelge 4.9. ANN MISO modeli için elde edilen model performans değerleri.....	93

Çizelge 4.10. ANN SISO modeli için elde edilen model performans değerleri .....	94
Çizelge 4.11. ANN MISO modeli için elde edilen model performans değerleri.....	97
Çizelge 4.12. ANN SISO modeli için elde edilen model performans değerleri .....	98
Çizelge 4.13. ARX model yapıları 5 adım sonrası model tahminleri için model performans kriterleri.....	100
Çizelge 4.14. ARMAX model yapıları 5 adım sonrası model tahminleri için model performans kriterleri.....	101
Çizelge 4.15. Proses model yapıları 5 adım sonrası model tahminleri için model performans kriterleri.....	102
Çizelge 5.1. Klor yönetim senaryoları kapsamında kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonları (Karadirek vd. 2014a).....	109

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda hızlı nüfus artışı, sanayileşme, düzensiz kentleşme ve iklim değişikliği gibi etmenler kısıtlı su kaynakları üzerindeki baskıyı artırmakta ve bu kaynakların sürdürülebilir kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Su kaynaklarının sürdürülebilir kullanılması gerektiğinin yanında kullanıcılara yeterli miktarda ve kalitede içme - kullanma suyu temini su kuruluşlarının asli görevleri arasındadır ve üzerinde ehemmiyetle durulması gereken bir konudur.

Nihai kullanıcıya suyun yeterli kalitede ulaşması maksadı ile kaynaktan alınan içme suyu uygun bir yöntem ile artırılır ve/veya patojen mikroorganizmaların giderilmesi maksadı ile dezenfekte edilir. İçme sularının dezenfeksiyonunda farklı yöntemler olmakla birlikte, klor ile dezenfeksiyon en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Su dağıtım şebekelerinde dezenfeksiyonun amacı yalnızca sisteme iletilen su içerisindeki patojen mikroorganizmaları bertaraf etmek olmayıp aynı zamanda şebekede oluşabilecek potansiyel kontaminasyona karşı bakiye bırakmaktır. Ülkemiz gibi su dağıtım şebekelerindeki toplam su kayıpları miktarının sistem giriş hacminin %50'si olduğu durumlarda, su dağıtım şebekelerinde bakiye dezenfektan büyük önem kazanmaktadır. Özellikle su dağıtım şebekelerinde su kesintisinin olduğu durumlarda, şebekede negatif basınç etkisi meydana gelir ve bu durum neticesinde su kayıplarının kaynaklandığı çatlaklardan şebeke içerisine kontaminasyon gerçekleşebilir. Klor, uygulama kolaylığı, ucuz ve etkili olması ve bakiye bırakması sebepleri ile dünyada en yaygın kullanılan dezenfektandır.

Su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının nispeten düşük seviyelerde olması veya bulunmaması durumunda olası kontaminasyon halk sağlığını olumsuz etkilemektedir. Su dağıtım şebekelerinde meydana gelen kontaminasyon sonucu ülkemizde ve dünyada ortaya çıkan birçok vaka bulunmaktadır. Klor konsantrasyonlarının nispeten yüksek olması durumunda ise klorun organik ve inorganik maddeler ile yaptığı reaksiyonlar sonucu oluşan ve birçoğunun kanserojen etkiye sahip olduğu bilinen dezenfeksiyon yan ürünleri (DYÜ) ortaya çıkmaktadır. Uygulama kolaylığı, etkili ve ucuz olması gibi sebeplerle dezenfektan olarak tercih edilen klor belirlenen limit değerler arasında tutulmalıdır. Dünya sağlık örgütü (WHO) su dağıtım şebekelerinde en az klor konsantrasyonunun 0,2 mg/L olmasını tavsiye etmektedir. Ülkemizde ise Mart 2013 tarihinde revize edilen "İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik" normal işletme koşullarında ve dezenfektan olarak klor kullanılması durumunda su dağıtım şebekelerindeki uç noktalarda klor konsantrasyonunun 0,2 – 0,5 mg/L arasında olması gerektiğini bildirmektedir. Yine aynı yönetmelik kapsamında kanserojen etkiye sahip dezenfeksiyon yan ürünlerinden olan trihalometanlar (THM) için izin verilebilir en yüksek toplam THM konsantrasyonu 100 µg/L olarak bildirilmektedir.

Klor, su içerisindeki organik ve inorganik maddeler ile girdiği reaksiyonlar sonucu bozunmaya uğrar ve bu bozunma klor ana akım bozunması ( $K_b$ ) olarak adlandırılır. Bunun yanında su dağıtım şebekelerinde klor, boru cinsi ve yaşı gibi özelliklere bağlı olarak boru cidarı ile yaptığı reaksiyonlar sonucunda da bozunmaya uğrar ki bu bozunma da klor boru cidarı bozunması ( $K_w$ ) olarak adlandırılır. Klor ana akım bozunma katsayısı laboratuvar ortamında yapılan çalışmalar sonucu tespit

edilebilirken boru cidar bozunma katsayısı değerleri ise genellikle kalibrasyon çalışmaları sonucunda tespit edilir.

Su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının su kuruluşları tarafından yönetimi konusunda genel uygulama yaklaşımı farklı noktalarda örnekleme istasyonları seçilmek sureti ile klor ölçmeleri yapılması esasına dayanmaktadır. Fakat su dağıtım şebekeleri dinamik sistemler olup, hidrolik ve su kalitesi parametreleri zamansal ve mekansal değişimler göstermektedir. Bu nedenle klor konsantrasyonlarının yönetimi için ölüm istasyonlarından alınan numuneler su dağıtım şebekesindeki zamansal ve mekansal değişimleri temsil etmekte yetersiz kalır. Su dağıtım şebekelerinde l noktalar su kalitesi açısından su yaşının yüksek olduğu noktalar olup, bu noktalar her zaman fiziki olarak en uzak nokta anlamına gelmemektedir. Tam da bu nedenle su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının yönetimi maksadı ile modelleme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır ve mer’i mevzuat hükümleri bu durum göz nnden bulundurulurak revize edilmelidir.

Su dağıtım şebekelerinde hidrolik ve su kalitesi parametrelerinin modellenmeleri deterministik olarak yapılabilereği gibi, son yıllarda bilgisayar teknolojisinin ve dolayısı ile makine öğrenme teknolojisinin de gelişmesi ile veriye dayalı modelleme yaklaşımları da bu amaçla kullanılmaya başlanmıştır. Deterministik modelleme yaklaşımı sistemin fiziksel tüm özelliklerinin bilinmesini ve öncelikle bir hidrolik model kurulmasını gerektirirken, veriye dayalı modelleme yaklaşımları yalnızca girdi ve çıktı ilişkisi üzerine kurulan ve bazıları matematiksel olarak ta ifade edilebilen modellerdir. Deterministik modelleme yaklaşımlarında su dağıtım şebekesinin boru, düğüm noktaları, koordinatlar, vanalar, pompa, dengeleme tankları gibi fiziksel bileşenleri ile ilgili bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlara ilaveten hidrolik model kurulumu için temel su tktim verileri, debi profilleri gibi bilgilere de ihtiyaç duyulmaktadır. Klor konsantrasyonlarının deterministik modelleme yaklaşımı ile modellenebilmesi için hidrolik model verilerinin yanı sıra klor ana akım ve klor boru cidar bozunma katsayıları gibi veriler gereklilikler arasındadır. Su dağıtım şebekelerinde su kalitesinin modellenmesi amaı ile deterministik modelleme çalışmaları 1980’li yıllarda başlamış olup, 1994 yılında A.B.D. evre Kruma Ajansı (US – EPA) tarafından geliştirilen ve günümüzde güncellenmiş versiyonları geniş uygulama alanı bulan EPANET hidrolik ve su kalitesi modeli ile devam etmiştir. EPA tarafından geliştirilen EPANET cretsiz olarak temin edilebilen bir yazılımdır. EPANET’in kaynak kodları da ücretsiz olarak ulaşılabilir durumdadır. Bu sayede konuyla ilgilenen araştırmacılar kendi ihtiyaçları doğrultusunda programı geliştirebilir. Son yıllarda EPANET’in açık kaynak kodları kullanılarak farklı isimler altında ticari birçok hidrolik ve su kalitesi mevcuttur.

Deterministik modelleme yaklaşımında ihtiyaç duyulan bilgilere ulaşmak her zaman mümkün olmayabilir veya bu bilgilere ulaşmak zaman ve ciddi ekonomik maliyetler gerektirebilir. Bu durumda yine son yıllarda yalnızca girdi ve çıktı parametreleri arasındaki ilişkilerin kullanımı ile su dağıtım şebekelerinde modelleme çalışmaları gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmaların başında yapay sinir ağları ve sistem tanımlamaya dayalı matematiksel modellerin kullanımı gelmektedir.

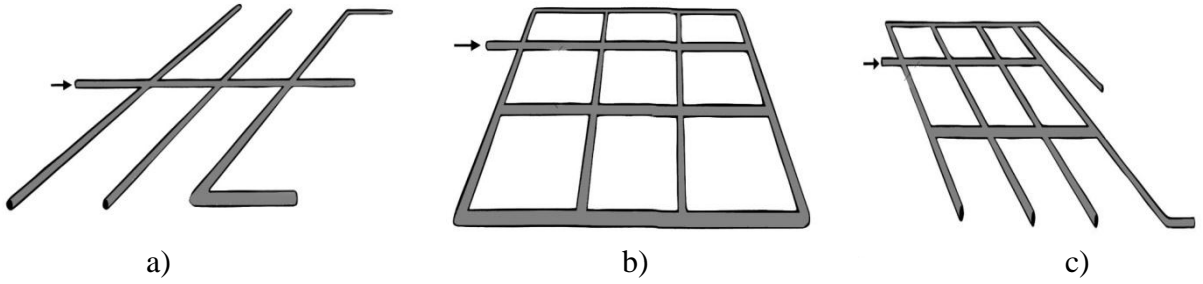
Bu çalışma kapsamında içme suyu dağıtım şebekelerinde serbest bakiye klor konsantrasyonların yönetimi amacıyla deterministik ve veriye dayalı modelleme yaklaşımları uygulanmıştır. Bu kapsamda Antalya ili Konyaaltı ilçesi sınırları içerisinde yer alan, Boğaçay yeraltı su kaynaklarından beslenen Konyaaltı su dağıtım şebekesinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar kapsamında çalışma bölgesinde su kalitesi ölçüm ve analiz çalışmaları, online kantitatif ve kalitatif parametrelerin izlenmesi, EPANET hidrolik ve su kalitesi modeli kullanımı ile deterministik modelleme yaklaşımı ve veriye dayalı modelleme yaklaşımları ile serbest bakiye klor konsantrasyonları modellenmiş ve kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonları tespit edilmiştir.



## 2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI

### 2.1. İçme Suyu Dağıtım Şebekeleri

İçme suyu dağıtım şebekeleri, suyun kaynaktan alınarak kullanıcılara ulaştırılmasında kullanılan, pompalar, borular, vanalar, depolama ve dengeleme tankları ile yangın musluklarından oluşan dinamik sistemlerdir. Su dağıtım şebekelerinin amacı kullanıcıya yeterli miktarda ve kalitede suyu ulaştırmaktır. Su dağıtım şebekeleri dal şebeke sistemleri, ağ şebeke sistemleri veya her ikisinin birleşiminden oluşan yapılardan oluşurlar. Şekil 2.1’de su dağıtım şebekelerine ait sistemler verilmektedir.



Şekil 2.1. Farklı tiplerdeki su dağıtım şebekeleri, a) Dal şebeke sistemi, b) Ağ şebeke sistemi, c) Ağ ve dal şebeke sistemi birleşimi (Jespersion 2001)

İçme suyu dağıtım şebekeleri basınçlı sistemler olup, kullanıcılara yeterli debi ve su basıncı ile yeterli kalitede su ulaştırmak amacı ile tasarlanmalıdır (Karpuzcu, 2005). Farklı yapılardaki su dağıtım şebekelerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Dal şebeke sistemlerinde hidrolik hesaplamalar basit, boru çaplarının nispeten küçük olması sebebi ile ekonomik olması bu sistemlerin avantajlarını oluşturur (Schal 2013, Muslu 2005). Fakat bu sistemlerin dezavantajları;

i) Boruların uç kısımlarının hem fiziki yönden hem de hesap yönünden ölü noktalar teşkil etmesi ve bu ölü noktalarda hızın düşük olmasına dolayısı ile su kalitesinin bozulması,

ii) Bakım ve onarım durumlarında su kesintisi bütün bölgeyi etkileyebilmesi,

iii) Sistemde tek yönlü akımın mevcut olmasına bağlı olarak yeni bölgeler eklendiğinde basınçta düşüşler yaşanabilir olması olarak sıralanabilir. (Muslu, 2005).

Ağ şebeke sistemleri ise ölü noktaların oluşmaması, bakım ve onarım durumunda bölgenin tamamının etkilenmemesi ve daha esnek bir işletmeye izin vermesi gibi avantajlara sahiptir (Mcghee 2001). Diğer taraftan ağ şebeke sistemlerinin hidrolik hesabı daha karmaşıktır ve daha fazla boru ve boru malzemesi ihtiyacı mevcuttur (Muslu 2005).

İçme suyu dağıtım şebekeleri dinamik ve yaşayan sistemlerdir (Izquierdo vd. 2012). İçme suyu dağıtım şebekelerinde su tüketimlerinin zamansal ve mekansal farklılıkları sebebi ile hidrolik özellikler ve dolayısı ile su kalitesi özellikleri değişim gösterir. Türkiye’de su dağıtım şebekelerindeki optimum su basıncı 60 mss olarak bildirilmiştir (Anonim-I 2014).

## 2.2. İçme Sularının Dezenfeksiyonu

Patojen mikroorganizmaların sudan uzaklaştırılması işlemine suyun dezenfeksiyonu adı verilir (Eroğlu, 2008). Yeraltı ve/veya yüzeysel su kaynaklarından temin edilen suyun tüketiciye ulaşmadan önce arıtılması ve/veya genel olarak dezenfeksiyon işleminin uygulanması gerekir.

İçme suyu şebekelerinde dezenfeksiyon; kaynatma ve benzeri fiziki işlemler, UV ışınları, halojenler (klor, brom, iyot), ozon, potasyum permanganat vb. oksidantlar ile uygulanabilir. Dezenfeksiyon metodunun ve kullanılacak dezenfektanın seçiminde, dezenfektanın cinsi ve dozu, gerekli temas süresi, suyun sıcaklığı ve kimyasal özellikleri, giderilecek mikroorganizmaların tür ve özellikleri önemlidir (Eroğlu 2008).

Etkili, makul fiyatlı, ulaşılabilirliğinin ve uygulanmasının kolay olması sebepleri ile içme sularının dezenfeksiyonunda en yaygın kullanılan dezenfektan klordur. Dezenfektan olarak klor kullanımı içme suyu kaynaklı hastalıkları ortadan kaldırmıştır (USCDC 1997). İçme sularında dezenfeksiyonun amacı yalnızca patojen mikroorganizmaların giderimi değil aynı zamanda su dağıtım şebekelerinde meydana gelebilecek muhtemel kontaminasyona karşı kalıntı bırakmaktır (Clark ve Sivaganesan 2002). Dezenfektan olarak klor kullanımının bir diğer avantajı da su içerisinde bakiye bırakmasıdır. Kaynak noktasında arıtma ve/veya dezenfeksiyon işlemi uygulanan su genellikle içilebilir kalitede olmakla birlikte, kaynaktan tüketiciye ulaşmaya kadar kirlenme riskiyle genellikle karşı karşıyadır. Bu kirlenmenin ana sebeplerinden birisi içme suyu dağıtım sistemlerinde su kayıplarının meydana geldiği çatlaklardan olması muhtemeldir. Ülkemizde su dağıtım şebekelerinde meydana gelen su kayıpları miktarının ortalama değeri %50 seviyelerindedir (Karadirek vd. 2012). Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, kaynaktan şebekeye verilen suyun tüketiciye güvenli ulaşması için dezenfeksiyon işlemi sonrasında su içerisinde bakiye bırakan dezenfektanların kullanılması gerekliliği gündeme gelmektedir. Bu durum ülkemizde ve birçok ülkede kullanılan dezenfektandan istenen bir özelliktir.

Klor, su içerisinde bulunan organik ve inorganik maddeler ile reaksiyona girerek zamanla bozunmaya uğrar. Demir, mangan, sülfid, bromür ve amonyak gibi inorganik maddeler klor ile nispeten daha hızlı reaksiyona girerken, klorun organik maddeler ile girdiği reaksiyonlar ise göreceli olarak daha yavaş reaksiyonlardır. Klorun su içerisindeki organik ve inorganik maddeler ile yaptığı reaksiyonlar klor ana akım bozunması olarak adlandırılır ve bu bozunma katsayısı  $K_b$  ile ifade edilir.  $K_b$  katsayısı, su sıcaklığı, pH, başlangıç klor konsantrasyonu, organik ve inorganik maddelerin konsantrasyonuna bağlıdır (Clark ve Sivaganesan 2002). Su dağıtım şebekelerinde klor ayrıca boru cidarı ile reaksiyona girer ve bu reaksiyon klor boru cidar bozunması olarak adlandırılır ve bu bozunma katsayısı  $K_w$  ile ifade edilir.  $K_w$ , boru cinsi ve yaşı, boru içerisinde oluşmuş biofilm ve korozyon ve birikmiş sedimana bağlı olarak değişim gösterir (Vasconcelos vd. 1997).

İçme suyu kaynaklı tarih boyunca bir çok felaket yaşanmış olup, dünyada ve ülkemizde su kaynaklı olarak gerçekleşen seçilmiş bazı olaylar Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Su kaynaklı olarak gerçekleşen salgın hastalıklar olayları ile ilgili seçilmiş bazı örnekler

<b>Lokasyon ve tarih</b>	<b>Karakteristikleri</b>	<b>Referans</b>
Richmond Height, Florida, A.B.D.; Ocak – Mart 1994	1200 gastroenterit vakası, klorlanmış, sığ kuyudan temin edilen su	Weissman vd. 1976
Bradford, Philadelphia, A.B.D., Eylül – Aralık 1979	3500 gastroenterit vakası, klorlanmış kuyu suyu temini	Akın ve Jakubowski 1986
Oakcreek Kanyonu, Arizona, A.B.D., Nisan 1989	240 kişiden 11’inde gastroenterit vakası, klorlanmamış özel kuyu suyu temini	Lawson vd. 1991
Uggelose, Danimarka, Kasım 1992 – Şubat 1993	1400 gastroenterit vakası, klorlanmamış su kaynağı (belediye)	Laursen vd. 1994
Gideon, Missouri, A.B.D., Aralık 1993	600 salmonella vakası, 15 hastanede tedavi vakası, 7 ölüm vakası, dezenfeksiyon yapılmamış su kaynağı	Clark vd. 1996
Malatya, Türkiye, Aralık 2005	9907 akut ishal vakası, su dağıtım şebekesine kontaminasyon	Koroglu vd. 2011
Finike, Antalya, Türkiye, Ekim 2007	Yaklaşık 400 gastroenterit vakası, içme suyu dağıtım şebekesine kontaminasyon	Anonim II, 2007
Keçiborlu, Isparta, Türkiye, Nisan 2010	Yaklaşık 600 ishal vakası, içme suyu dağıtım şebekesine kontaminasyon	Anonim III, 2010

Su dağıtım şebekelerinde bakiye klor bulunmaması veya oldukça düşük konsantrasyonlarda bulunması durumunda potansiyel kontaminasyon sonucu halk sağlığı olumsuz etkilenmektedir. Klor konsantrasyonlarının yüksek olması durumunda ise hem klor kendisi zehirli etki göstermekte olup hem de sudaki doğal organik bileşiklerle reaksiyona girerek insan sağlığına zararlı kanserojen etki gösteren bileşiklerin oluşmasına yol açabilmektedir.

Klorun, doğal sulara bulunan humik ve fülvik asitlerle reaksiyona girmesi sonucu oluşan klorlu organik bileşiklerin en önemlileri trihalometanlardır (THM) (Rodriguez ve Serodes 2005). Hemen hemen bütün bileşiklerinin kanserojen etki yaptığı bilinmektedir. İçme sularında en çok rastlanan THM bileşikleri kloroform ( $\text{CHCl}_3$ ), bromodiklorometan ( $\text{CHBrCl}_2$ ), dibromoklorometan ( $\text{CHBr}_2\text{Cl}$ ) ve bromoform ( $\text{CHBr}_3$ )’dur. THM oluşum hızı ve miktarı humus konsantrasyonu arttıkça, sıcaklık arttıkça ve yüksek pH değerlerinde artmaktadır (Yalçın ve Gürü 2002, Villanueva vd. 2003, Günay 2005, Uyak ve Toröz 2006). Klorlanmış içme suyu içinde oluşan dezenfeksiyon yan ürünleri (DYÜ) arasında THM ve haloasetik asitler (HAA) 1970’lerden beri en fazla çalışılan ve kanserojen yapabilme özelliği açısından en şüpheli

görülen DYÜ türleridir (Crozes vd. 1995, , Uyak 2006). Bu sebepler nedeni klor konsantrasyonları şebeke içerisinde kontrol edilmeli ve belirli sınır değerler arasında bulundurulmalıdır.

07.03.2013 Tarih ve 28580 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan “İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik”te “İçme-kullanma sularının dezenfeksiyonunda klor kullanılması halinde, uç noktada yapılacak ölçümlerde serbest klor düzeyinin 0,2 – 0,5 mg/L olması sağlanır. Klorlamada bu düzeyin sağlanamaması durumunda mahalli idare tarafından ara klorlama ünitesi yaptırılır. Deprem ve sel gibi olağanüstü durumlar ile kaynak, depo ve şebeke sistemi gibi su yapılarında oluşan arızalanmalara bağlı olarak yapılan su kesintilerinde şebekenin en uç noktasında serbest klor düzeyi en fazla 1,0 mg/L olacak şekilde klorlama yapılabilir. İçme-kullanma suyunda dezenfeksiyon etkinliğinin denetlenmesi amacıyla, serbest klor ölçümleri suyun mahallinde her gün yapılır.” ibaresi yer almaktadır. Yine aynı yönetmelik kapsamında su dağıtım şebekelerinde izin verilen en yüksek toplam THM konsantrasyonu 100 µg/l olarak belirtilmektedir (Anonim IV 2013). Dünya sağlık örgütü (WHO) ise, içme suyu dağıtım şebekelerinde minimum serbest bakiye klor konsantrasyonlarının 0,2 mg/L olmasını tavsiye etmektedir (WHO, 2011). ABD’de, Çevre Koruma Ajansı (EPA), THM ve HAA için sırasıyla 80 µg/l ve 60 µg/l limitlerini getirmiş olup, Avrupa Birliği ülkelerinde ise içme suyu yönetmeliklerinde sadece toplam THM için 100 µg/l limiti bulunmaktadır (EECD 1998, USEPA 1998).

Su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının yönetimi halk sağlığı açısından risk oluşturmayacak şekilde yönetilmelidir. Bu nedenle klor konsantrasyonları, su dağıtım şebekelerinde zamansal ve mekansal değişimler gösterir. Klor konsantrasyonlarının şebekede belirli limitler arasında kalmasını sağlamak için modelleme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır (Karadirek vd. 2011).

### 2.3. Klor Bozunma Kinetikleri

Dezenfektan olarak kullanılan klor genellikle klor gazı (Cl<sub>2</sub>) veya sodyum hipoklorit (HOCl) formunda kullanılır (Xin vd. 2003). Klor, suda son derece kolay çözünen ve kontrollü bir şekilde kolayca uygulanabilen bir maddedir. Klor iyonu suda çözüldüğünde bağıntı (2.1)’de belirtilen hidroliz ve iyonizasyon reaksiyonları meydana gelir. Gaz halindeki klor suda tamamen erir ve suda eridiği zaman klor hızla hidrolize olarak hipokloröz asidi (HOCl) oluşturur (Peker 2007).

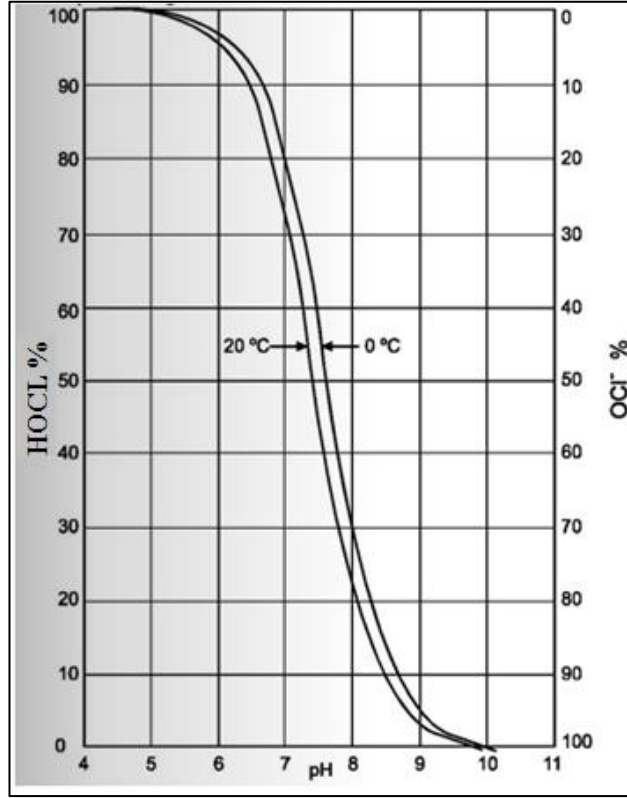


Oluşan hipokloröz asiti iyonlaşarak hipoklorit iyonu meydana getirir. Bu iyonlaşma bağıntı (2.2) ile ifade edilir;



Hipokloröz asit (HOCl) ve hipoklorit iyonlarının (OCl<sup>-</sup>) konsantrasyonuna “serbest klor” adı verilir ve miktarları esas olarak suyun pH değeri tarafından belirlenir. Hipokloröz asit yüksüz olması sebebiyle mikroorganizma hücrelerinin çevresindeki

yüklerden etkilenmeden hücre içerisine nüfuz edebildiğinden hipoklorür iyonlarına göre 80 kat daha etkilidir. Etkili bir dezenfeksiyon için pH 6,5 ~ 7,0 mertebelerinde tutulmaktadır (Muslu 2002, Eroğlu 2008). Hipokloröz asit kuvvetli asittir ve ortamda tamamen dağılır, hipoklorik asit ise zayıf bir asittir ve dağılımı ortamın pH'sı ile belirlenir. Şekil 2.2'de pH'a bağlı olarak HOCl ve OCl<sup>-</sup> yüzdeleri verilmektedir.



Şekil 2.2. Farklı sıcaklık ve pH değerlerinde HOCl ve OCl dağılımı (EPA 1990)

Klor, su dağıtım şebekelerinde ana akımda meydana gelen bozunma ve boru cidari ile klorun yaptığı reaksiyonlar sonucu oluşan bozunma olarak ikiye ayrılmaktadır. Klorun su dağıtım şebekelerindeki genel bozunma kinetiği bağıntı (2.3)'te verilmektedir (Xin vd. 2003).

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{K_w}{r_h} - \frac{W}{r_h} - K_b \cdot C \quad (2.3)$$

- C : Ana akım klor konsantrasyonu
- t : Zaman
- K<sub>w</sub> : Klor boru cidar bozunma katsayısı
- K<sub>b</sub> : Klor ana akım bozunma katsayısı
- r<sub>h</sub> : Hidrolik yarıçap
- C<sub>w</sub> : Boru cidarında klor konsantrasyonu

Klorun su içerisindeki organik ve inorganik maddeler ile yaptığı reaksiyon sonucu oluşan bozunmaya klor ana akım bozunması denmektedir (Clark ve Sivaganesan 2002). Su sıcaklığı, pH, organik ve inorganik madde konsantrasyonu ve başlangıç klor

konsantrasyonu gibi etmenlere bağılı olan klor ana akım bozunması laboratuvar testleri ile belirlenmektedir (Vieira 2004).  $K_b$ , literatürde  $0,070 \text{ gün}^{-1}$  ile  $17,760 \text{ gün}^{-1}$  arasında değerler almaktadır (Powell vd. 2000). Klor ana akım bozunma katsayısının genel olarak birinci derece reaksiyon kinetiği ile ifade edildiğini bildirmişlerdir. Klorun ana akımında meydana gelen bozunma genel olarak (2.4) bağıntısı ile ifade edilebilmektedir.

$$r = K_b C^n \quad (2.4)$$

r : Reaksiyon hızı (kütle/hacim/zaman)  
 $K_b$  : Bozunma katsayısı  
n : Reaksiyon derecesi  
 $C^n$  : Reaksiyon konsantrasyonu (kütle/hacim)

Boru cinsi ve yaşı, biofilm, korozyon ve birikmiş sediman gibi faktörlere bağılı olan, klorun boru cidarı ile yaptığı reaksiyon sonucu ortaya çıkan bozunma klor boru cidar bozunması olarak adlandırılmaktadır. Klor boru cidar bozunma katsayısı genel olarak model kalibrasyon çalışmalarında, model tahminleri ile saha ölçümlerinin kıyaslanması sureti ile tespit edilmektedir. Shank (2004) deneme yanılma yönteminin klor boru cidar bozunma katsayısının tespitinde yeterli olmadığını bildirmektedir. Diğer taraftan, Liu vd. (2010) ise  $K_b$  değerinin hassas bir şekilde tespiti sonrasında  $K_w$  değerinin sahada yapılan ölçümler kullanılarak deneme yanılma yöntemi ile tespit edilebileceğini bildirmektedir.  $K_w$ , ana akımdaki akış ve boru cidarı ile boru cidarındaki reaksiyon alanı arasındaki kütle transferinden etkilenir. İlk faktör, izlenen kimyasalın moleküler yayılımına bağılı kütle transfer eşitliği ile ifade edilir.  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  su sıcaklığında klorun su içerisindeki yayılımı  $1,44 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sn}$  değerine eşittir. Bir diğer faktör olan boru cidarındaki reaksiyonun gerçekleştiği alan ise birim hacimdeki yüzey alana eşittir (Mostafa vd. 2013). Klorun boru cidarındaki bozunma katsayısı eşitlik 2.5 ile ifade edilmektedir.  $K_w$  değeri 0'dan başlayarak boru yaşı, cinsi, biyofilm gibi özelliklere bağılı olarak değişmektedir. (Rossman vd. 1994)

$$r(C_i) = (A/V)K_w C_i^n \quad (2.5)$$

$K_w$  : Klor boru cidar bozunma katsayısı  
A/V : Boru içerisinde birim hacimdeki yüzey alanı ( $2/R_i$ )  
 $R_i$  : Boru çapı

#### 2.4. Deterministik Modelleme Yaklaşımı

Deterministik modelleme yaklaşımı genel olarak girdi parametre değerleri tariflenen ve kantitatif olarak bilinen matematiksel modeller kullanarak çıktı değerlerini hesaplar. Örneğin, verilen girdi parametresi aynı kimyasal bir reaksiyon denkleminde olduğu gibi daima aynı çıktıyı verir. Konvansiyonel modelleme yaklaşımında, şebekenin statik ve dinamik bilgilerine ihtiyaç duyulur. Statik bilgiler, şebekenin fiziksel bileşenleri, coğrafi bilgileri, bağlantılar, boru çapları, boru uzunlukları, vb., dinamik bileşenleri ise dengeleme tankları, kaynak, pompa, vanalar, saatlik su tüketimleri vb. olmak üzere kategorilendirilebilir (Machell vd. 2009).

Su dağıtım şebekelerindeki klor konsantrasyonlarının belirlenmesi maksadı ile 1951 yılından günümüze kadar farklı modeller geliştirilmiş; klor bozunmasının genel olarak birinci derece reaksiyon kinetiğine uyduğu belirtilmiştir (Haas ve Karra 1984, Biswas vd. 1993, Rossman 1993, Rossman vd. 1994, Chambers vd. 1995, Vasconcelos vd. 1997). İlk su kalitesi modeli Wood (1980) tarafından geliştirilmiş ve bu model Males vd. (1985) tarafından varış süresi ve konsantrasyonun bir fonksiyonu olarak mekansal değişimleri tespit etmek için kullanılmıştır. Grayman vd. (1988) tarafından dinamik algoritmaları kullanan bir su kalitesi modeli geliştirilmiş olup, bu çalışmalar araştırmacıların su dağıtım şebekelerinde hidrolik ve su kalitesi modellerini birleştirme üzerinde yoğunlaşmıştır. Su dağıtım şebekelerinde hidrolik ve su kalitesi davranışlarının geniş zaman aralıklarında simülasyonu amacı ile EPANET isimli hidrolik ve su kalitesi modeli oluşturulmuştur (Rossman 1993). EPANET hidrolik ve su kalitesi modelinin geliştirilmesini takiben günümüze kadar birçok hidrolik ve su kalitesi modeli geliştirilmiştir (Grayman vd. 2006). Su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının tahmini, hidrolik model sonuçlarını, klor ana akım ve klor boru cidar bozunma katsayılarını girdi olarak kullanır. Bu nedenle su dağıtım şebekelerinde su kalitesi modelleri, kalibrasyonu ve doğrulaması yapılmış bir hidrolik modele ihtiyaç duyar (Males vd. 1998). Su dağıtım şebekelerinde su kalitesi modelleri, laboratuvarında tespit edilmiş olan klor ana akım bozunma katsayısını doğrulanması maksadı ile kalibrasyon çalışmasına tabi tutulmalıdır.

#### **2.4.1. EPANET hidrolik ve su kalitesi modeli**

EPANET hidrolik ve su kalitesi modeli, su dağıtım şebekelerinin hidrolik ve su kalitesi davranışlarının geniş zaman aralıklarında simülasyonunu gerçekleştirebilir. Su dağıtım şebekeleri borulardan, düğüm noktalarından, pompalardan, vanalardan ve dengeleme tanklarından oluşmaktadır. EPANET, her bir borudaki suyun akışını, düğüm noktalarındaki basıncı, tanklardaki su yüksekliğini ve şebekede bir simülasyon periyodu boyunca su kalitesindeki konsantrasyon değişimlerini izler. Bu yazılım, su dağıtım sistemlerinde birçok farklı analizin yapılması için kullanılabilir. Hidrolik model kalibrasyonu, bakiye klor analizi ve su tüketim miktarının değerlendirilmesi bunlara örnektir. Sistemdeki su kalitesinin iyileştirilmesi için alternatif yönetim senaryolarının oluşturulmasına yardımcı olur. Yazılım sayesinde içme suyu dağıtım sisteminin basit bir şekilde kullanıcı tarafından görsel olarak oluşturulmasına ve şebeke elemanlarına ait verilerin bu ortama aktarılmasına izin verir. Sisteme ilişkin çok çeşitli veri analizi ve raporlaması yapılabilir. Ücretsiz olarak ulaşılabilen EPANET hidrolik ve su kalitesi modeli aynı zamanda kaynak kodunu da ücretsiz olarak kullanıcılara sunmaktadır (Rossman 2000). EPANET hidrolik ve su kalitesi modeline ait hidrolik özellikler şu şekilde sıralanabilir: i) Analiz edilen sistem sınırsız büyüklüktedir. ii) Hazen-Williams, Darcy-Weisbach veya Chezy-Manning formüllerine göre sürekli yük kayıpları hesaplanır. iii) Dirsekler ve diğer şebeke elemanlarındaki yerel yük kayıpları hesaplanır. iv) Sabit ya da değişken pompaların hızları modellenir. v) Pompalama enerjisini ve maliyetini hesaplanır. vi) Değişik vana modelleri (kapatma, kontrol, basınç ayarlama ve akış kontrolü vanaları) kullanılır. vii) Değişik çap ve yüksekliklerdeki haznelere içerir. viii) Orifisten basınca bağlı olarak çıkan akışı modeller. ix) Tüm basit tank seviyelerini ya da zaman kontrollerini ve karmaşık kontrolleri ana sisteme işleyebilir (Rossman 2000).

EPANET hidrolik ve su kalitesi modeline ait su kalitesi özellikleri; i) Zaman içinde reaktif olmayan iz elementlerin modellenmesi, ii) Reaktif maddelerin zamanla artması ya da bozunmasının modellenmesi, iii) Şebeke içerisinde baştan sona su yaşının modellenmesi, iv) Boru cidarlarında ve ana akımdaki reaksiyonların modellenmesi, v) Büyüme ve bozunma reaksiyonlarının belirli bir sınır konsantrasyona kadar takip edilmesi, vi) Sistemdeki her bir boru için hız reaksiyon katsayılarının değiştirilebilmesine olanak sağlanması, vii) Şebekede zamanla değişiklik gösteren konsantrasyonlar ya da yersel kütle girişlerinin tanımlanması, viii) Dengeleme tanklarında farklı karışım modellerinin tanımlanabilmesi olarak sıralanabilirler (Rossman 2000).

## **2.5. Veriye Dayalı Modelleme Yaklaşımı**

Hidrolojik modeller fiziksel, matematiksel veya ampirik modeller olarak sınıflandırılabilirken, son yıllarda matematik eşitlikler içeren fakat bu eşitliklerin fiziksel süreçler yerine verilerdeki zaman serilerinden üretildiği yeni bir modelleme yaklaşımı ortaya çıkmıştır. Yalnızca girdi ve çıktı verileri arasındaki ilişkinin analizi ile elde edilen bu modeller, son yıllarda makine öğrenimindeki gelişmeleri takiben oldukça fazla uygulama alanı bulmaktadır (Solomatine vd. 2008).

Son yıllarda geleneksel hidrodinamik tabanlı su kalite modellemelerinin zahmetli ve yüksek maliyetli olmaları, su şebekelerinde su kayıplarının sağlıklı olarak tahmin edilememesi ve modelleme kullanılarak klor bozunumu ile ilgili çok sayıda varsayım kullanılması nedenleri ile yeni yöntemler denenmeye başlanmış bulunmaktadır. Bu yeni sınıf ampirik (öğrenmeye dayalı) yöntemler girdi - çıktı ilişkisine bağlı olarak geliştirilmekte; su dağıtım şebekelerindeki stratejik noktalarda kalıntı bakiye klorun tahmin edilmesinde uygulanabilmektedir (May vd. 2004, May vd. 2006).

### **2.5.1. Yapay sinir ağları tabanlı modelleme yaklaşımı**

Yapay sinir ağları (YSA), gerçekleştirilen örnekleri kullanmak sureti ile öğrenebilen, öğrenme yolu ile yeni bilgiler geliştirebilen ve çevresel olaylara karşı tepkiler üretebilen bilgisayar sistemleridir (Şen 2004, Uslu 2011, Kasaplı 2014). YSA, öğrenme, ilişkilendirme, sınıflandırma, genelleme, optimizasyon gibi konularda kullanılmaktadırlar (Uslu 2011).

Biyolojik sinir hücrelerinde olduğu gibi YSA'nın da temel unsuru YSA'nın çalışmasına esas teşkil eden en küçük ve temel bilgi işleme birimi olan yapay sinir hücresidir. Yapay sinir ağları genel olarak girdiler, ağırlıklar, birleştirme fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktı olmak üzere beş temel bileşenden oluşur (Uslu 2011, Kasaplı 2014).

Girdiler, diğer hücrelerden ya da dış ortamlardan hücreye giren bilgileri içerir. Ağırlıklar, yapay sinir tarafından alınan girişlerin sinir üzerindeki etkisini belirlemekte olup, her bir girişin kendisine ait bir ağırlığı mevcut olup, YSA içinde girdilerin nöronlar arasında iletimini sağlayan tüm bağlantıların farklı ağırlık değerleri bulunmaktadır ki; bu da ağırlıkların her işlem elemanı üzerinde bir etkisi olduğunu gösterir. İşlem elemanından



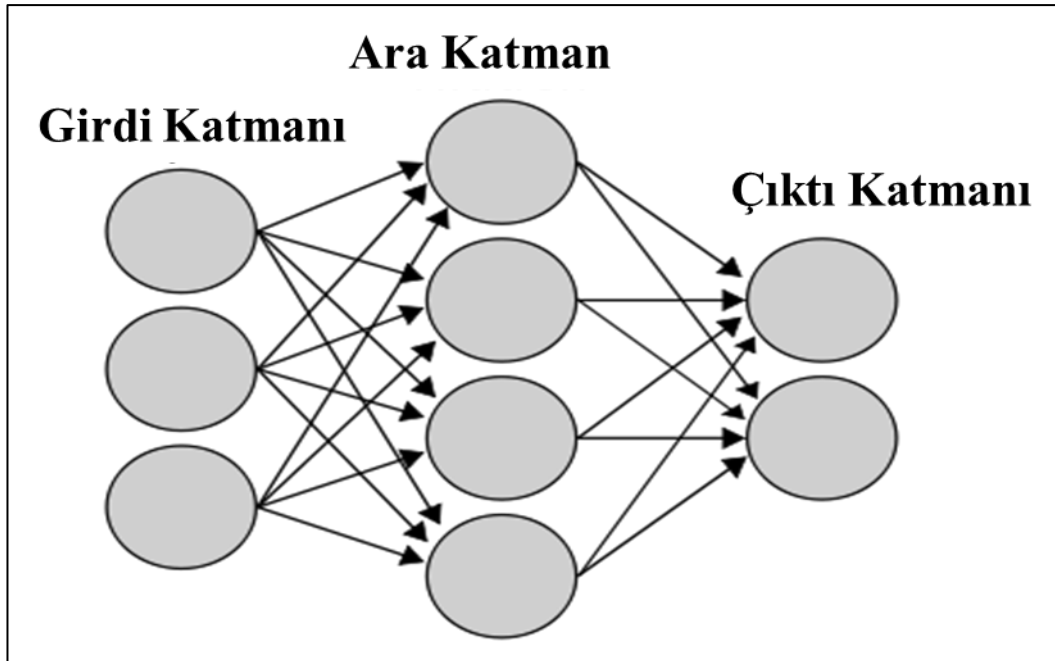
gelen bilgileri birleştiren toplama fonksiyonu, net girdiyi hesaplar (Şen 2004, Uslu 2011, Kasaplı 2014). Toplama fonksiyonu için farklı fonksiyonlar kullanılsa da en yaygın olarak kullanılan ağırlık toplama fonksiyonu olup, bu fonksiyon bağıntı (2.6)'da verilmektedir.

$$NET = \sum_i^n G_i A_i \quad (2.6)$$

G : Girdiler  
A : Ağırlıklar  
N : Toplam girdi sayısı

Aktivasyon fonksiyonu, hücreye gelen net girdiyi işleyerek hücrenin bu girdiyeye karşılık üreteceği çıktıyı belirlemektedir. Aktivasyon fonksiyonu için lineer, hiperbolik tanjant, sigmoid ve eşit fonksiyonu gibi fonksiyonlar kullanılmaktadır (Kasaplı 2014).

YSA, yapay sinir hücrelerinin oluşturduğu bir grup oluş, Şekil 2.3'te verilmektedir. YSA içerisindeki yapay sinir hücreleri birbirleri ile iletişim halinde olup, bir yapay sinir hücresinin çıktısı bir başka yapay sinir hücresi için girdi olabilir (Uslu 2011).



Şekil 2.3. Yapay sinir ağlarının genel yapısı

Temelde üç farklı katmandan oluşan YSA mimarisinde girdi katmanı girdileri ağa alınmasını sağlayan hücrelerin bulunduğu katman olup, ara katman ise girdi katmanı ve çıktı katmanı arasında kalan katmandır. Çıktı katmanında ise çıktıların YSA dışına verilmesini sağlayan hücrelerin bulunduğu katmandır.

YSA'nın katmanlarının ve/veya hücrelerin dizilişi, bir biriyle bağlantı şekilleri gibi özellikler YSA'nın mimarisi olarak adlandırılır ve başlıca mimari türleri ileri beslemeli ve geri beslemeli ağlardır. İleri beslemeli ağlarda bilgi akışı ileriye doğru olup, geri besleme

yoktur. Geri beslemeli ağlar ise bir veya birden fazla gizli katmandan oluşurlar ve bir veya birden fazla geri besleme döngüsüne sahiptirler.

YSA yapısının uygulama başarısını belirleyen en önemli faktörlerden birisi de öğrenme algoritmasıdır. Genellikle ağ yapısının öğrenme algoritmasının seçiminde belirleyici olması sebebi ile seçilen ağ yapısı üzerinde kullanılacak öğrenme algoritmasının seçimi ağ yapısına bağlıdır (Kasaplı 2014). Literatürde YSA geliştirilmesi ile ilgili çok sayıda öğrenme algoritması yer almaktadır. YSA sürecinin tasarlanmasında karar verilmesi gereken diğer işlemler ara katman sayısının ve nöron sayısının belirlenmesidir. Ara katman sayısının belirlenmesinde belirli bir kural olmayıp deneme yanılma yöntemi ile tayin edilebilir. Nöron sayısının belirlenmesinde de keza belirli bir kural olmayıp deneme yanılma yöntemi ile tayin edilmektedir. Nöron sayılarının az olması durumunda ağın verileri öğrenememe durumu ortaya çıkarken, fazla olması durumunda ise verilerin ağ tarafından ezberlenmesine yol açabilir (Kasaplı 2014).

YSA performansları değerlendirilirken bazı performans ölçütleri kullanılır. Ortalama kare karesi (MSE), hata kareleri toplamı (SSE) ve ortalama hata karekökü (RMSE) YSA performans değerlendirmesinde kullanılan başlıca performans ölçütleridir (Karakuzu 2011).

### **2.5.2. Sistem tanımlamaya dayalı modelleme yaklaşımı**

Sistem tanımlama, sistemin girdi ve çıktı parametrelerinin kullanımı ile dinamik sistemler için matematiksel modellerin geliştirildiği bir metodolojidir ve verilerden elde edilen farklı yapılarla modellerin tanımlanması ve model performansının karşılaştırılmasının yapıldığı iteratif bir süreçtir (Ljung 2010). Sistem tanımlama süreci, sistem girdi ve çıktı parametrelerinin zaman veya frekans alanındaki değerlerinin tespitini, model yapısı seçimini, aday model yapısı içerisindeki değiştirilebilir parametreler için tahmin metodu uygulanmasını ve tahmin edilen modelin değerlendirilmesi basamaklarını gerektirir (Ljung 2010). Sistem tanımlama süreci genellikle basit model yapılarının parametrelerinin seçimi ile başlar ve performans değerlendirmesi sonrasında ihtiyaç duyulursa model karmaşıklığı artırılabilir. Model karmaşıklığının artırılmasında genellikle daha fazla veri gereksinimi ortaya çıkar ve model parametrelerindeki belirsizlik artar (Ljung 2010). Mevcut sistemin fiziksel özelliklerine ihtiyaç duymayan ve girdi – çıktı parametrelerinin ilişkisinin temelinde dayanan sistem tanımlamaya dayalı modelleme yaklaşımları, mevcut sistemin fiziksel özelliklerine ihtiyaç duymadan dinamik sistemlerin modellenmesine imkan tanımaktadırlar (Venkatesh ve Dahleh 2001). Parametre sayısına bağlı olarak parametrik ve parametrik olmayan modeller olmak üzere ikiye ayrılan sistem tanımlamaya dayalı modelleme yaklaşımlarında parametre sayısının sonlu olması durumunda parametrik modellerin kullanımı önerilmektedir (Erdoğan vd. 2005, Özaydın 2009). Sistem tanımlamaya dayalı modelleme yaklaşımında en çok kullanılan model yapıları otoregresif modeller (AR), otoregresif hareketli ortalamalı modeller (ARMA), özbağlanımlı otoregresif modeller (ARX), özbağlanımlı otoregresif hareketli ortalamalı modeller (ARMAX), uzay – durum modelleri (state space), proses modelleri ve Box – Jenkins (BJ) modelleridir (Çelik vd. 2008). Zamana dayalı ve dışsal bir girdinin olduğu parametrik modeller bağıntı (2.7) ile ifade edilebilir (Özaydın 2009).

$$A(q)y(t) = \sum_{i=1}^n \frac{B(q)}{F(q)} x_i(t - nk_i) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t) \quad (2.7)$$

A, B, C, D ve F sırasıyla  $n_a$ ,  $n_b$ ,  $n_c$ ,  $n_d$  ve  $n_f$  boyutlarıyla modelin polinomlarını;  $nk_i$ ,  $i$ . bağımsız değişkenin gecikmesini;  $q$ , zamanda geriye öteleme operatörünü;  $t$  zaman indeksini;  $y$ , bağımlı değişkeni (çıkıtı);  $x_i$ , bağımsız değişkenleri,  $e$  ise ortalaması 0 hata terimini ifade etmektedir (Özaydın 2009).

C, D ve F polinomlarının 1 olduğu durumlarda ARX modeli söz konusu olur ve genel olarak bağıntı (2.8) ile ifade edilir ve tek girdi tek çıkıtı (SISO: single input – single output) modellerinde bağıntı (2.9) ile ifade edilir (Ljung 2010).

$$A(q)y(t) = B(q)x(t - nk) + e(t) \quad (2.8)$$

$$y(t) + a_1y(t - 1) + \dots + a_{n_a}y(t - n_a) = b_1u(t - n_k) + \dots + b_{n_b}u(t - n_k - n_b + 1) + e(t) \quad (2.9)$$

$y(t)$  :  $t$  anında çıkıtı değeri  
 $n_a$  : pole sayısı  
 $n_b$  : sıfırlar+1  
 $n_k$  : girdi çıkıtıyı etkilemeden önce geçmesi gereken örnek aralığı  
 $y(t-1) \dots y(t-n_a)$  : mevcut çıkıtının bağlı olduğu önceki çıkıtlar  
 $u(t-n_k) \dots u(t-n_k-n_b+1)$  : Mevcut çıkıtının bağlı olduğu önceki ve gecikmeli girdiler  
 $e(t-1) \dots e(t-n_c)$  : beyaz gürültü değerleri (hatalar)

F ve D polinomlarının 1 olduğu durumda ARMAX modeli söz konusu olur ve genel olarak bağıntı (2.10) ile ifade edilir (Ljung 2010).

$$A(q)y(t) = B(q)x(t - nk) + C(q)e(t) \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} \\ B(q) &= b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b+1} \\ C(q) &= \text{hareketli ortalama beyaz gürültü modeli} = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{n_c}q^{-n_c} \\ e(t) &= \text{hatalar} \end{aligned}$$

Sistem tanımlamaya dayalı SISO modeller için kullanılan bir diğer yaklaşım da proses modelleridir. Proses modelleri, sistem dinamiklerini statik kazanç, gecikme fonksiyonları ile tanımlayan düşük dereceli transfer fonksiyonlarıdır ve genel olarak bağıntı (2.11) ile ifade edilir (Ljung 2010).

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + 2 * \zeta * T_w * s + (T_w * s)^2} * \exp(-T_d * s) \quad (2.11)$$

$K_p$ : Statik kazanç (iletim fonksiyonu değişkeni)

Zeta: Sönüm katsayısı (iletim fonksiyonu değişkeni)  
 Tw: Rezonans zaman sabiti (iletim fonksiyonu değişkeni)  
 Td: Gecikme fonksiyonu (iletim fonksiyonu değişkeni)

Sistem tanımlamaya dayalı modellerin model performans değerlendirmelerinde genellikle Akaike nihai sonuç hatası (FPE: final prediction error) ve en iyi uyum kriteri (BF: best fit) kullanırken, ortalama kata karesi (MSE), hata kareleri toplamı (SSE) ve ortalama hata karekökü (RMSE) gibi performans ölçütleri de kullanılabilir (Ljung 1999, Özaydın 2009, Ljung 2010).

Akaike teorisine göre en düşük FPE değerine sahip model en doğru model olarak değerlendirilir. FPE değeri (2.12) bağıntısına göre hesaplanır (Ljung 1999, Ljung 2010).

$$FPE = V \left( \frac{1 + \frac{d}{N}}{1 - \frac{d}{N}} \right) \quad (2.12)$$

V = Yitim işlevi  
 D = Tahmin edilen parametre sayısı  
 N = Tahmin amaçlı kullanılan veri setinde gözlem sayısı

Eşitlik (2.12)'de yer alan yitim işlevi, V, (2.13) bağıntısına göre hesaplanır.

$$V = \det \left( \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon(t, \theta_n) (\varepsilon(t, \theta_n))^T \right) \quad (2.13)$$

$\theta_n$  = Tahmin edilen parametreler

BF – en iyi uyum kriteri ise modelin veriyi temsil edebilme kabiliyetini gösterir. BF kriterinin %100 olması modelin tahmin etme kabiliyetinin %100 olduğunu gösterir. BF %0 olması, model kullanılarak elde edilen çıktı tahmin değerlerinin ancak ortalamaya eşit olabileceğini gösterir. En iyi uyum kriteri bağıntı (2.14)'e göre hesaplanır. BF kriteri tanımı gereğince negatif sonuçlar alabilir ki; bu %0 olmasından daha kötü bir durumu göstermektedir (Ljung 1999, Ljung 2010).

$$BF (\%) = \left| 1 - \frac{|y - \hat{y}|}{|y - \bar{y}|} \right| * 100 \quad (2.14)$$

y = ölçülen çıktı değeri  
 $\hat{y}$  = modelle tahmin edilen çıktı değeri  
 $\bar{y}$  = y ölçümlerinin ortalaması

## 2.6. Konu ile İlgili Geçmişte Yapılan Çalışmalar

Tarihsel olarak şebeke sistemlerinin tasarımında öncelikli olarak hidrolik kapasiteler üzerine odaklanılmış ve su kalite değişimi konusu dikkate alınmamıştır. Su dağıtım şebekelerinin temel görevinin belirtilen debi ve basınçta su temin edilmesi olduğu düşünülmüştür. Günümüzde su kalitesine verilen önemin artması ile su dağıtım şebekelerinin ilk tasarım dönemlerinde var olmayan çeşitli standartları sağlamaları gerekli olmaktadır. Gerçekte, su dağıtım endüstrisi veya ilgili kuruluşlarından, şebeke değerlendirmesi açısından dikkatlerini, şebekede dağıtılan su kapasitesi yerine su kalitesindeki değişime yönlendirmeleri veya bu konu ile ilgilerini artırmaları istenmektedir. Yeni başlayan bu önemli bakış açısı değişiminin devam etmesi durumunda, dünyada su dağıtımını sağlayan pek çok altyapı tesisi için, su dağıtım şebekelerinde su kalitesinin iyileştirilmesi yönünde araştırmaların yapılmasına yönelik ciddi çalışmalar yapılması gerekecektir (Hart vd.1992).

Şebekelerde suyun dağıtımını sırasında su kalitesini etkileyen faktörler; su kalite karakteristikleri (fiziksel, kimyasal ve biyolojik), boruların karakteristikleri (boru yaşı, boru cinsi, korozyon, birikintiler vb.), şebeke sisteminin karakteristikleri (ölü noktalar, su depoları vb.), şebeke işletim karakteristikleri (su ihtiyaçları, hızlar vb.), suların karışımı (farklı su kaynakları) olarak belirtilmiştir (Levy vd. 1986, Allen ve Geldreich 1977, Donlon ve Pipes 1986, McCelle ve Maury 1977).

Belirtilen bu faktörler şebeke sisteminin kinetiği ile birleştirildiğinde (akım miktarı ve yönündeki değişiklikler, uygulanan dozlardaki değişim vb.) dağıtım şebekesi içindeki su kalite değişimleri açısından modelleme yaklaşımlarının kullanımı gerekli duruma gelmiştir. Şebeke sistemlerinin modellenmesi için hidrolik özellikler ve su kalite faktörleri birbirine bağlanmalıdır. Bir su dağıtım şebekesi içinde oluşan su kalite değişimlerinin tahmin edilmesi için hidrolik bir model ile kirlilik taşınım modelinin birleştirilmesi gerekmektedir.

Rossmann vd. (1994) tarafından “İçme suyu şebekelerinde bakiye klor modellemesi” başlıklı çalışmada, South Central Connecticut Regional Water Authority hizmet alanının bir bölümü için EPANET modeli başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Kütle transfer tabanlı model, içme suyu şebekesinde klor bozunma tahmini için geliştirilmiştir.

Park (1996), YSA kullanarak klor ve azotlu bileşikler arasındaki reaksiyonu modelleme çalışmalarında bulunmuştur. Karmaşık doğrusal olmayan eşitliklerin kullanıldığı çalışmada, geri beslemeli YSA modelinin süreç kontrolünün uzun alıkonma süresi sebebi ile olumlu sonuçlar vermediği, ileri beslemeli YSA modelinin ise olumlu sonuçlar verdiği bildirilmiştir.

Rodriguez vd. (1997) içme suyu dağıtım şebekelerinde serbest bakiye klor konsantrasyonlarına ait tahmin çalışmalarını konvansiyonel birinci dereceden modelleme çalışması ve yapay sinir ağları tabanlı modelleme yaklaşımları ile gerçekleştirmişler ve bu iki yaklaşımı kıyaslamışlardır. Çalışmanın sonucunda yapay sinir ağları tabanlı modelleme çalışmalarının başarısının sistemden elde edilen veri setlerinden etkilendiğini bildirmişlerdir. Ayrıca geleneksel modelleme yaklaşımında

gerekli bilgilerin toplanmasının mümkün olmadığı ya da zor olduğu durumlarda yapay sinir ağları tabanlı modelleme yaklaşımlarının içme suyu dağıtım şebekelerinde dezenfeksiyon kontrolü için kullanılabileceği belirtilmiştir.

Rodriguez ve Serodes (1998) içme suyu dağıtım şebekelerinde doğrusal ARX ve doğrusal olmayan ANN modelleri ile serbest bakiye klor konsantrasyonlarının tahmini için Kanada'da iki şebeke için modelleme çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Bütün verilerin değerlendirmesini takiben elde edilen tahmin sonuçlarında ARX ve ANN modelleri benzer performanslara sahipken, yüksek ve düşük klor konsantrasyonlarını içeren özel durumlarda ANN modelinin daha iyi sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir.

Ratnayake ve Jayatilake (1999) tarafından içme suyu şebekelerinde kirleticilerin taşınması konusunda yapılan çalışmada EPANET modeli kullanılmıştır. Çalışma için hidrofor kullanılan iki okul ve bir hastane pilot olarak seçilmiş ve EPANET modeli kullanılarak içme suyu şebekesinde bir noktadan diğerine bozunabilen ve bozunmayan maddelerin konsantrasyon değişimi izlenmiştir.

Hua vd. (1999) tarafından yayınlanan çalışmada çeşitli su örneklerinde klor bozunması üzerinde sıcaklık ve başlangıç klor konsantrasyonunun etkileri incelenmiş ve bu amaçla bir modelleme çalışması yapılmıştır.

Powell vd. (2000) su sıcaklığının ve başlangıç klor konsantrasyonunun klor ana akım bozunma katsayısına etkilerini inceledikleri çalışmalarında, hem su sıcaklığının hem de başlangıç klor konsantrasyonunun klor ana akım bozunma katsayısını doğrudan etkilediğini bildirmişlerdir.

Biscos vd. (2003) su dağıtım şebekelerinde fiziksel elemanların sistemin kontrol amaçlı modellenmesinin zorluklarını ve bu zorlukların çözümü için MINLP (mixed-integer on-linear programming) yöntemini anlattıkları çalışmalarında elde edilen sonuçların su dağıtım şebekelerinde kontrol amaçlı kullanılabileceğini bildirmişlerdir.

Hallam vd. (2003) su sıcaklığının klor ana akım bozunma katsayısı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Yaz ve kış ayları için farklı sıcaklıkların kullanılması sonucunda su sıcaklığının klor ana akım bozunma katsayısı üzerinde oldukça etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Lippai ve Wright (2005) tarafından Kaliforniya'da Livermore, Pleasanton ve Dublin kentleri olmak üzere yaklaşık 190.000 kişiye içme suyu temin eden Zone 7 şebekesinde WinPipes modeli uygulanmıştır. WinPipes EPANET tabanlı bir içme suyu dağıtım şebekesi modelidir. Modelleme çalışması, 2 arıtma ünitesi ve 51,5 km uzunluğunda iletim borularını içeren Zon 7 sistemi için yapılmıştır. Çalışma kapsamında yüksek su tüketimi koşullarında su dağıtım konusunda gelecekteki harcamaların değerlendirilmesi için altyapı yönetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu değerlendirme çalışmasının bir parçası olarak şebekenin işletim açısından hassasiyeti, başarısız olma ihtimali ve kritik koşulları incelenmiştir. Bu değerlendirme analizi ile en fazla işletim hatalarına yol açabilecek su iletim sistemi elemanlarının öne çıkarılması planlanmıştır. Bu analiz sonuçları, ileride yapılması gerekli olan inceleme, bakım ve yenileme faaliyetlerinin öncelik sırasının belirlenmesinde kullanılmıştır.

Dongwen vd. (2006) tarafından yapılan modelleme çalışmasında, Zhengzhou şebekesi için EPANET tabanlı MIKENET modeli kullanılmıştır. Bu model, su dağıtım şebekesi işletiminin değerlendirilmesi ve acil durumların çözümlenmesinde yardımcı olacak bir karar destek sistemi aracı olarak kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, içme suyu şebekesinde meydana gelebilecek arızalar, borularda meydana gelebilecek patlamalar vb. konularda benzetim modelleri geliştirilerek denenmiştir. Model, şebeke işletiminin değerlendirilmesi, acil durumların oluşması durumundaki eksikliklerin tanımlanması için yardımcı olmuştur.

İçme suyu dağıtım şebekelerinde klor, ana akımda ve boru cidarında gerçekleşen reaksiyonlar sonucu zamanla bozunmaya uğrar. Farklı su kaynakları, farklı boru yaşları ve tiplerine sahip su dağıtım şebekelerinde klor ana akım ve klor boru cidar bozunma katsayılarının tespitine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiş bulunmaktadır. Bunlar arasından seçilen çalışmalar Çizelge 2.2’de verilmektedir.

Çizelge 2.2. Su dağıtım şebekelerinde klor bozunma katsayılarının tespiti için gerçekleştirilmiş bazı çalışmalar (Rossman 2006 ve Brown vd. 2011’den derlenmiştir.)

Çalışmanın türü	Boru cinsi	$K_{\text{toplam}}$ (gün <sup>-1</sup> )	$K_b$ (gün <sup>-1</sup> )	$K_w$ (ft/gün)	Referans
Saha	Gri dökme demir	3,17	1,58	0,13	Wable vd. 1991
Saha	Düktül dökme demir	9,94	2,88	0,58	
Saha	Düktül dökme demir	8,21	1,15	0,58	
Saha	Asbestli çimento boru	0,126-0,138	0,114	N/A	Zhang vd. 1992
Saha	Çelik boru	0,054	0,072	N/A	
Saha	Çelik	0,066	N/A	N/A	
Saha	Gri dökme demir	4,32	0,12	0,86	Kiene vd. 1993
Saha	Gri dökme demir				
Simülasyon	Dökme demir	2,90	0	0,24	Mathieu vd. 1993
Modelleme	Kaplamasız dökme demir	N/A	0,55	1,50	Rossman vd. 1994
Saha	Asbestli çimento boru	0,22 – 0,39	0,03	N/A	Chambers vd. 1995
Simülasyon	Dökme demir	3,60	0,52	0,25	Parent vd. 1996a
Simülasyon	Dökme demir	12,10	0,54	0,98	Parent vd. 1996b
Modelleme	Asbestli çimento boru	N/A	1,16	0	Vasconcelos vd. 1997
Modelleme	Kaplamasız dökme demir	N/A	0,83	2,49	
Modelleme	Kaplamasız galvanize demir	N/A	0,23	0,89	
Modelleme	Kaplamasız dökme demir	N/A	17,70	4,99	
Modelleme	Düktül dökme demir	N/A	0,77	0,10	
Simülasyon	Düktül demir	2,7 – 3,7	0,25 – 0,49	0,31 – 0,43	Rossman vd. 2001

- N/A: Mevcut olmayan verileri göstermektedir.

Shillong - Hindistan ve Dhak - Bangladeş kentlerinde içme suyu şebekesi için yerel içme suyu yetkilileri tarafından uzaktan algılama verileri ile birleştirilen EPANET ve EPANET tabanlı MIKENET modeli kullanılarak uygulamalar yapılmıştır. Her iki kentte şebeke kesikli sistem olarak çalışmaktadır. Bu tür sistemlerde basınç düşük olduğundan ve her saatte su temini gerçekleşmediğinden, modelleme çalışmaları yapmak oldukça güçleşmektedir. Yapılan çalışmada EPANET programının kesikli şebeke sistemleri modellemesi için de uygun olduğu görülmüş ve şebeke yönetimi için bu modelin kullanılabilirliği anlaşılmıştır (Ingeduld ve Svitak 2006).

Marunga vd. (2006) tarafından Zimbabwe - Mutare kentinde içme suyu şebekesinde kaçak miktarının azaltılmasına yönelik basınç yönetimi ve bir su yönetim sistemi kurulmasına yönelik olarak yapılan çalışmada EPANET modeli kullanılmıştır. Şebekenin normal işletme basıncı 75-80 m'dir. Basınç dağılımını görmek için EPANET modeli kullanılmıştır. Pek çok denemeye ait sonuçlara dayanarak hidrolik model sistemdeki kabul edilebilir minimum basıncı 50 m. olarak tahmin etmiştir. Sistemin, optimum basınç seviyesinde işletimi ile kaçak su miktarı azaltılabileceği bildirilmiştir.

İçme suyu şebekesinde hidrolik analiz yapmak için EPANET modeli kullanılmış ve su kayıpları miktarı basınca bağlı olduğundan genetik algoritma tabanlı bir basınç kontrol ve su kayıpları azaltma yöntemini içeren iki işletim modeli geliştirilmiştir (Araujo vd. 2006). Bu iki modül ile yeterli teknik performans sağlanarak, sistemin farklı senaryolar için genel değerlendirme amaçlı kullanımı gerçekleştirilmiştir. Çalışma vanaların doğru bir şekilde konumlandırılması ve yönetimi ile basınç kontrolü yapılarak sistemin daha verimli bir hale getirilebileceğini göstermiştir.

May vd. (2006) genel regresyon sinir ağları (GRNN) yöntemini başarı ile uygulamış; sonuçlarını diğer bir ampirik girdi - çıktı yöntemi olan ARMA model sonuçları ile karşılaştırmışlardır.

Bowden vd. (2006) Avustralya'da Myponga şebekesinde çapraz korelasyon metodu ile bekleme süresini seçtikleri çalışmada, genel regresyon sinir ağları ve çoklu regresyon modelleri ile içme suyu dağıtım şebekesinde serbest bakiye klor konsantrasyonlarının tahmini için modelleme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada genel regresyon sinir ağları tabanlı modelleri ile yüksek hassasiyette tahmin yapabilen bir model elde etmişlerdir.

May vd. (2008) kompleks yapıdaki içme suyu dağıtım şebekelerinde su kalitesi modelleme çalışmalarında yapay zeka tabanlı modelleme çalışmalarının uygunluğundan bahsetmişler ve istatistiksel modellemeye dayalı bu yaklaşımda doğrusal olmayan girdi değişken seçimi yöntemi ile genel regresyon sinir ağları tabanlı modelleme çalışmalarını Avustralya - The Cherry Hills - Brushy ve Myponga şebekelerinde gerçekleştirmişlerdir.

Huusom vd. (2010) doğrusal modellerin kontrol amaçlı kullanımında ARX model yapısının ARMAX ve uzay - durum modellerine göre daha uygun bir yapı olduğunu bildirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada ARX model yapısının kontrol amaçlı olarak hem SISO hem de MIMO (çok girdi - çok-çıkıtı) sistemlerinde olumlu sonuç verdiği aktarılmıştır.

Huusom vd. (2011) yaptıkları çalışmada proses endüstrilerindeki uzun gecikme zamanlarının ve büyük bozan etken değerlerinin varlığı sebebi ile sistemin standart bir kontrol sistemi ile kontrol edilmesinin zorluğunu belirtmişlerdir. Yine çalışmalarında sıvı petrolün ısıtılarak buharlaştırıldığı bir fırın için ARX model yapısını kullanarak, tahmine dayalı sistem kontrolü çalışmasını gerçekleştirmişler ve bu yapının özellikle zaman gecikmesi olan sistemlerde (özellikle kimyasal sistemler) uygun olduğunu bildirmişlerdir.



Georgescu vd. (2012) EPANET yazılımını kullanarak 50000 nüfuslu bir kasabaya ait su dağıtım şebekesinde üç günlük zaman periyodu için klor konsantrasyonları tahmin çalışmaları yapmışlardır. 42 düğüm noktası, 78 boru ve bir tankın yer aldığı su dağıtım şebekesinde en az su tüketiminin olduğu saatlerde en düşük klor konsantrasyon seviyelerinin 0,34 mg/L'nin altına düşmediği tespitini yapmışlardır.

Ahn vd. (2012) su dağıtım şebekelerinde klor ve THM konsantrasyonlarının tahmini ve kaynakta dozlanacak klor konsantrasyonunun tespiti amacı ile EPANET 2.0 hidrolik ve su kalitesi modelini kullanmışlardır. Yapılan çalışmada kaynakta dozlanacak klor konsantrasyonlarının mevsimsel değişimleri de tespit edilmiştir.

Goyal ve Patel (2014), su dağıtım şebekelerine aralıklı olarak su verilen bir durumda klor konsantrasyonlarının mekânsal değişimini incelemek için hidrolik ve su kalitesi modelini entegre etmek sureti ile bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Klor konsantrasyonlarının birinci derece reaksiyon kinetiğine uyduğunu bildirdikleri çalışmaları, Hindistan'da genel işletme prensibi olan şebekeye aralıklı olarak su verilmesi durumunda ara klora istasyonlarının çalışma sonucu elde edilen eşitlikler ile gerekliliğinin doğrulanabileceğini ve elde edilen eşitliklerin bu genel durum için yerel ölçekli kullanılabileceğini bildirmişlerdir.

Cordoba vd. (2014), yaptıkları çalışmada su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının değerlendirilmesi amacı ile Monte – Carlo simülasyonu ile YSA yaklaşımını birlikte kullanmışlardır. Yapılan çalışmada YSA yaklaşımı ile modelleme için başlangıç klor konsantrasyonu, pH, bulanıklık ve bakiye klor konsantrasyonlarına ait geçmiş verileri ve Monte – Carlo simülasyonu sonucu üretilen verileri kullanmışlar, YSA yöntemi ile oldukça iyi sonuçlar elde ettiklerini bildirdikleri çalışmada elde edilen sonuçların doğrulaması maksadı ile hidrolik ve su kalitesi model sonuçlarını kıyaslamışlardır.

Wu vd. (2014), su dağıtım şebekelerinde YSA tabanlı model geliştirme süreci ile ilgili bir derleme çalışması yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada, 2000 yılından itibaren su dağıtım şebekelerinde su kalitesinin YSA tabanlı model yaklaşımları ile çalışıldığı 81 çalışmayı incelemişler ve yapılan çalışmalarda genel olarak en fazla üzerinde durulan konunun YSA mimarisi olduğunu, ancak girdi seçimi ve model doğrulama aşamalarının daha fazla göz önünde bulundurulması gerektiği bildirilmiştir.

EPANET hidrolik ve su kalitesi modeli, su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının modellenmesi ve geniş zaman aralıklı simülasyonu çalışmalarında kullanılmış bir modeldir. Deterministik modelleme yaklaşımları ile gerçekleştirilen çalışmalarda su kalitesinin tahmin yetenekleri doğrudan hidrolik model yeteneklerine bağlıdır. Bu sebeple su kalitesi modellerinin performans kriterleri karşılaştırılırken, hidrolik model hassasiyetleri göz önünde bulundurulmalıdır. Literatürde bu kapsamda EPANET modeli kullanımı ile gerçekleştirilen çalışmalardan bazı seçilmiş çalışmalar genel bilgi vermesi açısından Çizelge 2.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 2.3. Farklı çalışma sahalarında klor konsantrasyonlarının modellenmesi için EPANET hidrolik ve su kalitesi modelinin kullanıldığı bazı çalışmalar

Çalışma Sahası	Su Kalitesi Özelliği	Kullanılan Model	Model Performansı	Referans
A.B.D.'de farklı bölgelerde yapılan çalışmalar	Konvansiyel arıtma, Farklı $K_b$ değerlerine sahip kaynaklar	EPANET/Birinci derece reaksiyon kinetiği	Mutlak hata 0,05 – 0,15 mg/L	Vasconcelos vd. 1997
Seul, Kore 6573 boru ve 4522 düğüm noktası	Konvansiyel arıtma, ortalama $K_b$ 0,27–0,29 gün <sup>-1</sup>	EPANET/Birinci derece reaksiyon kinetiği	Mutlak hata 0,04 mg/L	Ahn vd. 2012
6 Ekim Şehri, Mısır 80 km <sup>2</sup> lik ana hat üzerinde	Konvansiyel arıtma, ortalama $K_b$ -0,792 gün <sup>-1</sup>	EPANET / Birinci derece reaksiyon kinetiği	Ortalama mutlak hata 0,12 mg/L	Mostafa vd. 2013
Algarve, Portekiz; 23 km uzunluğunda dağıtım hattı	Konvansiyel arıtma, düşük organik ve inorganik madde 13 °C'de $K_b$ -0,27 gün <sup>-1</sup>	EPANET, EPANET MSX / Birinci derece reaksiyon kinetiği	Ortalama Hata Karesi Ölçüm Noktası 1: 0,03 Ölçüm Noktası 2: 0,025	Monteiro vd. 2014

## 2.7 Konu ile İlgili Bu Tez'de Yapılan Çalışmalar

Tez çalışması kapsamında pilot çalışma bölgesi olarak seçilen Konyaaltı su dağıtım şebekesinde serbest bakiye klor konsantrasyonlarının deterministik ve veriye dayalı modelleme yaklaşımı kullanılarak yönetimi gerçekleştirilmiştir. Pilot çalışma bölgesi 18 alt bölgeye ayrılmak sureti ile mevcut olan ölçüm cihazlarına ilave olarak kalitatif ve kantitatif online ölçüm cihazlarının yerleştirilmesi ve bu cihazların mevcut SCADA sistemine entegrasyonu sağlanmıştır. Bu çalışmalar ile literatürdeki örneklerine göre görece daha büyük bir su dağıtım şebekesinde hidrolik ve su kalitesi parametrelerinin online olarak yalnızca kaynakta ve dengeleme tanklarında değil su dağıtım şebekesi üzerinde de izlenmesi sağlanmıştır (Kara vd. 2014, Karadirek vd. 2012b, Muhammetoğlu vd. 2011, Muhammetoğlu vd. 2010, Demirel vd. 2009).

Çalışma bölgesinde su kalitesinin kaynakta ve su dağıtım şebekesindeki akıbetinin incelenmesi maksadı ile 2008 – 2011 yılları arasında 30 ay süresince her iki ayda bir olmak üzere saha ve laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Kitiş vd. 2010, TÜBİTAK 2011). Bu veriler ışığında laboratuvar çalışmaları ile klor ana akım bozunma katsayısı üç farklı sezon için tayin edilmiştir (Altındal 2009, Altındal 2010, TÜBİTAK 2011).

ASAT coğrafi bilgi sistemi verilerinin güncellenmesine ilişkin çalışmaları takiben çalışma bölgesinde deterministik modelleme çalışmalarına başlanmış olup, pilot çalışma bölgesinde hidrolik ve su kalitesi modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Karadirek vd. 2014a, Karadirek vd. 2010). Çalışma bölgesinde klor konsantrasyonlarının yönetimi için gerçekleştirilen modelleme çalışmaları neticesinde elde edilen hidrolik modelin kullanımı ile çalışma bölgesinde su kayıplarının azaltılması çalışmaları da yürütülmüştür (Kara 2011, Muhammetoğlu vd. 2011, TÜBİTAK 2011, Karadirek vd. 2012a).

Deterministik modelleme çalışmalarında model kalibrasyonu ve doğrulaması çalışmalarını takiben pilot çalışma bölgesinde kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonları tespit edilmiştir (Karadirek vd. 2014a, Karadirek vd. 2013). Geçmişte yapılan çalışmalar incelendiğinde, deterministik modelleme çalışmalarının görece daha küçük su dağıtım şebekelerinde yapıldığı anlaşılmaktadır. Ayrıca bu tez çalışması kapsamında yapılan deterministik modelleme çalışmalarında SCADA, CBS, alt bölge ayırma işlemleri bir bütün olarak ele alınmış ve değerlendirilmiştir.

Veriye dayalı modelleme yaklaşımları ile ilgili çalışmalar YSA tabanlı modelleme yaklaşımları ile sistem tanımlamaya dayalı modelleme yaklaşımları kullanılmış olup, su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının yönetimi çalışmalarında kullanımları irdelenmiştir. Bu kapsamda ölçülen su kalitesi parametreleri açısından yüksek su kalitesine sahip pilot çalışma bölgesinde YSA tabanlı modelleme yaklaşımları ile klor konsantrasyonlarının tahminler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların gerçekleştirilmesinde pilot çalışma bölgesine 2009 yılında eklenen online su kalitesi ölçüm cihazları kullanılmış olup, farklı veri girdileri ile su dağıtım şebekesinde klor konsantrasyonlarının yönetimi gerçekleştirilmiştir (Soyupak vd. 2010, TÜBİTAK 2011). Tez çalışması kapsamında bazı sistem tanımlamaya dayalı modelleme yaklaşımları pilot çalışma bölgesinde klor konsantrasyonlarının yönetimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bu aşamasında, deterministik modelleme yaklaşımının sonuçlarından elde edilen su yaşının en yüksek olduğu noktaya ve kaynağa ek online klor ölçüm istasyonları oluşturulmuş ve kaynakta dozlanan klor konsantrasyonuna karşın klor konsantrasyonları açısından kritik nokta olan diğer ölçüm istasyonunda klor konsantrasyonlarının tahminleri sağlanmıştır (Karadirek vd. 2014b).

Tez çalışması kapsamında ölçülen su kalitesi parametreleri açısından oldukça yüksek su kalitesine sahip ve görece büyük bir su dağıtım şebekesinde deterministik ve veriye dayalı modelleme yaklaşımları kullanılarak klor konsantrasyonlarının yönetimi, ayrıca deterministik modelleme yaklaşımları kullanılarak farklı koşullarda kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonlarının tespiti yapılmıştır.

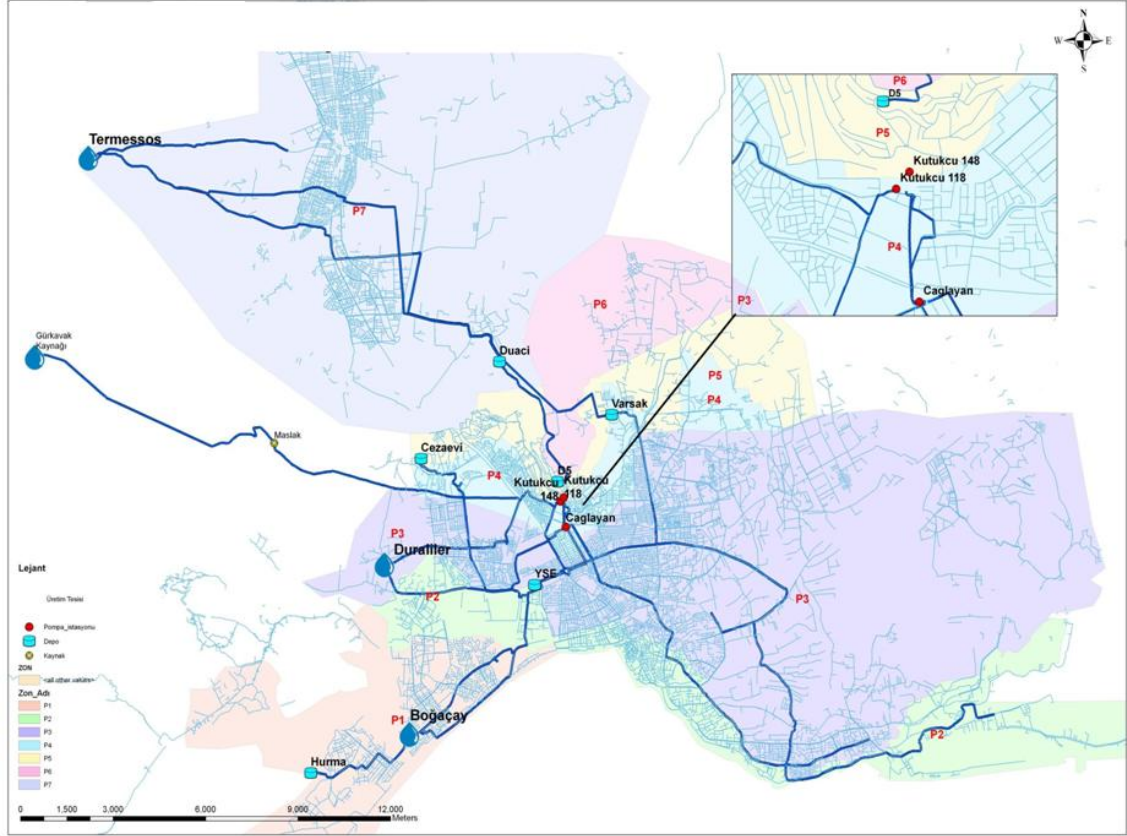
Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının akıbeti ile ilgili çalışmalar yer almaktadır. Bu kapsamda farklı araştırmacılar tarafından farklı su kaynakları ve farklı çalışma sahaları seçilmiş olup, deterministik ve veriye dayalı modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında ise organik madde konsantrasyonu ve amonyum, demir, mangan, bromür gibi klor tüketimine etki eden parametrelerin çok düşük olduğu bir çalışma bölgesinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar kapsamında literatürdeki kullanılan örneklerine nazaran, görece büyük bir su dağıtım şebekesinde

veri tabanlı izleme ve kontrol sistemi, coğrafi bilgi sistemi, online su kalitesi izleme çalışmaları ve alt bölge yöntemleri entegre edilerek çalışmalar gerçekleştirilmiş ve bu entegrasyon sonucu kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonları tespiti yapılmıştır. Aynı zamanda yine tez çalışması kapsamında çalışma bölgesi için klor konsantrasyonlarının modellenmesi amacı ile veriye dayalı modelleme yaklaşımları kullanılmıştır. Literatürde bazı veriye dayalı modelleme yaklaşımları, klor konsantrasyonlarının modellenmesi için kullanılmış olsa da, düşük klor tüketimine sahip bir su kaynağında çalışmalara rastlanmamaktadır. Tez çalışması ile, öncelikli olarak su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının yönetimi maksadına yönelik gerçek ve işleyen orta ölçekte bir şebeke sisteminde veri tabanlı izleme ve kontrol sistemi, coğrafi bilgi sistemi, online su kalitesi izleme sistemi ve alt bölge yaklaşımlarının entegrasyonunu kullanarak literatüre daha önce yapılmamış özgün katkı yapma hedeflenmiştir. Ayrıca veriye dayalı modelleme amaçlı değişik sayısal yaklaşımların yüksek kalitede su kullanan şebekelerde klor yönetim ve kontrolü amaçlı kullanımlarının karşılaştırmalı olarak irdelenmesi ilk defa bu çalışma ile gerçekleştirilmiştir. Son olarak da iki farklı modelleme tekniğinin kıyaslanması ile deterministik ve veriye dayalı modelleme yaklaşımlarının entegre kullanılmasının özgün örneklerle sunulması amaçlanmıştır.

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Antalya İçme Suyu Dağıtım Sistemi ve Pilot Çalışma Bölgesi

Antalya şehrinin içme ve kullanma suyu ihtiyacı yeraltı su kaynaklarından karşılanmaktadır. Antalya şehrinde yeraltı su kaynaklarından sağlanan su, arıtmaya ihtiyaç duymadan yalnızca sıvı sodyum hipoklorit çözeltisi kullanımı ile dezenfeksiyon sonrasında su dağıtım şebekesine verilmektedir. Antalya şehri içme suyu üretim ve dağıtım sistemi Şekil 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.1. Antalya şehri içme suyu üretim ve dağıtım sistemi (TÜBİTAK 2011)

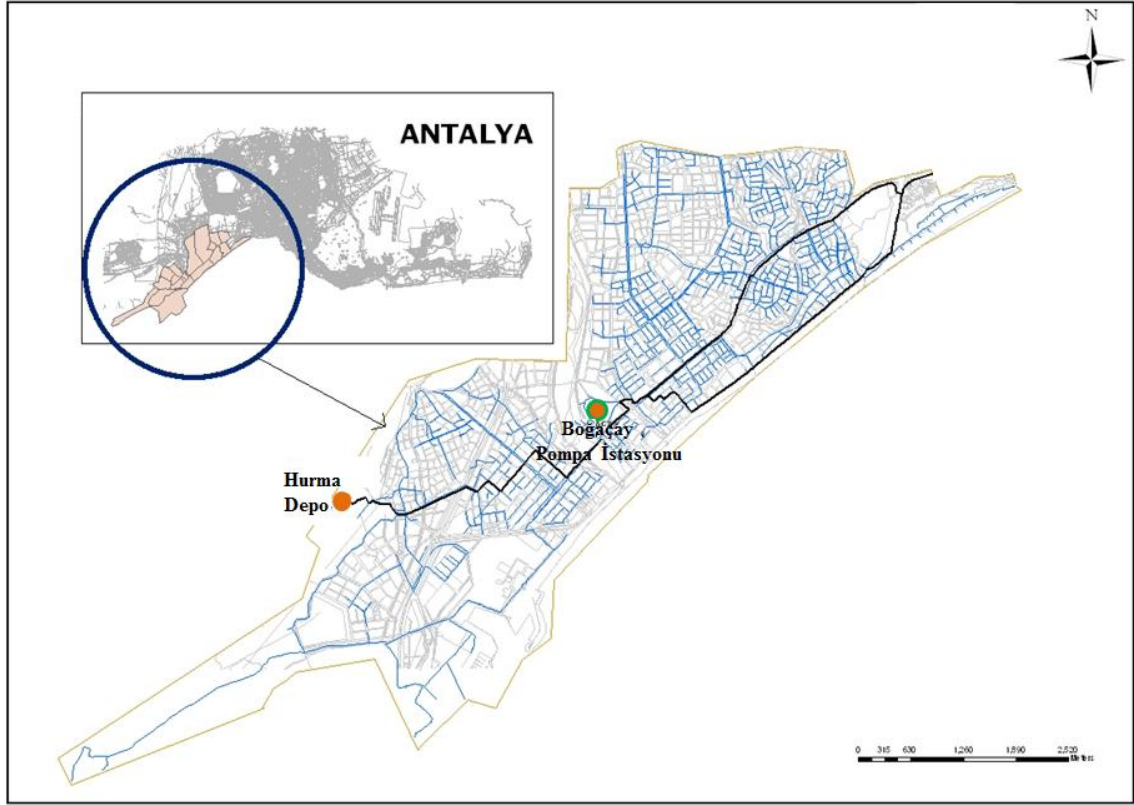
Termesos, Duraliler, Boğaçay yeraltı ve Gürkavak kaynak suyu kaynaklarından sağlanan su, şehrin topoğrafyası sebebi ile dokuz farklı basınç bölgesine ayrılmış olan su dağıtım şebekesine verilmektedir (Palancı 2011). Antalya şehri içme suyu dağıtım şebekesi basınç bölgeleri ve su kaynakları Çizelge 3.1’de verilmektedir. Antalya içme suyu üretim ve dağıtım sisteminden Antalya Su ve Atıksu İdaresi Genel Müdürlüğü (ASAT) sorumludur. Antalya şehri içme suyu üretim ve dağıtım sistemleri ile içme suyu şebekesinin etkin ve verimli bir şekilde kontrol ve kumandasını sağlamak üzere 2007 yılında kurulan SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition; Veri tabanlı İzleme ve Kontrol) sistemi mevcuttur. SCADA sistemi sayesinde su üretim ve dağıtım tesisleri ile su dağıtım şebekesi üzerinde kalitatif ve kantitatif parametreler izlenebilmekte, vana ve pompalar uzaktan kontrol edilebilmektedir.

Çizelge 3.1. Antalya şehri içme suyu dağıtım sistemi basınç bölgeleri ve su kaynakları (Palancı 2011)

Basınç Bölgesi	Basınç Bölgesinin Su Verdiği Kotlar	Su Kaynağı
P 1	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
P 6	170 - 230 m	Termessos
P7	>230m	Termessos

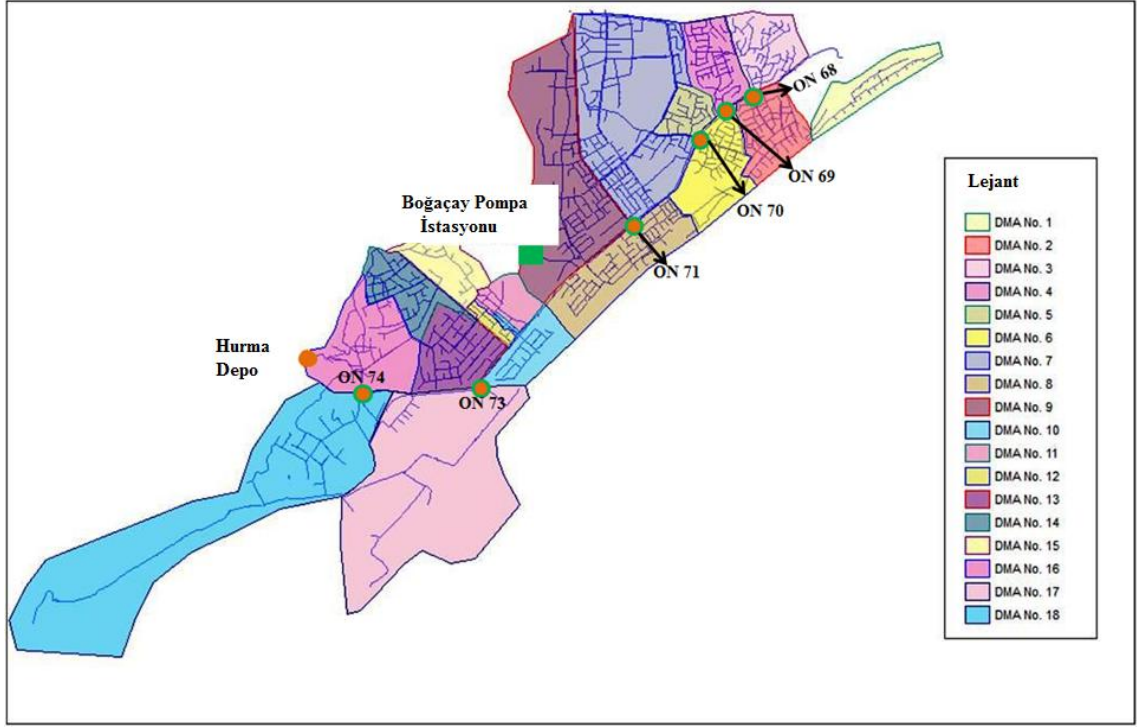
Bu çalışma kapsamında 0-20 m kotları arasında yer alan P1 basınç bölgesindeki Konyaaltı su dağıtım şebekesi pilot çalışma bölgesi olarak seçilmiştir. Konyaaltı su dağıtım şebekesi Antalya içme suyu dağıtım şebekesinin başlıca alt dağıtım sistemlerinden birisi olup, yaklaşık olarak 60000 kişiye hizmet vermektedir. Beş adet yeraltı su kuyusundan sağlanan ham su, sıvı sodyum hipoklorit çözeltisi kullanılarak dezenfeksiyon işlemi tamamlandıktan sonra dört adet yatay pompa ile *Boğaçay Pompa İstasyonundan* şebekeye verilmektedir. Pilot çalışma bölgesi nispeten yeni bir şebeke olup, güvenilir şebeke bilgilerine sahiptir. Konyaaltı su dağıtım şebekesi yaklaşık olarak 200 km.'lik boru uzunluğuna sahiptir ve saatlik su salınımları dengelemek amacı ile *Hurma Depo* isimli, 57 m. kotunda yer alan 15000 m<sup>3</sup>'lük bir depo ile hizmet vermektedir. Pilot çalışma bölgesinde çelik, PVC, HDPE, düktil gibi farklı malzemelerden üretilmiş farklı uzunluk, çap ve yaşlarda borular kullanılmaktadır (TÜBİTAK 2011, Soyupak vd. 2011, Karadirek vd. 2012a, Karadirek vd. 2012b). Şekil 3.2'de Konyaaltı su dağıtım şebekesi ve temel bileşenleri verilmektedir. Konyaaltı su dağıtım şebekesinde olağanüstü haller dışında genel işletme prensibi su dağıtım şebekesinin 17:00 – 22:00 arasında kaynakta pompaların kapatılması ile yalnızca depodan besleme yapılması esasına dayanmaktadır. Geriye kalan zamanda ise kaynakta bulunan dört adet yatay pompa su ihtiyacına göre farklı kombinasyonlarda çalışma sahasına terfi yapmaktadır.

Konyaaltı su dağıtım şebekesi ağ sistem ve dal sistemlerin birleşimi şeklinde olup, tek bir sistem olarak çalışmakta iken su kayıplarının ve su kalitesinin daha verimli bir şekilde yönetimi maksadı ile alt bölgelere (district metered area; DMA) ayrılmıştır (Karadirek vd. 2012a). Alt bölgelere ayırma işlemi, su dağıtım şebekesini birden fazla, kontrollü, birbirinden bağımsız ayrı olarak çalışan küçük su dağıtım şebekeleri olarak tanımlanmaktadır (Morrison 2004).



Şekil 3.2. Konyaaltı su dağıtım şebekesi ve temel bileşenleri (TÜBİTAK 2011, Soyupak vd. 2011, Karadirek vd. 2012a)

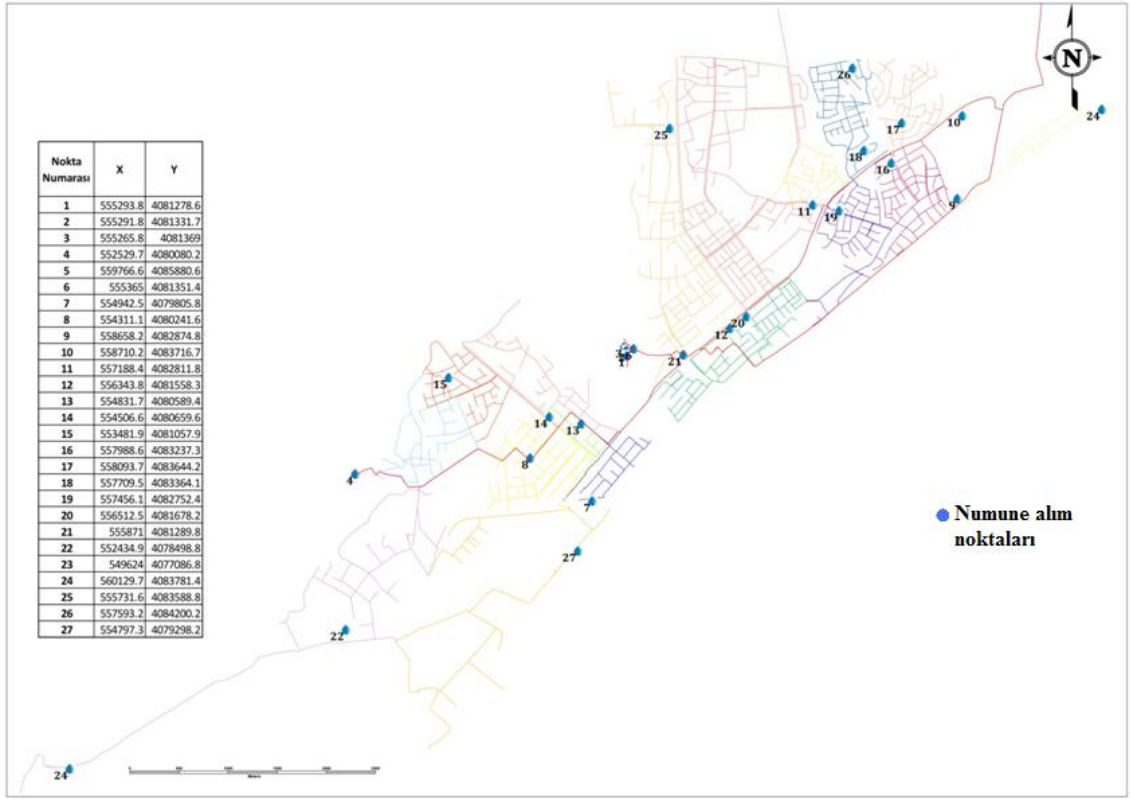
Pilot çalışma bölgesi, hem su kayıplarının hem de su kalitesinin daha iyi yönetilebilmesi amacı ile 18 alt bölgeye ayrılmıştır. Alt bölgelere ayırma işleminde hali hazırda var olan akarsu geçişleri ve kanallar alt bölgelerin sınırlarının oluşturulmasında kullanılmış olup, EPANET 2.0 isimli hidrolik ve su kalitesi modeli kullanılarak uygun olmayan su basıncı ve su hızlarının oluşması da engellenmiştir. Alt bölgelerin yönetiminde 1000'den daha az abone bağlantısı ile daha iyi bir yönetim sağlanabilir, fakat genel olarak alt bölgelerde 3000 - 5000 abone bağlantısı olması sıklıkla karşılaşılan ve önerilen bir yöntemdir (Thornton vd. 2008). Pilot çalışma bölgesinde oluşturulan alt bölgelerde abone bağlantı sayısı 50 – 979 abone arasındadır (Karadirek vd. 2012a). Oluşturulan alt bölgelerin tamamına tek noktadan su temini yapılmakta olup, tüm alt bölge girişlerine elektromanyetik debimetre ve basınç metre montajları yapılmıştır.



Şekil 3.3. Konyaaltı su dağıtım şebekesi alt bölgeleri ve online su kalitesi ölçüm istasyonları (Karadirek vd. 2012a)

Pilot çalışma bölgesinde de SCADA sistemi mevcut olup, bu çalışma kapsamında yeni SCADA istasyonları eklemek sureti ile debi, su basıncı, serbest bakiye klor konsantrasyonları, bulanıklık, elektriksel iletkenlik, su sıcaklığı gibi parametrelerin gerçek zamanlı izlenmesi, kontrolü ve kaydı sağlanmıştır. Her bir alt bölge girişinde yer alan debimetre ve basınç metreler ilave olarak pompa istasyonunda, dengeleme tankında da debimetre ve basınç metreler yer almaktadır. Kantitatif ölçüm parametrelerine ilaveten Boğaçay Pompa İstasyonunda, Hurma Depoda ve sırasıyla ON 68, ON 69, ON 70, ON 71, ON 73 ile ON 74 istasyonlarında pH, su sıcaklığı, elektriksel iletkenlik, bulanıklık ve serbest bakiye klor konsantrasyonları online olarak izlenmekte ve elde edilen veriler hem mevcut cihazlar hem de SCADA merkezinde kayıt altına alınmaktadır. Pilot çalışma bölgesinde oluşturulan alt bölgeler ve online ölçüm istasyonları Şekil 3.3'te verilmektedir. Çalışma bölgesinde online su kalitesi ölçümlerinin yanı sıra 2008 – 2011 yılları arasında 30 ay süresince 27 noktadan alınan numunelerde her iki ayda bir olmak üzere saha ve laboratuvar ölçüm ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu 27 noktadan ilk üçü kaynakta klorlama öncesinde, dördüncü nokta ise hemen klorlama sonrasında olup, diğer ölçüm noktaları su dağıtım şebekesi üzerinde farklı noktalarda yer almaktadır. Saha ölçüm ve analiz parametreleri sıcaklık, pH, çözülmüş oksijen, elektriksel iletkenlik, tuzluluk, bulanıklık, serbest ve toplam klorudur. Laboratuvar ölçümleri ise orto-fosfat, toplam fosfor, amonyum, nitrit, nitrat, demir, mangan, toplam koliform, fekal koliform, kjeldahl azotu, bromür (altı ayda bir), trihalometanlar (altı ayda bir), toplam organik karbon ve UV<sub>254</sub> parametreleridir. Çalışma sahası numune alma noktalarının lokasyonları Şekil 3.4'te verilmektedir.





Şekil 3.4. Su kalitesi ölçüm ve analiz çalışmaları için numune alım noktaları (TÜBİTAK 2011)

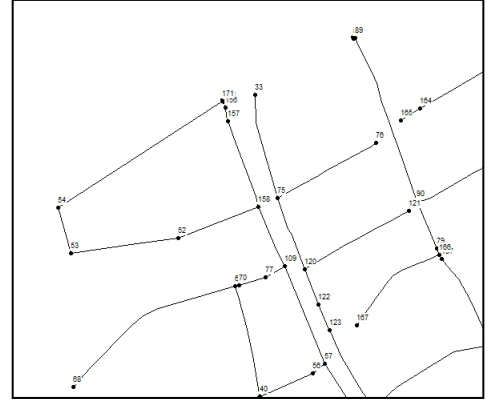
### 3.2. Serbest Bakiye Klor Konsantrasyonlarının Deterministik Modelleme Yaklaşımı ile Modellenmesi

#### 3.2.1. Model girdi dosyalarının hazırlanması

Deterministik modelleme çalışmalarının en önemli kısmı model girdi dosyalarının (şebekeye ait fiziksel bileşenlerin) hazırlanmasıdır. Bu kapsamda ASAT CBS birimi tarafından oluşturulan su dağıtım sisteminin bileşenlerine ait veriler (boru uzunluğu, boru çapı, düğüm noktası koordinatları, vanalar vb.) sahada kontrol edilmek sureti ile güncellemeler gerçekleştirilmiştir. Şebekenin fiziksel bileşenlerine ait güncellenmiş coğrafi bilgi sistemi verileri, deterministik modelleme yaklaşımında kullanılmak üzere girdi dosyaları oluşturulmuştur. Pilot çalışma bölgesinin coğrafi bilgi sistemi verilerine ait görsel ve bu verilerin kullanılması ile oluşturulan şebekenin fiziksel bileşenlerini gösteren görseller Şekil 3.5'te verilmektedir.



a)



b)

Şekil 3.5. a) Coğrafi bilgi sistemi verilerine ait verilerin görseli b) Coğrafi bilgi sistemi verileri kullanılarak elde edilen deterministik modelleme yaklaşımı girdi verileri görseli (TÜBİTAK, 2011)

### 3.2.2. Klor ana akım bozunma katsayısının belirlenmesi

İçme suyu dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının deterministik modelleme yaklaşımı kullanılarak modellenebilmesi için, klor ana akım bozunma ile klor boru cidar bozunma katsayılarına ihtiyaç vardır. Klor boru cidar bozunma katsayısı ( $K_w$ ) genellikle kalibrasyon çalışmaları ile tahmin edilirken; klor ana akım bozunma katsayısı ( $K_b$ ) ise laboratuvar çalışmaları ile tespit edilmektedir.  $K_b$ , su sıcaklığı, başlangıç klor konsantrasyonu ve ham su içerisindeki klor ile reaksiyona giren organik ve inorganik madde içeriğine bağlıdır.

Pilot çalışma bölgesi su kaynağı olan Boğaçay Pompa İstasyonundan klorlama öncesinden ham su numunesi alınmıştır. Ham su numunesine laboratuvar ortamında sıvı sodyum hipoklorit çözeltisi kullanılarak klor dozlaması gerçekleştirilmiş olup, klor dozlanan numuneler, klor ile reaksiyona girmeyen amber cam şişelere hava boşluğu kalmayacak şekilde alınmıştır. Numuneler aynı başlangıç zamanında 15 °C, 20 °C ve 30 °C sıcaklıklarda üç farklı inkübatörde saklanmıştır. Su dağıtım şebekesindeki ortalama su sıcaklığı 20 °C olup, 15 °C ve 30 °C su sıcaklıkları ise su dağıtım şebekesindeki olağan dışı durumları temsil etmektedir ki; su sıcaklıklarının seçiminde pilot çalışma bölgesinde her iki ayda bir olarak otuz ay süresince gerçekleştirilen su kalitesi ölçümleri ile de teyit edilmiştir.

İnkübatörde saklanan numunelerde, belirlenen zaman aralıklarında serbest bakiye ve toplam klor konsantrasyonları ölçümleri iki tekrarlı olarak gerçekleştirilmiş ve ortalama değerler kullanılmıştır.  $K_b$  ölçümleri için Mayıs 2009, Ağustos 2009 ve Mart 2010 olmak üzere ham su kalitesindeki mevsimsel değişimlerin etkisini de tespit amacı ile üç farklı periyotta aynı işlemler gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.3. Model kalibrasyonu ve doğrulaması

Deterministik modelleme yaklaşımında EPANET 2.0 isimli hidrolik ve su kalitesi modeli kullanılmıştır. İçme suyu dağıtım şebekelerinde serbest bakiye klor

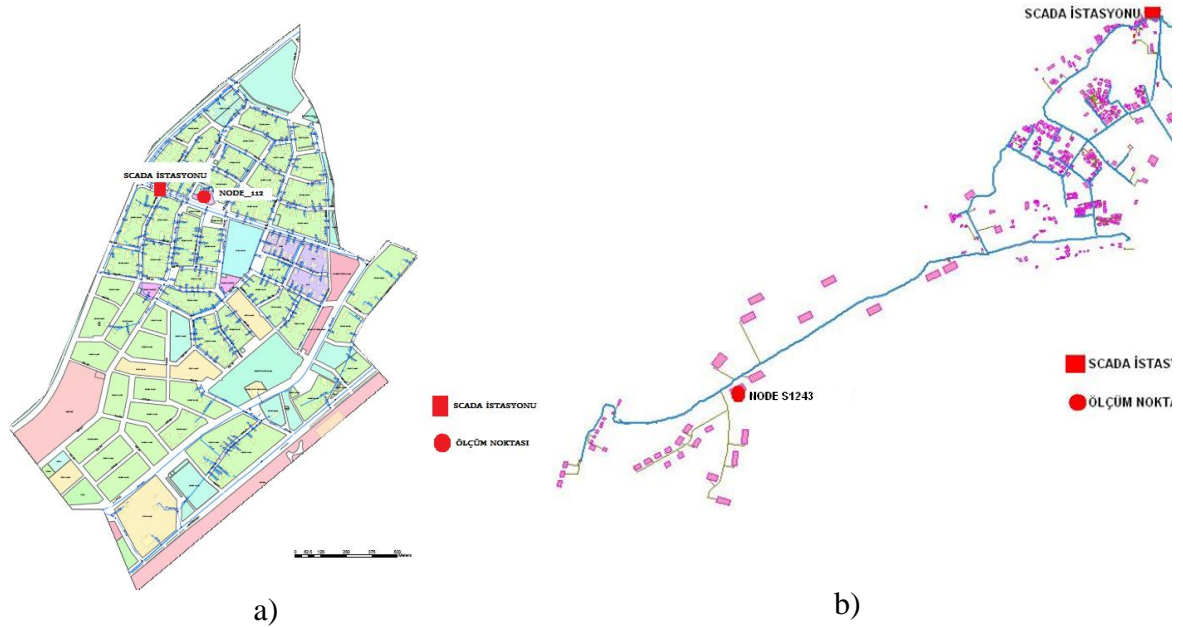


katsayı klor ana akım bozunma katsayısıdır ki; laboratuvar çalışmaları ile tespit edilmiştir. Bir diğer katsayı ise klor boru cidar bozunma katsayısıdır. Pilot çalışma bölgesinin hidrolik çözümünde Hazen – Williams eşitliği (3.1) kullanılmış olup, boru cidar pürüzlülük katsayısı 90 – 140 arasında değişkenlik göstermektedir. Düşük değerler eski ve pürüzlülüğü yüksek borular için, yüksek değerler ise daha yeni ve pürüzlülüğü düşük olan borular için kullanılmaktadır.

$$V = k.C.R^{0,63}.J^{0,54} \quad (3.1)$$

- V = Su hızı (m/sn)  
k = Birim çevirme faktörü (Metrik birim sistemi için ≈ 0,85)  
R = Hidrolik yarıçap  
J = Enerji çizgisi eğimi

Boru cidar pürüzlülük katsayısının tayini amacı ile pilot çalışma bölgesinde hidrolik model kalibrasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda farklı boru yaşlarına sahip iki alt bölge seçilmiş ve çalışmalar bu alt bölgelerde gerçekleştirilmiştir. Görselleri Şekil 3.7’de verilen bu alt bölgeler sırası ile Alt Bölge No.6 ve Alt Bölge No.18’dir. Aralık 2009 ve Nisan 2010 tarihlerinde gerçekleştirilen hidrolik model kalibrasyon çalışmalarında taşınabilir basınç metre marifeti ile Çizelge 3.2’de verilen kontrol noktalarında basınç ölçümleri yapılmış ve su basıncı değerleri belirli zaman aralıkları kaydedilmiştir. Pilot çalışma bölgesindeki boru yaşının nispeten genç olması ve büyük bir çoğunluğunun plastik borulardan oluşması sebebi ile pürüzlülük katsayısı 100’den başlamak sureti ile 10 birim artış olacak şekilde denem yanılma yöntemi ile ölçümler ve model tahminleri arasındaki en düşük ortalama mutlak hata değerini veren pürüzlülük katsayıları belirlenmiştir.



Şekil 3.7. a) Alt bölge – 6, b) Alt bölge – 18 coğrafi bilgi sistemi verilerine ait görseller (TÜBİTAK 2011)

Çizelge 3.2. Hidrolik model kalibrasyonu için sahadan alınan kontrol numune istasyonlarına ait detaylar

Çalışmanın Yapıldığı Alt Bölge	Kontrol Numunelerinin Alındığı İstasyon	Alınan Kontrol Numunelerine EPANET modelinde karşılık gelen Düğüm Noktası
Alt Bölge - 6	Arapsuyu Eski Cami	Düğüm Noktası 112
Alt Bölge - 18	Gökdere Cami	Düğüm Noktası S1243

Nispeten daha yüksek boru yaşına sahip 6. alt bölgede Aralık 2009 tarihinde, normal işletme koşullarında 120 saatlik bir zaman periyodu için kalibrasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Nisan 2010 tarihinde ise nispeten daha düşük boru yaşına sahip 18. alt bölgede yangın vanası açılmak sureti ile çalışma sahasında olağan dışı debi profilleri oluşturulmuş ve 36 saatlik bir süre için model tahminleri yapılmıştır.

Hidrolik model kalibrasyonunu takiben su kalitesi modeli kalibrasyon çalışmaları yürütülmüştür. EPANET modelinde belirlenmesi gereken üç katsayıdan birisi olan klor boru cidar bozunma katsayısı ( $K_w$ ), boru yaşı, boru cinsi, su sıcaklığı ve boru içerisindeki biyofilm tabakası gibi parametrelere bağlı olarak değişim gösterir. Klor boru cidar bozunma katsayısının tayini için Kasım – Aralık 2009 tarihleri arasında dört farklı periyotta kalibrasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Toplamda dört farklı alt bölgede (2., 4., 6. ve 8. Alt bölgeler) gerçekleştirilen kalibrasyon çalışmalarında alt bölgelere temin edilen suyun debi değerleri 5 dakikalık zaman aralıkları ile ASAT SCADA Merkezi'nden temin edilmiştir. Su kalitesi modeli kalibrasyon çalışmalarının gerçekleştirildiği alt bölgeler Şekil 3.8'de verilmektedir. Alt bölgelere temin edilen suyun klor konsantrasyonuna ait veriler ise ASAT SCADA Merkezi'nden ve istenilen zaman aralıklarında veri alınması mümkün olan online su kalitesi ölçüm cihazlarından temin edilmiştir. Model tahminlerinin, ölçüm sonuçları ile kıyaslanmasını esas alan bu çalışmada klor konsantrasyonlarının sahada ölçülmesi için cami, taksi durağı ve spor tesisleri gibi numune alınması kolay olan noktalardan gündüz ve gece numuneler alınmış ve serbest bakiye klor konsantrasyonları tayin edilmiştir. Numune alımından önce musluklardan bir miktar su akması sağlanmış ve böylece şebekedeki serbest bakiye klor konsantrasyonları tayin edilmiştir. Serbest bakiye klor konsantrasyonları aynı anda iki adet HACH DR 890 taşınabilir kolorimetre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı anda aynı numunedan iki ölçüm yapılmış, iki ölçüm sonucu birbirini ile uyumlu sonuç vermediyse daha fazla numune ile ölçüm gerçekleştirilmiştir. Modelin kararlı hale gelmesi için geçen süre model ısınma süresi olarak adlandırılmakta olup, bu süre hidrolik model çalışmaları ile suyun alıkonma süresi esas alınarak hesaplanmaktadır. Su kalitesi modeli kalibrasyon çalışmaları süresince model ısınma süresi altı saat olarak belirlenmiş olup, çalışmalar buna göre şekillendirilmiştir.

Birinci su kalitesi kalibrasyon periyodu 09.11.2009 – 10.11.2009 tarihleri arasında 48 saatlik bir zaman aralığı için gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılan kalibrasyon çalışmaları normal işletme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sahasında klor dozlaması yalnızca Boğaçay pompa istasyonunda yapılmaktadır ve klor dozlaması yaklaşık olarak 0,40 - 0,50 mg/L seviyelerindedir. İkinci su kalitesi kalibrasyon çalışması 23.11.2009 – 24.11.2009 tarihleri arasında 48 saatlik bir zaman aralığı için gerçekleştirilmiş olup, 24.11.2009 tarihinde su kalitesi modelinin tahmin

yeteneklerinin test edilmesi amacı ile kaynakta klor dozlaması yaklaşık üç saatlik süre içerisinde 1 mg/L'ye kadar artırılmıştır.



Şekil 3.8. a) Alt bölge – 2, b) Alt bölge – 4, c) Alt bölge – 6, d) Alt bölge – 8'e ait coğrafi bilgi sistemi verilerine ait görseller (TÜBİTAK 2011)

Su kalitesi modeli üçüncü kalibrasyon çalışması 06.12.2009 – 07.12.2009 tarihleri arasında 36 saatlik zaman aralığı için gerçekleştirilmiş olup, 07.12.2009 tarihinde model tahmin yeteneklerinin test edilmesi amacı ile kaynakta klor konsantrasyonunun altı saatlik bir zaman dilimi içerisinde 1 mg/L'ye artırılmıştır. Su kalitesi modeli dördüncü kalibrasyon periyodu ise normal işletme koşullarında,

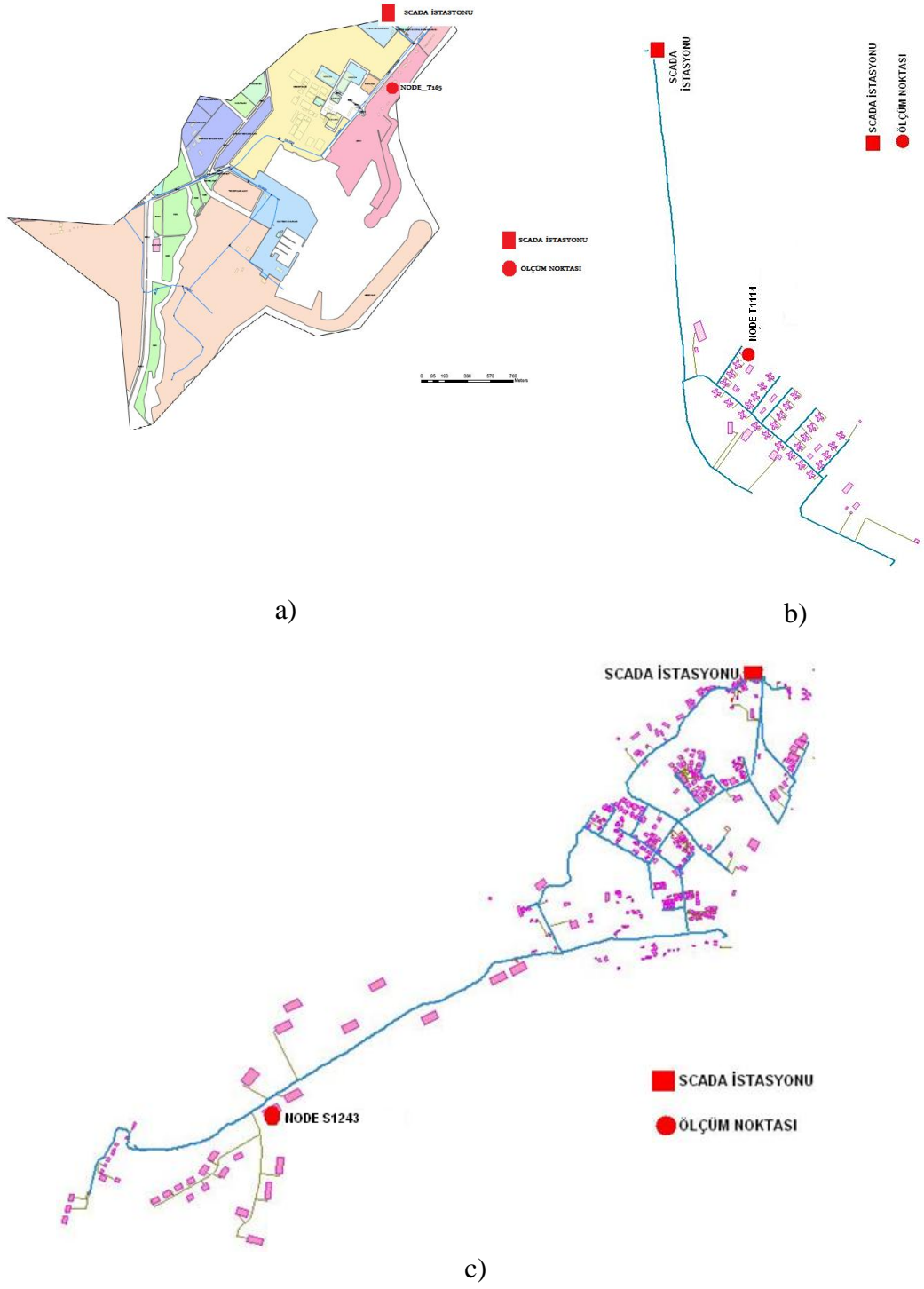
23.12.2009 – 28.12.2009 tarihleri arasında 120 saatlik bir zaman aralığı için gerçekleştirilmiştir.

Sonuçta klor konsantrasyonu için ölçülen değerler ile model tahminleri arasında deneme yanılma yöntemi ile en düşük ortalama mutlak hata değerini veren  $K_w$  değeri hesaplanmıştır.  $K_w$  değeri sıfır olabilir (Rossman 2000). Bu nedenle bu katsayının kalibrasyonu sıfırdan başlayarak 0,01 m/gün artırılmak sureti ile gerçekleştirilmiştir. Su kalitesi modeli kalibrasyon çalışmaları için sahada klor konsantrasyonlarının ölçülmesinde seçilen ölçüm istasyonlarına ait detaylar Çizelge 3.3'te verilmektedir.

Çizelge 3.3. EPANET model tahminlerinin kalibrasyonu için sahadan alınan kontrol numune istasyonlarına ait detaylar (TÜBİTAK 2011)

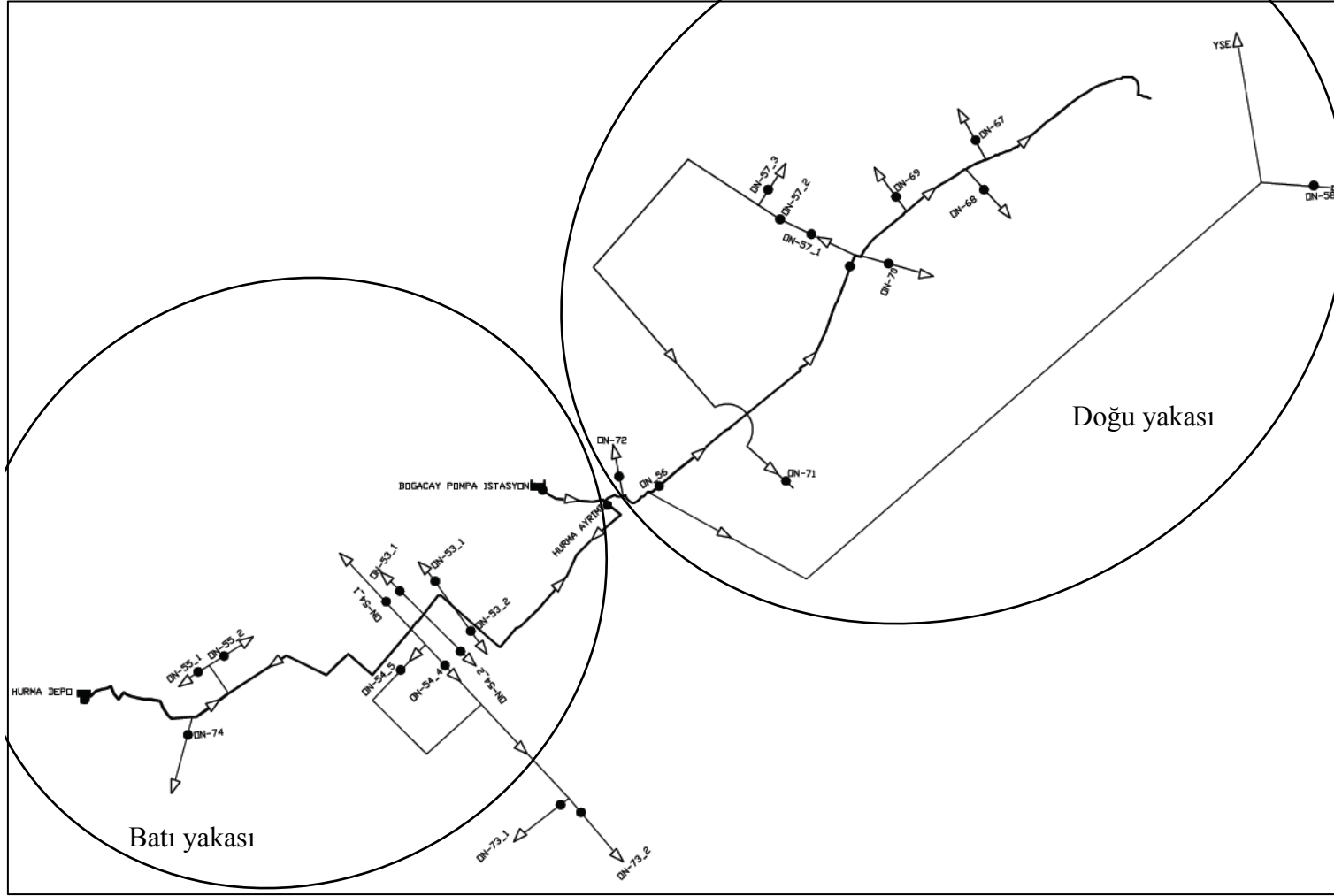
Çalışmanın Yapıldığı Alt Bölge	Kontrol Numunelerinin Alındığı İstasyon	Alınan Kontrol Numunelerine EPANET modelinde karşılık gelen Düğüm Noktası
Alt Bölge - 2	Deniz Kenarı Cami	Düğüm Noktası 74
Alt Bölge - 2	Arapsuyu Merkez Cami	Düğüm Noktası 40
Alt Bölge - 4	Konyaaltı Belediyesi Spor Tesisleri	Düğüm Noktası 23
Alt Bölge - 6	Arapsuyu Eski Cami	Düğüm Noktası 112
Alt Bölge - 8	Sahil Taksi Durağı	Düğüm Noktası 371

Kalibrasyon parametreleri tespit edilen çalışma bölgesine ait hidrolik ve su kalitesi modelinin, kalibrasyon parametreleri kullanılarak Şubat – Mayıs 2010 tarihleri arasında farklı zaman dilimlerinde model tahminleri ve saha ölçümlerinin kıyaslanması ile su kalitesi modeli doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Su kalitesi modeline ait ısınma süreleri 6 – 20 saat aralığında tespit edilmiş olup, çalışmalar bu veriler ışığında şekillendirilmiştir. Su kalitesi modeli doğrulama çalışmaları birinci periyodu 22.02.2010 – 23.02.2010 tarihleri arasında 48 saatlik bir zaman aralığı için kalibrasyon çalışmalarının yürütüldüğü alt bölgelerde (2. alt bölge, 4. alt bölge, 6. alt bölge, 8. alt bölge) gerçekleştirilmiştir. Su kalitesi modeli doğrulama çalışması ikinci periyodu Şekil 3.9'da görselleri verilen 17-a., 17-b. ve 18. alt bölgelerde, 12.04.2010 – 13.04.2010 tarihleri arasında 48 saatlik bir zaman dilimi için gerçekleştirilmiştir. Su kalitesi modeli doğrulama çalışmalarının üçüncü periyodunda pilot çalışma bölgesi doğu ve batı yakası olarak ikiye ayrılmış olup, 12.05.2010 tarihleri arasında çalışma bölgesi doğu yakasında 10 saatlik bir zaman dilimi için gerçekleştirilmiştir. Su kalitesi modeli üçüncü doğrulama çalışması kapsamında ON-68 ve ON-70 nolu online ölçüm istasyonlarında ölçülen klor konsantrasyonları ve debi değerleri ile model tahminleri kıyaslanmıştır. Pilot çalışma bölgesindeki ayrımlar ve ölçüm noktalarına ait detaylar Şekil 3.10'da verilmektedir. Su kalitesi modeli üçüncü doğrulama periyodunu takiben 14.09.2010 – 15.09.2010 tarihleri arasında çalışma sahasının tamamında 48 saatlik bir zaman dilimi için dördüncü su kalitesi doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9. a) 17-a Alt bölge, b) 17-b Alt bölge, c) 18. Alt bölgeye ait coğrafi bilgi sistemi verilerine ait görseller (TÜBİTAK 2011)



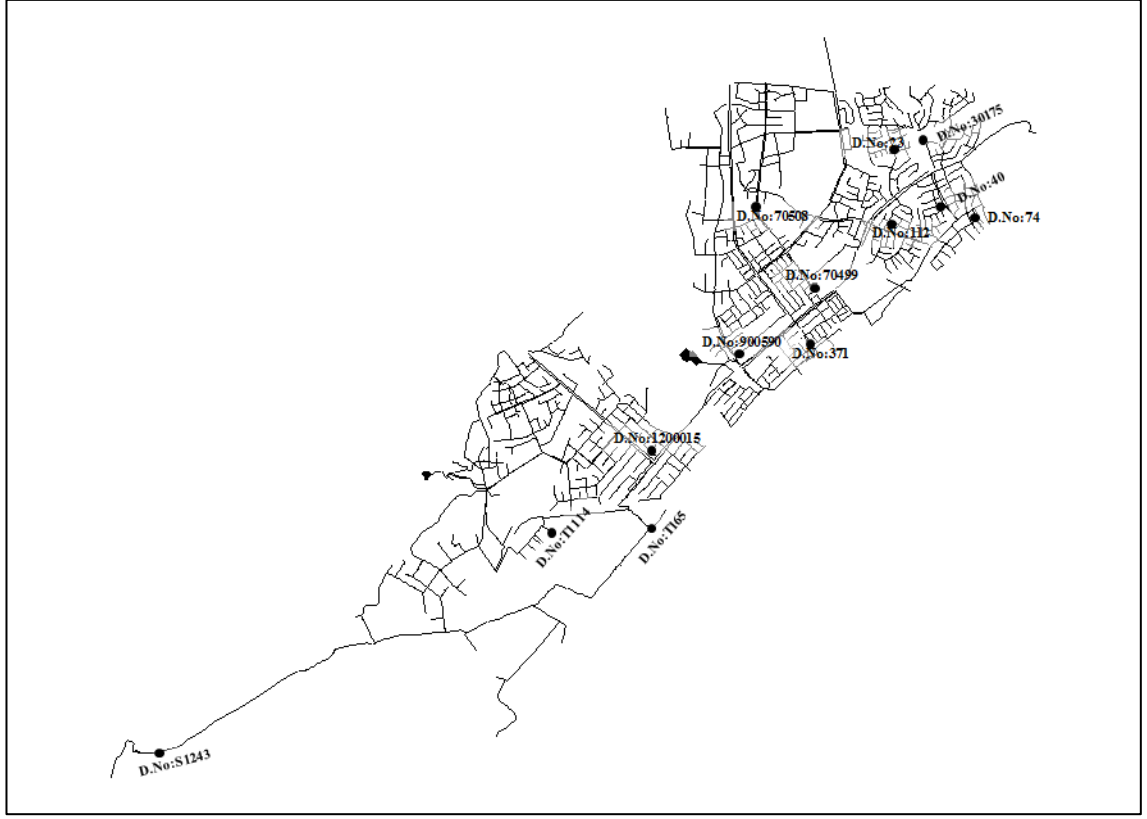


Şekil 3.10. Model doğrulama çalışmalarında fiziksel olarak ikiye ayrılan pilot çalışma bölgesi

Şubat – Mayıs 2010 tarihleri arasında su kalitesi modeli doğrulama çalışmaları kapsamında klor konsantrasyonlarına ait ölçümler ile mode tahminleri kıyaslanmış ve model doğrulaması çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Su kalitesi modeli doğrulama çalışmaları kapsamında klor konsantrasyonlarının ölçümlerinin yapıldığı tüm kontrol numunesi istasyonları ait bilgiler Çizelge 3.4’te, bu ölçüm istasyonlarının saha üzerindeki lokasyonları ise Şekil 3.11’de verilmektedir.

Çizelge 3.4. Su kalitesi modeli doğrulama çalışmaları amacı ile sahadan alınan kontrol numunelerinin konum bilgileri (TÜBİTAK 2011)

Çalışmanın Yapıldığı Alt Bölge	Kontrol Numunelerinin Alındığı İstasyon	Alınan Kontrol Numunelerine EPANET modelinde karşılık gelen Düğüm Noktası/Boru Numarası
2. Alt Bölge	Deniz Kenarı Cami	Düğüm Noktası 74
2. Alt Bölge	Arapsuyu Merkez Cami	Düğüm Noktası 40
2. Alt Bölge	ON-68 ölçüm istasyonu	Düğüm Noktası 2156
2. Alt Bölge	ON-68 ölçüm istasyonu	Boru Numarası 2147
3. Alt Bölge	Kuba Cami	Düğüm Noktası 30175
4. Alt Bölge	Konyaaltı Belediyesi Spor Tesisleri	Düğüm Noktası 23
6. Alt Bölge	Arapsuyu Eski Cami	Düğüm Noktası 112
6. Alt Bölge	ON-70 ölçüm istasyonu	Düğüm Noktası 6327
6. Alt Bölge	ON-70 ölçüm istasyonu	Boru Numarası 6164
7. Alt Bölge	S. Kırımlıoğlu Cami	Düğüm Noktası 70499
7. Alt Bölge	Lütfullah Cami	Düğüm Noktası 70508
8. Alt Bölge	Sahil Taksi Durağı	Düğüm Noktası 371
9. Alt Bölge	Sezerler Cami	Düğüm Noktası 900590
12. Alt Bölge	Bileydi Cami	Düğüm Noktası 1200015
17-a Alt Bölge	DLH Antalya Müdürlüğü	Düğüm Noktası T165
17-b Alt Bölge	Laçın Sitesi K5 Blok	Düğüm Noktası T1114
18. Alt Bölge	Gökdere Cami	Düğüm Noktası S1243



Şekil 3.11. Model doğrulama çalışmalarında kontrol numunesi alınan noktaların konumları

#### 3.2.4. Deterministik modelleme yaklaşımı ile yönetim ve senaryo analiz çalışmaları

Kalibrasyonu ve doğrulaması yapılan pilot çalışma bölgesi hidrolik ve su kalitesi modeli, pilot çalışma bölgesi su dağıtım sisteminin tamamında WHO (Dünya Sağlık Örgütü) tarafından tavsiye edilen ve İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik'te belirtilen (dezenfeksiyon amacı ile klor kullanılması durumunda şebekede) 0,2 mg/L değerinin altına düşmemesi için kaynakta dozlanması gereken en uygun klor konsantrasyonunun bulunması amacı ile kullanılmıştır.

Yönetim çalışmalarında; serbest bakiye klor konsantrasyonları için kritik debi değerleri, farklı sıcaklıklar için elde edilen klor ana akım bozunma katsayıları, klor ana akım bozunma katsayıları ile kritik debi değerlerinin kombinasyonları kullanılarak şebekenin tamamında en az 0,2 mg/L klor konsantrasyonuna sahip olması için kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonunun tespiti için sekiz farklı senaryo çalışması irdelenmiş ve kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonları tahmin edilmiştir. Tahmin edilen klor dozaj konsantrasyonları uygulama kolaylığı da göz önünde bulundurularak tespit edilmiştir. Yönetim senaryolarında klor konsantrasyonlarının kaynakta sabit bir değerde dozlandığı kabulü yapılmıştır.

Yönetim senaryolarının geliştirilmesinde, çalışma bölgesinde klor konsantrasyonlarını etkileyebilecek olağan dışı durumlar da göz önünde

bulundurulmuştur. Su sıcaklığının  $K_w$  değeri üzerindeki etkisi oldukça düşük olup, yönetim senaryolarında su sıcaklığı ile  $K_w$  değerinin değişmediği kabulü yapılmıştır. Çalışma bölgesinde gerçekleştirilen fiziksel su kayıpları azaltma çalışmaları da göz önünde bulundurulmuş ve fiziksel su kayıplarının sistem giriş hacminin %10'una tekabül eden değere kadar azaltılması durumu için de senaryolar oluşturulmuştur. Su kayıplarının azaltılması durumu göz önünde bulundurularak oluşturulan senaryolarda su kayıplarının su dağıtım şebekesinde üniform olarak dağıldığı kabul edilmiştir.

Birinci yönetim senaryosu kapsamında su dağıtım şebekesinde mevcut durumda görülebilecek en yüksek su tüketim miktarları kullanılarak modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Birinci yönetim senaryosu, su dağıtım şebekesinde görülebilecek en yüksek tüketimlerin gerçekleştiği dönem için gerçekleştirilmiştir. Fakat su sıcaklığının artması durumunda su dağıtım şebekesinde serbest bakiye klor konsantrasyonlarının azalması için risk oluşturan başlıca etmen su hızının düşük olması durumudur. Yaz aylarında sürekli olarak en yüksek tüketim gerçekleşmez. İkinci yönetim senaryosu bu durum göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. İkinci yönetim senaryosu kapsamında su sıcaklığı en yüksek değer kabul edilmiş, su tüketim verileri ise yüksek su sıcaklığının ve yüksek su sıcaklığında olası en düşük su tüketim verileri alınarak gerçekleştirilmiştir. Üçüncü yönetim senaryosu su dağıtım şebekesinde görülebilecek en düşük su tüketimlerin gerçekleştiği dönem için gerçekleştirilmiştir. Çalışma bölgesinde devam eden su kayıplarının azaltılması çalışmalarını da göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen dördüncü yönetim senaryosu, birinci yönetim senaryosunun su kayıplarının azaltılması durumu için düzenlenmiş halidir. Beşinci yönetim senaryosu, ikinci yönetim senaryosunun su kayıplarının azaltılması durumu için düzenlenmiş halidir. Altıncı yönetim senaryosu, üçüncü yönetim senaryosunun su kayıplarının azaltılması durumu için düzenlenmiş halidir. Yedinci yönetim senaryosu, su kaynağındaki su kalitesinin muhtemel bozulması durumunda kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonlarının tespiti için geliştirilmiştir. Bu kapsamda birinci yönetim senaryosu verileri yeniden düzenlenerek kullanılmıştır. Bu kapsamda şebekedeki en yüksek su sıcaklığının en yüksek su tüketim verilerinin gerçekleştiği dönem için klor ana akım bozunma katsayısı beş kat artırılmak sureti ile model tahmin çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sekizinci yönetim senaryosu su kaynağındaki su kalitesinin muhtemel bozulması durumunda kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonlarının tespiti için geliştirilmiştir. Bu kapsamda üçüncü yönetim senaryosu verileri yeniden düzenlenerek kullanılmıştır.

### **3.3. Serbest Bakiye Klor Konsantrasyonlarının Veriye Dayalı Modelleme Yaklaşımları ile Modellenmesi**

#### **3.3.1. Model girdi verilerinin temini**

Veriye dayalı modelleme yaklaşımlarının gerçekleştirilebilmesi için online verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda, pilot çalışma bölgesinde klor dozlama istasyonu olan Boğaçay Pompa İstasyonunda ve sahada mevcut olan ve fiziksel olarak kaynağa en uzakta yer alan online ölçüm istasyonlarının (ON-68, ON-69) verilerini kullanmak sureti ile çalışmalara başlanmıştır. Çalışmanın daha sonraki aşamasında ise klor dozlama istasyonuna ve pilot çalışma bölgesinde serbest bakiye klor konsantrasyonları açısından kritik nokta olan Gökdere istasyonuna birer adet online klor



MISO modelleme çalışması için; i) MATLAB yazılımından faydalanılmıştır. ii) En az düğüm sayısı 5, en fazla düğüm sayısı 15 olarak seçilmiştir. iii) Eğitim için Levenberg-Marquardt eşitliği kullanılmıştır (Beale vd.2010). iv) Performans kriteri olarak ortalama hata karesi (MSE) ve çıktılar ile hedefler arasındaki korelasyonu ifade eden regresyon (R) değerleri kullanılmıştır. v) Veriler eğitim, test ve doğrulama aşamaları için üç kısma ayrılmıştır. Verilerin %50'si eğitim, %25'i test ve %25'i doğrulama için kullanılmıştır. Girdi olarak Boğaçay Pompa İstasyonu su kalitesi parametreleri (klor, su sıcaklığı, pH, bulanıklık), hedef olarak ise ON-68 ölçüm istasyonu klor verileri kullanılmıştır.

SISO modelleme çalışması için; i) MATLAB yazılımından faydalanılmıştır. ii) En az düğüm sayısı 5, en fazla düğüm sayısı 15 olarak seçilmiştir. iii) Eğitim için Levenberg-Marquardt eşitliği kullanılmıştır (Beale vd. 2010). iv) Performans kriteri olarak ortalama hata karesi (MSE) ve çıktılar ile hedefler arasındaki korelasyonu ifade eden regresyon (R) değerleri kullanılmıştır. v) Veriler eğitim, test ve doğrulama aşamaları için üç kısma ayrılmıştır. Verilerin %50'si eğitim, %25'i test ve %25'i doğrulama için kullanılmıştır. Girdi olarak klor dozlama istasyonu klor verileri, hedef olarak ise ON-68 ölçüm istasyonu klor verileri kullanılmıştır.

### **3.3.3. Sistem tanımlama yöntemine dayalı modelleme yaklaşımları**

Sistem tanımlamaya dayalı modelleme yaklaşımları kapsamında YSA tabanlı modelleme yaklaşımına alternatif olabilecek, girdi değişken sayısını en aza indiren, dinamik özellikler taşıyan veriye dayalı matematiksel modeller geliştirilmiştir. Buradaki modellemenin esası, seçilen modelin parametrelerinin tahmin edilmesini temel olarak almaktadır (Ljung 2009, Ljung ve Glad 1994). Bu yaklaşımda ölçümler ile model tahminlerinin birbirine yakın olması istenir ki; bu nedenle kullanılan verilerin yarısı model geliştirme diğer yarısı ise doğrulama amacı ile kullanılmaktadır. Sistem tanımlama yöntemine dayalı modelleme yaklaşımlarında girdi olarak klor dozlama istasyonunda elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları, hedef olarak ise Gökdere istasyonunda elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında, ARX modelleri, ARMAX modelleri ve proses modelleri sistem tanımlamada kullanılmak amacı ile geliştirilmiştir. Sistem tanımlamaya dayalı çalışmalarda model seçim için nihai sonuç hatası (FPE: final prediction error) ve en iyi uyum kriteri (BF: best fit) kullanılmıştır.

Farklı model yapıları elde edildikten sonra Akaike teorisine göre en düşük FPE değerine sahip model en doğru model olarak değerlendirilir. FPE değeri (3.1) bağıntısına göre hesaplanır (Ljung 1999).

$$FPE = V \left( \frac{1 + \frac{d}{N}}{1 - \frac{d}{N}} \right) \quad (3.1)$$

V= yitim işlevi

d= Tahmin edilen parametre sayısı

N= Tahmin amaçlı olarak kullanılan veri setinde gözlem sayısı

Eşitlik (3.1)'de yer alan yitim işlevi, V, (3.2) bağıntısına göre hesaplanır.

$$V = \det \left( \frac{1}{N} \sum_1^N \varepsilon(t, \theta_n) (\varepsilon(t, \theta_n))^T \right) \quad (3.2)$$

$\theta_n$  = Tahmin edilen parametreler

En iyi uyum kriteri (BF), modelin veriyi temsil edebilme kabiliyetini gösterir. En iyi uyum kriterinin %100 olması modelin tahmin etme kabiliyetinin %100 olduğunu gösterir. En iyi uyum kriterinin %0 olması, model kullanılarak elde edilen çıktı tahmin değerlerinin ancak ortalamaya eşit olabileceğini gösterir. En iyim uyum kriteri bağıntı (3.3)'e göre hesaplanır.

$$BF (\%) = \left| 1 - \frac{|y - \hat{y}|}{|y - \bar{y}|} \right| * 100 \quad (3.3)$$

y= ölçülen çıktı değeri

$\hat{y}$ =modelle tahmin edilen çıktı değeri

$\bar{y}$  = y ölçümlerinin ortalaması

## 4. BULGULAR

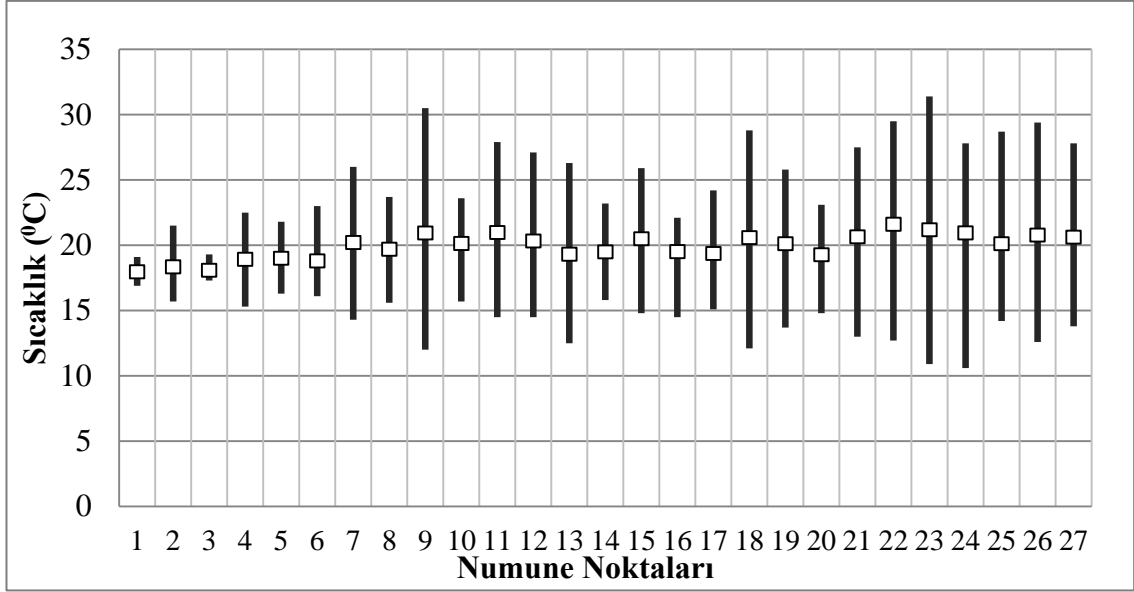
### 4.1. Saha ve Laboratuvar Ölçüm ve Analizleri

Çalışma bölgesinde 30 ay süresince her iki ayda bir olmak üzere toplam 15 dönemde 27 noktadan alınan numunelerde saha ve laboratuvarda gerçekleştirilen ölçüm ve analiz sonuçları ulusal ve uluslararası su kalite standartları ile karşılaştırıldığında, şebekedeki su kalitesinin ölçülen parametreler açısından iyi kalitede olduğu görülmektedir. Çalışmanın başlangıcından itibaren tamamlanmış olan 15 dönemlik ölçüm ve analiz çalışmalarının sonuçları, ilgili içme suyu standartları ile kıyaslanmıştır. İlgili sonuçların kıyaslanması Çizelge 4.1’de verilmektedir (TÜBİTAK 2011, Karadirek vd. 2014a). Kaynakta ve şebeke üzerinde bazı noktalarda koliform bakteri mevcudiyetinin olabilmesi içme suyu şebekelerinde klor konsantrasyonlarının kontrolünün önemini göstermektedir. Çalışma bölgesinde ölçülen en düşük ve en yüksek serbest bakiye klor konsantrasyonları sırasıyla 0,06 ve 0,78 mg/L’dir. Pilot çalışma bölgesindeki su kalitesinin çok iyi olması ve bölgedeki şebeke borularının yeni olması nedeniyle, yapılan ölçüm ve analiz çalışmalarında sudaki klor tüketiminin çok az seviyede gerçekleştiği görülmektedir. Boğaçay kuyularından temin edilerek Konyaaltı bölgesine iletilen suda bulunan organik ve inorganik maddelerin (toplam organik karbon, amonyum, demir, mangan, bromür ve koliform bakteri), klorun tüketimine etkisinin oldukça düşük olduğu sonucuna varılmaktadır.

Çalışma bölgesindeki toplam organik karbon ve bromür değerlerinin oldukça düşük değerlerde olması, bunun yanında düşük klor dozlama miktarları nedeniyle Boğaçay yeraltı suyu kaynaklarında THM oluşumlarının oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir ve tüm ölçüm ve analiz çalışmaları sonucunda çalışma bölgesinde THM konsantrasyonlarının 10 - 23 µg/L aralığında olduğu tespit edilmiştir (Kitis vd. 2010).

Çalışma bölgesi su dağıtım şebekesinde 30 ay süresince her iki ayda bir olmak üzere yapılan saha ve laboratuvar ölçümleri sonucunda elde edilen su sıcaklığı değerleri Şekil 4.1’de verilmektedir (TÜBİTAK 2011, Karadirek vd. 2014a). Elde edilen değerler ışığında, çalışma bölgesi su dağıtım şebekesinde ortalama su sıcaklığı 20 °C olarak kabul edilmiştir. Kış aylarında bölgedeki ortalama su sıcaklığı 15 °C, yaz aylarında ise 30 °C olarak kabul edilmiştir. Elde edilen su sıcaklığı değerleri kullanılarak kabul edilen ortalama su sıcaklıkları  $K_b$  değerinin tespitinde ve deterministik modelleme çalışmalarında kullanılmıştır.





Şekil 4.1. 2008 – 2011 yılları arasında pilot çalışma bölgesindeki 27 farklı ölçüm noktasında 15 ölçüm sonucu elde edilen su sıcaklığı değerleri (TÜBİTAK 2011, Karadirek vd. 2014a)

$K_b$  değerleri Mayıs 2009, Ağustos 2009 ve Mart 2010 olmak üzere üç farklı periyotta ve üç farklı sıcaklıkta tespit edilmiştir. Üç farklı periyot için tespit edilen serbest bakiye klor  $K_b$  değerleri, mevsimsel değişimin  $K_b$  değerleri üzerinde çok düşük bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. 20 °C için ortalama  $K_b$  değeri 0,13156/gün, 30 °C için 0,19897/gün ve 15 °C için 0,06420/gün olarak tespit edilmiştir (Altındal 2010, TÜBİTAK 2011). Literatürde  $K_b$  değerlerinin 0,070/gün ile 17,7/gün arasında değiştiği bildirilmektedir (Powell vd. 2000, Tiryakioglu 2005). Çalışma sahasında elde edilen değerler literatür değerleri ile kıyaslandığında elde edilen  $K_b$  değerlerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Düşük  $K_b$  değerleri Çizelge 4.1’de verilen su dağıtım şebekesi su kalitesi ölçüm ve analiz sonuçlarıyla da desteklenmektedir.  $K_b$  değerlerinin tespiti ile ilgili istatistiksel veriler Çizelge 4.2’de verilmektedir ki; buradan da anlaşılacağı üzere çalışma bölgesinde klor ana akım bozunma katsayısı birinci derece reaksiyon kinetiğine uymaktadır.

Çizelge 4.1. Konyaaltı su dağıtım şebekesi su kalitesi ölçüm sonuçlarının ilgili yönetmelikler ile kıyaslanması (Karadirek vd. 2014a)

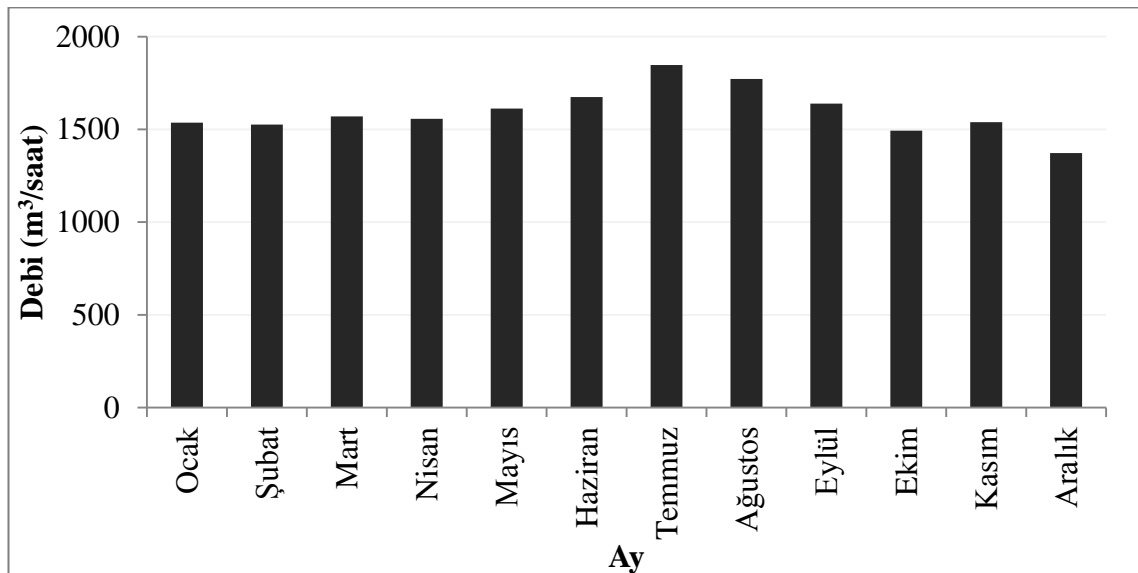
Parametre	Birim	Ölçülen en düşük değer	Ölçülen ortalama değer	Ölçülen en yüksek değer	İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (2013)	WHO (Dünya Sağlık Teşkilatı) İçme suyu kalitesi kılavuzu (2011)
Sıcaklık	<sup>0</sup> C	10,6	20,18	31,4		
pH		7,29	7,51	7,95		-
Çözünmüş oksijen	mgO <sub>2</sub> /L	3,95	5,70	9,15	6,5 and 9,5	-
Elektriksel iletkenlik	µS/cm	547	593	651	-	-
Tuzluluk	‰	0,1	0,1	0,1	2500	Önerilen klorür konsantrasyonu, 250 mg/L
Bulanıklık	NTU	0,08	0,2	0,55	-	-
Serbest bakiye klor	mg/L	0,06	0,33	0,78	-	Uç noktalarda en düşük 0,2 (öneri)
Toplam klor	mg/L	0,08	0,36	0,80	0,2 ve uç noktalarda en fazla 0,5	-
NH <sub>4</sub>	mg/L	0,00	0,02	0,38	-	-
NO <sub>2</sub>	mg/L	0,002	0,017	0,055	0,50	3
NO <sub>3</sub>	mg/L	3,05	9,82	17,8	0,5	50
Toplam Kjeldahl Azotu	mg/L	0,28	1,09	5,60	50	-
Ortofosfat fosforu	mg/L	<0,01	<0,01	0,15	-	-
Toplam fosfor	mg/L	<0,01	<0,01	0,43	-	-
Demir	mg/L	0,01	0,02	0,07	-	-
Mangan	mg/L	0,001	0,017	0,038	0,2	0,05
Toplam THM	µg/L	10	15	23	0,05	Kloroform 300, Bromoform 100, Dibromoklorometan 100, Bromodiklorometan 60
Toplam organik karbon	mg/L	0,10	0,34	1,02	100	-
Bromür	mg/L	<0,02	<0,02	0,0539	Anormal değişim yok	-
Toplam koliform	CFU/100 ml	0	0	0	-	0
Fekal koliform	CFU/100 ml	0	0	0	0	-

- : Standart/yönetmelikte yer almayan değerleri belirtmektedir.

Çizelge 4.2. Klor ana akım bozunma katsayısı çalışmalarına ait sonuçların istatistiksel değerlendirmesi (Karadirek vd. 2014a)

Periyot	Mayıs 2009			Ağustos 2009			Mart 2010
Su sıcaklığı (°C)	15	20	30	15	20	30	20
Numune sayısı	21	36	21	36	31	26	15
Regresyon eşitliği	$Y = 0.0588 - 0.06758 \cdot X$	$Y = -0.0121 - 0.06808 \cdot X$	$Y = -0.0113 - 0.16098 \cdot X$	$Y = -0.0561 - 0.06082 \cdot X$	$Y = 0.0237 - 0.16296 \cdot X$	$Y = -0.0572 - 0.2369 \cdot 6 \cdot X$	$Y = -0.1380 - 0.1636 \cdot 5 \cdot X$
$K_b$ (gün <sup>-1</sup> )	0.06758	0.06808	0.16098	0.06082	0.16296	0.23696	0.16365
$R^2$	0.956	0.985	0.972	0.987	0.968	0.981	0.958
Düzeltilmiş $R^2$	0.954	0.984	0.970	0.987	0.966	0.980	0.955
Tahminlerin standart hatası	0.03434	0.03922	0.06174	0.03908	0.11515	0.10718	0.06940
F testi	413.242	2198.91	650.113	2596.11	865.287	1220.54	296.94
Regresyon önem derecesi (P değeri)	Çok Yüksek (0.000)	Çok Yüksek (0.000)	Çok Yüksek (0.000)	Çok Yüksek (0.000)	Çok Yüksek (0.000)	Çok Yüksek (0.000)	Çok Yüksek (0.000)

Konyaaltı su dağıtım şebekesine verilen su miktarları SCADA sistemi tarafından izlenmekte ve kayıt altına alınmaktadır. Çalışma bölgesine 2010 yılında verilen aylık ortalama su miktarları Şekil 4.2’de verilmektedir. Çalışma bölgesine 2010 yılında verilen aylık ortalama en yüksek debi Temmuz ayında 1847,75 m<sup>3</sup>/saat iken, en düşük Aralık ayında 1372,54 m<sup>3</sup>/saat olarak tespit edilmiştir.

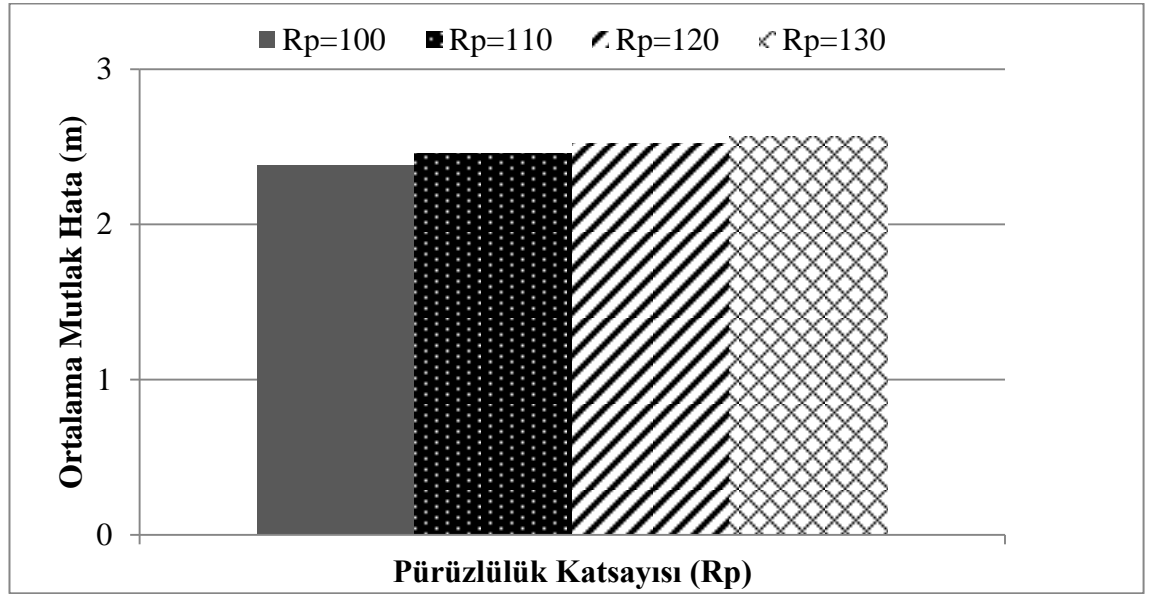


Şekil 4.2. Pilot çalışma bölgesine 2010 yılında terfi edilen aylık ortalama debi değerleri (TÜBİTAK 2011, Karadirek vd. 2014a)

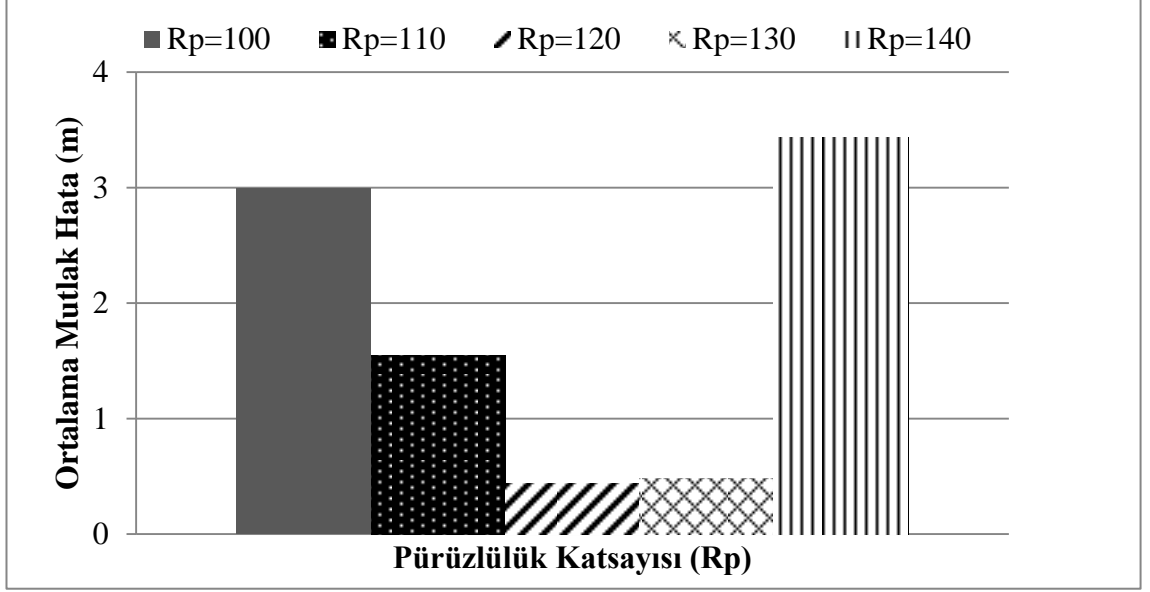
## 4.2. EPANET Modeli ile Hidrolik Model Kalibrasyon Çalışması

Hidrolik model kalibrasyon çalışması için 6. alt bölgede 23.12.2009 - 28.12.2009 tarihleri arasında 120 saatlik zaman periyodunda yarım saatlik zaman aralıkları ile 18. alt bölgede ise 05.04.2010 – 06.04.2010 tarihleri arasında 36 saatlik zaman periyodunda 15 dakika zaman aralıkları ile su basıncı tahminleri gerçekleştirilmiştir. 6. alt bölgede 112 numaralı düğüm noktasında, 18. alt bölgede ise S1243 numaralı düğüm noktasında belirli zaman aralıkları ile taşınabilir basınç metre marifetiyle basınç ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 18. alt bölgede yapılan çalışmalar süresince model tahmin yeteneklerinin tespit edilmesi amacı ile yangın musluğu açılmış ve sistem içerisinde olağan dışı su tüketimlerinin gerçekleşmesi sağlanmıştır.

Aralık 2009 ve Nisan 2010'da yapılan hidrolik model kalibrasyon çalışması sonucunda su basıncı model tahminleri ve ölçümleri kıyaslanmış, farklı boru pürüzlülük katsayıları için her bir alt bölgede ortalama mutlak hata değerleri hesaplanmıştır. 6. alt bölge için hesaplanan ortalama mutlak hata değerleri Şekil 4.3'te, 18. alt bölge için hesaplanan ortalama mutlak hata değerleri ise Şekil 4.4'te verilmektedir.



Şekil 4.3. 6. Alt bölge 112 nolu düğüm noktasında 23.12.2009 - 28.12.2009 tarihleri arasında farklı pürüzlülük katsayıları için elde edilen ortalama mutlak hata değerleri (TÜBİTAK 2011)

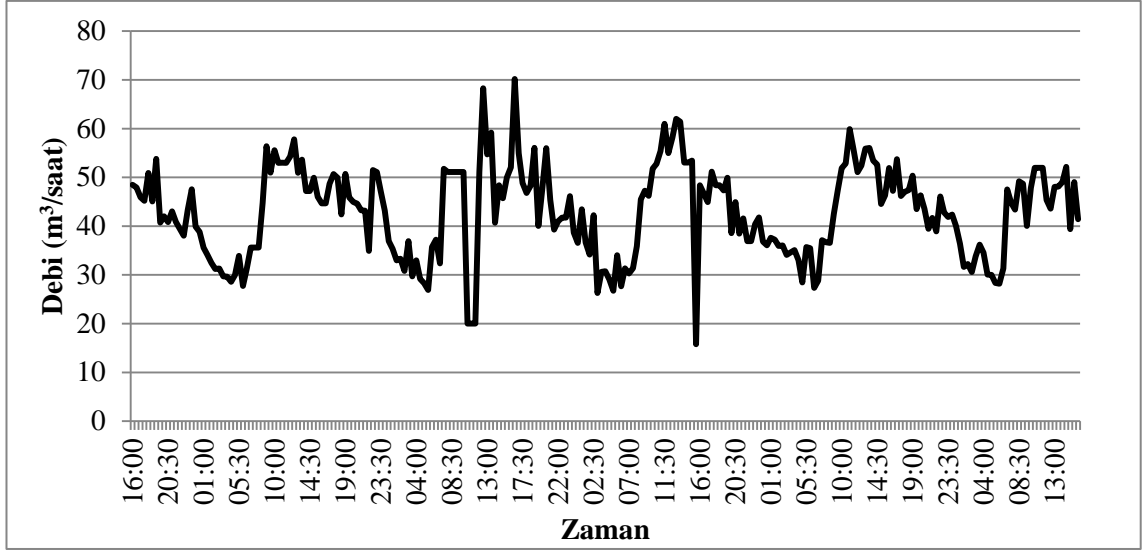


Şekil 4.4. 18. Alt bölge S1243 nolu düğüm noktasında 05.04.2010 – 06.04.2010 tarihleri arasında farklı pürüzlülük katsayıları için elde edilen ortalama mutlak hata değerleri (TÜBİTAK 2011)

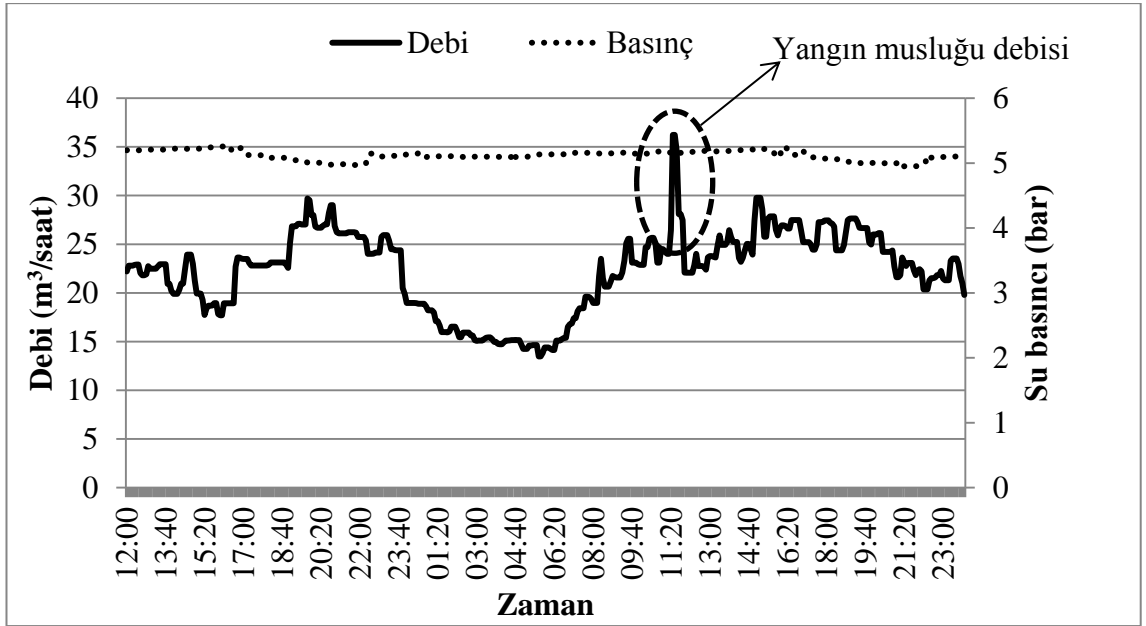
Pilot çalışma bölgesinde gerçekleştirilen hidrolik model kalibrasyon çalışması sonucunda, pilot çalışma bölgesinde nispeten düşük boru yaşına sahip alt bölgelerde boru cidar pürüzlülük katsayısı 120, diğer alt bölgelerde ise 100 olarak hesaplanmış ve sonraki çalışmalarda bu değerler kullanılmıştır.

#### 4.2.1. EPANET modeli ile kalibrasyonu tamamlanmış hidrolik model tahminleri

Çalışma bölgesinde, hidrolik model kalibrasyonu için seçilen çalışma bölgelerinde kalibrasyonu yapılan boru cidar pürüzlülük katsayısı kullanılarak su basıncı model tahminleri ve saha ölçümleri kıyaslanmıştır. 6. alt bölgede kullanılan debi değerleri Şekil 4.5'te, 18. alt bölgede kullanılan debi değerleri ise Şekil 4.6'da verilmektedir. 18.alt bölgede yangın musluğu açılması sonucu oluşan debi değişimi de Şekil 4.6'da görülmektedir.

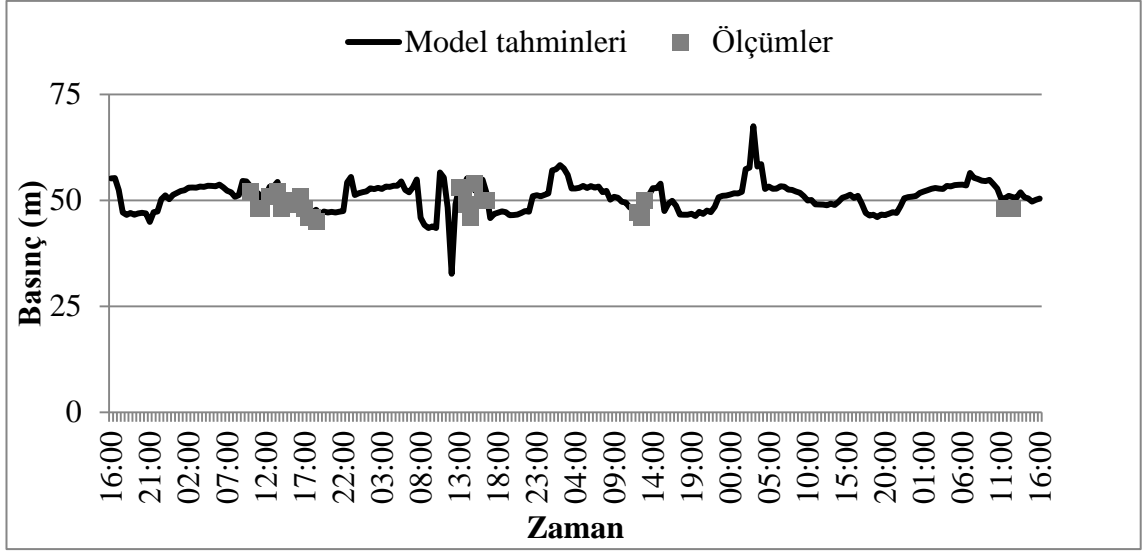


Şekil 4.5. 6. Alt bölgede 23.12.2009 - 28.12.2009 tarihleri arasında ölçülen debi değerleri (Başlangıç ve bitiş tarihi ve saati: 23.12.2009, 16:00 28.12.2009, 16:00) (TÜBİTAK 2011)

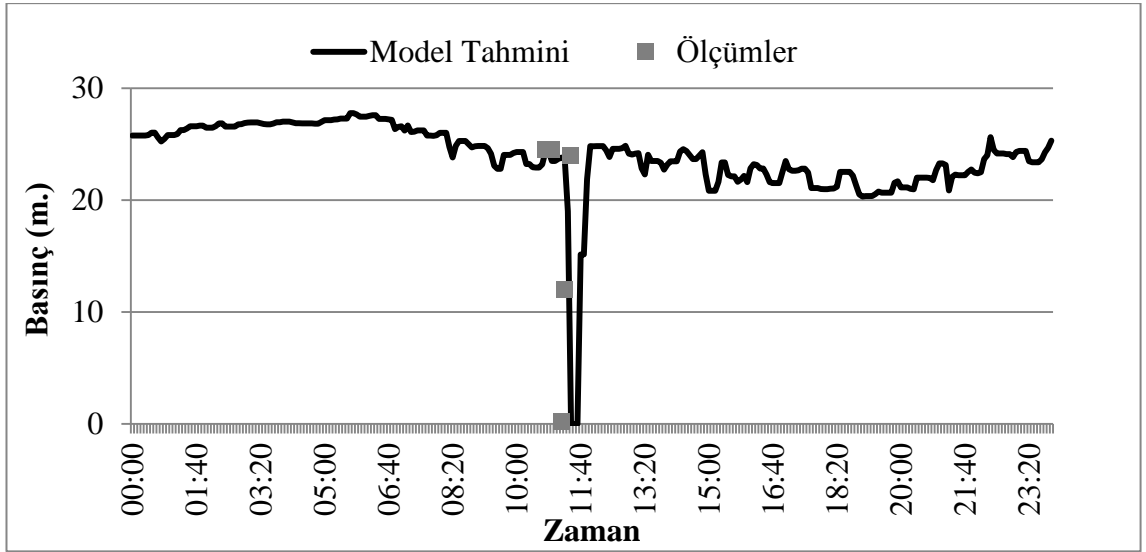


Şekil 4.6.18. Alt bölgede 05.04.2010 – 06.04.2010 tarihleri arasında 36 saat süre ile elde edilen debi ve su basıncı değerleri (TÜBİTAK 2011)

Hidrolik model kalibrasyon çalışması amacı ile seçilen iki alt bölgede, kalibrasyon parametresi olan boru cidar pürüzlülük katsayıları belirlendikten sonra su basıncı model tahminleri ve saha ölçümleri kıyaslanmıştır. Şekil 4.7’de verilen 6. alt bölge için su basıncı model tahminleri ve saha ölçümleri kıyaslandığında ortalama mutlak hata 2,9 m olarak tespit edilmiştir. 18. alt bölge için ise Şekil 4.8’de verilen su basıncı model tahminleri ve ölçümler kıyaslandığında ortalama mutlak hata değeri 0,44 m. olarak hesap edilmiştir.



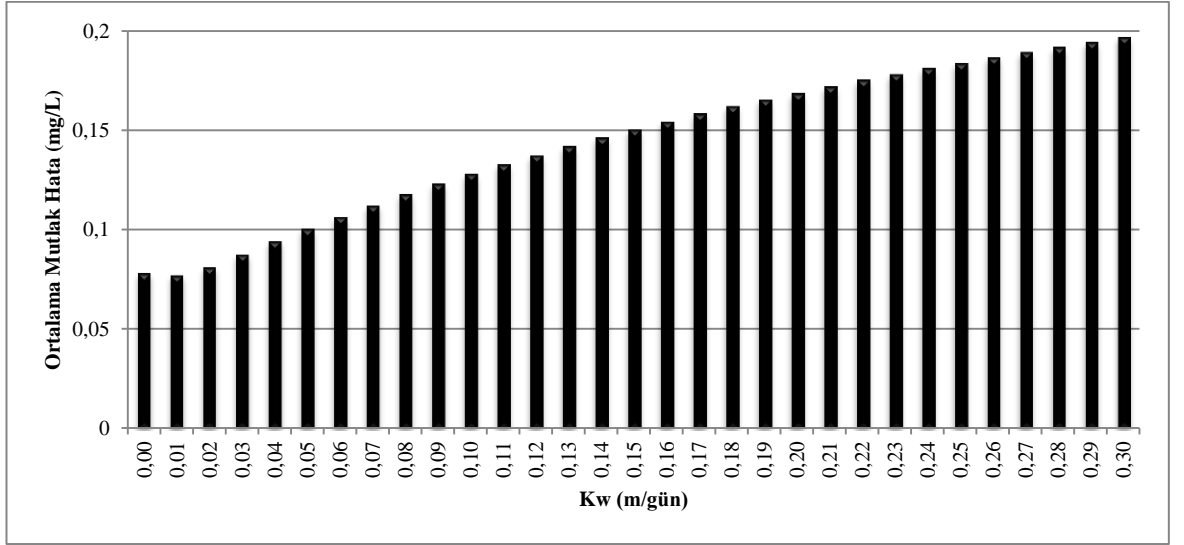
Şekil 4.7. 6. Alt bölge 112 nolu düğüm noktasında 23.12.2009 - 28.12.2009 tarihleri için elde edilen su basıncı model tahminleri ve ölçümler (Başlangıç tarihi ve saati: 23.12.2009, 16:00) (TÜBİTAK 2011)



Şekil 4.8. 18. Alt bölgede S1243 nolu düğüm noktasında 05.04.2010 – 06.04.2010 tarihleri arasında elde edilen su basıncı model tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011)

### 4.3. EPANET Modeli ile Su Kalitesi Modeli Kalibrasyon Çalışması

Dört farklı alt bölgede dört farklı periyotta gerçekleştirilen kalibrasyon çalışmaları neticesinde model tahminleri ile saha ölçümleri arasındaki ortalama mutlak hata değerleri hesaplanmış ve  $K_w$  değeri -0,01 olarak tespit edilmiştir. Tüm kalibrasyon periyotları için elde edilen ortalama mutlak hata değerleri Şekil 4.9'da verilmektedir. Ayrıca tüm kalibrasyon periyotlarında elde edilen hatalar ile ortalama mutlak hata değerlerine ait veriler sırasıyla Çizelge 4.3, Çizelge 4.4, Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6'da ve tüm kalibrasyon periyotları için elde edilen ağırlıklı toplam hatalar toplamı Çizelge 4.7'de verilmektedir



Şekil 4.9. Farklı  $K_w$  değerleri için elde edilen ortalama mutlak hata değerleri (TÜBİTAK 2011)



Çizelge 4.3. Birinci kalibrasyon periyodunda dört alt bölgede farklı Kw değerleri için elde edilen hata değerleri (TÜBİTAK 2011)

Alt Bölge (Düğüm Noktası)	Ölçüm Sayısı	K <sub>w</sub>										
		0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
2 (74)	1	0,040	0,049	0,058	0,067	0,075	0,083	0,090	0,097	0,104	0,110	0,116
2 (40)	1	0,035	0,030	0,025	0,020	0,015	0,010	0,005	0,001	0,004	0,008	0,012
4	2	0,027	0,024	0,021	0,019	0,016	0,014	0,011	0,009	0,006	0,004	0,002
6	3	0,049	0,046	0,044	0,042	0,040	0,038	0,037	0,038	0,039	0,040	0,040
8	3	0,029	0,028	0,027	0,026	0,025	0,024	0,023	0,023	0,022	0,021	0,020
<b>Toplam Hata :</b>		<b>0,363</b>	<b>0,349</b>	<b>0,338</b>	<b>0,329</b>	<b>0,317</b>	<b>0,307</b>	<b>0,297</b>	<b>0,299</b>	<b>0,303</b>	<b>0,309</b>	<b>0,312</b>
Alt Bölge (Düğüm Noktası)	Ölçüm Sayısı	K <sub>w</sub>										
		0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	
2 (74)	1	0,122	0,127	0,132	0,136	0,142	0,147	0,151	0,156	0,160	0,164	
2 (40)	1	0,017	0,021	0,025	0,029	0,033	0,037	0,040	0,044	0,048	0,051	
4	2	0,002	0,003	0,005	0,007	0,009	0,012	0,014	0,016	0,018	0,020	
6	3	0,042	0,040	0,043	0,045	0,048	0,051	0,055	0,058	0,060	0,063	
8	3	0,019	0,019	0,018	0,017	0,016	0,016	0,015	0,014	0,014	0,014	
<b>Toplam Hata :</b>		<b>0,326</b>	<b>0,331</b>	<b>0,35</b>	<b>0,365</b>	<b>0,385</b>	<b>0,409</b>	<b>0,429</b>	<b>0,448</b>	<b>0,466</b>	<b>0,486</b>	
Alt Bölge (Düğüm Noktası)	Ölçüm Sayısı	K <sub>w</sub>										
		0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	
2 (74)	1	0,168	0,171	0,175	0,179	0,182	0,185	0,188	0,189	0,192	0,195	
2 (40)	1	0,055	0,058	0,061	0,064	0,068	0,071	0,074	0,077	0,080	0,083	
4	2	0,022	0,024	0,026	0,028	0,030	0,032	0,034	0,036	0,038	0,039	
6	3	0,067	0,070	0,072	0,075	0,078	0,080	0,083	0,085	0,087	0,089	
8	3	0,014	0,015	0,015	0,015	0,015	0,016	0,016	0,016	0,017	0,018	
<b>Toplam Hata :</b>		<b>0,51</b>	<b>0,532</b>	<b>0,549</b>	<b>0,569</b>	<b>0,589</b>	<b>0,608</b>	<b>0,627</b>	<b>0,641</b>	<b>0,66</b>	<b>0,677</b>	

Çizelge 4.4. İkinci kalibrasyon periyodunda üç alt bölgede farklı Kw değerleri için elde edilen hata değerleri (TÜBİTAK 2011)

Bölge Numarası	Ölçüm Sayısı	K <sub>w</sub>										
		0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
4	3	0,156	0,158	0,161	0,163	0,166	0,168	0,171	0,173	0,175	0,178	0,180
6	5	0,137	0,128	0,119	0,114	0,110	0,106	0,105	0,104	0,104	0,104	0,103
8	5	0,202	0,201	0,200	0,200	0,199	0,199	0,198	0,198	0,197	0,196	0,196
<b>Toplam Hata :</b>		<b>2,163</b>	<b>2,119</b>	<b>2,078</b>	<b>2,059</b>	<b>2,043</b>	<b>2,029</b>	<b>2,028</b>	<b>2,029</b>	<b>2,03</b>	<b>2,034</b>	<b>2,035</b>
Bölge Numarası	Ölçüm Sayısı	K <sub>w</sub>										
		0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	
4	3	0,182	0,184	0,187	0,189	0,191	0,193	0,195	0,197	0,199	0,201	
6	5	0,103	0,104	0,105	0,106	0,106	0,108	0,109	0,112	0,114	0,115	
8	5	0,195	0,195	0,194	0,194	0,193	0,193	0,193	0,194	0,194	0,194	
<b>Toplam Hata :</b>		<b>2,036</b>	<b>2,047</b>	<b>2,056</b>	<b>2,067</b>	<b>2,068</b>	<b>2,084</b>	<b>2,095</b>	<b>2,121</b>	<b>2,137</b>	<b>2,148</b>	
Bölge Numarası	Ölçüm Sayısı	K <sub>w</sub>										
		0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	
4	3	0,203	0,205	0,207	0,209	0,211	0,213	0,215	0,216	0,218	0,220	
6	5	0,116	0,118	0,118	0,119	0,120	0,121	0,121	0,122	0,123	0,123	
8	5	0,195	0,196	0,196	0,197	0,197	0,198	0,198	0,199	0,199	0,200	
<b>Toplam Hata :</b>		<b>2,164</b>	<b>2,185</b>	<b>2,191</b>	<b>2,207</b>	<b>2,218</b>	<b>2,234</b>	<b>2,24</b>	<b>2,253</b>	<b>2,264</b>	<b>2,275</b>	

Çizelge 4.5. Üçüncü kalibrasyon periyodunda dört alt bölgede farklı Kw değerleri için elde edilen hata değerleri (TÜBİTAK 2011)

Bölge Numarası	Ölçüm Sayısı	K <sub>w</sub>										
		0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
2	8	0,091	0,092	0,096	0,099	0,102	0,105	0,108	0,111	0,114	0,117	0,120
4	6	0,126	0,124	0,123	0,121	0,120	0,118	0,116	0,115	0,114	0,112	0,111
6	9	0,070	0,072	0,075	0,078	0,082	0,085	0,088	0,091	0,095	0,099	0,102
8	9	0,096	0,097	0,099	0,101	0,102	0,104	0,105	0,107	0,109	0,110	0,112
<b>Toplam Hata :</b>		<b>2,978</b>	<b>3,001</b>	<b>3,072</b>	<b>3,129</b>	<b>3,192</b>	<b>3,249</b>	<b>3,297</b>	<b>3,36</b>	<b>3,432</b>	<b>3,489</b>	<b>3,552</b>
Bölge Numarası	Ölçüm Sayısı	K <sub>w</sub>										
		0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	
2	8	0,123	0,126	0,130	0,133	0,137	0,140	0,143	0,147	0,150	0,153	
4	6	0,109	0,108	0,106	0,105	0,104	0,102	0,101	0,100	0,099	0,097	
6	9	0,107	0,112	0,116	0,121	0,126	0,130	0,135	0,139	0,143	0,146	
8	9	0,113	0,115	0,116	0,117	0,119	0,120	0,122	0,123	0,124	0,126	
<b>Toplam Hata :</b>		<b>3,618</b>	<b>3,699</b>	<b>3,764</b>	<b>3,836</b>	<b>3,925</b>	<b>3,982</b>	<b>4,063</b>	<b>4,134</b>	<b>4,197</b>	<b>4,254</b>	
Bölge Numarası	Ölçüm Sayısı	K <sub>w</sub>										
		0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	
2	8	0,156	0,159	0,162	0,165	0,167	0,170	0,174	0,177	0,181	0,184	
4	6	0,098	0,098	0,099	0,099	0,100	0,101	0,102	0,103	0,106	0,108	
6	9	0,150	0,153	0,157	0,161	0,164	0,167	0,171	0,174	0,177	0,180	
8	9	0,127	0,128	0,129	0,131	0,132	0,133	0,134	0,135	0,137	0,138	
<b>Toplam Hata :</b>		<b>4,329</b>	<b>4,389</b>	<b>4,464</b>	<b>4,542</b>	<b>4,6</b>	<b>4,666</b>	<b>4,749</b>	<b>4,815</b>	<b>4,91</b>	<b>4,982</b>	

Çizelge 4.6. Dördüncü kalibrasyon periyodunda 6 numaralı alt bölgede farklı Kw değerleri için elde edilen hata değerleri (TÜBİTAK 2011)

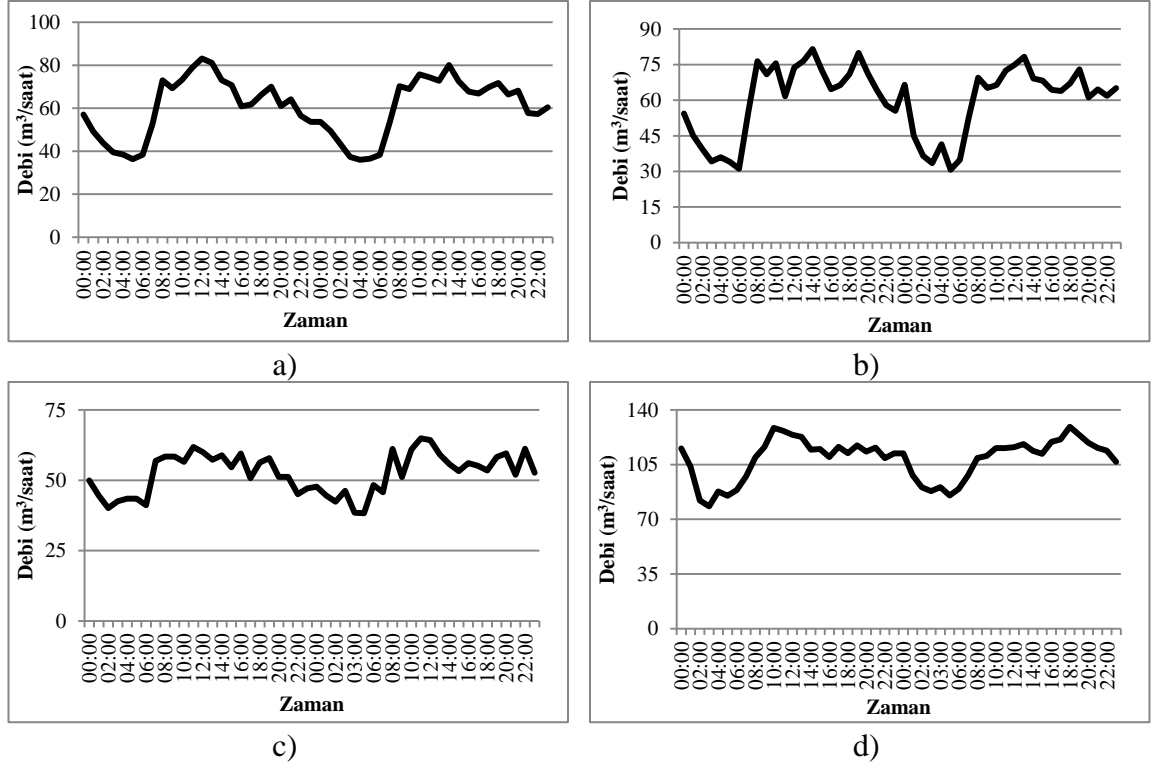
Bölge Numarası	Ölçüm Sayısı	K <sub>w</sub>										
		0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
6	29	0,037	0,035	0,046	0,064	0,082	0,099	0,115	0,129	0,143	0,156	0,168
<b>Toplam Hata :</b>		<b>1,073</b>	<b>1,015</b>	<b>1,334</b>	<b>1,856</b>	<b>2,378</b>	<b>2,871</b>	<b>3,335</b>	<b>3,741</b>	<b>4,147</b>	<b>4,524</b>	<b>4,872</b>
Bölge Numarası	Ölçüm Sayısı	K <sub>w</sub>										
		0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	
6	29	0,179	0,189	0,199	0,208	0,216	0,224	0,232	0,239	0,245	0,251	
<b>Toplam Hata :</b>		<b>5,191</b>	<b>5,481</b>	<b>5,771</b>	<b>6,032</b>	<b>6,264</b>	<b>6,496</b>	<b>6,728</b>	<b>6,931</b>	<b>7,105</b>	<b>7,279</b>	
Bölge Numarası	Ölçüm Sayısı	K <sub>w</sub>										
		0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	
6	29	0,257	0,263	0,268	0,273	0,277	0,282	0,286	0,290	0,293	0,297	
<b>Toplam Hata :</b>		<b>7,453</b>	<b>7,627</b>	<b>7,772</b>	<b>7,917</b>	<b>8,033</b>	<b>8,178</b>	<b>8,294</b>	<b>8,41</b>	<b>8,497</b>	<b>8,613</b>	

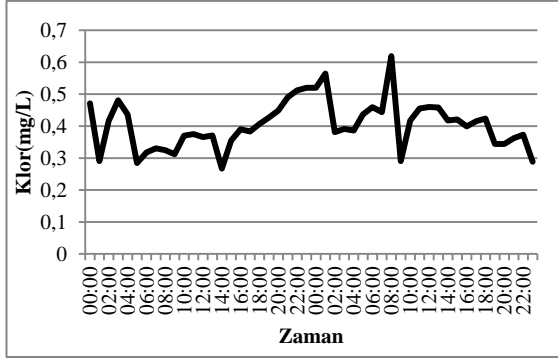
Çizelge 4. 7. Dört kalibrasyon periyodu sonrasında tüm alt bölgelerde farklı Kw değerleri için elde edilen hataların toplamı (TÜBİTAK 2011)

Kalibrasyon Periyodu	K <sub>w</sub>										
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
Birinci Kalibrasyon	0,363	0,349	0,338	0,329	0,317	0,307	0,297	0,299	0,303	0,309	0,312
İkinci Kalibrasyon	2,163	2,119	2,078	2,059	2,043	2,029	2,028	2,029	2,03	2,034	2,035
Üçüncü Kalibrasyon	2,978	3,001	3,072	3,129	3,192	3,249	3,297	3,36	3,432	3,489	3,552
Dördüncü Kalibrasyon	1,073	1,015	1,334	1,856	2,378	2,871	3,335	3,741	4,147	4,524	4,872
<b>Toplam</b>	<b>6,577</b>	<b>6,484</b>	<b>6,822</b>	<b>7,373</b>	<b>7,93</b>	<b>8,456</b>	<b>8,957</b>	<b>9,429</b>	<b>9,912</b>	<b>10,356</b>	<b>10,771</b>
Kalibrasyon Periyodu	K <sub>w</sub>										
	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	
Birinci Kalibrasyon	0,326	0,331	0,35	0,365	0,385	0,409	0,429	0,448	0,466	0,486	
İkinci Kalibrasyon	2,036	2,047	2,056	2,067	2,068	2,084	2,095	2,121	2,137	2,148	
Üçüncü Kalibrasyon	3,618	3,699	3,764	3,836	3,925	3,982	4,063	4,134	4,197	4,254	
Dördüncü Kalibrasyon	5,191	5,481	5,771	6,032	6,264	6,496	6,728	6,931	7,105	7,279	
<b>Toplam</b>	<b>11,171</b>	<b>11,558</b>	<b>11,941</b>	<b>12,3</b>	<b>12,642</b>	<b>12,971</b>	<b>13,315</b>	<b>13,634</b>	<b>13,905</b>	<b>14,167</b>	
Kalibrasyon Periyodu	K <sub>w</sub>										
	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	
Birinci Kalibrasyon	0,51	0,532	0,549	0,569	0,589	0,608	0,627	0,641	0,66	0,677	
İkinci Kalibrasyon	2,164	2,185	2,191	2,207	2,218	2,234	2,24	2,253	2,264	2,275	
Üçüncü Kalibrasyon	4,329	4,389	4,464	4,542	4,6	4,666	4,749	4,815	4,91	4,982	
Dördüncü Kalibrasyon	7,453	7,627	7,772	7,917	8,033	8,178	8,294	8,41	8,497	8,613	
<b>Toplam</b>	<b>14,456</b>	<b>14,733</b>	<b>14,976</b>	<b>15,235</b>	<b>15,44</b>	<b>15,686</b>	<b>15,91</b>	<b>16,119</b>	<b>16,331</b>	<b>16,547</b>	

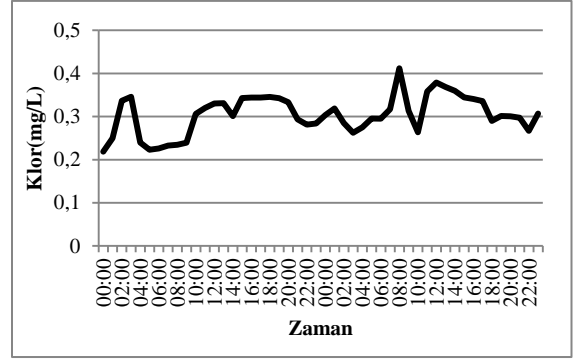
#### 4.3.1. EPANET modeli ile kalibrasyonu tamamlanmış su kalitesi modeli tahminleri birinci periyodu

Su kalitesi modeli tahminleri birinci periyodunun amacı 09.11.2009 - 10.11.2009 tarihleri arasında seçilen dört farklı alt bölgede kalibrasyon değeri tespit edilen klor boru cidar bozunma katsayısı kullanılarak 48 saat boyunca serbest bakiye klor konsantrasyonlarını tahmin etmektir. Bu amaçla 2. alt bölge, 4. alt bölge, 6. alt bölge ve 8. alt bölge girişinde elde edilen debi değerleri Şekil 4.10'da, klor konsantrasyonları verileri ise Şekil 4.11'de verilmektedir.

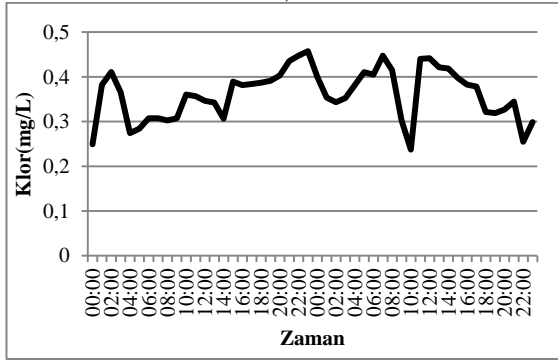




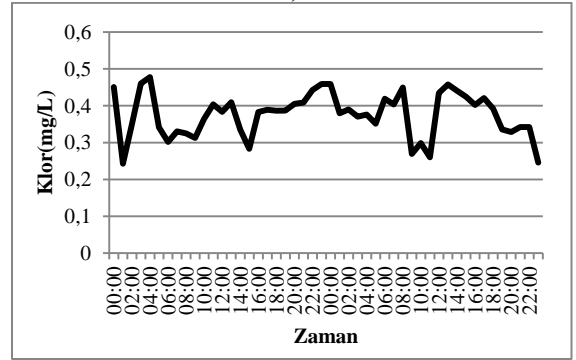
a)



b)



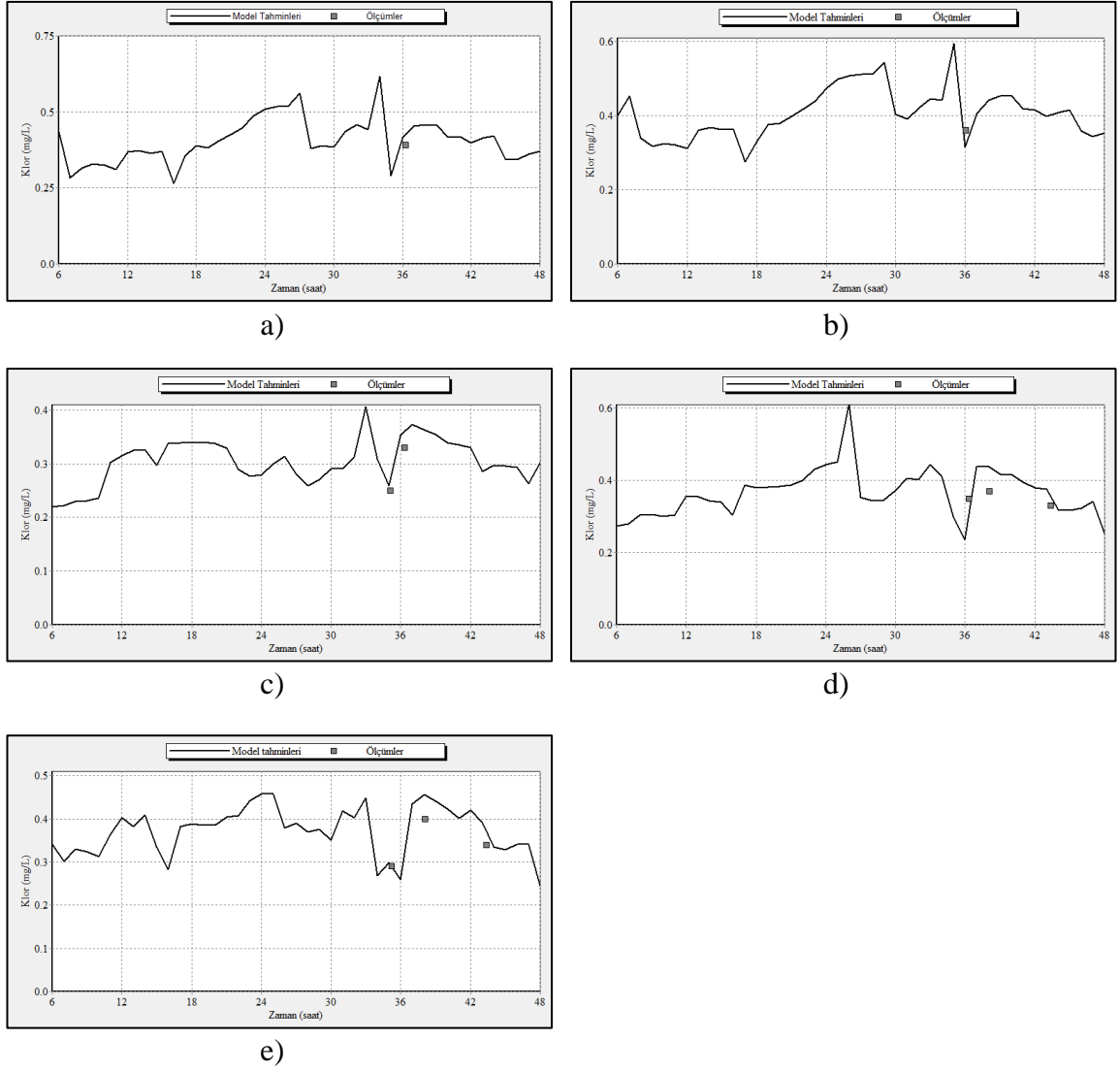
c)



d)

Şekil 4.11. a) 2. Alt bölgede, b) 4. Alt bölgede, c) 6. Alt bölgede ve d) 8. Alt bölgede 09.11.2009 - 10.11.2009 tarihleri arasında ölçülen klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011)

09.11.2009 – 10.11.2009 tarihleri arasında alt bölge girişinde elde edilen debi ve klor konsantrasyonları kullanılarak 2. alt bölge, 4. alt bölge, 6. alt bölge ve 8. alt bölge için elde edilen klor konsantrasyonları model tahminleri ve ölçümler Şekil 4.12’de, verilmektedir.

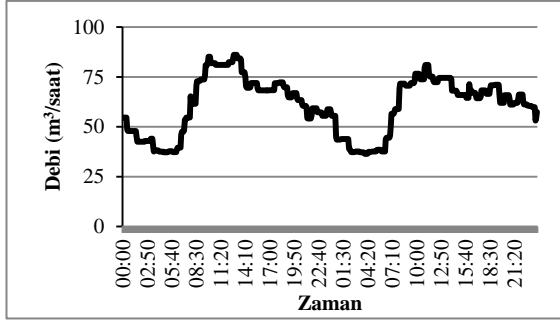


Şekil 4.12. a) 2. Alt bölge 40 nolu düğüm noktasında, b) 2. Alt bölge 74 nolu düğüm noktasında, c) 4. Alt bölge 23 nolu düğüm noktasında, d) 6. Alt bölge 112 nolu düğüm noktasında, e) 8. Alt bölge 371 nolu düğüm noktasında 09.11.2009 - 10.11.2009 tarihleri için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011)

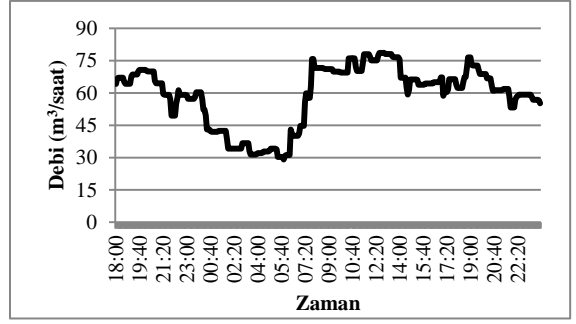
#### 4.3.2. EPANET modeli ile kalibrasyonu tamamlanmış su kalitesi modeli tahminleri ikinci periyodu

Su kalitesi modeli tahminleri ikinci periyodunun amacı 23.11.2009 - 24.11.2009 tarihleri arasında seçilen dört farklı alt bölgede kalibrasyon değeri tespit edilen klor boru cidar bozunma katsayısı kullanılarak, 2. ve 8. alt bölge bölgelerde 48 saat boyunca, 4. ve 6. alt bölge bölgelerde ise 30 saat boyunca serbest bakiye klor konsantrasyonlarını tahmin etmektir. Bu amaçla 2. alt bölge, 4. alt bölge, 6. alt bölge ve 8. alt bölge girişinde elde edilen debi değerleri Şekil 4.13'te, klor konsantrasyonları verileri ise Şekil 4.14'te verilmektedir.

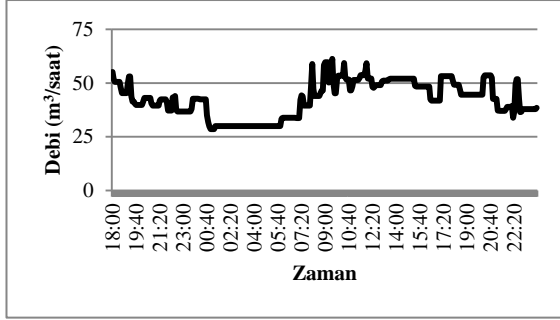




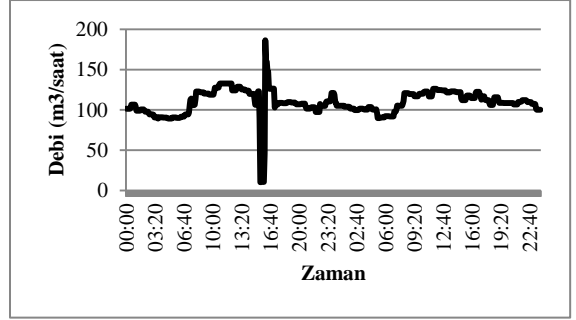
a)



b)

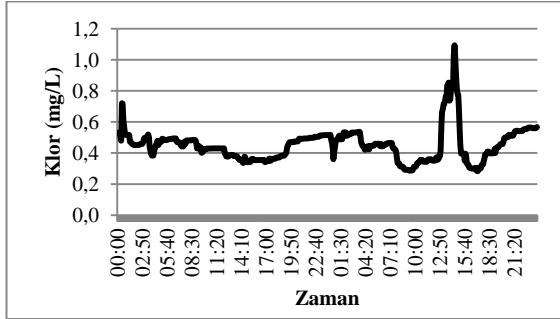


c)

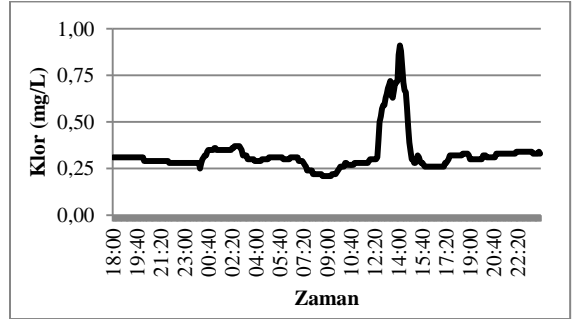


d)

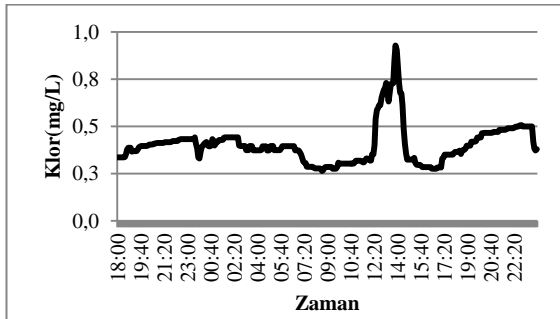
Şekil 4.13. a) 2. Alt bölgede, b) 4. Alt bölgede, c) 6. Alt bölgede ve d) 8. Alt bölgede 23.11.2009 - 24.11.2009 tarihleri arasında ölçülen debi değerleri (TÜBİTAK 2011)



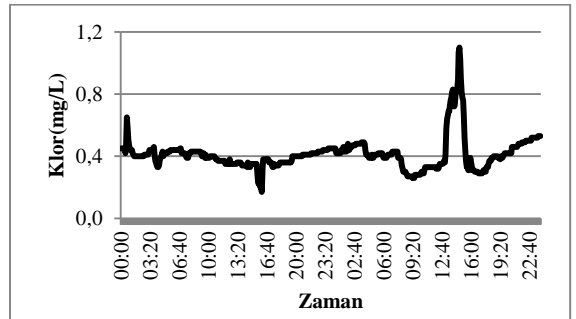
a)



b)



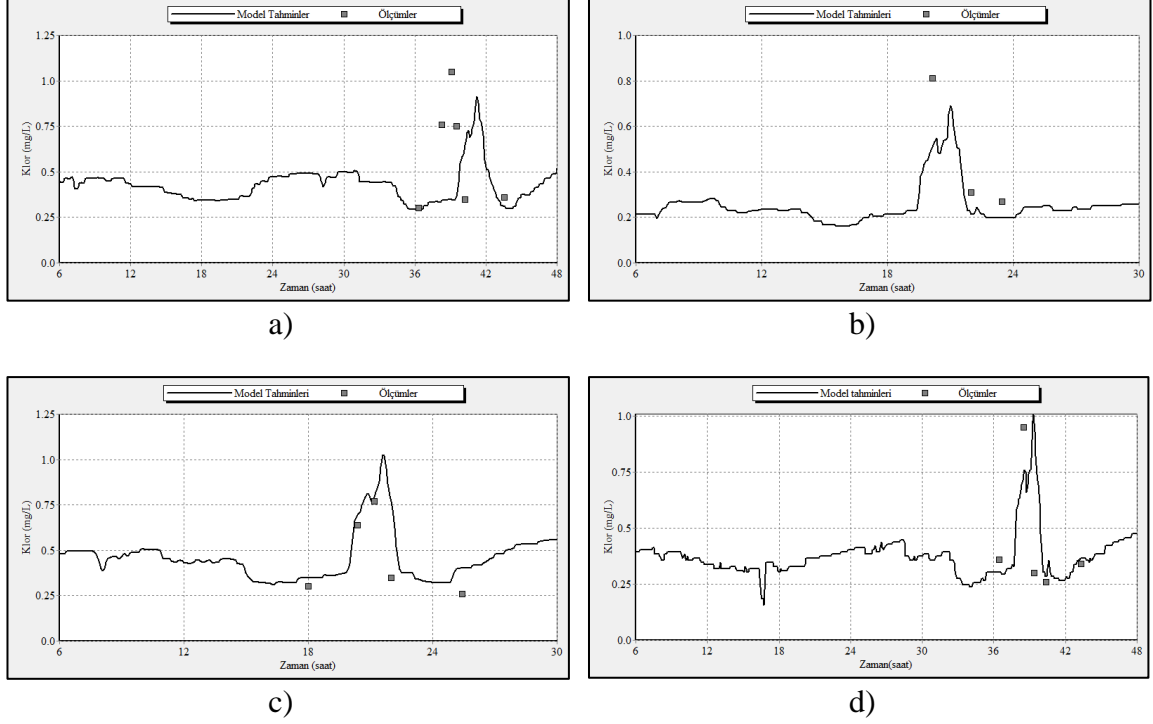
c)



d)

Şekil 4.14. a) 2. Alt bölgede, b) 4. Alt bölgede, c) 6. Alt bölgede ve d) 8. Alt bölgede 23.11.2009 - 24.11.2009 tarihleri arasında ölçülen klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011)

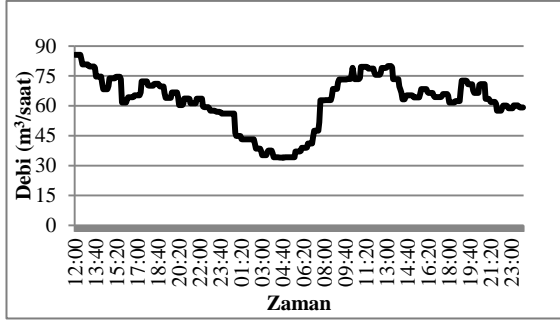
23.11.2009 – 24.11.2009 tarihleri arasında alt bölge girişinde elde edilen debi ve klor konsantrasyonları kullanılarak 2. alt bölge, 4. alt bölge, 6. alt bölge ve 8. alt bölge için elde edilen klor konsantrasyonları model tahminleri ve ölçümleri Şekil 4.15'te verilmektedir.



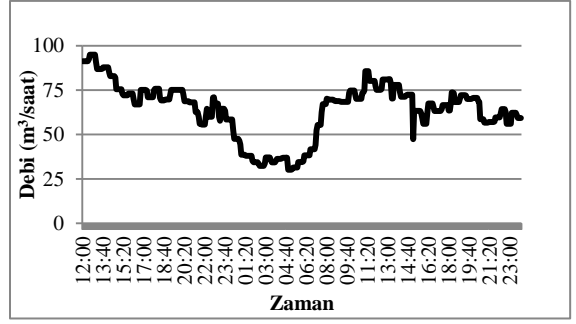
Şekil 4.15. a) 2. Alt bölge 74, b) 4. Alt Bölge 23, c) 6. Alt bölge 112, d) 8. Alt bölge 371 nolu düğüm noktalarında 23.11.2009 - 24.11.2009 tarihleri için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler

#### 4.3.3. EPANET modeli ile kalibrasyonu tamamlanmış su kalitesi modeli tahminleri üçüncü periyodu

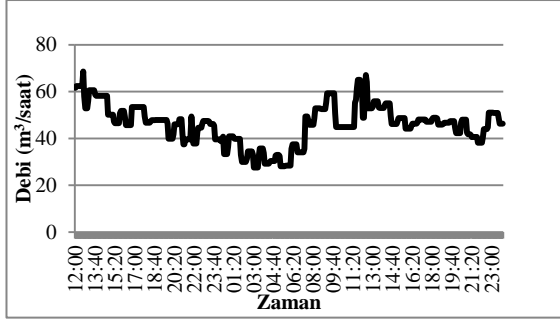
Su kalitesi modeli tahminleri üçüncü periyodunun amacı 06.12.2009 – 07.12.2009 tarihleri arasında seçilen dört farklı alt bölgede kalibrasyon değeri tespit edilen klor boru cidar bozunma katsayısı kullanılarak 36 saat boyunca serbest bakiye klor konsantrasyonlarını tahmin etmektir. Bu amaçla 2. alt bölge, 4. alt bölge, 6. alt bölge ve 8. alt bölge girişinde elde edilen debi değerleri Şekil 4.16'da, klor konsantrasyonları verileri ise Şekil 4.17'de verilmektedir.



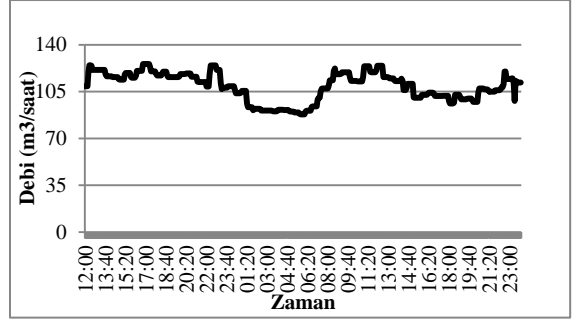
a)



b)

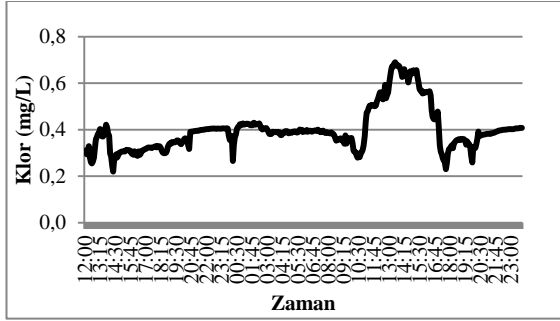


c)

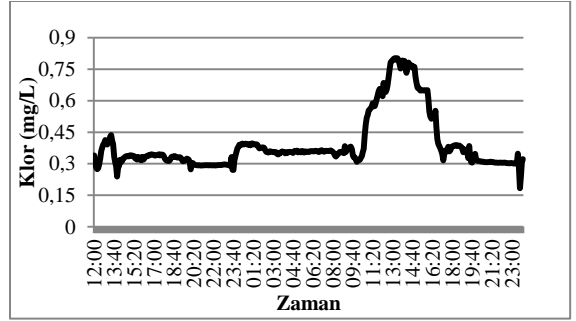


d)

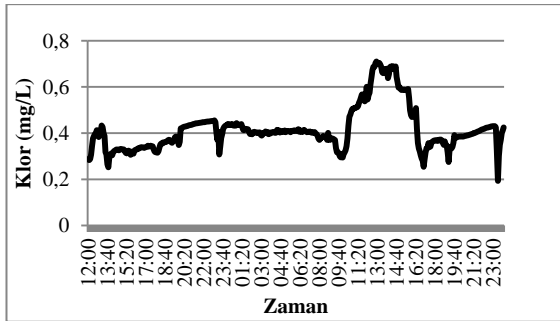
Şekil 4.16. a) 2. Alt bölgede, b) 4. Alt bölgede, c) 6. Alt bölgede ve d) 8. Alt bölgede 06.12.2009 - 07.12.2009 tarihleri arasında ölçülen debi değerleri (TÜBİTAK 2011)



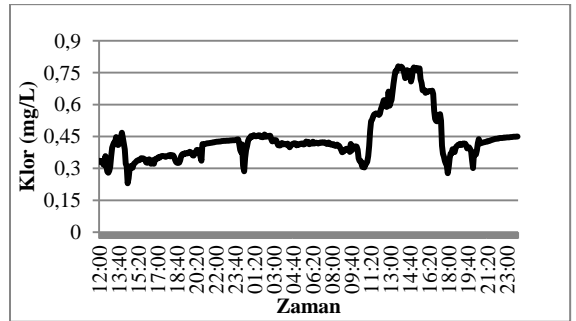
a)



b)



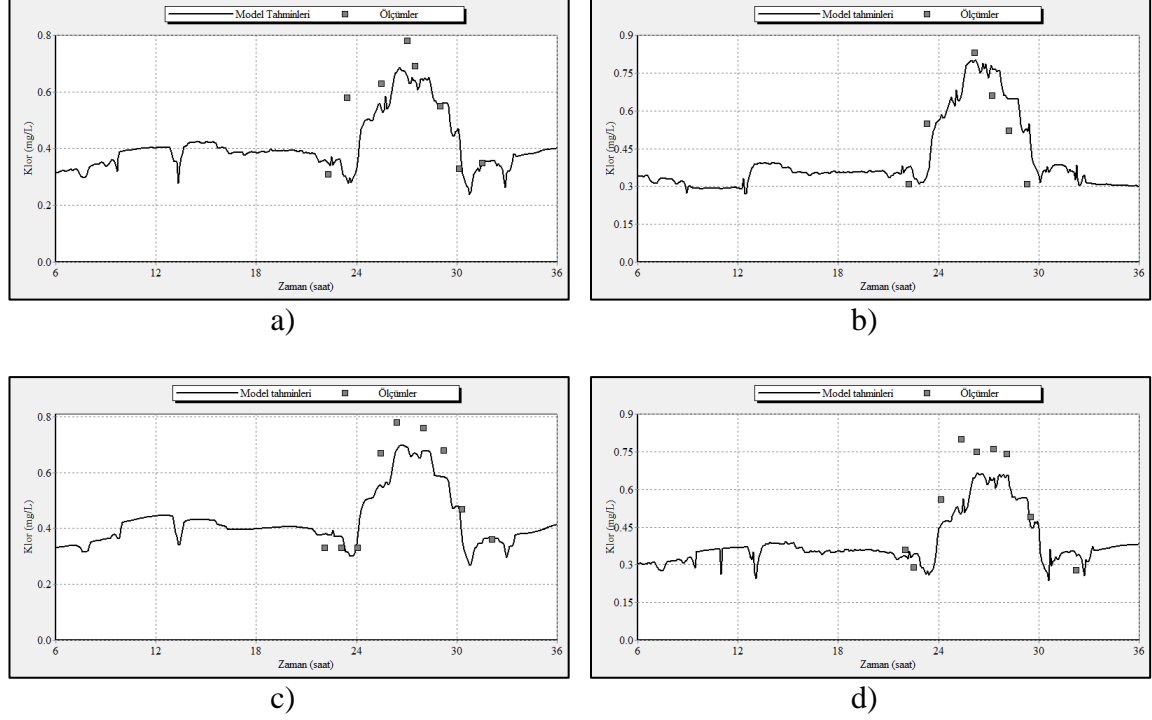
c)



d)

Şekil 4.17. a) 2. Alt bölgede, b) 4. Alt bölgede, c) 6. Alt bölgede ve d) 8. Alt bölgede 23.11.2009 - 24.11.2009 tarihleri arasında ölçülen klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011)

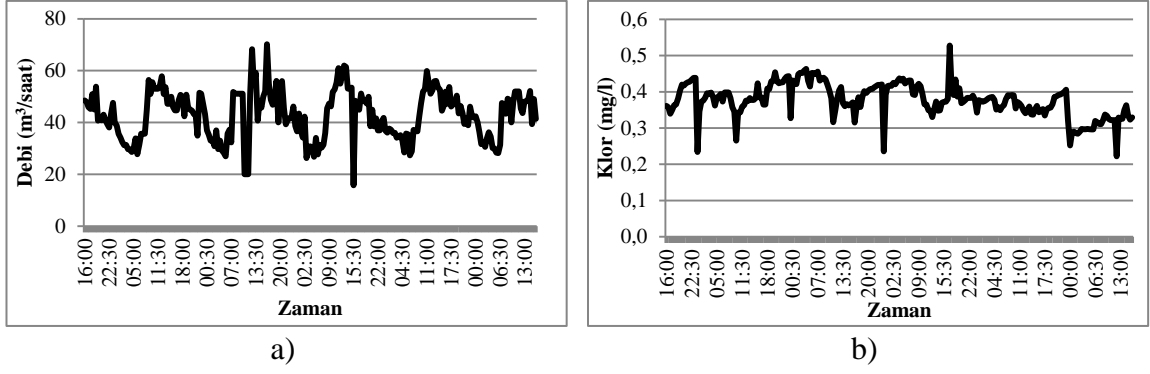
06.12.2009 – 07.12.2009 tarihleri arasında alt bölge girişinde elde edilen debi ve klor konsantrasyonları kullanılarak 2. alt bölge, 4. alt bölge, 6. alt bölge ve 8. alt bölge için elde edilen klor konsantrasyonları model tahminleri ve ölçümler Şekil 4.18’de verilmektedir.



Şekil 4. 18. 2. Alt bölge 40, b) 4. Alt Bölge 23, c) 6. Alt bölge 112, d) 8. Alt bölge 371 nolu düğüm noktalarında 06.12.2009 - 07.12.2009 tarihleri için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011)

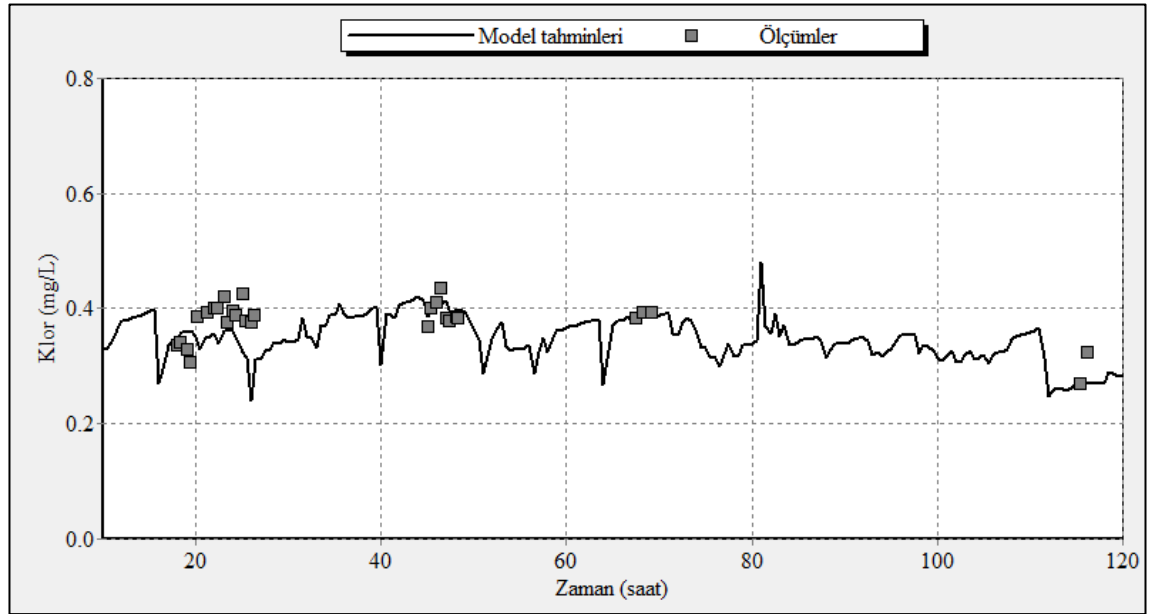
#### 4.3.4. EPANET modeli ile kalibrasyonu tamamlanmış su kalitesi modeli tahminleri dördüncü periyodu

Su kalitesi modeli tahminleri dördüncü periyodunun amacı 23.12.2009 – 28.12.2009 tarihleri arasında 6. alt bölgede kalibrasyon değeri tespit edilen klor boru cidar bozunma katsayısı kullanılarak 120 saat boyunca serbest bakiye klor konsantrasyonlarını tahmin etmektir. Bu amaçla 6. alt bölge girişinde elde edilen debi değerleri ve klor konsantrasyonları Şekil 4.19’da verilmektedir.



Şekil 4.19. 6. Alt bölgede 23.12.2009 - 28.12.2009 tarihleri arasında ölçülen a) debi değerleri b) klor konsantrasyonları (Başlangıç ve bitiş tarihi ve saati: 23.12.2009, 16:00 28.12.2009, 16:00) (TÜBİTAK 2011)

23.12.2009 – 28.12.2009 tarihleri arasında alt bölge girişinde elde edilen debi ve klor konsantrasyonları kullanılarak 6. alt bölge elde edilen klor konsantrasyonları model tahminleri ve ölçümler Şekil 4.20’de verilmektedir.



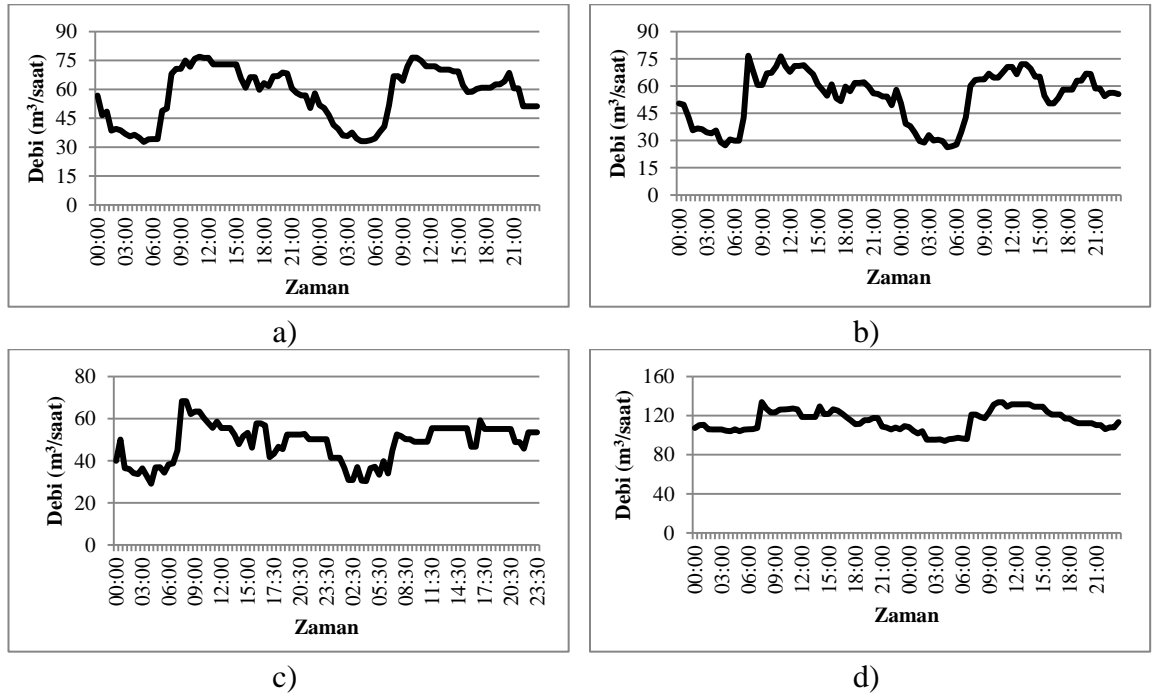
Şekil 4.20. 6. Alt bölge 112 nolu düğüm noktasında 23.12.2009 - 28.12.2009 tarihleri için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (Başlangıç tarihi ve saati: 24.12.2009, 02:00) (TÜBİTAK 2011)

#### 4.4. EPANET Modeli ile Su Kalitesi Modeli Doğrulama Çalışmaları

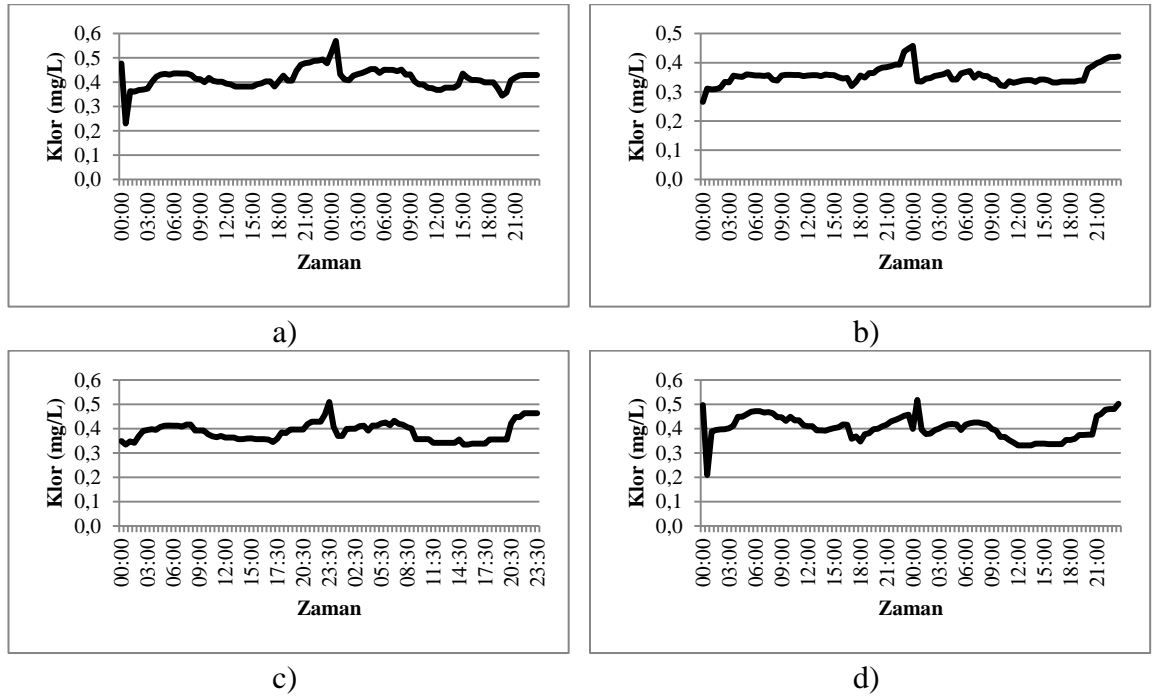
##### 4.4.1. EPANET modeli ile su kalitesi modeli doğrulama çalışması birinci periyodu

Bu çalışmanın amacı 22.02.2010 - 23.02.2010 tarihleri arasında kalibrasyon çalışmalarında kullanılan 2., 4., 6. ve 8. alt bölgelerde 48 saat boyunca klor konsantrasyonlarını tahmin etmektir. Bu çalışma kapsamında 22.02.2010 - 23.02.2010

tarihleri arasında 2., 4., 6., ve 8. alt bölgelerde elde edilen debi değerleri Şekil 4.21'de ve klor konsantrasyonları Şekil 4.22'de verilmektedir.

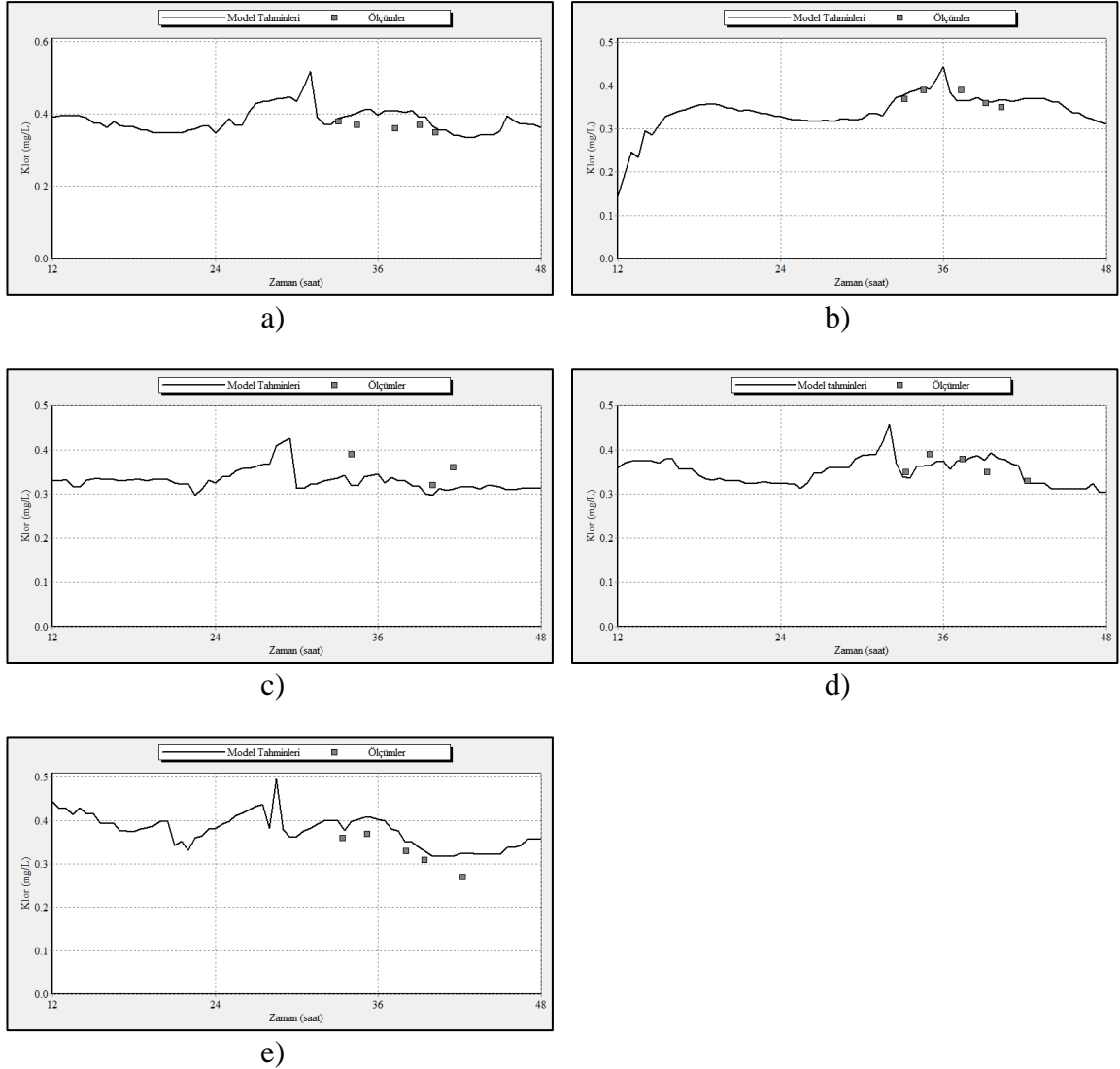


Şekil 4.21. a) 2. Alt bölgede, b) 4. Alt bölgede, c) 6. Alt bölgede ve d) 8. Alt bölgede 22.02.2010 – 23.02.2010 tarihleri arasında ölçülen debi değerleri (TÜBİTAK 2011)



Şekil 4.22. a) 2. Alt bölgede, b) 4. Alt bölgede, c) 6. Alt bölgede ve d) 8. Alt bölgede 22.02.2010 - 23.02.2010 tarihleri arasında ölçülen klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011)

22.02.2010 - 23.02.2010 tarihleri arasında alt bölge girişlerinde elde edilen debi ve klor konsantrasyonları kullanılarak 2., 4., 6. ve 8. alt bölgelerde elde edilen klor konsantrasyonları model tahminleri ve ölçümler Şekil 4.23'te verilmektedir.

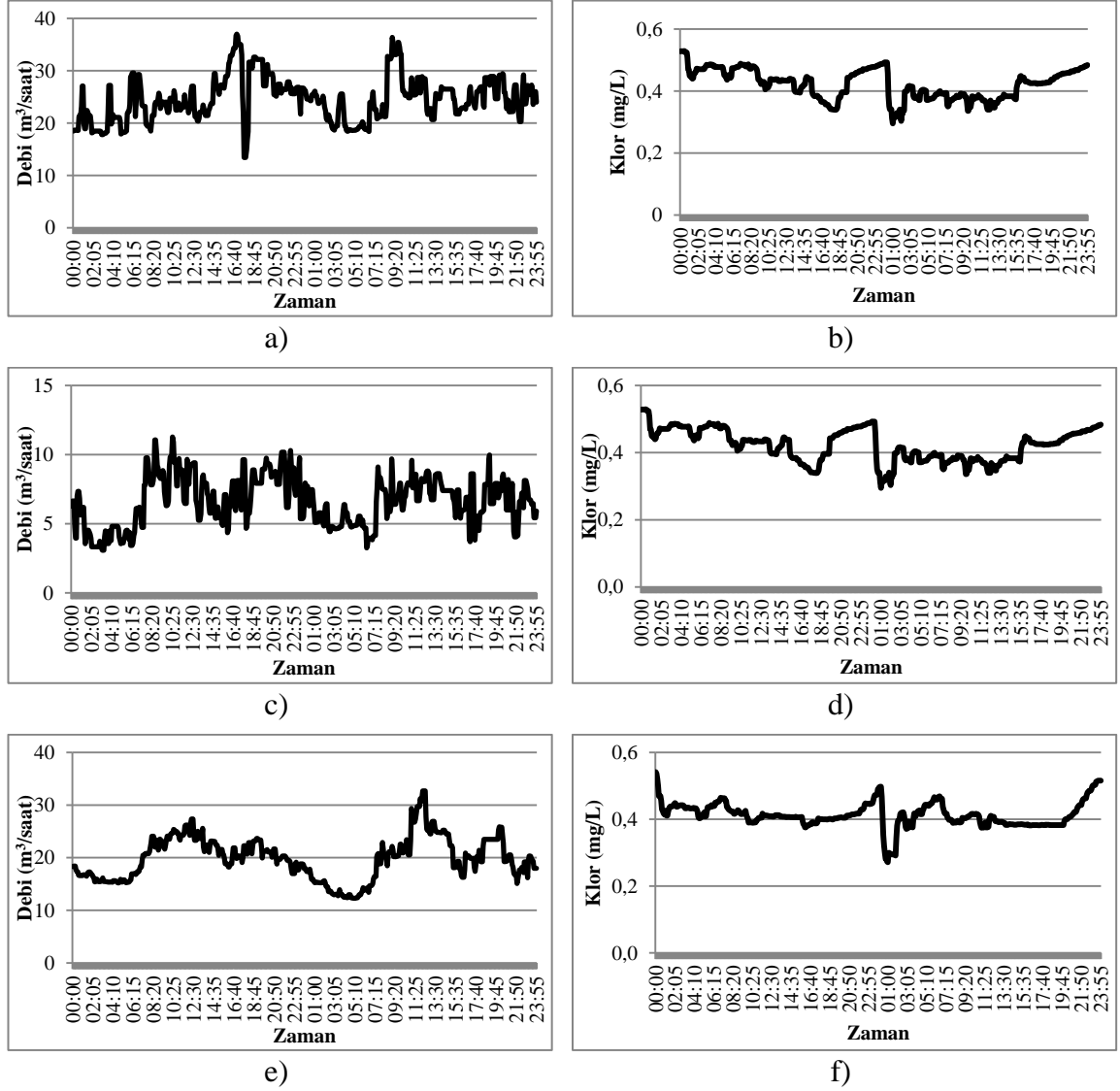


Şekil 4.23. a) 2. Alt bölge 40 nolu düğüm noktasında, b) 2. Alt bölge 74 nolu düğüm noktasında, c) 4. Alt bölge 23 nolu düğüm noktasında, d) 6. Alt bölge 112 nolu düğüm noktasında, e) 8. Alt bölge 371 nolu düğüm noktasında 09.11.2009 - 10.11.2009 tarihleri için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011)

Model doğrulama çalışmaları neticesinde klor konsantrasyonları ölçüm sonuçları ve model tahminleri arasındaki ortalama mutlak hata 2. alt bölge 40 nolu düğüm noktasında 0,024 mg/L, 74 nolu düğüm noktasında 0,012 mg/l, 4. alt bölge 23 nolu düğüm noktasında 0,047 mg/L, 6.alt bölge 112 nolu düğüm noktasında 0,017 mg/L, 8.alt bölge 371 nolu düğüm noktasında 0,031 mg/L olarak hesaplanmıştır.

#### 4.4.2. EPANET modeli ile su kalitesi modeli doğrulama çalışması ikinci periyodu

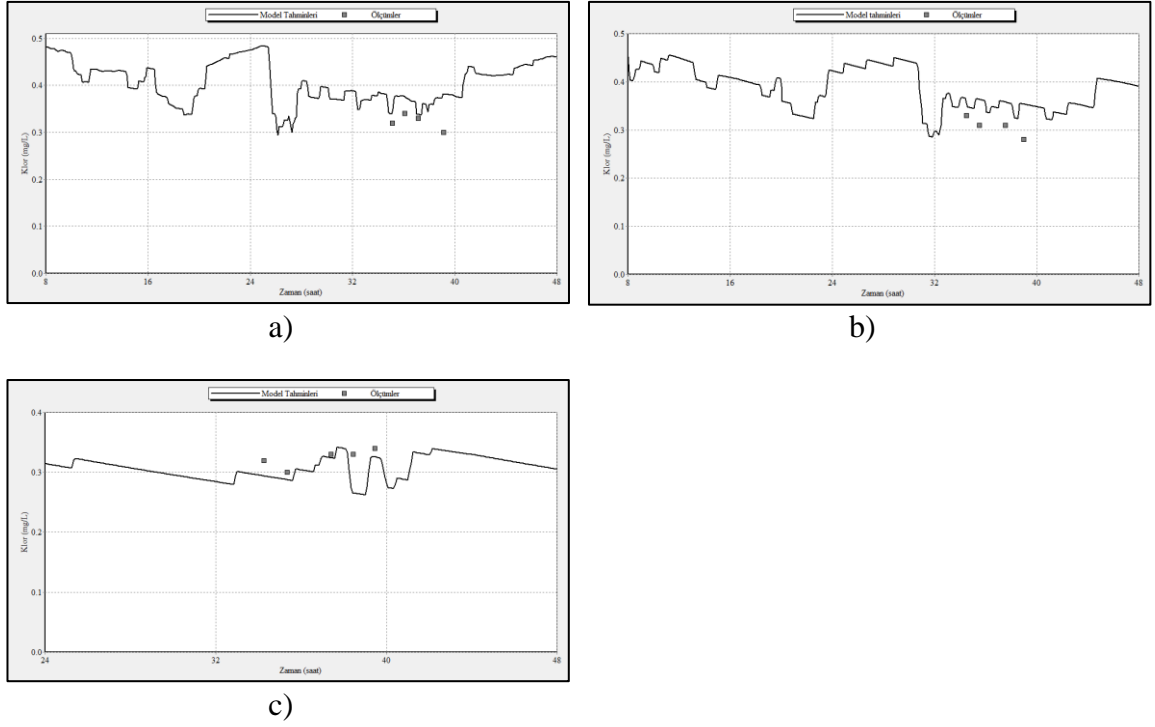
Bu çalışmanın amacı 12.04.2010 - 13.04.2010 tarihleri arasında 17-a, 17-b ve 18. alt bölgelerde 48 saat boyunca klor konsantrasyonlarını tahmin etmektir. Bu çalışma kapsamında 12.04.2010 - 13.04.2010 tarihleri arasında 17-a, 17-b ve 18. alt bölgelerde elde edilen debi değerleri ve klor konsantrasyonları Şekil 4.24'te verilmektedir.



Şekil 4.24. 12.04.2010 – 13.04.2010 tarihleri arasında ölçülen a) 17-a. Alt bölgede debi, b) 17-a. Alt bölgede klor konsantrasyonları, c) 17-b. alt bölgede debi, d) 17-b alt bölgede klor konsantrasyonları, e) 18. Alt bölgede debi, f) 18. Alt bölgede klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011)

12.04.2010 - 13.04.2010 tarihleri arasında alt bölge girişlerinde elde edilen debi ve klor konsantrasyonları kullanılarak 17-a., 17-b., ve 18. alt bölgelerde elde edilen klor konsantrasyonları model tahminleri ve ölçümler Şekil 4.25'te verilmektedir.



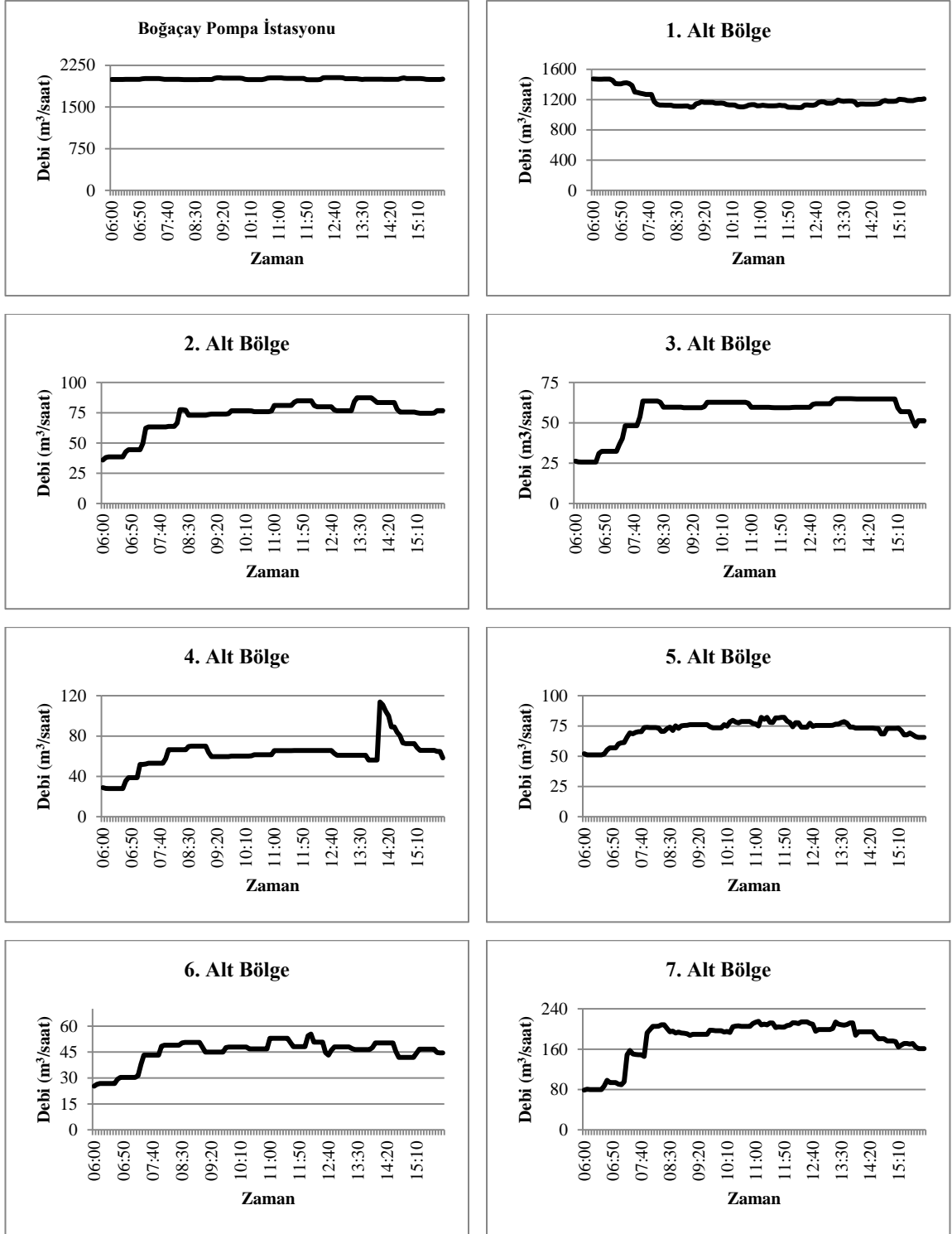


Şekil 4.25. a) 17-a. Alt bölge T165 nolu düğüm noktasında, b) 17-b. Alt bölge T1114 nolu düğüm noktasında, c) 18. Alt bölge S1243 nolu düğüm noktasında 12.04.2009 - 13.04.2009 tarihleri için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011)

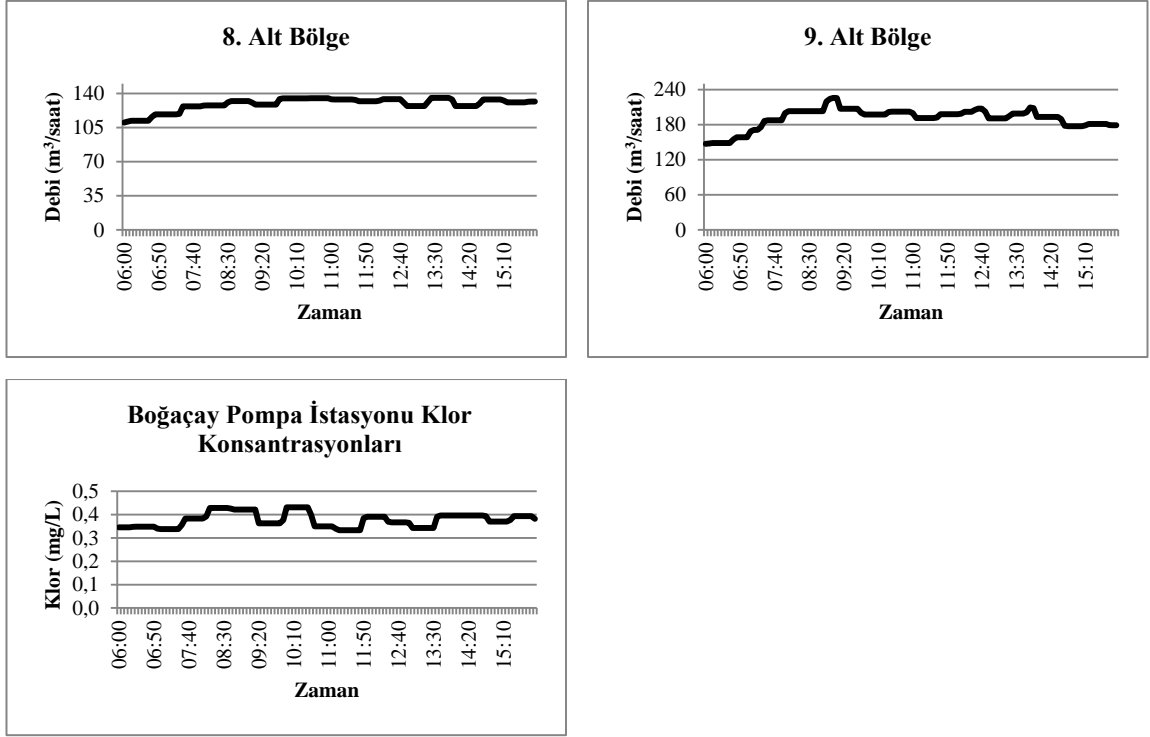
Model doğrulama çalışmaları neticesinde klor konsantrasyonları ölçüm sonuçları ve model tahminleri arasındaki ortalama mutlak hata 17-a. alt bölge T165 nolu düğüm noktasında 0,037 mg/L, 17-b. alt bölge T1114 nolu düğüm noktasında 0,050 mg/L, 18. alt bölge S1243 nolu düğüm noktasında 0,029 mg/L olarak hesaplanmıştır.

#### 4.4.3. EPANET modeli ile su kalitesi modeli doğrulama çalışması üçüncü periyodu

Bu çalışmanın amacı 12.05.2010 tarihinde çalışma bölgesi doğu yakası alt bölgelerinde 10 saat boyunca ON-68 ve ON-70 online ölçüm istasyonlarında klor konsantrasyonlarını ve debi değerlerini tahmin etmektir. Bu çalışma kapsamında 12.05.2010 tarihinde 06:00 – 16:00 saatleri arasında elde edilen debi değerleri ve kaynakta dozlanan klor konsantrasyonları Şekil 4.26’da verilmektedir.

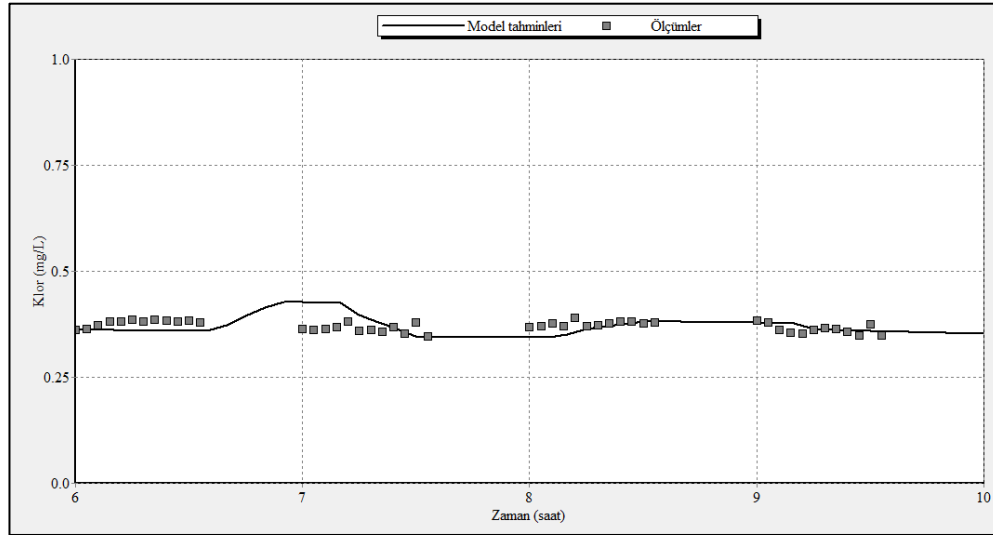


Şekil 4.26. Çalışma bölgesi doğu yakasında 12.05.2010 tarihinde ölçülen debi değerleri ve klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011)

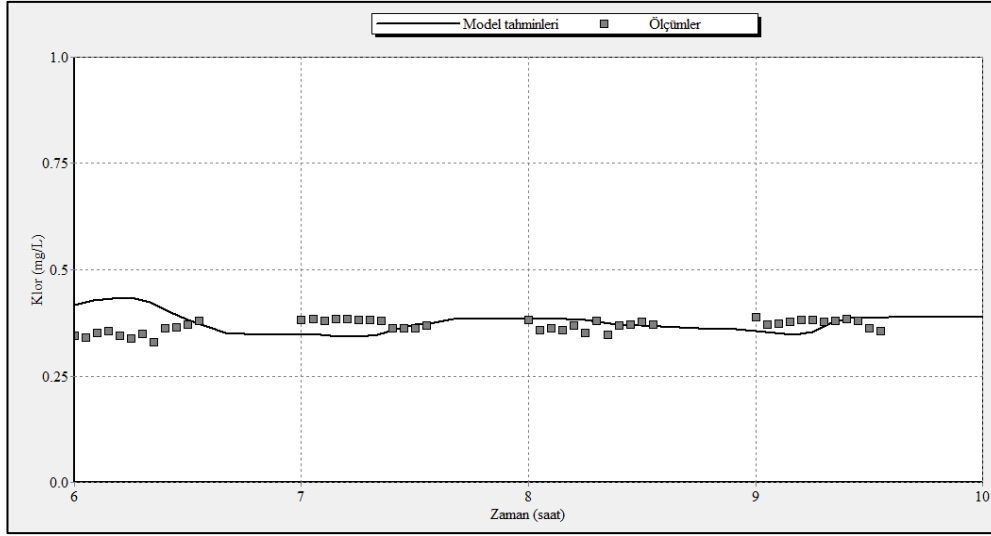


Şekil 4.26. (Devam). Çalışma bölgesi doğu yakasında 12.05.2010 tarihinde ölçülen debi değerleri ve klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011)

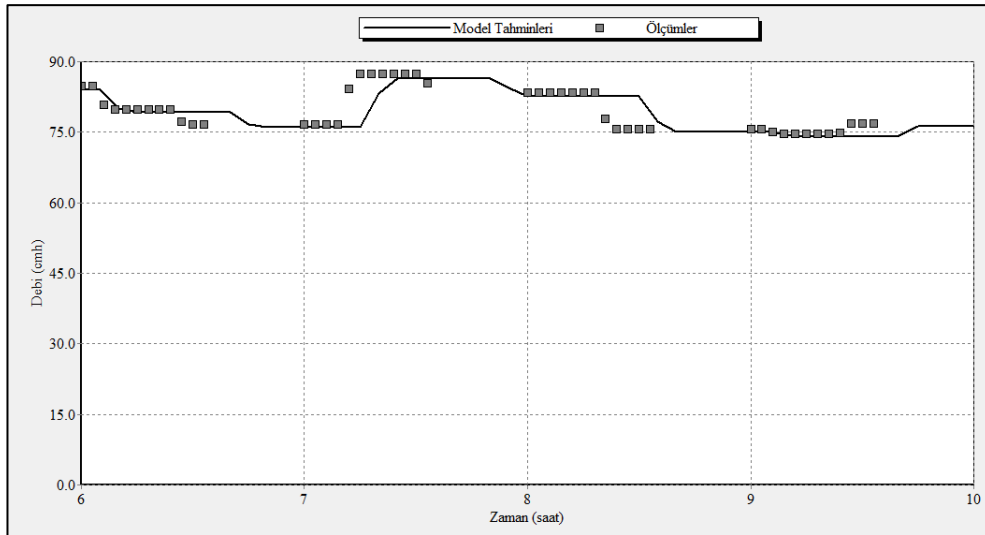
12.05.2010 tarihinde ölçüm istasyonlarında elde edilen klor konsantrasyonları model tahminleri ve ölçümleri Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de, debi değerlerine ait model tahminleri ve ölçümler ise Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’da verilmektedir.



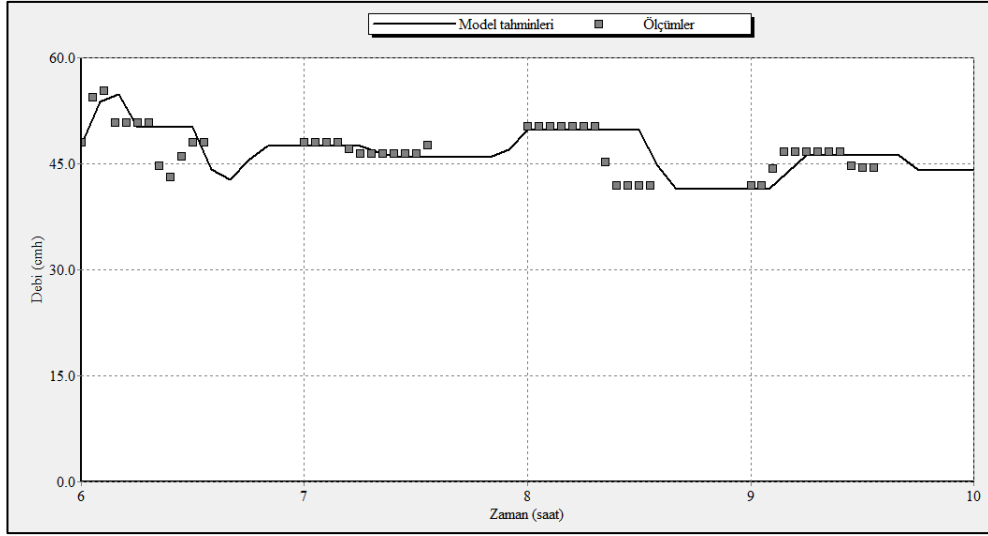
Şekil 4.27. Çalışma bölgesi doğu yakası 2156 nolu düğüm noktasında (2. alt bölge girişi, ON-68) 12.05.2010 tarihi için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011)



Şekil 4.28. Çalışma bölgesi doğu yakası 6327 nolu düğüm noktasında (6. alt bölge girişi, ON-70) 12.05.2010 tarihi için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011)



Şekil 4.29. Çalışma bölgesi doğu yakası 2147 nolu boruda (2. alt bölge girişi, ON-68) 12.05.2010 tarihi için elde edilen debi tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011)

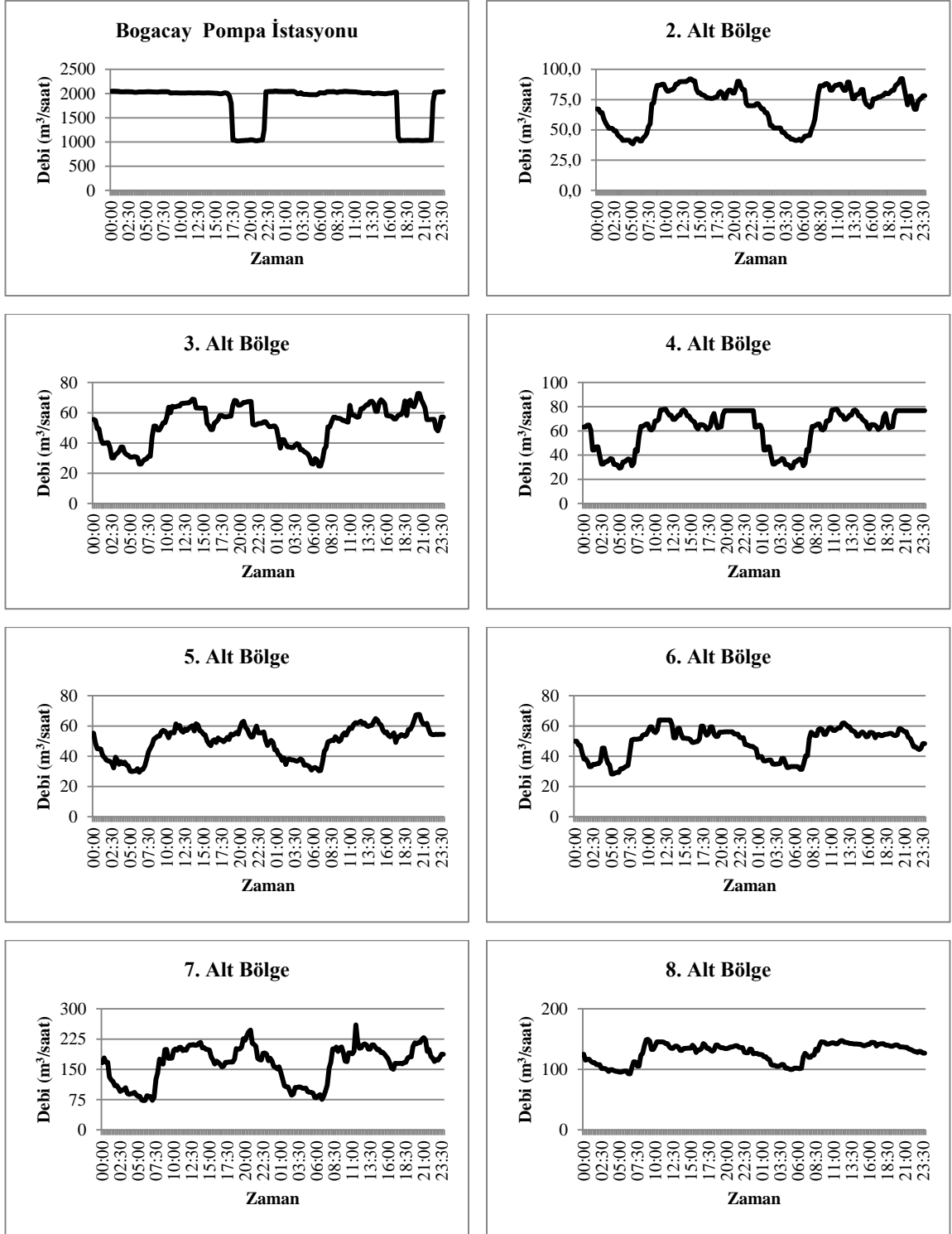


Şekil 4.30. Çalışma bölgesi doğu yakası 6164 nolu boruda (6. alt bölge girişi, ON-70) 12.05.2010 tarihi için elde edilen debi tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011)

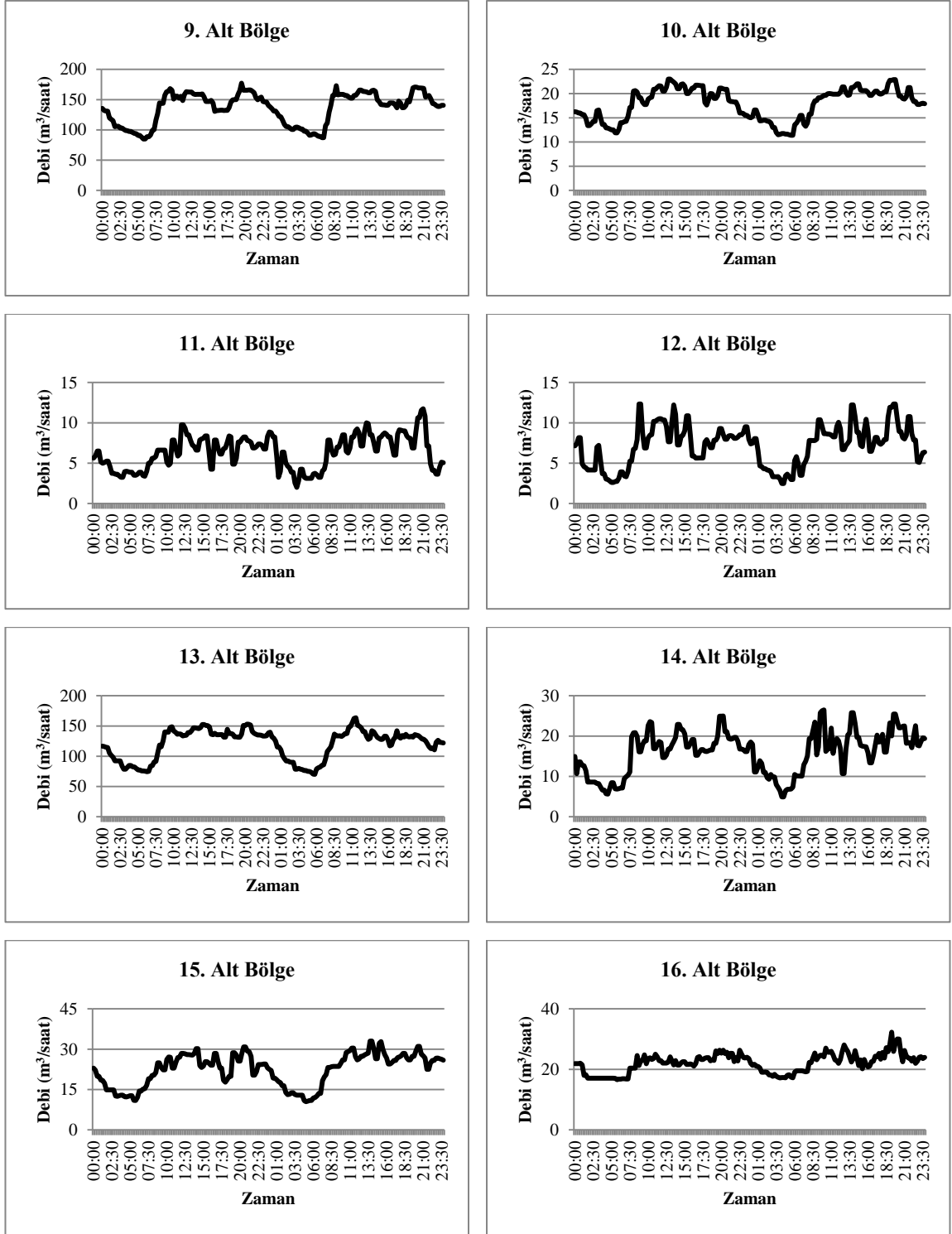
Model doğrulama çalışmaları neticesinde klor konsantrasyonları ölçüm sonuçları ve model tahminleri arasındaki ortalama mutlak hata 2156 nolu düğüm noktasında (ON-68) 0,027 mg/L, 6327 nolu düğüm noktasında (ON-70) 0,034 mg/L, olarak hesaplanmıştır. Debi değerleri ölçüm sonuçları ve model tahminler, arasındaki ortalama mutlak hata 2147 nolu boruda (ON-68) 1,933 m<sup>3</sup>/saat, 6164 nolu boruda (ON-70) 1,735 m<sup>3</sup>/saat olarak hesaplanmıştır.

#### 4.4.4. EPANET modeli ile su kalitesi modeli doğrulama çalışması dördüncü periyodu

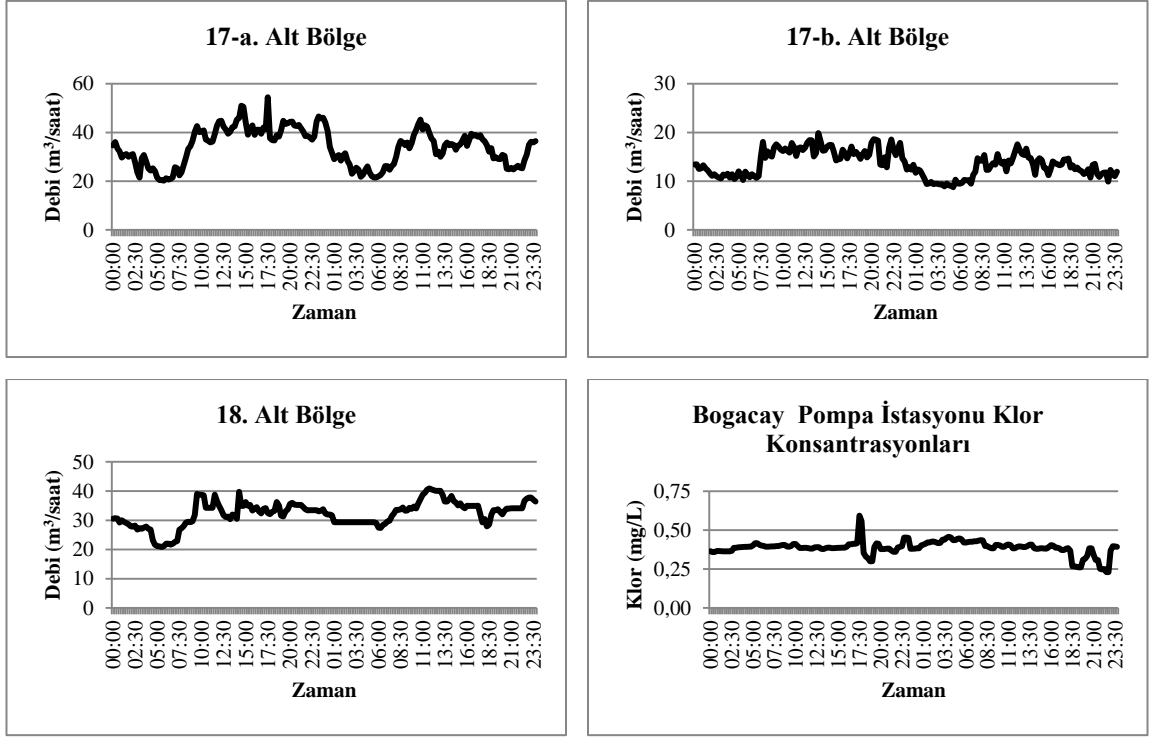
Bu çalışmanın amacı 14.09.2010 - 15.09.2010 tarihleri arasında 48 saat süre için Konyaaltı Bölgesi Su Dağıtım Şebekesinde klor konsantrasyonlarını tahmin etmektir. Bu çalışma kapsamında 14.09.2010 - 15.09.2010 tarihleri arasında çalışma bölgesine temin edilen debi değerleri ve kaynakta dozlanan klor konsantrasyonları Şekil 4.31'de verilmektedir.



Şekil 4.31. Çalışma bölgesinde 14.09.2010 - 15.09.2010 tarihleri arasında ölçülen debi değerleri ve klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011)

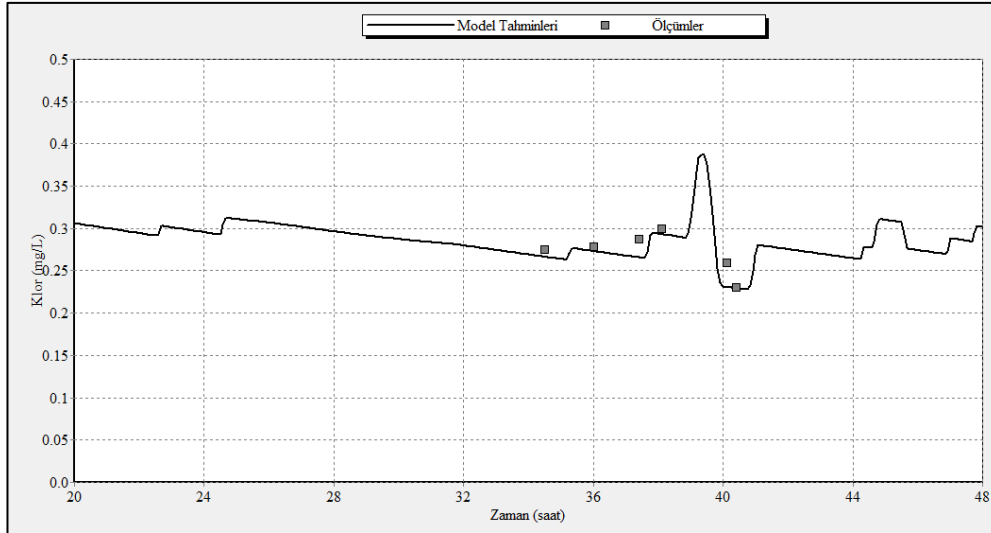


Şekil 4.31. (Devam). Çalışma bölgesinde 14.09.2010 - 15.09.2010 tarihleri arasında ölçülen debi değerleri ve klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011)



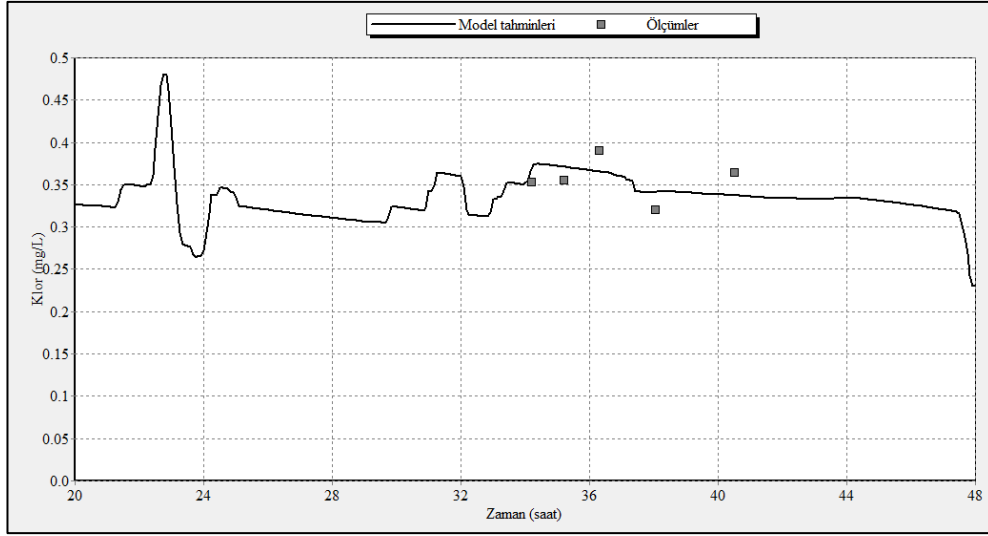
Şekil 4.31. (Devam). Çalışma bölgesinde 14.09.2010 - 15.09.2010 tarihleri arasında ölçülen debi değerleri ve klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011)

Bu çalışma kapsamında 14.09.2010 - 15.09.2010 tarihleri arasında çalışma bölgesi için elde edilen klor konsantrasyonlarına ait model tahminleri ve ölçümleri Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te verilmektedir.



Şekil 4.32. Çalışma bölgesi S1243 nolu düğüm noktasında 14.09.2010 - 15.09.2010 tarihleri için elde edilen klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011)



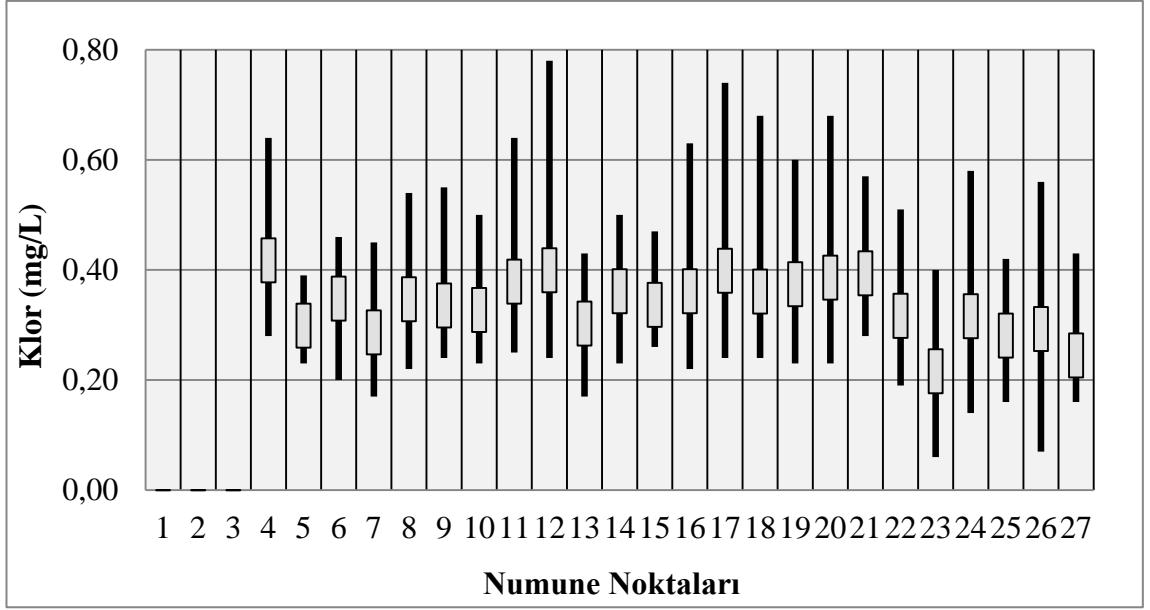


Şekil 4.33. Çalışma bölgesi 1200015 nolu düğüm noktasında 14.09.2010 - 15.09.2010 tarihleri için elde edilen klor konsantrasyonları tahminleri ve ölçümler (TÜBİTAK 2011)

Model doğrulama çalışmalarının son aşamasında klor konsantrasyonları ölçüm sonuçları ve model tahminleri arasındaki ortalama mutlak hata S1243 nolu düğüm noktasında 0,012 mg/L, 120005 nolu düğüm noktasında 0,022 mg/L olarak hesaplanmıştır.

#### 4.5. EPANET Modeli ile Klor Konsantrasyonu Yönetim ve Senaryo Analiz Çalışmaları

Bu çalışmada, Boğaçay Pompa İstasyonu'ndan çalışma bölgesine temin edilen suyun, şebekenin tamamında en az 0,2 mg/L klor konsantrasyonuna sahip olması için kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonunun tespiti için sekiz farklı senaryo çalışması ile irdelenmiş ve kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonları tespit edilmiştir. Çalışma bölgesinde 30 ay süre için yapılan saha çalışmalarında en düşük klor konsantrasyonlarının görüldüğü, ayrıca kalibrasyon ve doğrulama çalışmalarında da en yüksek su yaşına sahip 18. alt bölgede yer alan S1243 nolu düğüm noktasında model süresince klor konsantrasyonlarının zamanla değişimi takip edilmiştir. Çalışma bölgesinde 30 ay süre ile gerçekleştirilen ölçüm ve analiz çalışmaları sonucunda 24 farklı noktada (toplam 27 ölçüm noktasından üç tanesi klor dozlama öncesi) görülen en düşük, ortalama ve en yüksek serbest bakiye klor konsantrasyonları Şekil 4.34'te verilmektedir. 23 nolu numune noktası S1243 nolu düğüm noktasına tekabül etmektedir. Şekil 4.34'ten de görüldüğü üzere 30 ay süresince yapılan ölçüm ve analiz çalışmaları sonucunda en düşük serbest bakiye klor konsantrasyonları bu noktada gözlemlenmiştir. Ayrıca çalışma bölgesinde belirlenen saatler için klor konsantrasyonlarının mekânsal değişimleri de incelenmiştir.



Şekil 4.34. 2008 – 2011 yılları arasında pilot çalışma bölgesindeki 27 farklı ölçüm noktasında 15 ölçüm sonucu elde edilen klor konsantrasyonları (TÜBİTAK 2011)

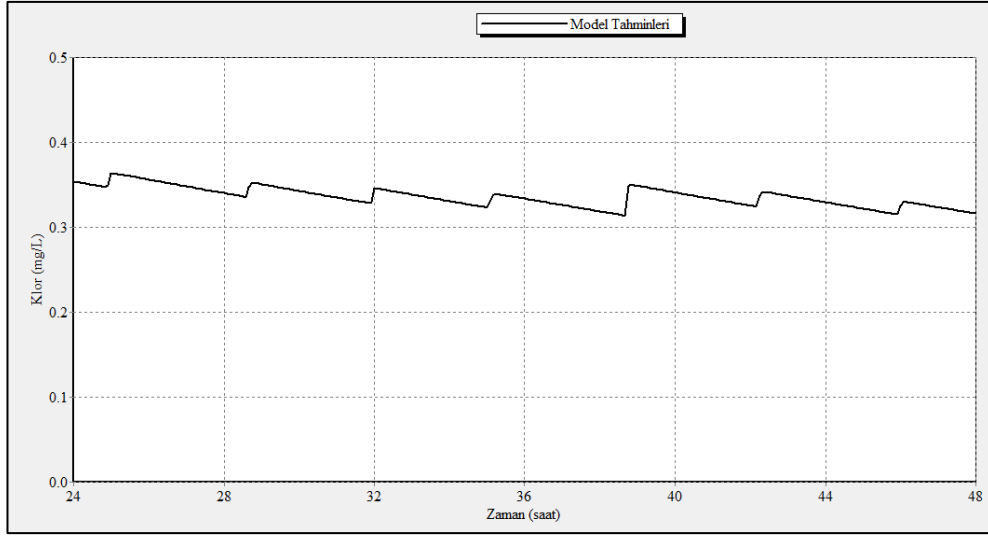
Yönetim senaryolarının geliştirilmesinde, çalışma bölgesinde klor konsantrasyonlarını etkileyebilecek olağan dışı durumlar göz önünde bulundurulmuştur. Bu kapsamda çalışma bölgesinde 2010 yılı süresince elde edilen en yüksek ve en düşük debi değerleri ve su sıcaklıkları kullanılmış olup, senaryolar bu veriler üzerinden geliştirilmiştir. Bu bilgiler ışığında, çalışma bölgesine temin edilen suyun aylık ortalama en yüksek debisi Temmuz 2010'da, en düşük debisi ise Aralık 2010'da gerçekleşmiştir. Çalışma bölgesinde tespit edilen ortalama su sıcaklığı 30 ay süresince yapılan saha çalışmaları sonuçlarına göre 20 °C olarak kabul edilmiş olup, senaryoların geliştirilmesinde kabul edilen ortalama su sıcaklığı değeri ve şebekedeki ortalama su sıcaklığının 30 °C olduğu durumlar göz önünde bulundurulmuştur.  $K_b$  hesaplamasında kullanılan 15 °C su sıcaklığı değeri klor tüketimi için kritik olmadığından senaryolarda kullanılmamıştır. Çalışma bölgesinde gerçekleştirilen fiziksel su kayıpları azaltma çalışmaları da göz önünde bulundurularak geliştirilen senaryolar ve Çizelge 4.8'de verilmektedir. Yönetim senaryoları kapsamında kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonlarının tahmini klor dozaj konsantrasyonlarının uygulama kolaylığı da göz önünde bulundurularak tespit edilmiştir.

Çizelge 4.8. Çalışma bölgesinde dozlanacak klor konsantrasyonlarının tespiti için oluşturulan yönetim senaryoları (TÜBİTAK 2011, Karadirek vd. 2014a)

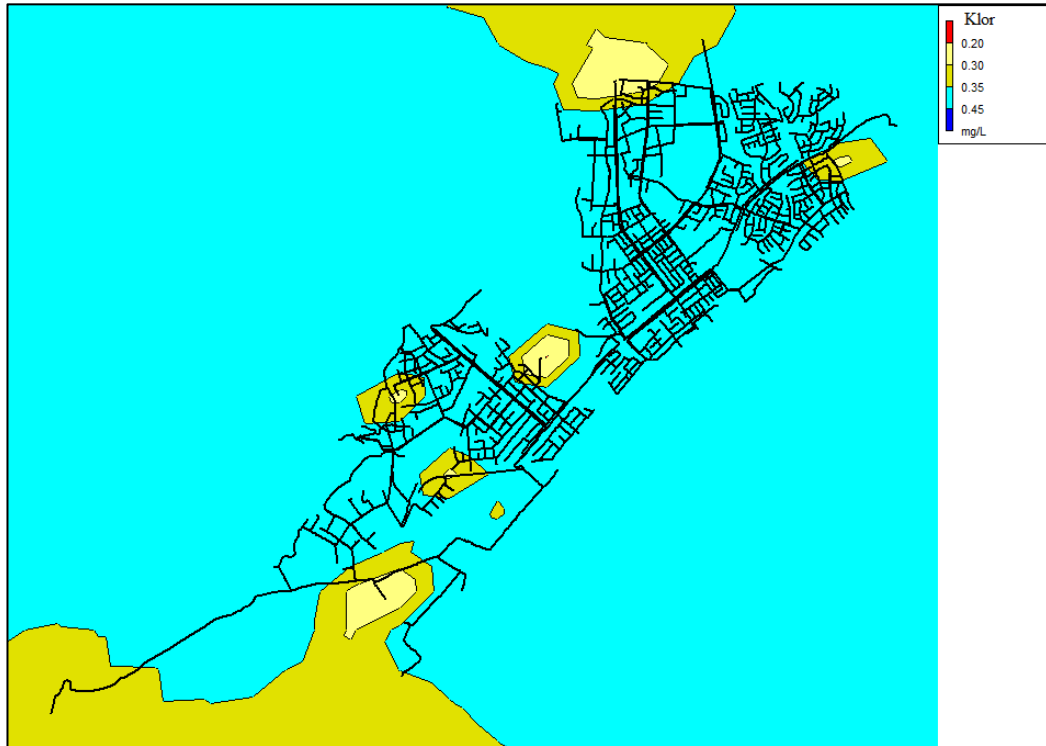
Yönetim Senaryosu	Uygulama Yöntemi	Debi (m <sup>3</sup> /saat)	Su Sıcaklığı (°C)	K <sub>b</sub> (gün <sup>-1</sup> )
1. Senaryo	Temmuz 2010 (en yüksek su sıcaklığında en yüksek su tüketimi)	1847,75	30	0,19897
2. Senaryo	Haziran 2010 (en yüksek su sıcaklığında en düşük su tüketimi)	1674,64	30	0,19897
3. Senaryo	Aralık 2010 (en düşük su tüketimi)	1372,54	20	0,13156
4. Senaryo	Temmuz 2010 (1. Senaryo için fiziksel su kayıplarının azaltılması durumunda)	1478,2	30	0,19897
5. Senaryo	Haziran 2010 (2. Senaryo için fiziksel su kayıplarının azaltılması durumunda)	1339,71	30	0,19897
6. Senaryo	Aralık 2010 (3. Senaryo için fiziksel su kayıplarının azaltılması durumunda)	1098,03	20	0,13156
7. Senaryo	Temmuz 2010 (K <sub>b</sub> değerinin beş kat artması durumunda)	1847,75	30	0,99485
8. Senaryo	Aralık 2010 (K <sub>b</sub> değerinin beş kat artması durumunda)	1372,54	20	0,6578

#### 4.5.1. EPANET modeli ile klor konsantrasyonu yönetim ve senaryo analiz çalışmaları birinci yönetim senaryosu

Birinci yönetim senaryosu kapsamında 2010 yılı içerisinde en yüksek su tüketim verilerinin gerçekleştiği tarih 20 - 21 Temmuz 2010 olarak tespit edilmiş olup, bu tarihlerde su dağıtım şebekesinin tamamında su sıcaklığının 30 °C olduğu kabulü yapılmıştır. Yönetim senaryoları kapsamında deneme – yanılma yöntemi ile kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyon değerleri için birçok farklı değer denenmiştir. Bu yönetim senaryosu kapsamında kaynakta farklı klor dozaj değerleri denenmek sureti ile şebekedeki klor konsantrasyonlarının zamansal ve mekânsal değişimleri izlenerek, kritik nokta olan S1243 nolu düğüm noktasındaki klor konsantrasyonlarının zamansal değişimleri irdelenmiş ve örnek olarak 0,45 mg/L ve 0,35 mg/L klor dozaj miktarlarında elde edilen tahminler sunulmuştur. Kaynakta 0,45 mg/L klor dozlanması durumunda S1243 nolu düğüm noktasındaki klor konsantrasyonlarının zamansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.35'te verilmektedir. Bu periyot için en düşük klor konsantrasyonu 21.07.2010 tarihinde saat 23:00'da 0,32 mg/L olarak tahmin edilmiştir. Bu doğrultuda çalışma bölgesindeki klor konsantrasyonlarının mekansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.36'da verilmektedir.



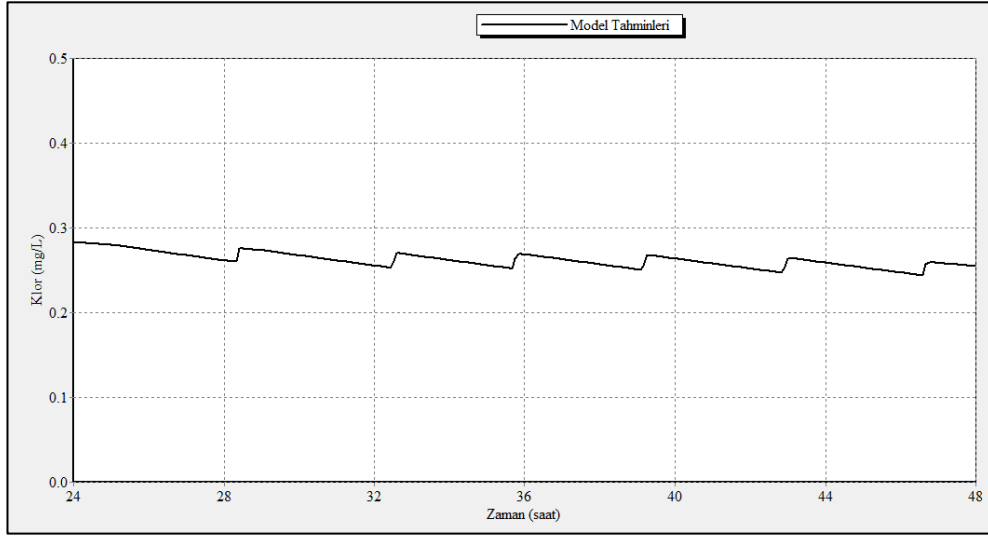
Şekil 4.35. S1243 nolu düğüm noktası için 21.07.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011)



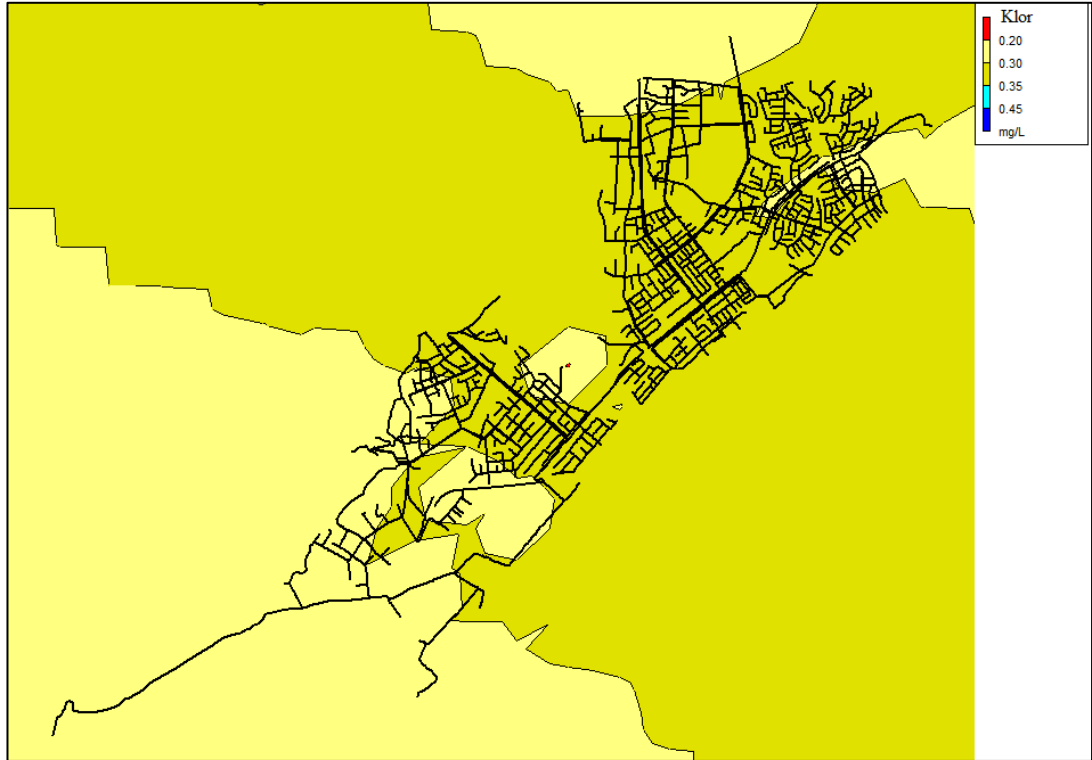
Şekil 4.36. Pilot çalışma bölgesinde 21.07.2010 tarihinde saat 23:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011)

Birinci yönetim senaryosu kapsamında kaynakta 0,35 mg/L klor dozlanması durumunda S1243 nolu düğüm noktasındaki klor konsantrasyonlarının zamansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.37'de verilmektedir. Bu periyot için en düşük klor konsantrasyonu 21.07.2010 tarihinde saat 23:00'da 0,24 mg/L olarak tahmin

edilmiştir. Bu doğrultuda çalışma bölgesindeki klor konsantrasyonlarının mekansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.38’de verilmektedir.



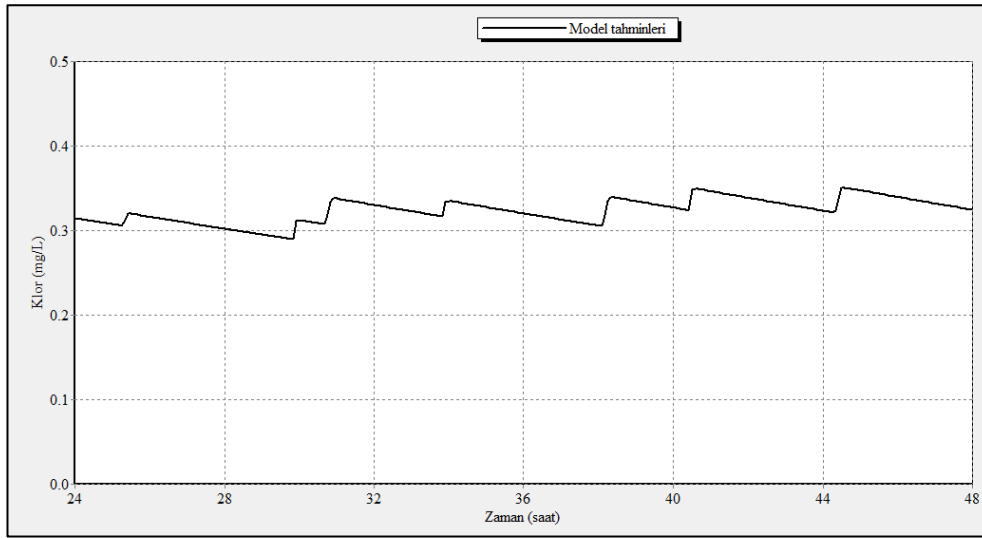
Şekil 4.37. S1243 nolu düğüm noktası için 21.07.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011)



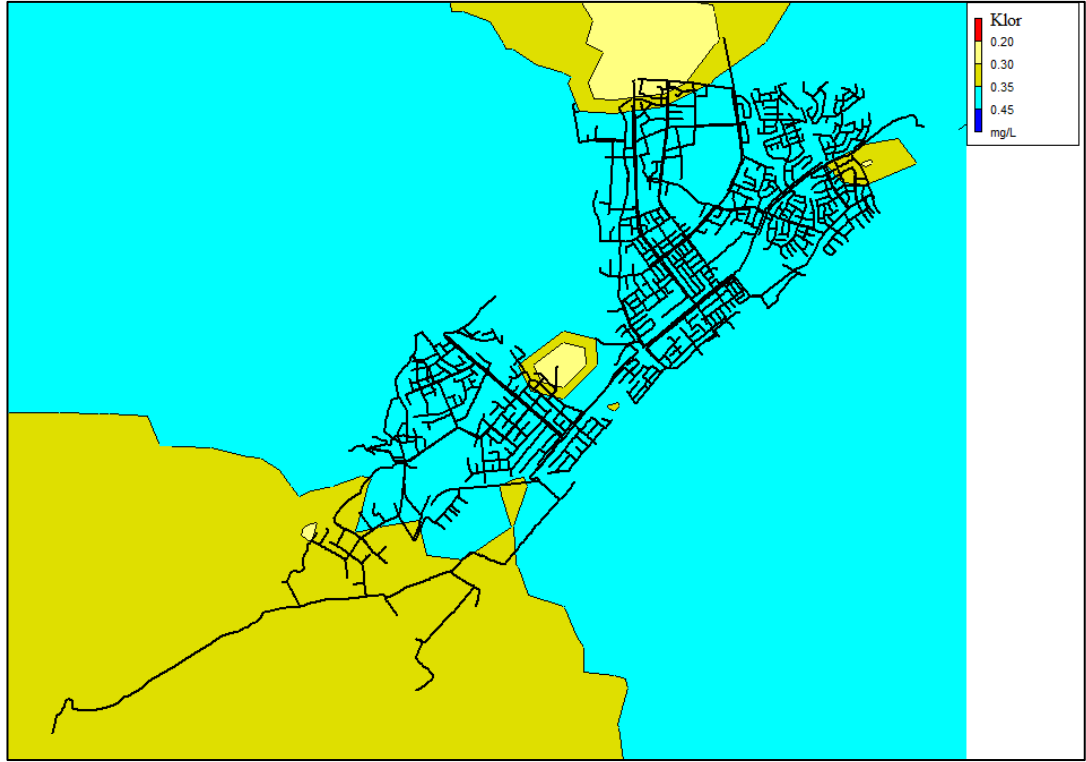
Şekil 4.38. Pilot çalışma bölgesinde 21.07.2010 tarihinde saat 23:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011)

#### 4.5.2. EPANET modeli ile klor konsantrasyonu yönetim ve senaryo analiz çalışmaları ikinci yönetim senaryosu

İkinci yönetim senaryosu kapsamında su sıcaklığının en yüksek değer, su tüketim verilerinin ise yüksek su sıcaklığına karşın en düşük değerler aldığı Haziran 2010 verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 01 - 02 Haziran 2010 tarihleri senaryo çalışması için kullanılmıştır. Kaynakta 0,45 mg/L klor dozlanması durumunda su dağıtım şebekesindeki klor konsantrasyonlarının kritik nokta olan S1243 nolu düğüm noktasındaki zamansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.39'da verilmektedir. Bu periyot için en düşük klor konsantrasyonu 02.06.2010 tarihinde saat 06:00'da 0,29 mg/L olarak tahmin edilmiştir. Bu doğrultuda çalışma bölgesindeki klor konsantrasyonlarının mekansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.40'da verilmektedir.



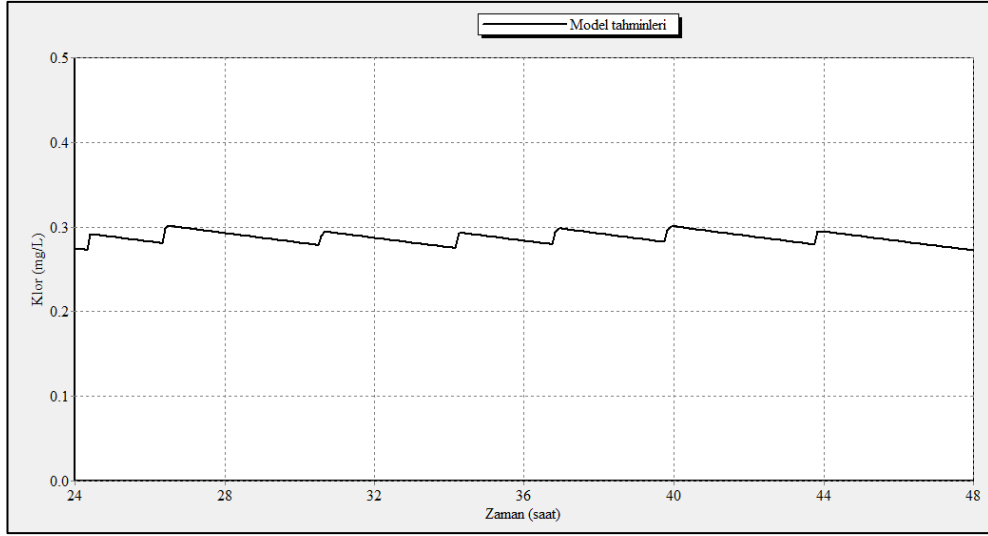
Şekil 4.39. S1243 nolu düğüm noktası için 02.06.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011)



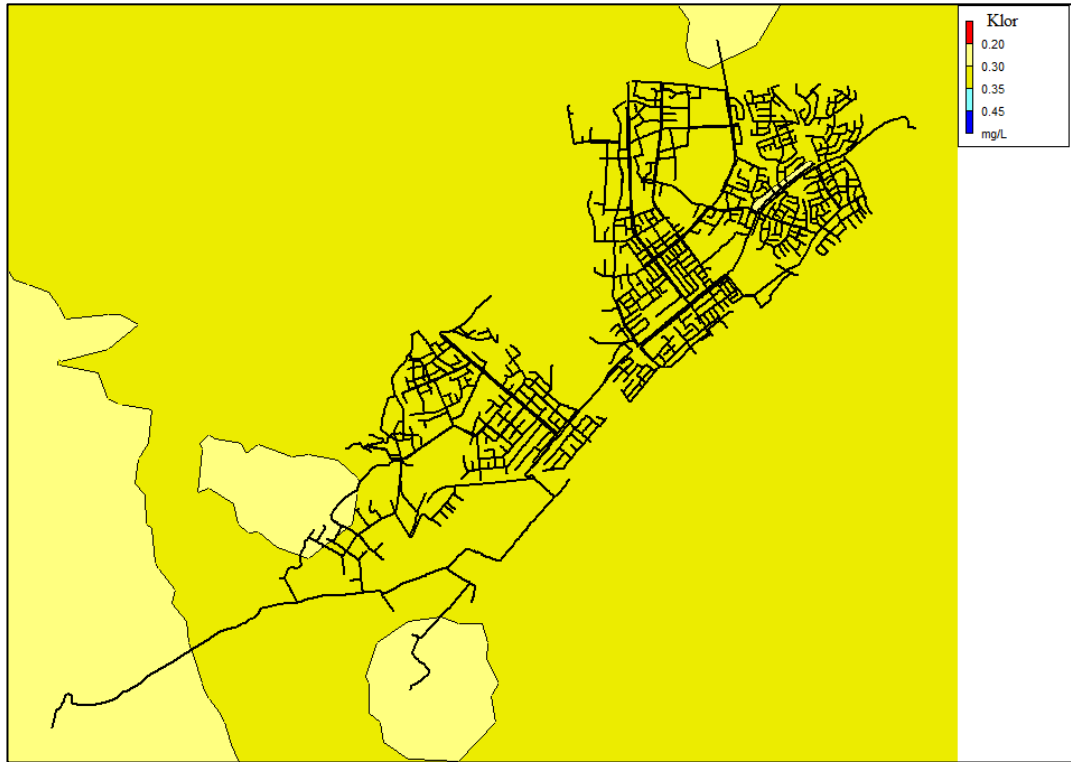
Şekil 4.40. Pilot çalışma bölgesinde 02.06.2010 tarihinde saat 06:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011)

#### 4.5.3. EPANET modeli ile klor konsantrasyonu yönetim ve senaryo analiz çalışmaları üçüncü yönetim senaryosu

Üçüncü yönetim senaryosu, aylık ortalama su tüketim verilerinin değerlendirilmesi sonucunda 20 °C su sıcaklığının yaşanabileceği ve 2010 yılı verilerinde debinin en düşük olduğu aralık ayı belirlenmiş olup, aralık ayı içerisinde 01.12.2010 – 02.12.2010 2010 tarihleri seçilmiştir. Kaynakta 0,35 mg/L klor dozlanması durumunda su dağıtım şebekesindeki klor konsantrasyonlarının kritik nokta olan S1243 nolu düğüm noktasındaki zamansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.41’de verilmektedir. Bu periyot için en düşük klor konsantrasyonu 02.12.2010 tarihinde saat 23:00’da 0,27 mg/L olarak tahmin edilmiştir. Bu doğrultuda çalışma bölgesindeki klor konsantrasyonlarının mekansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.42’de verilmektedir.



Şekil 4.41. S1243 nolu düğüm noktası için 02.12.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011)

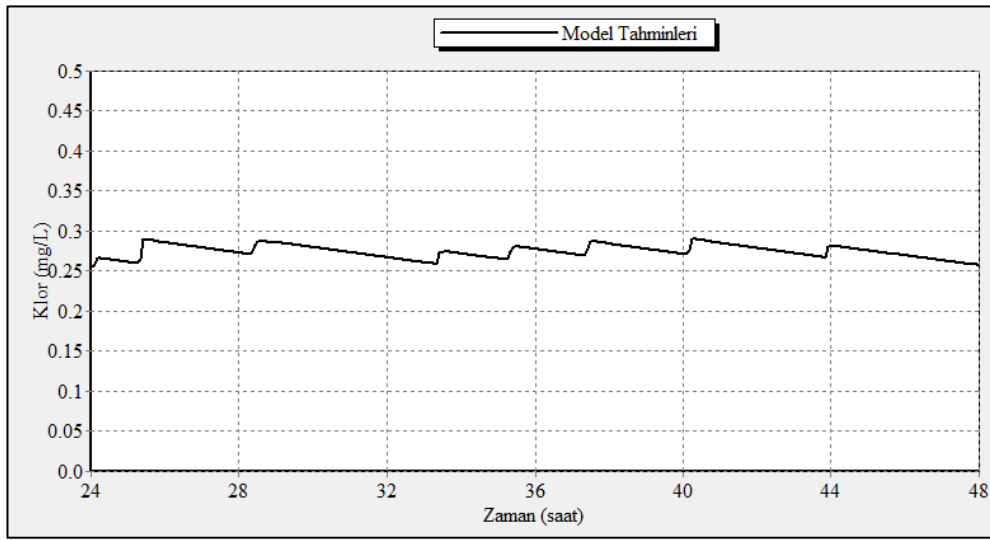


Şekil 4.42. Pilot çalışma bölgesinde 02.12.2010 tarihinde saat 23:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011)



#### 4.5.4. EPANET modeli ile klor konsantrasyonu yönetim ve senaryo analiz çalışmaları dördüncü yönetim senaryosu periyodu

Çalışma bölgesinde devam eden su kayıplarının azaltılması çalışmaları da göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen dördüncü yönetim senaryosu, birinci yönetim senaryosunun su kayıplarının azaltılması durumu için düzenlenmiş halidir. Bu çalışma kapsamında kaynakta 0,35 mg/L klor dozlanması durumunda su dağıtım şebekesindeki klor konsantrasyonlarının kritik nokta olan S1243 nolu düğüm noktasındaki zamansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.43'te verilmektedir. Bu periyot için en düşük klor konsantrasyonu 21.07.2010 tarihinde saat 23:00'da 0,25 mg/L olarak tahmin edilmiştir. Bu doğrultuda çalışma bölgesindeki klor konsantrasyonlarının mekansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.44'te verilmektedir.



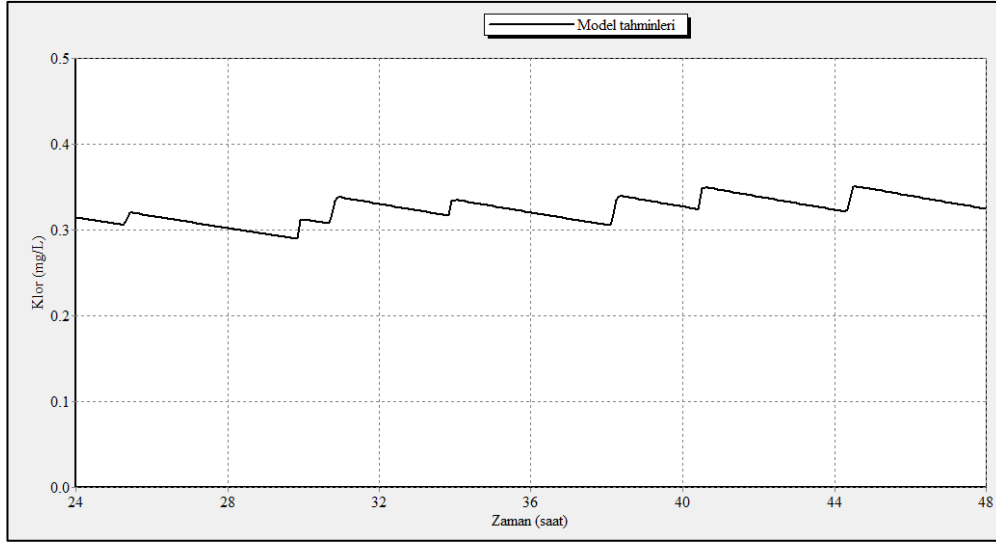
Şekil 4.43. S1243 nolu düğüm noktası için 21.07.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011)



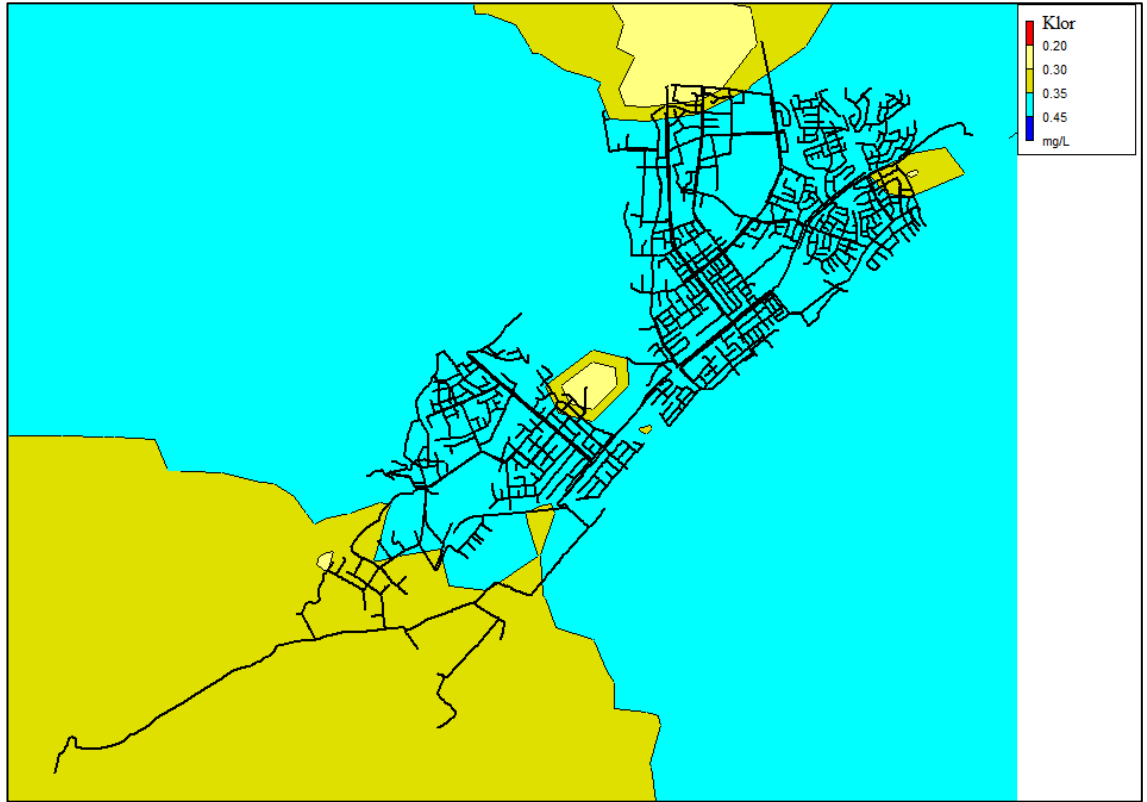
Şekil 4.44. Pilot çalışma bölgesinde 21.07.2010 tarihinde saat 23:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011)

#### 4.5.5. EPANET modeli ile klor konsantrasyonu yönetim ve senaryo analiz çalışmaları beşinci yönetim senaryosu

Beşinci yönetim senaryosu, ikinci yönetim senaryosunun su kayıplarının azaltılması durumu için düzenlenmiş halidir. Bu çalışma kapsamında kaynakta 0,45 mg/L klor dozlanması durumunda su dağıtım şebekesindeki klor konsantrasyonlarının kritik nokta olan S1243 nolu düğüm noktasındaki zamansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.45'te verilmektedir. Bu periyot için en düşük klor konsantrasyonu 02.06.2010 tarihinde saat 06:00'da 0,29 mg/L olarak tahmin edilmiştir. Bu doğrultuda çalışma bölgesindeki klor konsantrasyonlarının mekansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.46'da verilmektedir.



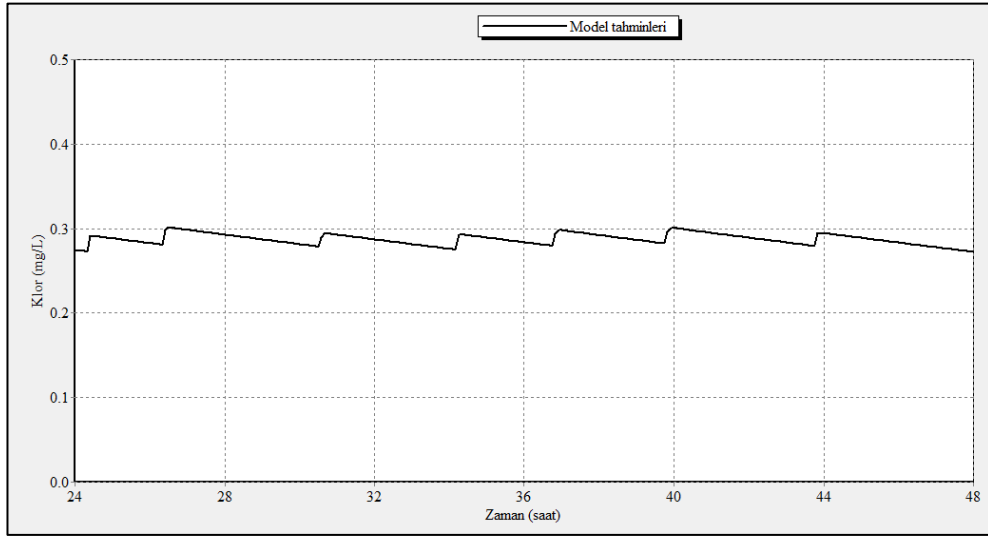
Şekil 4.45. S1243 nolu düğüm noktası için 02.06.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011)



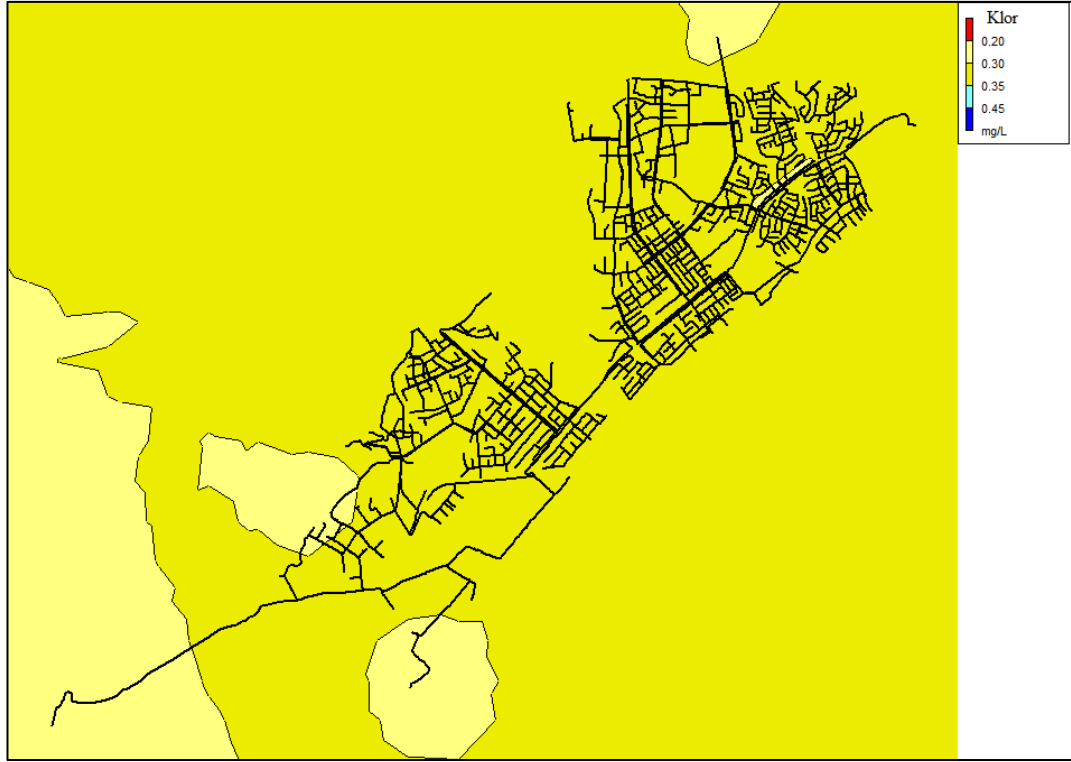
Şekil 4.46. Pilot çalışma bölgesinde 02.06.2010 tarihinde saat 06:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011)

#### 4.5.6. EPANET modeli ile klor konsantrasyonu yönetim ve senaryo analiz çalışmaları altıncı yönetim senaryosu

Altıncı yönetim senaryosu, üçüncü yönetim senaryosunun su kayıplarının azaltılması durumu için düzenlenmiş halidir. Bu çalışma kapsamında kaynakta 0,35 mg/L klor dozlanması durumunda su dağıtım şebekesindeki klor konsantrasyonlarının kritik nokta olan S1243 nolu düğüm noktasındaki zamansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.47’de verilmektedir. Bu periyot için en düşük klor konsantrasyonu 02.12.2010 tarihinde saat 23:00’da 0,27 mg/L olarak tahmin edilmiştir. Bu doğrultuda çalışma bölgesindeki klor konsantrasyonlarının mekansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.48’de verilmektedir.



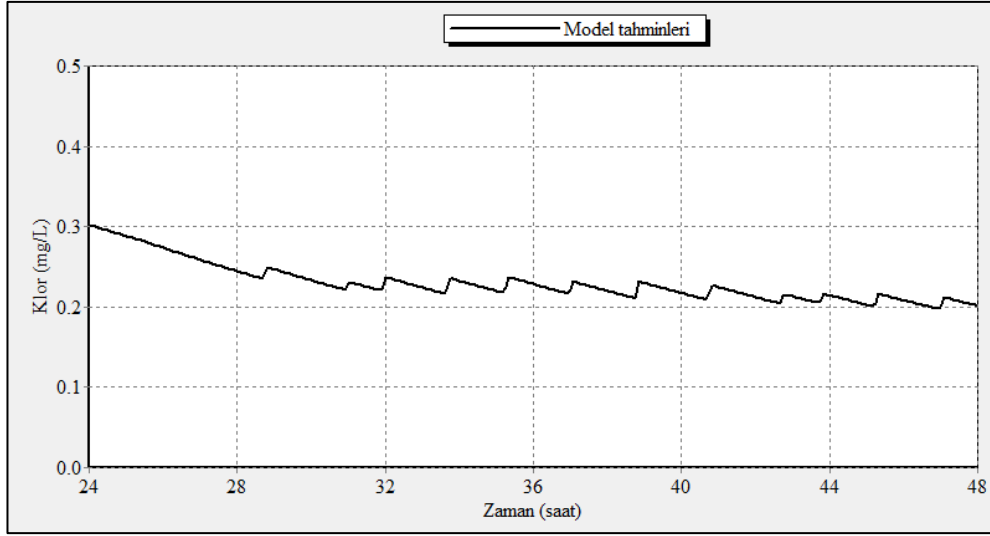
Şekil 4.47. S1243 nolu düğüm noktası için 02.12.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011)



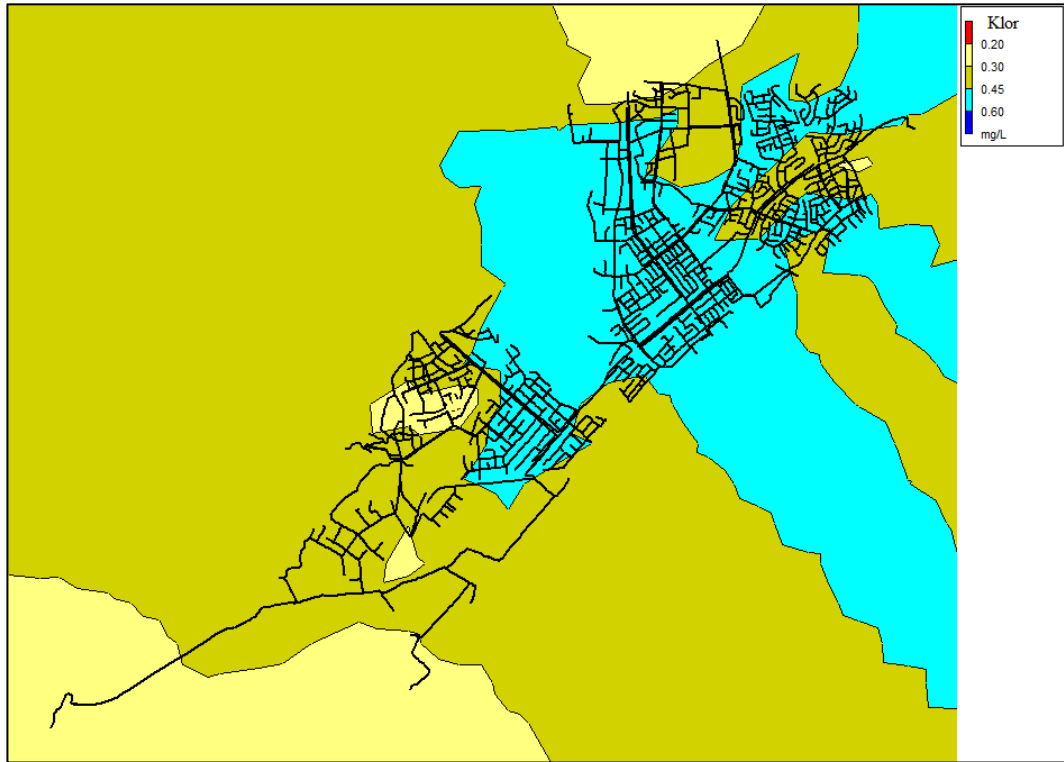
Şekil 4.48. Pilot çalışma bölgesinde 02.12.2010 tarihinde saat 23:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011)

#### 4.5.7. EPANET modeli ile klor konsantrasyonu yönetim ve senaryo analiz çalışmaları yedinci yönetim senaryosu

Yedinci yönetim senaryosu, su kaynağındaki su kalitesinin muhtemel bozulması durumunda kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonlarının tespiti için geliştirilmiştir. Bu kapsamda birinci yönetim senaryosu verileri yeniden düzenlenerek kullanılmıştır. Bu kapsamda şebekedeki en yüksek su sıcaklığının görülebileceği, 2010 yılı için en yüksek su tüketim verilerinin gözlemlendiği temmuz ayında klor ana akım bozunma katsayısı beş kat arttırılmak sureti ile model tahmin çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kaynakta 0,60 mg/L klor dozlanması durumunda su dağıtım şebekesindeki klor konsantrasyonlarının kritik nokta olan S1243 nolu düğüm noktasındaki zamansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.49'da verilmektedir. Bu periyot için en düşük klor konsantrasyonu 21.07.2010 tarihinde saat 23:00'da 0,20 mg/L olarak tahmin edilmiştir. Bu doğrultuda çalışma bölgesindeki klor konsantrasyonlarının mekansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.50'de verilmektedir.



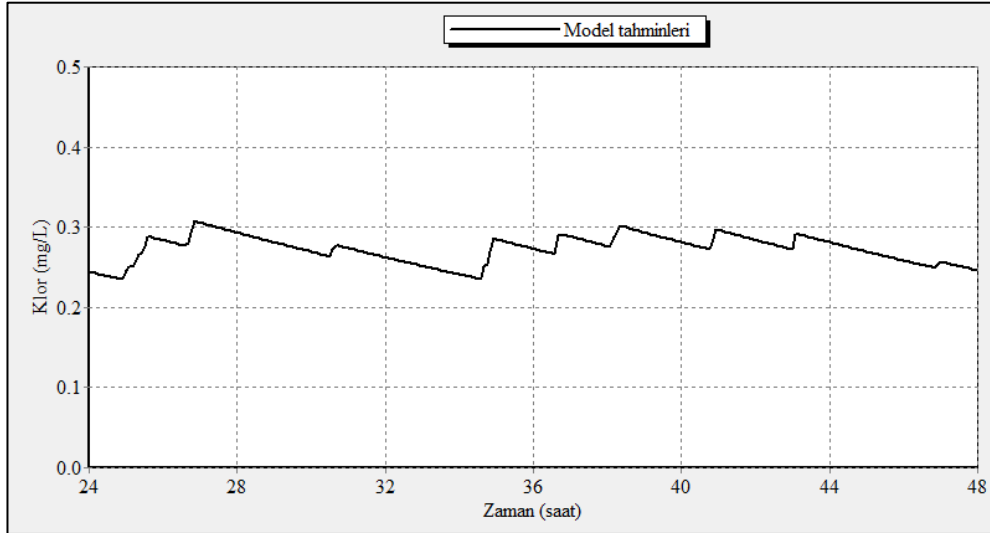
Şekil 4.49. S1243 nolu düğüm noktası için 21.07.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011)



Şekil 4.50. Pilot çalışma bölgesinde 21.07.2010 tarihinde saat 23:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011)

#### 4.5.8. EPANET modeli ile klor konsantrasyonu yönetim ve senaryo analiz çalışmaları sekizinci yönetim senaryosu

Sekizinci yönetim senaryosu su kaynağındaki su kalitesinin muhtemel bozulması durumunda kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonlarının tespiti için geliştirilmiştir. Bu kapsamda üçüncü yönetim senaryosu verileri yeniden düzenlenerek kullanılmıştır. Bu kapsamda 2010 yılında şebekedeki en düşük tüketim verilerinin gözlemlendiği, şebekedeki su sıcaklığının 20 °C kabul edildiği aralık ayında klor ana akım bozunma katsayısı beş kat artırılmak sureti ile model tahmin çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kaynakta 0,45 mg/L klor dozlanması durumunda su dağıtım şebekesindeki klor konsantrasyonlarının kritik nokta olan S1243 nolu düğüm noktasındaki zamansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.51’de verilmektedir. Bu periyot için en düşük klor konsantrasyonu 03.12.2010 tarihinde saat 23:00’da 0,24 mg/L olarak tahmin edilmiştir. Bu doğrultuda çalışma bölgesindeki klor konsantrasyonlarının mekansal değişimlerine ait model tahminleri Şekil 4.52’de verilmektedir.



Şekil 4.51. S1243 nolu düğüm noktası için 03.12.2010 tarihi için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları (Başlangıç saati: 00:00) (TÜBİTAK 2011)



Şekil 4.52. Pilot çalışma bölgesinde 03.12.2010 tarihinde saat 23:00 için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının mekansal değişimi (TÜBİTAK 2011)

#### 4.6. Serbest Bakiye Klor Konsantrasyonlarının Veriye Dayalı Modelleme Yaklaşımları ile Modellenmesi

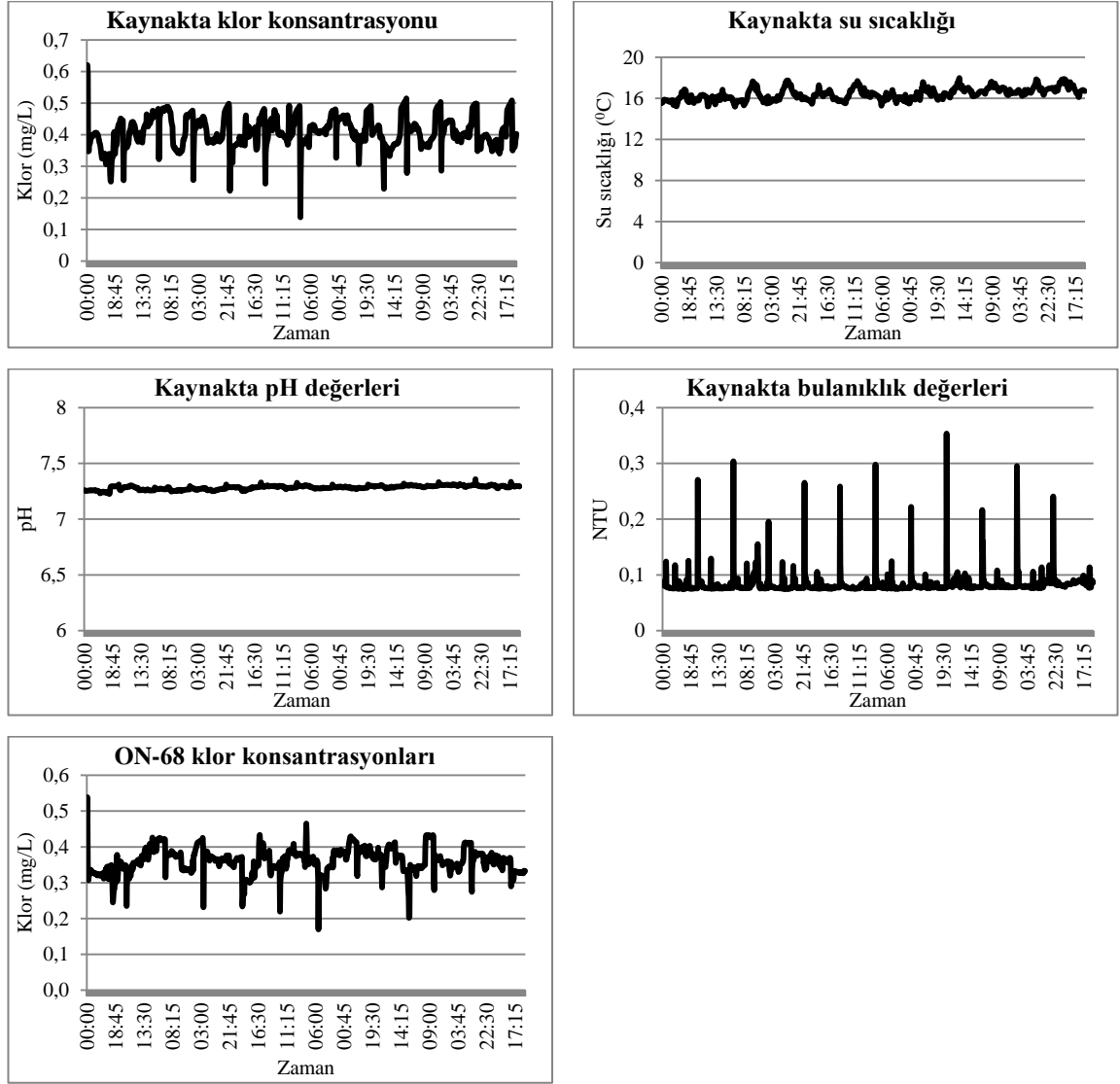
##### 4.6.1. YSA tabanlı modelleme yaklaşımları birinci periyodu

YSA tabanlı modelleme çalışmalarının birinci periyodunda 01.11.2010 – 12.11.2010 tarihleri arasında 15 dakika zaman aralıklı olarak Boğaçay Pompa İstasyonu'ndan ve ON-68 nolu online ölçüm istasyonundan elde edilen veriler kullanılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında kaynaktan kayıt altına alınan pH, bulanıklık, su sıcaklığı değerleri ve klor konsantrasyonları girdi; ON-68 nolu istasyonda ölçülen klor konsantrasyonları ise çıktı olarak kullanılmak sureti ile YSA tabanlı MISO modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 01.11.2010 – 12.11.2010 tarihleri arasında 15 dakika zaman aralıklı olarak kaynaktan ve hedef olarak kullanılan ON-68 nolu istasyonda elde edilen su kalitesi parametreleri Şekil 4.53'te verilmektedir. MISO yaklaşımında MATLAB yazılımından faydalanılmış olup, aşağıda verilen kısıt koşullar benimsenmiştir:

- i) Öğrenme sürecinde çok katmanlı algılayıcı (MLP: multi layer perceptron) kullanılmıştır.
- ii) En az düğüm sayısı 5, en fazla düğüm sayısı 15 olarak seçilmiştir.
- iii) 20 Aday yapı denenerek; en iyi performansa sahip olanı kullanılmıştır.



v) Veriler eğitim, test ve doğrulama aşamaları için üç kısma ayrılmıştır. Verilerin %50'si eğitim, %25'i test ve %25'i doğrulama için kullanılmıştır.

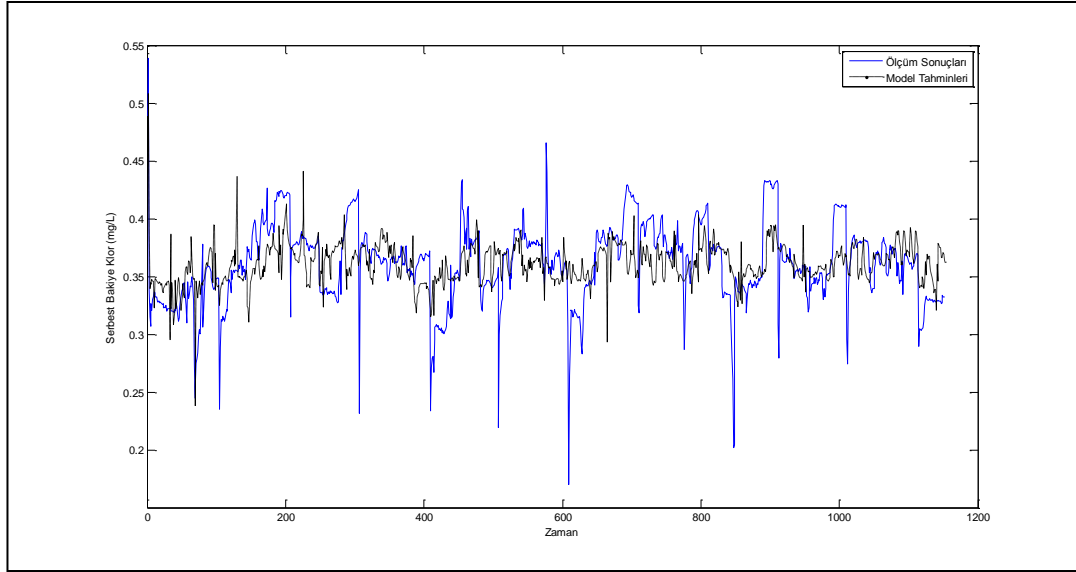


Şekil 4. 53. 01.11.2010 – 12.11.2010 tarihleri arasında Boğaçay Pompa İstasyonu'nda ve ON-68 nolu online ölçüm istasyonunda elde edilen su kalite parametreleri

Model çalışmalarının sonuçlarını değerlendirmek maksadı ile performans kriteri olarak ortalama hata karesi (MSE) ve çıktılar ile hedefler arasındaki korelasyonu ifade eden regresyon (R) değerleri kullanılmıştır. Bu kapsamda bir gizli tabakalı ve 15 gizli düğümlü yapı en iyi tahmin performansını ve hassasiyetini sağlamış bulunmaktadır. Bu model yapısı ile elde edilen sonuçların özeti Çizelge 4.9'da verilmektedir. Seçilen bu model yapısı için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarına ait model tahminlerinin ve ölçümlerin kıyaslanması Şekil 4.54'te verilmektedir.

Çizelge 4.9. ANN MISO modeli için elde edilen model performans değerleri

Gizli Nöron Sayısı	Model Performans Parametresi					
	MSE			R		
	Eğitim	Doğrulama	Test	Eğitim	Doğrulama	Test
15	0,00091	0,00096	0,00106	0,5062	0,3941	0,4154



Şekil 4.54. MISO modelleme yaklaşımı ile 01.11.2010 – 12.11.2010 tarihleri arasında ON-68 nolu istasyon için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının ve ölçümlerin kıyaslanması

Çalışmanın ikinci aşamasında kaynaktan kayıt altına alınan serbest bakiye klor konsantrasyonları girdi, ON-68 nolu istasyonda ölçülen klor konsantrasyonları ise çıktı olarak kullanılmak sureti ile YSA tabanlı SISO modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir SISO yaklaşımında MATLAB yazılımından faydalanılmış olup, aşağıda verilen kısıt koşullar benimsenmiştir:

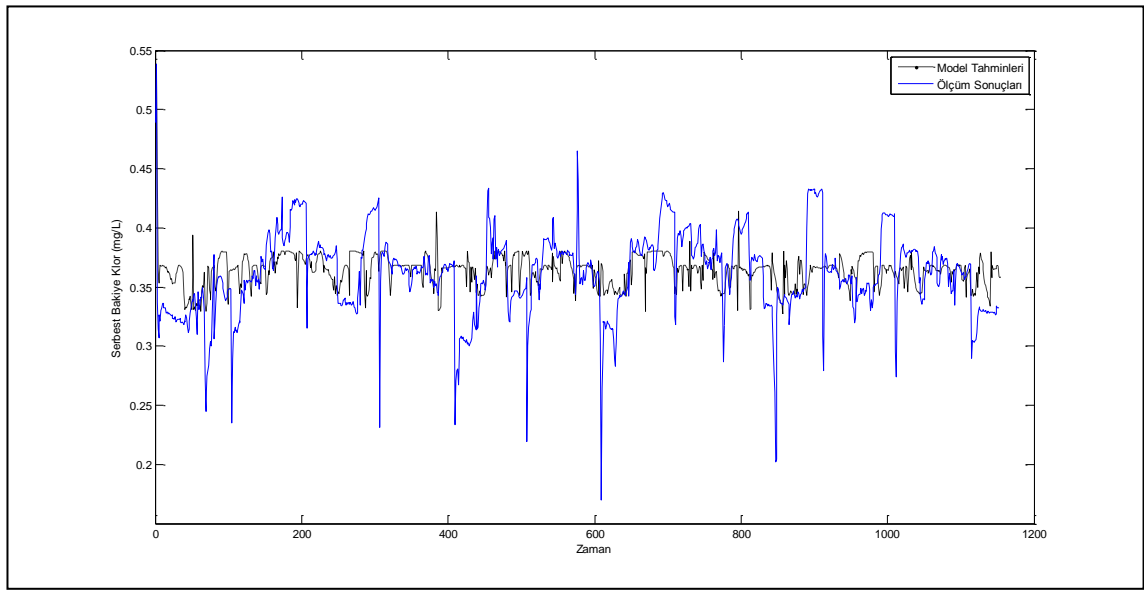
- i) Öğrenme sürecinde çok katmanlı algılayıcı (MLP: multi layer perceptron) kullanılmıştır.
- ii) En az düğüm sayısı 5, en fazla düğüm sayısı 15 olarak seçilmiştir.
- iii) 20 Aday yapı denenerek; en iyi performansa sahip olanı kullanılmıştır.
- v) Veriler eğitim, test ve doğrulama aşamaları için üç kısma ayrılmıştır. Verilerin %50'si eğitim, %25'i test ve %25'i doğrulama için kullanılmıştır.

Model çalışmalarının sonuçlarını değerlendirmek maksadı ile performans kriteri olarak ortalama hata karesi (MSE) ve çıktılar ile hedefler arasındaki korelasyonu ifade eden regresyon (R) değerleri kullanılmıştır. Bu kapsamda bir gizli tabakalı ve 9 gizli düğümlü yapı en iyi tahmin performansını ve hassasiyetini sağlamış bulunmaktadır. Bu model yapısı ile elde edilen sonuçların özeti Çizelge 4.10'da verilmektedir. Seçilen bu

model yapısı için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarına ait model tahminlerinin ve ölçümlerin kıyaslanması Şekil 4.55'te verilmektedir.

Çizelge 4.10. ANN SISO modeli için elde edilen model performans değerleri

Gizli Nöron Sayısı	Model Performans Parametresi					
	MSE			R		
	Eğitim	Doğrulama	Test	Eğitim	Doğrulama	Test
9	0,00100	0,00109	0,00128	0,4032	0,2664	0,2428



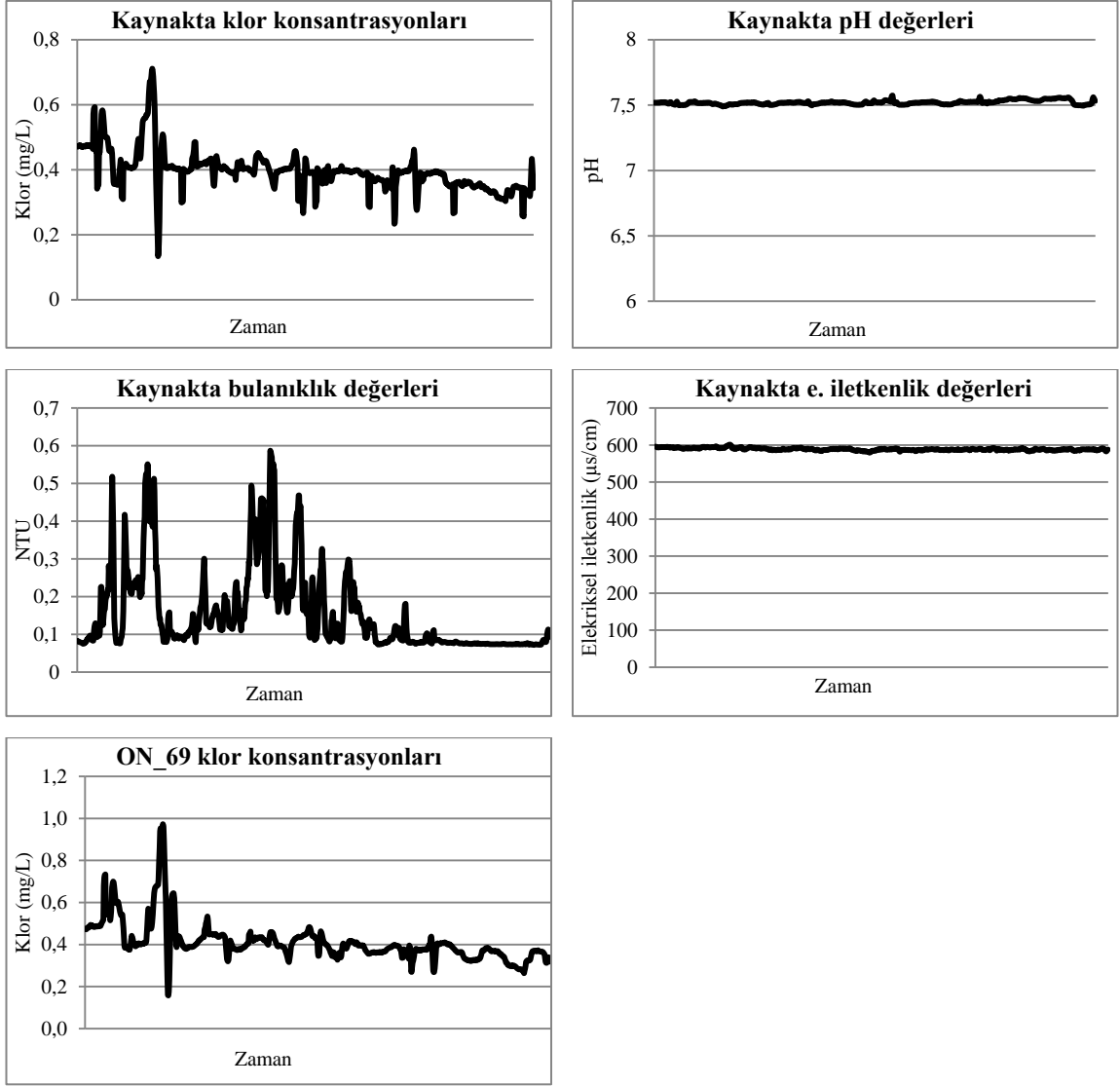
Şekil 4.55. SISO modelleme yaklaşımı ile 01.11.2010 – 12.11.2010 tarihleri arasında ON-68 nolu istasyon için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının ve ölçümlerin kıyaslanması

YSA tabanlı modellerde (iyi) bir model, regresyon eğrisinin 45°'lik bir eğimle orijinden geçtiği modellerdir (Şen, 1996). YSA tabanlı modelleme çalışmalarının ilk aşaması için elde edilen modeller tahminler ile uyumluluk göstermemektedir. Bunun sebebi ise kaynaktan ve hedef ölçüm istasyonunda elde edilen verilerin güvenilirliklerinin düşük olmasıdır. Bu sebeple farklı tarihler arasında kaynaktan ve ON-69 nolu ölçüm istasyonunda elde edilen daha güvenilir veriler kullanılmak sureti ile ikinci periyot modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

#### 4.6.2. YSA tabanlı modelleme yaklaşımları ikinci periyodu

YSA tabanlı modelleme çalışmalarının ikinci periyodunda 23.09.2009 - 02.10.2009 tarihleri arasında 15 dakika zaman aralıklı olarak Boğaçay Pompa İstasyonu'ndan ve ON-69 nolu online ölçüm istasyonundan elde edilen veriler kullanılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında kaynaktan kayıtlı altına alınan pH, bulanıklık, elektriksel iletkenlik değerleri ve klor konsantrasyonları girdi, ON-69 nolu istasyonda ölçülen klor konsantrasyonları ise çıktı olarak kullanılmak sureti ile YSA tabanlı MISO modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. 23.09.2009 - 02.10.2009 tarihleri arasında 15 dakika zaman aralıklı olarak kaynaktan ve hedef olarak kullanılan ON-69 nolu istasyonda elde edilen su kalitesi parametreleri Şekil 4.56'da verilmektedir. MISO yaklaşımında MATLAB yazılımından faydalanılmış olup, aşağıda verilen kısıt koşullar benimsenmiştir:

- i) Öğrenme sürecinde çok katmanlı algılayıcı (MLP: multi layer perceptron) kullanılmıştır.
- ii) En az düğüm sayısı 5, en fazla düğüm sayısı 15 olarak seçilmiştir.
- iii) 20 Aday yapı denenerek; en iyi performansa sahip olanı kullanılmıştır.
- v) Veriler eğitim, test ve doğrulama aşamaları için üç kısma ayrılmıştır. Verilerin %50'si eğitim, %25'i test ve %25'i doğrulama için kullanılmıştır.

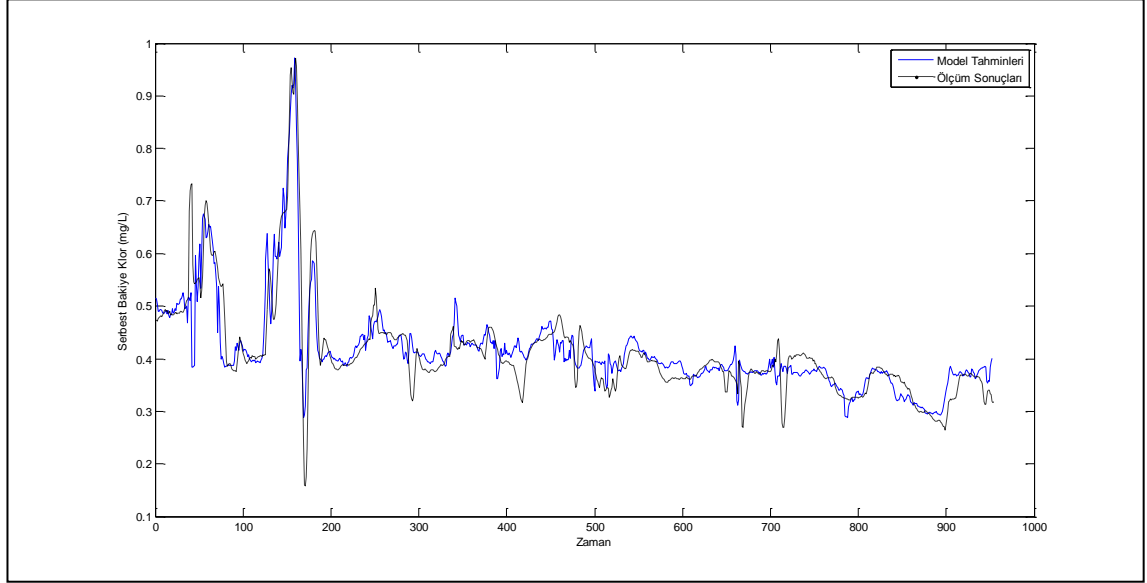


Şekil 4.56. 23.09.2009 - 02.10.2009 tarihleri arasında Boğaçay Pompa İstasyonu'nda ve ON-69 nolu online ölçüm istasyonunda elde edilen su kalite parametreleri

Model çalışmalarının sonuçlarını değerlendirmek maksadı ile performans kriteri olarak ortalama hata karesi (MSE) ve çıktılar ile hedefler arasındaki korelasyonu ifade eden regresyon (R) değerleri kullanılmıştır. Bu kapsamda bir gizli tabakalı ve 9 gizli düğümlü yapı en iyi tahmin performansını ve hassasiyetini sağlamış bulunmaktadır. Bu model yapısı ile elde edilen sonuçların özeti Çizelge 4.11'de verilmektedir. Seçilen bu model yapısı için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarına ait model tahminlerinin ve ölçümlerin kıyaslanması Şekil 4.57'de verilmektedir.

Çizelge 4.11. ANN MISO modeli için elde edilen model performans değerleri

Gizli Nöron Sayısı	Model Performans Parametresi					
	MSE			R		
	Eğitim	Doğrulama	Test	Eğitim	Doğrulama	Test
9	0,00156	0,00241	0,00224	0,9146	0,8591	0,8565



Şekil 4.57. MISO modelleme yaklaşımı ile 23.09.2009 - 02.10.2009 tarihleri arasında ON-69 nolu istasyon için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının ve ölçümlerin kıyaslanması

Çalışmanın ikinci aşamasında kaynaktan kayıt altına alınan serbest bakiye klor konsantrasyonları girdi, ON-69 nolu istasyonda ölçülen klor konsantrasyonları ise çıktı olarak kullanılmak sureti ile YSA tabanlı SISO modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. SISO yaklaşımında MATLAB yazılımından faydalanılmış olup, aşağıda verilen kısıt koşullar benimsenmiştir:

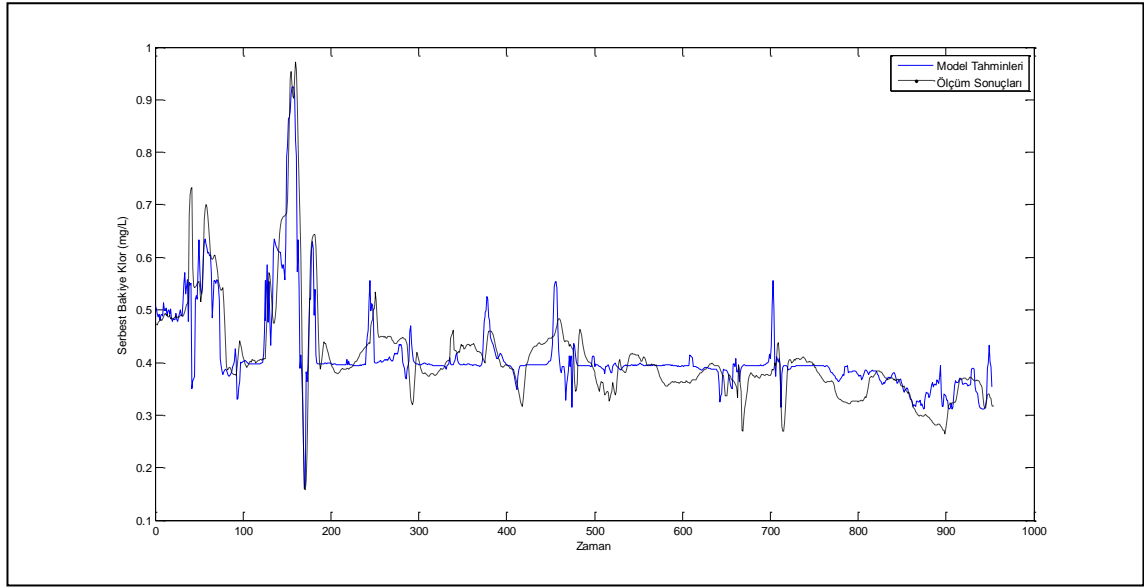
- i) Öğrenme sürecinde çok katmanlı algılayıcı (MLP: multi layer perceptron) kullanılmıştır.
- ii) En az düğüm sayısı 5, en fazla düğüm sayısı 15 olarak seçilmiştir.
- iii) 20 Aday yapı denenerek; en iyi performansa sahip olanı kullanılmıştır.
- v) Veriler eğitim, test ve doğrulama aşamaları için üç kısma ayrılmıştır. Verilerin %50'si eğitim, %25'i test ve %25'i doğrulama için kullanılmıştır.

Model çalışmalarının sonuçlarını değerlendirmek maksadı ile performans kriteri olarak ortalama hata karesi (MSE) ve çıktılar ile hedefler arasındaki korelasyonu ifade eden regresyon (R) değerleri kullanılmıştır. Bu kapsamda bir gizli tabakalı ve 10 gizli düğümlü yapı en iyi tahmin performansını ve hassasiyetini sağlamış bulunmaktadır. Bu

model yapısı ile elde edilen sonuçların özeti Çizelge 4.12’de verilmektedir. Seçilen bu model yapısı için elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarına ait model tahminlerinin ve ölçümlerin kıyaslanması Şekil 4.58’de verilmektedir.

Çizelge 4.12. ANN SISO modeli için elde edilen model performans değerleri

Gizli Nöron Sayısı	Model Performans Parametresi					
	MSE			R		
	Eğitim	Doğrulama	Test	Eğitim	Doğrulama	Test
10	0,00259	0,00275	0,00264	0,8471	0,8396	0,8411

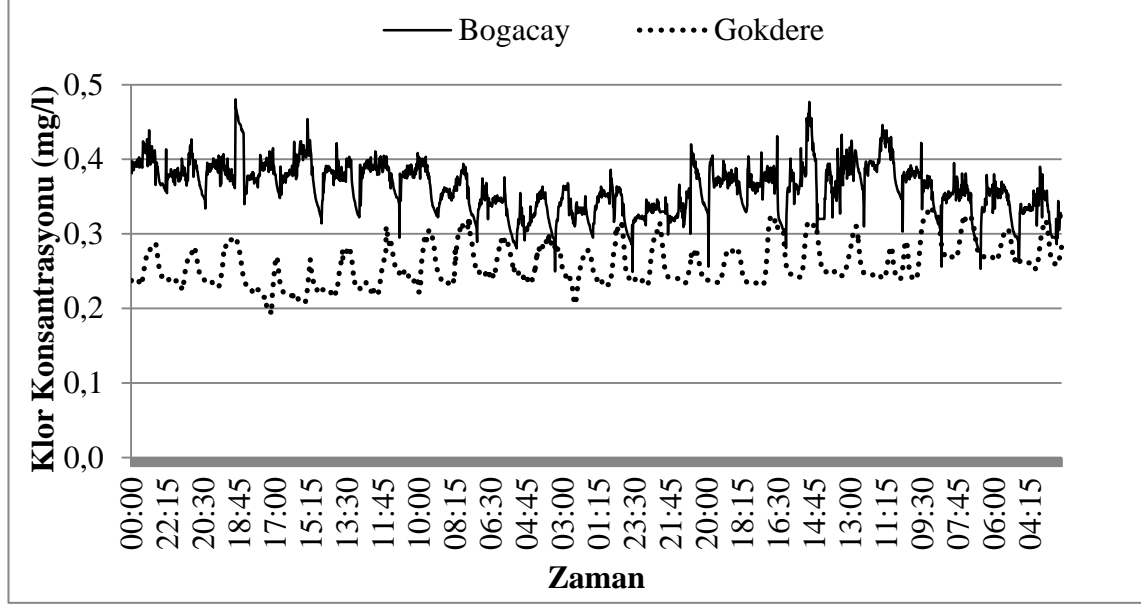


Şekil 4.58. SISO modelleme yaklaşımı ile 23.09.2009 - 02.10.2009 tarihleri arasında ON-69 nolu istasyon için tahmin edilen serbest bakiye klor konsantrasyonlarının ve ölçümlerin kıyaslanması

#### 4.6.3. Sistem tanımlama yöntemine dayalı modelleme yaklaşımları

Çalışmanın bu aşamasında girdi değişken sayısını en aza indiren ve yapay sinir ağları yöntemine alternatif oluşturabilecek veriye dayalı matematiksel yöntemler kullanan dinamik özellikler taşıyan modeller geliştirilmiştir. Sistem tanımlama yöntemine dayalı modelleme yaklaşımlarında kullanılan veriler kaynağa ve Gökdere istasyonuna kurulan ilave online klor ölçüm cihazlarından sağlanmıştır. Model seçiminde FPE ve BF performans kriterleri kullanılmış olup, 10.01.2012-02.02.2012 tarihleri arasında online klor ölçüm istasyonlarından alınan 15 dakika zaman aralıklı serbest bakiye klor konsantrasyon verileri kullanılmıştır. Kaynakta (Boğaçay) elde edilen klor konsantrasyon verilerinin girdi, Gökdere istasyonunda elde edilen klor konsantrasyon verilerinin hedef olarak kullanıldığı ARX, ARMAX ve proses modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen dinamik modellerden iletim fonksiyonuna dayalı süreç

modellerinin kullanılarak ileriye yönelik tahminlerin yapılması mümkündür ve sistem tanımlamaya dayalı modelleme yaklaşımlarında tahminler 5 adım sonrası için gerçekleştirilmiştir. Girdi ve hedef olarak kullanılan klor konsantrasyonları Şekil 4.59'da verilmektedir.



Şekil 4.59. 10.01.2012 – 02.02.2012 tarihleri arasında kaynak (Boğaçay) ve Gökdere istasyonlarında elde edilen serbest bakiye klor konsantrasyonları

Çalışmanın ilk aşamasında ARX modelleri kullanılmıştır. ARX (AutoRegressive with external input - özbağlanımlı) modellerinin genel eşitliği bağıntı (4.1)'de verilmektedir.

$$y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_{n_a}y(t-n_a) = b_1u(t-n_k) + \dots + b_{n_b}u(t-n_k-n_b+1) + e_t \quad (4.1)$$

- $y(t)$  : t anında çıktı değeri
- $n_a$  : pole sayısı
- $n_b$  : sıfırlar+1
- $n_k$  : girdi çıktıyı etkilemeden önce geçmesi gereken örnek aralığı
- $y(t-1) \dots y(t-n_a)$  : mevcut çıktının bağlı olduğu önceki çıktılar
- $u(t-n_k) \dots u(t-n_k-n_b+1)$  : Mevcut çıktının bağlı olduğu önceki ve gecikmeli girdiler
- $e(t-1) \dots e(t-n_c)$  : beyaz gürültü değerleri (hatalar)

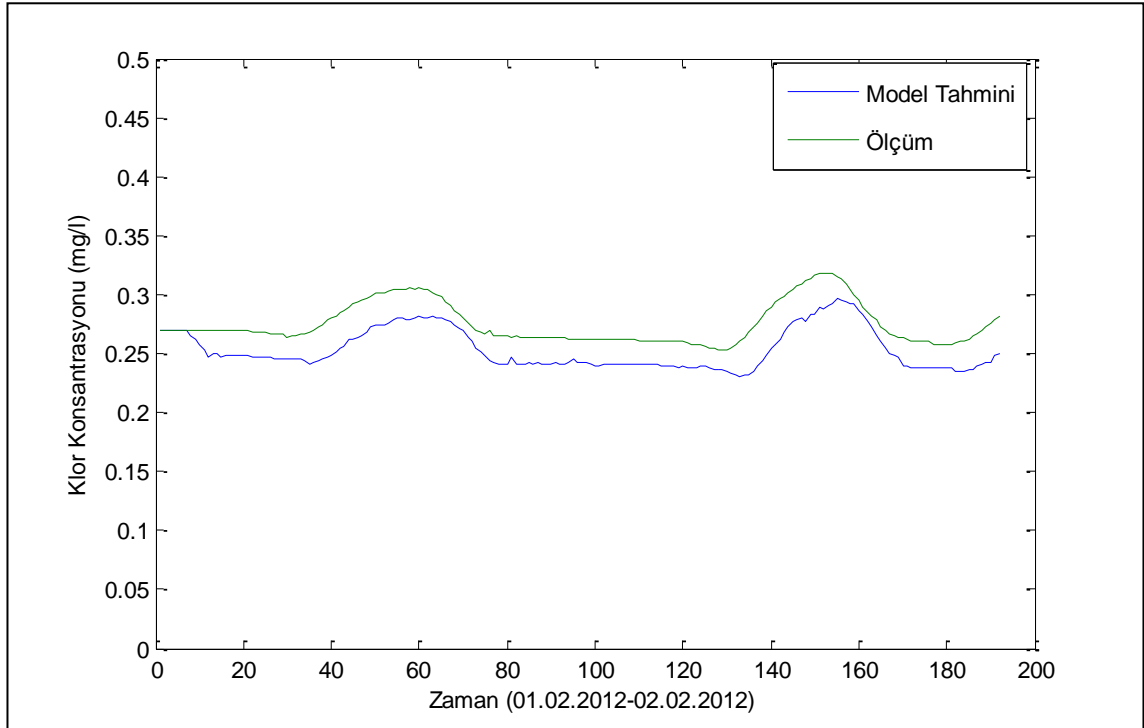
5 adım sonrası model tahminleri için farklı model yapıları elde edilmiştir. 5 adım sonrası tahminler için elde edilen model yapılarından en yüksek performansa sahip dört model yapısı ve bu modellere ait performans kriterleri Çizelge 4.13'te verilmektedir.



Çizelge 4.13. ARX model yapıları 5 adım sonrası model tahminleri için model performans kriterleri

Model Yapısı	FPE değerleri	BF (%)
ARX453	0,9815 e-005	70,11
ARX451	0,9834 e-005	70,06
ARX71	0,9852 e-005	70,06
ARX452	0,9827 e-005	70,05

Elde edilen ARX model yapılarından en yüksek performans kriterlerine ve 0,022 mg/L ortalama mutlak hataya sahip ARX453 model yapısı 5 adım sonrası model tahminleri için kullanılmış olup, model tahminleri ve ölçümlere ait kıyaslama Şekil 4.60'da verilmektedir.



Şekil 4.60. 01.02.2012 – 02.02.2012 tarihleri arasında ARX453 model yapısının 5 adım sonrası tahminleri ve ölçümlerin kıyaslanması

Çalışmanın ikinci aşamasında ARMAX modelleri kullanılmıştır. ARMAX (Autoregressive Moving Average with exogenous inputs - özbağımlı hareketli ortalamalı) modellerinin genel eşitliği bağıntı (4.2)'de verilmektedir.

$$\begin{aligned}
 A(q) y(t) &= B(q) u(t-nk) + C(q) e(t) \\
 A(q) &= 1+a_1q^{-1}+\dots\dots\dots+a_nq^{-na} \\
 B(q) &= b_1+b_2q^{-1}+\dots\dots\dots+b_{nb}q^{-nb+1}
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

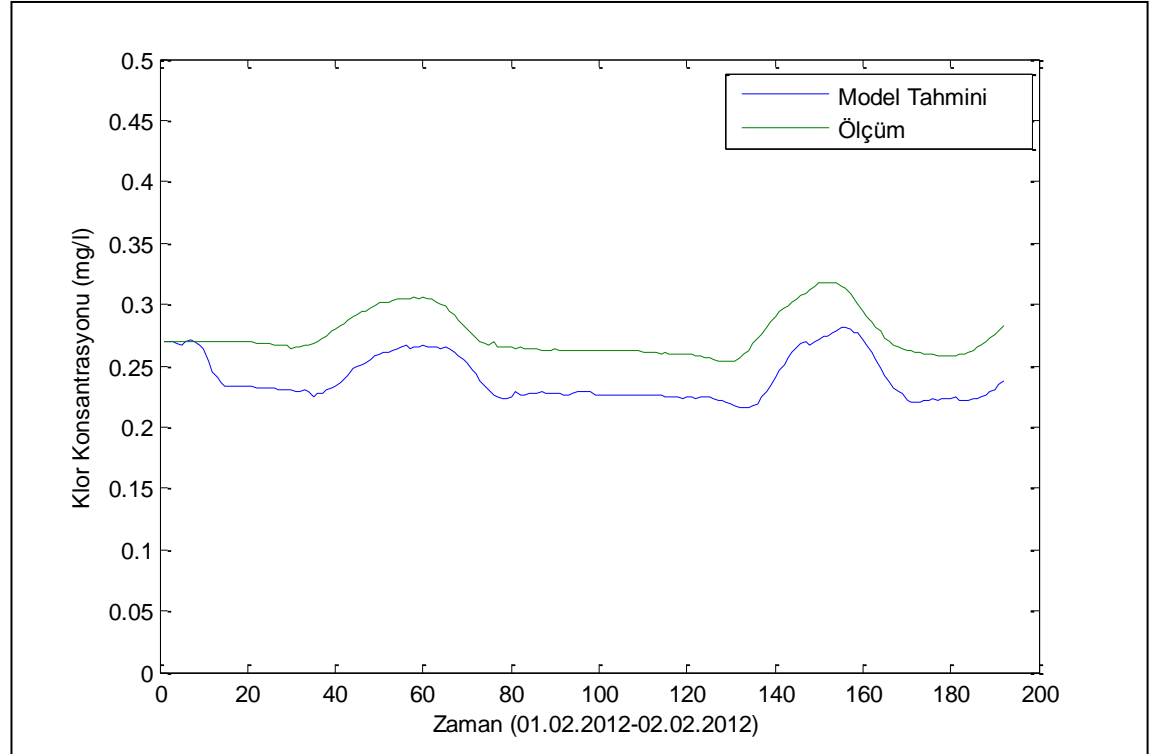
$C(q) = \text{hareketli ortalama beyaz gürültü modeli} = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc}$   
 $e(t) = \text{hatalar}$

5 adım sonrası model tahminleri için farklı model yapıları elde edilmiştir. 5 adım sonrası tahminler için elde edilen model yapılarından en yüksek performansa sahip dört model yapısı ve bu modellere ait performans kriterleri Çizelge 4.14’te verilmektedir.

Çizelge 4.14. ARMAX model yapıları 5 adım sonrası model tahminleri için model performans kriterleri

Model Yapısı	FPE değerleri	BF (%)
ARMAX2334	0,9964 e-005	71,55
ARMAX2333	0,9963 e-005	71,54
ARMAX2332	0,99964 e-005	71,53
ARMAX3222	0,9965 e-005	71,49

Elde edilen ARMAX model yapılarından en yüksek performans kriterlerine ve 0,036 mg/L ortalama mutlak hataya sahip ARMAX2334 model yapısı 5 adım sonrası model tahminleri için kullanılmış olup, model tahminleri ve ölçümlere ait kıyaslama Şekil 4.61’de verilmektedir.



Şekil 4.61. 01.02.2012 – 02.02.2012 tarihleri arasında ARMAX2334 model yapısının 5 adım sonrası tahminleri ve ölçümlerin kıyaslanması

Çalışmanın üçüncü aşamasında proses modelleri kullanılmıştır. Proses modellerinin genel eşitliği bağıntı (4.3)'te verilmektedir.

$$G(s) = \frac{K_p}{1+2*\zeta*T_w*s+(T_w*s)^2} * \exp(-T_d*s) \quad (4.3)$$

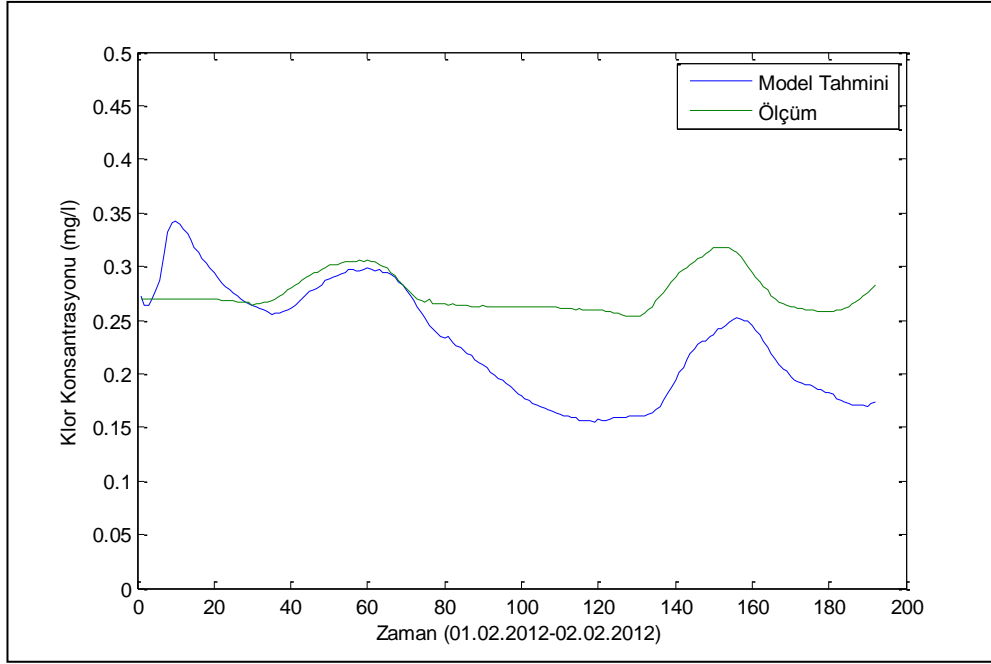
K<sub>p</sub>: Statik kazanç (iletim fonksiyonu değişkeni)  
 Zeta: Sönüm katsayısı (iletim fonksiyonu değişkeni)  
 T<sub>w</sub>: Rezonans zaman sabiti (iletim fonksiyonu değişkeni)  
 T<sub>d</sub>: Gecikme fonksiyonu (iletim fonksiyonu değişkeni)

5 adım sonrası model tahminleri için farklı model yapıları elde edilmiştir. 5 adım sonrası tahminler için elde edilen model yapılarından en yüksek performansa sahip dört model yapısı ve bu modellere ait performans kriterleri Çizelge 4.15'te verilmektedir.

Çizelge 4.15. Proses model yapıları 5 adım sonrası model tahminleri için model performans kriterleri

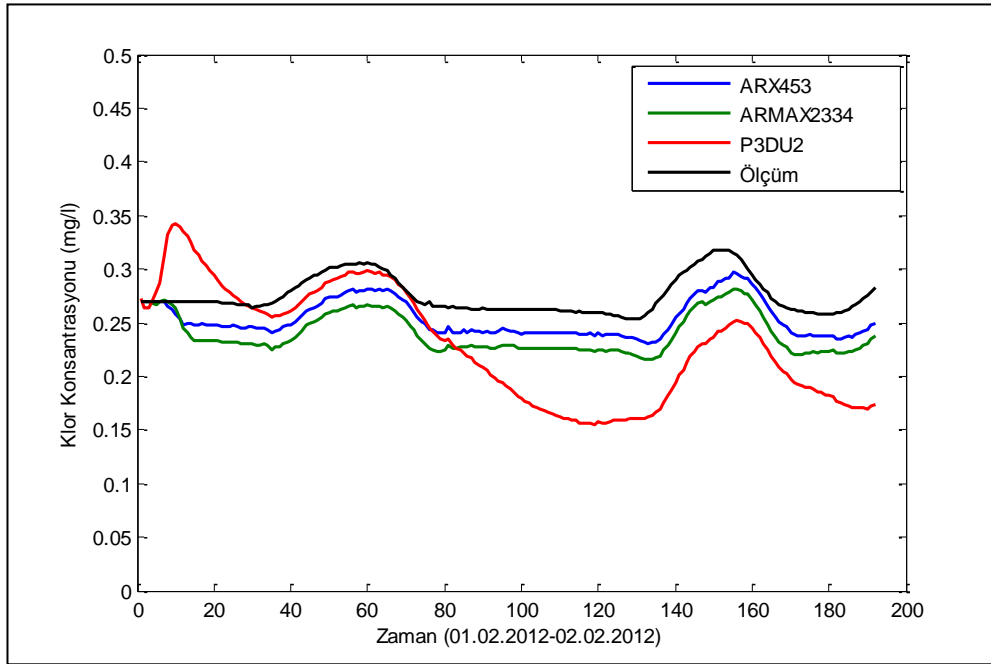
Model Yapısı	FPE değerleri	BF (%)
P3DU2	0,0962 e-005	70,77
P3D2	0,0983 e-005	70,23
P3DU1	0,1069 e-005	64,15
P3D1	0,1191 e-005	58,44

Elde edilen proses model yapılarından en yüksek performans kriterlerine ve 0,054 mg/L ortalama mutlak hataya sahip P3DU2 model yapısı 5 adım sonrası model tahminleri için kullanılmış olup, model tahminleri ve ölçümlere ait kıyaslama Şekil 4.62'de verilmektedir.



Şekil 4.62. 01.02.2012 – 02.02.2012 tarihleri arasında P3DU2 model yapısının 5 adım sonrası tahminleri ve ölçümlerin kıyaslanması

Sistem tanımlamaya dayalı modelleme yaklaşım çalışmaları kapsamında kullanılan üç farklı model yaklaşımında en iyi tahmin özelliklerine sahip modellerin klor konsantrasyonları model tahminleri ile ölçümlerinin kıyaslanması Şekil 4.63'te verilmektedir.



Şekil 4.63. Geliştirilen veriye dayalı matematiksel dinamik modellerin 5 adım sonrası tahminleri ile ölçümlerin kıyaslanması

## 5. TARTIŞMA

Çalışma bölgesinde yapılan su kalitesi ölçüm ve analiz çalışmaları neticesinde çalışma bölgesindeki su kalitesinin ölçülen parametreler nazarında yüksek olduğu belirlenmiştir (Kitiş vd. 2010, Soyupak vd. 2011, Karadirek vd. 2014a). Çalışma bölgesinde yapılan ölçüm ve analiz çalışmaları Boğacay yeraltı su kaynağında bulanıklık ve toplam organik seviyelerinin oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Çalışma neticesinde SUVA<sub>254</sub> (254 NM dalga boyunda UV absorbanası) değerlerinin genellikle 2 L/mg-m değerinin altında olduğu ve bununda ham suyun kaynakta genel olarak hidrofilik ve hümit olmayan karakterde olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar çalışma alanında yapılan ölçümler sonucu elde edilen düşük THM verilerini de doğrulamaktadır (Kitiş vd. 2010).

Su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının yönetiminde dezenfeksiyon yan ürünleri ile ilgili çalışmalar göz önünde bulundurulmalı ve klor yönetimi bu çalışmalara göre yapılmalıdır. Tez çalışması kapsamında 2008 – 2011 yılları arasında 30 aylık dönemde 6 aylık aralıklarla kaynakta klor dozlanması sonrasında ve su dağıtım şebekesinin 23 noktasında THM ölçümleri yapılmış olup, en yüksek toplam THM konsantrasyonu 23 µg/L olarak tespit edilmiştir. Ham suyun organik madde ve bromür gibi THM konsantrasyonlarında etken parametrelerin konsantrasyonlarının düşük olması ile bu durum açıklanmaktadır. Düşük THM konsantrasyonları nedeni ile çalışma bölgesinde dezenfeksiyon yan ürünleri ile ilgili ek bir çalışmaya gerek duyulmamıştır.

Deterministik modelleme yaklaşımında girdi parametresi olarak kullanılan serbest klor ana akım bozunma katsayısı üç ayrı dönemde mevsimsel değişimlerin ve su sıcaklığının  $K_b$  üzerine etkilerini de içerecek şekilde tayin edilmiştir (Altındal 2010). Elde edilen verilerin istatistiksel değerlendirmesi yapılmış olup, klor ana akım bozunmasının birinci derece reaksiyon kinetiğine uyduğu tespit edilmiştir (Karadirek vd. 2014a). Üç farklı sıcaklık değeri ve üç farklı periyotta yapılan çalışmalarda en düşük  $R^2$  değeri 0,956 en yüksek  $R^2$  değeri ise 0,987 olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde 15 °C için ortalama  $K_b$  değeri 0,06420/gün, 20 °C için ortalama  $K_b$  değeri 0,13156/gün ve 30 °C için ortalama  $K_b$  değeri 0,19897/gün olarak bulunmuştur. Literatürde  $K_b$  değerlerinin 0,070/gün ile 17,760/gün arasında değiştiği bildirilmektedir (Powell vd. 2000). Çalışma bölgesinde elde edilen görece düşük  $K_b$  değerleri, çalışma bölgesindeki su kalitesinin iyi olması ile desteklenmektedir. Çalışma bölgesinde mevsimsel değişimlerin klor ana akım bozunma katsayısı üzerine etkisi çok düşüktür. Yapılan çalışmalarda aynı sıcaklık değerlerinde farklı mevsimlerde elde edilen serbest klor ana akım bozunma katsayısı değerleri birbirine çok yakındır ki; bu durum çalışma bölgesinde 30 ay süresince gerçekleştirilen su kalitesi ölçüm ve analiz çalışmaları ile de desteklenmektedir.

Çalışma bölgesinde klor konsantrasyonlarının yönetimi maksadı ile yapılan deterministik modelleme çalışmaları klor ana akım bozunma katsayısının belirlenmesini takiben, su dağıtım şebekesinin fiziksel bileşenlerinin modele girilmesi aşamasına geçilmiştir. ASAT coğrafi bilgi sistem veri tabanının kullanıldığı model girdi dosyalarının oluşturulmasında, su dağıtım şebekesinin fiziksel bileşenleri sahada da incelenmiş ve gerektiğinde gerekli düzeltmeler yapılarak model girdi dosyaları oluşturulmuştur. Coğrafi bilgi sistemlerine ait veriler genellikle güncellenmemektedir,

bu nedenle modelleme çalışmalarından önce güncellenmesi önem taşımaktadır. EPANET hidrolik ve su kalitesi modelinin kullanıldığı deterministik modelleme yaklaşımında su dağıtım şebekesinin fiziksel bileşenlerinin yanı sıra düğüm noktalarında temel su tüketim verileri sahada bulunan online debi ölçüm cihazlarından elde edilen veriler ve ASAT abone bilgi sistemi verileri kullanılarak elde edilmiştir.

Model girdi dosyalarının oluşturulmasını takiben çalışma sahasında iki farklı alt bölgede (6., 18. alt bölgeler) hidrolik model kalibrasyon çalışmaları gerçekleştirilmiş ve deneme yanılma yöntemi ile boru cidar pürüzlülük katsayısı hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında su basıncı model tahminleri ile sahada yapılan su basıncı ölçümleri kıyaslanmış ve en düşük ortalama mutlak hata değerini veren boru cidar pürüzlülük katsayıları hesaplanmıştır. Bu kapsamda çalışma bölgesinde nispeten yüksek boru yaşına sahip bölgelerde boru cidar pürüzlülük katsayısı Hazen-Williams eşitliği için 100, nispeten daha düşük boru yaşına sahip bölgelerde ise 120 olarak belirlenmiş ve sonraki çalışmalarda bu değerler kullanılmıştır. Boru yaşı ve cinsi gibi özelliklere bağlı olarak boru pürüzlülük katsayısı genellikle 90 – ile 140 arasında değerler almakta olduğu bilinmektedir. Genellikle çok eski ve plastik dışındaki borularda boru pürüzlülük katsayısı 100'ün altındaki değerleri almaktadır. Bu çalışma için boru cidar pürüzlülük katsayısı yalnızca basınç tahminleri etkilemekte, klor konsantrasyonlarının tahminleri için bir etkide bulunmamaktadır (TÜBİTAK 2011).

Hidrolik model kalibrasyon çalışmasını takiben su kalitesi modeli kalibrasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda dört alt (2, 4, 6 ve 8. alt bölgeler) bölge kalibrasyon çalışmaları için seçilmiştir. Seçilen dört alt bölgede dört farklı zamanda kalibrasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda kalibrasyonu yapılan parametre klor boru cidar bozunma katsayısı ( $K_w$ ) Kalibrasyon çalışmasının ilk periyodu normal işletme koşullarında  $K_w$  değerinin deneme yanılma yöntemi kullanılarak tespitine dayanmaktadır. Seçilen dört farklı alt bölgede klor konsantrasyonu model tahminleri ile sahada yapılan klor ölçüm değerleri kıyaslanmıştır. Nispeten düşük klor ana akım ve boru cidar bozunma katsayısının olduğu çalışma sahalarındaki modelleme çalışmalarında hatalı hidrolik modele rağmen serbest bakiye klor konsantrasyonları için yapılan tahminler doğru çıkabilir. Düşük bozunma kinetikleri sebebi ile şebekenin farklı noktalarında ölçülen klor konsantrasyonu seviyeleri birbirlerine benzer değerlerde görülür. Bu nedenle kalibrasyon çalışmasının ikinci periyodunda, model yeteneklerinin test edilmesi maksadı ile kaynaktan klor konsantrasyonları üç saatlik bir süre içerisinde 1 mg/L'ye kadar artırılıp tekrar normal işletme koşullarında uygulanan 0,4 – 0,5 mg/L seviyelerine kadar indirilmiştir. Bu süre içerisinde kalibrasyon çalışması için seçilen dört farklı alt bölgede klor konsantrasyonu model tahminleri ile sahada ölçülen klor konsantrasyonları kıyaslanmıştır. Yapılan çalışmada klor konsantrasyonlarındaki ani değişimi yakalamakta zorlanan online klor ölçüm cihazları nedeni ile genel olarak model tahminleri ve ölçümler arasında özellikle yüksek konsantrasyonlarda normal koşullardaki model tahminlerine nazaran daha az hassas model tahminleri ile karşılaşmıştır. Ayrıca 2. alt bölgede seçilen bir numune istasyonunda model tahminleri ile saha ölçümleri arasında oldukça önemli bir fark olduğu tespit edilmiş olup, bu bölgede ayrıca saha çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde bölgede işlevini yitirmiş bir açma kapama vanası tespit edilmiş olup, çalışmanın sonraki aşamalarında bu arıza giderilmiştir. Kalibrasyon çalışmalarının üçüncü periyodunda kaynaktan dozlanan klor konsantrasyonları altı saatlik süre

içerisinde kademeli olarak 1 mg/L'ye kadar yükseltilmiş ve tekrar normal işletme koşullarında dozlanan 0,4 – 0,5 mg/L seviyelerine kadar indirilmiştir. Kalibrasyon çalışmasının dördüncü periyodunda bu dört alt bölge içerisinden 6. alt bölge seçilmiş ve daha uzun süreli bir modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon çalışmalarındaki dört farklı periyotta elde edilen klor konsantrasyonu model tahminleri ile saha ölçümleri kıyaslanmış ve  $K_w$  0 ile -0,3 m/gün arasındaki değerler kullanılarak en düşük ortalama mutlak hata değerleri hesap edilmiştir. Bu çalışma sonrasında en düşük ortalama mutlak hata değerini veren -0,01 m/gün değeri,  $K_w$  değeri olarak belirlenmiştir.  $K_w$  değerinin 0 değerinden başlayarak boru cinsi, yaşı gibi etkenlere bağlı olarak arttığı bildirilmektedir (Rossman 2000). Çalışma bölgesindeki nispeten düşük  $K_w$  değeri, bölgedeki boru yaşının nispeten düşük olması ile açıklanmaktadır.

Çalışma bölgesinin alt bölgelere ayrılması su kalitesi modelinin tahmin hassasiyetlerinin artırılmasına yardımcı olmuştur. Şebekenin tamamı yerine daha küçük bağımsız alt bölgelerde başlatılan çalışmada her bir alt bölgenin bağımsız modelleme çalışmasına olanak tanınması bu hassasiyetin önemli sebeplerindedir. Su dağıtım şebekelerinin alt bölgelere ayrılması ağ şebeke sisteminde daha fazla ölü nokta oluşmasına sebep olacağından ayırma işlemlerinde su kalitesi göz önünde bulundurulmalıdır. Çalışma bölgesinde yapılan model kalibrasyonu, doğrulaması ve klor konsantrasyonlarının yönetimi çalışmalarında su dağıtım şebekesinde kalitatif ve kantitatif parametrelerin online olarak izlenmesine ve bu verilerin saklanmasına olanak tanıyan SCADA sistemi faydalı olmuştur. Çalışma bölgesine eklenen kalitatif ve kantitatif ölçüm cihazları ile bu cihazlardan alınan verilerin anlık ve geçmişe dönük olarak SCADA sistemi sayesinde takibi, çalışma bölgesinin kontrollü olarak işletilmesine ve irdelenmesine imkan tanımıştır.

Kalibrasyon çalışmasını takiben kalibrasyon parametrelerinin doğrulanması maksadı ile model doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Su kalitesi modeli doğrulama çalışmaları farklı zaman dilimlerinde dört farklı periyotta gerçekleştirilmiştir. Su kalitesi modeli doğrulama çalışması birinci periyodu kalibrasyon çalışmalarının yapıldığı alt bölgelerde gerçekleştirilmiş olup, kalibrasyonda tespit edilen -0,01 m/gün klor boru cidar bozunma katsayısı kullanılarak klor konsantrasyonu model tahminleri ile saha ölçümleri kıyaslanmıştır. Bu çalışma neticesinde elde edilen klor konsantrasyonu model tahminleri ile ölçümler arasındaki görece düşük ortalama mutlak hata değerleri görece düşük  $K_w$  değerini doğrulamaktadır. Su kalitesi modeli doğrulama çalışmalarının ikinci periyodunda ise birinci doğrulama periyodundan farklı olarak 17-a, 17-b ve 18. alt bölgelerde klor konsantrasyonu model tahminleri ile ölçümler kıyaslanmış ve istatistiki değerlendirmelere göre model tahminleri ile saha sonuçları birbirleri ile görece iyi uyumlu vermiştir. Su kalitesi modeli doğrulama çalışmalarının üçüncü periyodunda pilot çalışma bölgesinin doğu yakasında gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışma neticesinde oldukça iyi sonuçlar elde edilmiş olup,  $K_w$  değeri bu çalışmada da doğrulanmıştır. Kalibrasyon ve doğrulama çalışmaları genel olarak parçadan bütüne doğru aşama aşama gerçekleştirilmiş olup, su kalitesi modeli doğrulama çalışmaları pilot çalışma bölgesinin tamamının modellenmesi sonucunda klor konsantrasyonu model tahminleri ile saha ölçümleri kıyaslanmış ve oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Su kalitesi kalibrasyon parametresi

Kalibrasyon ve doğrulama çalışmaları yapılan hidrolik ve su kalitesi modeli çalışma bölgesinde kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonlarının tespiti için yönetim senaryolarında kullanılmıştır. Yönetim ve senaryo analiz çalışmaları olarak adlandırılan bu çalışma paketinde, ölçüm ve analiz çalışmalarında elde edilmiş olan su dağıtım şebekesindeki su sıcaklıkları, online ölçüm istasyonlarından elde edilen çalışma bölgesine terfi edilen debi değerleri kullanılarak sekiz farklı senaryo geliştirilmiştir.

Birinci senaryo kapsamında su dağıtım şebekesinde en fazla su tüketiminin gerçekleştiği yaz aylarında şebekedeki minimum klor konsantrasyonunun en düşük 0,2 mg/L olması için Boğaçay pompa istasyonunda dozlanması gereken klor konsantrasyonu tespit edilmiştir. Birinci senaryo kapsamında kullanılan debi değerleri, Konyaaltı su dağıtım şebekesinde bir yıl içinde görülebilecek en yüksek debi değerleridir (2010 yılı Temmuz ayı). Yaz aylarında yüksek klor ana akım bozunma hızına karşın, su dağıtım şebekesinde yüksek su hızları meydana gelir. Birinci senaryo kapsamında kullanılan debi değerleri ve klor ana akım bozunma katsayısı sonucu elde edilen model sonuçları incelendiğinde bu değerler için Boğaçay pompa istasyonunda 0,35 mg/L klor dozlamasının yeterli olduğu tespit edilmiştir.

İkinci yönetim senaryosu kapsamında gerçekleştirilen çalışma sonucunda, şebekedeki su sıcaklığı 30 °C değerlerine ulaşması durumunda, birinci senaryo çalışmasında kullanılan debi değerlerine nazaran debi değerleri su dağıtım şebekesinde bulunduğu (yaz periyodunda) 0,35 mg/L klor dozlamasının yeterli olmayacağı intibası oluşmuş ve tespit edilmiştir. Bu kapsamda debi değerlerinin daha düşük olduğu fakat su sıcaklıklarının birinci senaryo çalışmasına nispeten daha yakın olduğu 2010 Haziran ayı debi değerleri kullanılmış olup, yaz aylarında Boğaçay pompa istasyonunda dozlanması tavsiye edilen klor konsantrasyonu 0,45 mg/L olarak tespit edilmiştir. Su tüketim verilerinin birinci yönetim senaryosuna göre düşük olması sebebi ile su dağıtım şebekesinde alıkonma süreleri artmakta iken yüksek su sıcaklığında klor bozunması da artmaktadır. Bu nedenle ikinci senaryo yönetimi çalışmasında kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonunun birinci yönetim senaryosuna göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Üçüncü yönetim senaryosu çalışması kapsamında su dağıtım şebekesinde en az su tüketiminin gerçekleştiği kış aylarında (2010 Aralık ayı) şebekedeki minimum klor konsantrasyonunun en az 0,2 mg/L olması için Boğaçay pompa istasyonunda dozlanması gereken klor konsantrasyonu tespit edilmiştir. Kış aylarında düşük klor ana akım bozunma katsayısına karşın su dağıtım şebekesinde düşük su hızları ile karşılaşmaktadır. Kış aylarında Boğaçay pompa istasyonunda dozlanması tavsiye edilen klor konsantrasyonu 0,35 mg/L'dir.

Dördüncü yönetim senaryosu kapsamında su dağıtım şebekesinde görülebilecek en fazla su tüketim miktarlarında (2010 Temmuz ayı) fiziksel su kayıplarının azaltılması durumunda karşılaşılabilecek su tüketim miktarları kullanılarak modelleme çalışmaları yapılmış ve şebekedeki en az klor konsantrasyonunun en az 0,2 mg/L olması için Boğaçay pompa istasyonunda dozlanması gereken klor konsantrasyonu tespit edilmiştir. Dördüncü yönetim senaryosu kapsamında model sonuçları incelendiğinde birinci yönetim senaryosu ile sonuçlar paraleldir. Bu durumda tavsiye edilen kaynaktaki klor dozlaması 0,35 mg/L değerine oldukça yakındır. Bu yönetim senaryosunda su alıkonma



süresi birinci yönetim senaryosuna nazaran daha düşüktür. Bu nedenle birinci yönetim senaryosuna göre daha yüksek klor dozajı gereksinimi beklenmektedir. Fakat klor ana akım ve boru cidar bozunma katsayılarının düşük olması sebebi ile kaynakta klor dozaj miktarları neredeyse birbirinin aynıdır.

Beşinci yönetim senaryosu, ikinci yönetim senaryosunda fiziksel su kayıplarının azaltılması durumunda karşılaşılabilecek su tüketim miktarları kullanılarak modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiş ve şebekedeki en düşük klor konsantrasyonunun 0,2 mg/L olması için Boğaçay pompa istasyonunda dozlanması gereken klor konsantrasyonu tespit edilmiştir. Beşinci yönetim senaryosu model sonuçları incelendiğinde ikinci yönetim senaryosu ile sonuçlar paraleldir. Klor ana akım ve boru cidar bozunma katsayılarının çok düşük olması sonuçların bu paralelliğini açıklamaktadır. Bu durumda tavsiye edilen kaynaktaki klor dozlaması 0,45 mg/L'dir.

Altıncı yönetim senaryosu üçüncü yönetim senaryosunda fiziksel su kayıplarının azaltılması durumunda karşılaşılabilecek su tüketim miktarları kullanılarak modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiş ve şebekedeki en düşük klor konsantrasyonunun 0,2 mg/L olması için Boğaçay pompa istasyonunda dozlanması gereken klor konsantrasyonu tespit edilmiştir. Altıncı yönetim senaryosu model sonuçları incelendiğinde üçüncü yönetim senaryosu ile sonuçlar paraleldir. Bu durumda tavsiye edilen kaynaktaki klor dozlaması 0,35 mg/L'dir. Klor ana akım ve boru cidar bozunma katsayılarının çok düşük olması sonuçların bu paralelliğini açıklamaktadır.

Yedinci yönetim senaryosu kapsamında su dağıtım şebekesinde görülebilecek en yüksek su tüketim miktarlarında (2010 Temmuz ayı), Boğaçay kaynağında klor ana akım bozunma katsayısının 5 kat artması ihtimaline karşın senaryo çalışması gerçekleştirilmiştir. Yedinci yönetim senaryosu kapsamında elde edilen sonuçlar incelendiğinde, su dağıtım şebekesinde en düşük serbest bakiye klor konsantrasyonunun 0,2 mg/L olması için Boğaçay pompa istasyonunda dozlanması gereken klor konsantrasyonu 0,60 mg/L'dir.

Sekizinci yönetim senaryosu kapsamında su dağıtım şebekesinde görülebilecek en düşük su tüketim miktarlarında, Boğaçay kaynağında klor ana akım bozunma katsayısının 5 kat artması ihtimaline karşın senaryo çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sekizinci yönetim senaryosu kapsamında elde edilen sonuçlar incelendiğinde, su dağıtım şebekesinde minimum serbest bakiye klor konsantrasyonunun 0,2 mg/L olması için Boğaçay pompa istasyonunda dozlanması gereken klor konsantrasyonu 0,45 mg/L'dir.

Deterministik modelleme çalışmaları neticesinde kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonları en kötü ihtimaller göz önünde bulundurularak tespit edilmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1'de özetlenmiştir. Bu çalışma neticesinde uygulama kolaylığı sağlaması ve online klor ölçüm cihazlarının hassasiyetinden kaynaklı oluşabilecek hataları en aza indirmesi maksadı ile kış aylarında kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonlarının kış aylarında 0,40 mg/L, yaz aylarında 0,50 mg/L diğer dönemlerde ise 0,40 – 0,50 mg/L değerleri arasında olması önerilmektedir. Bu değerler görece olarak düşük değerlerdir. Bunun ana sebebi ise çalışma bölgesindeki klor ana akım ve boru cidar bozunma katsayılarının nispeten düşük olmasıdır. Düşük

klor ana akım ve boru cidar bozunma katsayılarının sebebi ise çalışma bölgesine temin edilen ham suyun toplam organik karbon, bromür, amonyum, demir gibi klor tüketimi üzerinde etkili parametrelerin düşük konsantrasyonlarda olması ve çalışma bölgesindeki boruların nispeten yeni ve klor tüketimlerinin düşük olmasıdır.

Çizelge 5.1. Klor yönetim senaryoları kapsamında kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonları (Karadirek vd. 2014a)

Senaryo	1	2	3	4	5	6	7	8
Klor konsantrasyonu (mg/L)	0,35	0,45	0,35	0,35	0,45	0,35	0,60	0,45

Elde edilen sonuçlar ışığında Konyaaltı su dağıtım şebekesi klor dozlama istasyonunda debiye duyarlı otomatik klor dozlaması yapılması önerilmektedir. Yönetim senaryoları, klor dozlamasının debiye duyarlı olarak otomatik ve konsantrasyonların sabit olduğu kabullerine göre gerçekleştirilmiştir.

Deterministik modelleme çalışmalarını takiben klor konsantrasyonlarının modellenmesi amacı ile veriye dayalı modelleme yaklaşımları kullanılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak kaynakta online olarak ölçülen su kalitesi parametrelerinin girdi, su dağıtım şebekesinde fiziksel olarak en uzakta bulunan online su kalitesi ölçüm istasyonu (ON-68) klor konsantrasyonu verilerinin çıktı olarak kullanıldığı YSA tabanlı modelleme yaklaşımı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada ilk olarak 20 aday yapının denendiği MISO yaklaşımı sonrasında ise SISO yaklaşımı ile modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiş olup, model verilerinin güvenilirliğinin düşük olması sebebi ile model tahminleri ile ölçümler arasında büyük farklılıklar ortaya çıkmıştır. YSA tabanlı modelleme çalışmaları ikinci periyodu farklı veri setlerinin kullanılması ile gerçekleştirilmiştir. Kaynakta elde edilen online su kalitesi parametrelerinin girdi, su dağıtım şebekesinde fiziksel olarak birinci modelleme periyodunda kullanılan online ölçüm istasyonundan sonra kaynağa fiziksel olarak en uzak nokta olan online su kalitesi ölçüm istasyonu (ON-69) klor konsantrasyon verilerinin çıktı olarak kullanıldığı YSA tabanlı modelleme çalışmalarının ikinci periyodu gerçekleştirilmiştir. Birinci modelleme periyoduna nazaran daha iyi sonuçların alındığı ikinci modelleme periyodunda da arzu edilen sonuçlara ulaşılamamıştır ve bu nedenle çalışmanın geriye kalan kısmında sistem tanımlamaya dayalı modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sistem tanımlamaya dayalı modelleme yaklaşımları kapsamında, deterministik modelleme sonucunda su dağıtım şebekesinde en yüksek su yaşının tespit edildiği Gökdere istasyonuna ve klor dozlama noktasına ilave online klor ölçümleri montajı yapılarak bu istasyonlarda kayıt altına alınan verilerin sistem tanımlamaya dayalı modelleme yaklaşımları için kullanımı sağlanmıştır. Bu kapsamda kaynakta elde edilen klor konsantrasyonlarının girdi, Gökdere istasyonunda elde edilen klor konsantrasyonlarının çıktı olarak kullanıldığı tek girdi – tek çıktı ilkesine dayanan ARX, ARMAX ve proses modelleri geliştirilmiştir. Bu modelleme çalışmasında farklı model yapıları kullanılmış ve elde edilen en iyi model yapıları kıyaslanmıştır. Yapılan sistem tanımlamaya dayalı modelleme çalışmalarında YSA modelleme yöntemine göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir ve bunun sebebi olarak model verilerinin güvenilirliğinin daha yüksek olması sebep olarak tespit edilmiştir. Sistem tanımlamaya dayalı

modelleme yaklaşımlarında ise ARX model yapısı diğer model yapılarına nazaran daha iyi sonuçlar vermiştir.

Veriye dayalı modelleme yaklaşımları göreceli olarak deterministik modelleme yaklaşımından daha düşük ortalama mutlak hata değerleri vermekte ise de klor konsatrayonlarının mekansal değişimlerini tahmin edememektedir. Uygun model yapısı seçildiğinde zamansal değişimler konusunda deterministik modelleme yaklaşımından daha iyi sonuçlar elde edilen veriye dayalı modelleme yaklaşımlarında uzun süreli ve veri güvenilirliği yüksek verilere ihtiyaç duyulması veriye dayalı modelleme yaklaşımlarının dezavantajlarından birisini oluştururken, su dağıtım şebekelerinde şebekenin fiziksel bileşenlerine ait verilerin bulunmaması veya bu verilerin elde edilmesinin maliyetli ve zahmetli olduğu durumlarda kullanılması avantajlarından birisini oluşturmaktadır.

## 6. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında Konyaaltı su dağıtım şebekesinde en düşük klor konsantrasyonunun 0,2 mg/L olması için kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonları deterministik ve veriye dayalı modelleme yaklaşımları kullanılarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan veriler online ölçüm istasyonlarından sağlanmış ve bunlara ek olarak 30 ay süresince her iki ayda bir olmak üzere yapılan ölçüm ve analiz çalışmalarından faydalanılmıştır. Su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının yönetimi halk sağlığı açısından önem arz etmektedir. Su dağıtım şebekelerinin dinamik sistemler olması sebebi ile hidrolik ve su kalitesi parametreleri zamansal ve mekansal değişimler gösterir. Bu nedenle klor konsantrasyonlarının su dağıtım şebekelerinde yönetiminin gerçekleştirilebilmesi amacı ile modelleme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır ki; bu nedenle su dağıtım şebekelerinde modelleme çalışmaları bir gereksinimdir.

Su dağıtım şebekelerinde deterministik modelleme yaklaşımlarında, şebekenin fiziksel bileşenlerinin tamamına ihtiyaç duyulmaktadır. Su dağıtım şebekelerinin fiziksel bileşenlerinin model ortamına aktarılabilmesinde coğrafi bilgi sistemleri oldukça faydalı olup, gelişen bilgisayar teknolojilerinin günümüzdeki kullanım kolaylığı ve ulaşılabilirliği göz önünde bulundurulduğunda bir zorunluluk haline gelmiştir. Ülkemizde 2014 yılında su dağıtım şebekelerinde su kayıplarının azaltılması ile ilgili olarak yayımlanan yönetmelik uyarınca su kuruluşlarının su dağıtım şebekelerinde coğrafi bilgi sistemleri veri tabanlarını kurması yönetmeliğe bağlanmış olup, tüm belediyeler tarafından uygulamaya alınması beklenmektedir.

Su dağıtım şebekelerinin alt bölgelere ayrılması su dağıtım şebekelerinde meydana gelen su kayıplarının azaltılmasında oldukça faydalı olmaktadır (Karadirek 2012a). Ayrıca su dağıtım şebekelerinin alt bölgelere ayrılmasının su kalitesi modelleme çalışmalarına da katkısı olduğu ve model tahmin hassasiyetlerinin artırılmasına katkısı olduğu gözlemlenmiştir (Karadirek vd. 2014a). Su dağıtım şebekelerinin kantitatif ve kalitatif yönetiminde alt bölgelerin sağladığı faydalar gözardı edilemez lakin, su dağıtım şebekelerinde alt bölgelere ayırma işleminde var olan ölü noktalara ilaveten ölü noktalar oluştuğu için su kalitesi parametrelerinin kontrolü ve su kalitesi modeli kullanımı oldukça önemlidir (Muhammetoglu vd. 2010).

Deterministik modelleme yaklaşımları için gerekli olan su dağıtım şebekesinin fiziksel bileşenlerine ilaveten su tüketim verileri gibi hidrolik parametrelerde model girdisi olarak ihtiyaç dahilindedir. Bu durumda su dağıtım şebekelerinde kalitatif ve kantitatif parametrelerin online olarak izlenmesi ve kayıt altına alınması model hassasiyetleri açısından oldukça önemlidir. Çalışma bölgesinde online ölçüm cihazlarından elde edilen hidrolik ve su kalitesi verileri ASAT SCADA sisteminde kayıt altına alınmaktadır ki; bu sayede deterministik modelleme çalışmalarında yüksek hassasiyetli model tahminleri elde edilebilmiştir.

Su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının deterministik modelleme yaklaşımı ile modellenmesi çalışmalarında hidrolik model hassasiyeti oldukça önemlidir. Hidrolik model kalibrasyon çalışmalarında farklı yöntemler kullanılabilir. Bu kapsamda kullanılan başlıca yöntemler su dağıtım şebekesine

iz element vermek ve yangın musluğunun açılması ile su dağıtım şebekesinde olağan dışı debi değerleri elde etmektir. Tez çalışması kapsamında hidrolik model kalibrasyonu yangın musluğu açmak sureti ile olağan dışı debi değerleri oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deterministik modelleme yaklaşımlarında şebekenin tüm bileşenlerinin tespiti ve kontrolü modelleme çalışmalarından önce ve modelleme çalışmaları sırasında sağlanmalıdır.

Su dağıtım şebekesindeki düğüm noktalarının temel su ihtiyaçlarının hesabında abone veri tabanlarının kullanımı hidrolik model hassasiyetini artıran bir etkidir. Tez çalışması kapsamında düğüm noktalarının temel su ihtiyaçlarının hesaplanmasında abone veri tabanlarının kullanımı hidrolik model hassasiyetleri açısından oldukça faydalı olmuştur.

Su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının yönetimi amacı ile modelleme çalışmaları bir gereksinim olup, klor konsantrasyonlarının zamansal ve mekansal değişimlerinin mevcut yönetmeliklere uygun olup olmadığının tahminler ile kontrol edilmesinde oldukça faydalıdır. Ayrıca bu yöntemler ile kaynakta dozlanması gereken klor konsantrasyonları tespit edilebilmekte ve kullanıcıların yüksek klor konsantrasyonlarına ve buna bağlı dezenfeksiyon yan ürünlerine maruz kalmaları azaltılabilmektedir. Aynı zamanda şebekede serbest bakiye klor konsantrasyonlarının düşük değerlerde olduğu veya bulunmadığı durumları da önleyeceğinden olası bir kontaminasyon durumunda halk sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri de en aza indirmektedir. Bu durumda optimum klor dozlaması ile su kuruluşlarının kimyasal maliyetleri de azalmaktadır.

Düşük klor tüketimi neticesinde şebekede olağan durumlarda yapılan çalışmalar model yeteneklerinin tespiti için yeterli olmamaktadır. Klor tüketiminin düşük olduğu su kaynakları ile beslenen su dağıtım şebekelerinde, normal işletme koşulları dışında klor konsantrasyonlarının belirli zaman aralıklarında olağan dışı artırılması ve olağan değerlere tekrar indirilmesi ile hidrolik ve su kalitesi modelinin tahmin yeteneklerinin test edilmesinin oldukça önemli olduğu bu çalışma sonucunda tespit edilmiştir.

Çalışma bölgesinde deterministik modelleme yaklaşımlarının yanı sıra veriye dayalı modelleme yaklaşımları da kullanılarak su dağıtım şebekesinde klor konsantrasyonlarının modellenmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım kapsamında YSA tabanlı modelleme yaklaşımı ve sistem tanımlamaya dayalı modelleme yaklaşımları kullanılmış olup, veriye dayalı modelleme yaklaşımlarının klor konsantrasyonlarının zamansal değişimlerinin tahmininde daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Deterministik modelleme yaklaşımlarında su dağıtım şebekesinin fiziksel bileşenlerinin tamamına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca klor konsantrasyonlarının modellenmesi için klor bozunma katsayılarının da tespiti gerekmektedir. Tüm bu gereksinimlerin karşılanamadığı veya karşılanmasının maliyetli/zahmetli olduğu durumlarda veriye dayalı modelleme yaklaşımlarının kullanılabilmesi sonucuna ulaşılmıştır. Veriye dayalı modelleme yaklaşımlarının klor konsantrasyonlarının modellenmesinde kullanılabilmesi için uzun zaman aralığında veri güvenilirliği yüksek girdi ve çıktı parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca kaynağın girdi ve model tahmini yapılmak istenen noktanın çıktı olarak kullanıldığı bu modelleme yaklaşımlarında çıktı verilerinin hangi noktadan alınacağına belirlenmesi

oldukça görecelidir. Çalışma bölgesinde gerçekleştirilen sistem tanımlamaya dayalı modelleme yaklaşımlarında, çalışma bölgesinde klor konsantrasyonları için en kritik noktada gerçekleştirilmiştir ki; su dağıtım şebekelerinde kritik noktanın belirlenmesi için su yaşı hesabı yani bir diğer söylemle deterministik modelleme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Su dağıtım şebekelerinde su kalitesi parametrelerinin zamansal izlenmesine ilave olarak mekansal değişimleri de izlenmelidir ki; su kalitesi parametrelerinin mekansal değişimlerinin izlenmesi konusu veriye dayalı modelleme yaklaşımlarının dezavantajlarından birisini oluşturmaktadır.

Su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının yönetimi için veriye dayalı modelleme yaklaşımları kullanılması durumunda, model geliştirmek için kullanılan veri setlerinin uygunluğu en az seçilen model yapısı kadar model sonuçları üzerinde etkilidir. Özellikle düşük klor tüketiminin söz konusu olduğu içme suyu dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonları normal işletme koşullarında çok büyük değişimler göstermez. Bu gibi durumlarda geliştirilen YSA tabanlı modelleme yaklaşımlarının olağan dışı durumlarda klor konsantrasyonlarının tahmininde oldukça düşük performans gösterdiği bu çalışma neticesinde elde edilmiştir. Bu durumlarda klor konsantrasyonlarının model geliştirme aşamasında olağan dışı değişim göstermesi sağlanarak model tahmin yeteneklerinin arttığı yine bu çalışma neticesinde elde edilmiştir.

Bu çalışma su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının deterministik modelleme yaklaşımı ile yönetiminde SCADA, CBS, online izleme ve alt bölge yöntemlerinin entegre bir şekilde kullanılmasının etkili sonuçlar ortaya çıkardığını göstermiştir. Deterministik modelleme yaklaşımında su dağıtım şebekesinin tüm fiziksel bileşenlerinin ve klor bozunma kinetiklerinin tespiti gereklidir. Şebekenin fiziksel bileşenlerine ait yeterli veri bulunmadığı durumlarda veriye dayalı modelleme yaklaşımlarının deterministik modelleme yaklaşımlarına bir alternatif olarak kullanılabilmesi ve uygun veriler ile uygun model yapılarının kullanılması durumunda yüksek hassasiyette model tahminlerinin elde edilebileceği bu çalışma neticesinde ortaya konmuştur.

Su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının yönetiminde en kötü durum senaryolarına göre stratejiler geliştirilmeli, bu stratejilerde mevsimsel değişimlerin su tüketimleri ve klor bozunma katsayısı üzerine etkileri, su kayıplarının azaltılması çalışmaları ve şebekeye olası kontaminasyon gibi durumlar göz önünde bulundurulmalıdır. Kaynakta klor konsantrasyonlarının debiyeye duyarlı otomatik dozaj sistemi ile uygulanması önerilmekte olup, online izleme çalışmalarından elde edilen verilerin su kuruluşları tarafından değerlendirilmesi ve su kalitesi modelleme çalışmaları yapmaları önerilmektedir.

Günümüzde teknolojik gelişmeler neticesinde su kuruluşları veri tabanlı izleme ve kontrol sistemlerine geçiş yapmaktadırlar. Su dağıtım şebekelerinin hidrolik ve su kalitesi açısından optimum işletilebilmesi için modelleme çalışmaları bir zorunluluk olarak ortaya çıkmaktadır. Hidrolik ve su kalitesi modelleme çalışmaları çevrim dışı (offline) gerçekleştirilebileceği gibi; gerçek zamanlı (online) olarak ta yapılabilmektedir. Gelişen bilgisayar teknolojilerine paralel olarak online izleme sistemlerinden deterministik modelleme yazılımlarına veri aktarabilmek mümkün

olmaktadır. Bu sayede su dağıtım şebekesindeki hidrolik ve su kalitesine ait verilerin zamansal ve mekansal değişimlerine ait veriler online modelleme çalışmaları neticesinde tahmin edilebilmekte ve mevcut zaman diliminden sonraki durumlar için tahmin yapılması mümkün olabilmektedir. Su dağıtım şebekelerinde hidrolik ve su kalitesi modelleme çalışmalarının su kuruluşları tarafından benimsenmesi, farklı su kaynaklarına ve fiziksel bileşenlere sahip su dağıtım şebekelerinde çevrim içi ve çevrim dışı modelleme çalışmalarının araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

Veriye dayalı modelleme yaklaşımlarının su dağıtım şebekelerinde klor konsantrasyonlarının modellenmesi ve yönetimi amacı ile kullanılması konusunda farklı fiziksel konfigürasyona ve farklı su kaynaklarına sahip şebekelerde kullanılabilirliğinin araştırılması; farklı model yapılarının su dağıtım şebekelerinde kontrol mekanizması olarak kullanımının değerlendirilmesi önerilmektedir.

## 7. KAYNAKLAR

- Ahn, J.C. Lee, S.W. Choi, K.Y. and Koo, J.Y. 2012. Application of EPANET for the determination of chlorine dose and prediction of THMs in a water distribution system. *Sustain. Environ. Res.*, 22(1): 31-38.
- Akin, E.W. and Jakubowski, W. 1986. Drinking water transmission of giardiasis in the United States. *Wat.Sci. Tech.* 18(10): 219–226.
- Allen, M.T. and Geldreich, E.E. 1977. Distribution Line Sediments and Bacterial Regrowth. AWWA Water Quality Technology Conference, pp. 1-6, December 4-7, Kansas, MO, USA.
- Altındal, T. Karadirek, İ.E. and Muhammetoğlu, H. Chlorine Decay In Water Distribution Systems: Antalya Case Study. International Workshop on Urbanization, Land use, Land Degredation and Environment, September 28 – October 1 2009, Denizli, Turkey.
- Altındal, T. 2010 Su Dağıtım Şebekelerinde Klor Ana Akım Bozunma Katsayısının Araştırılması: Antalya Şehri Konyaaltı Bölgesi Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, 130 s.
- Anonim-I 2014. İçme Suyu Temin ve Dağıtım Sistemlerindeki Su Kayıplarının Kontrolü Yönetmeliği. 08/05/2014 tarihli ve 28994 sayılı Resmi Gazete.
- Anonim-II 2007. <http://www.haberler.com/finike-de-su-kaynakli-ishal-salgini-haberi/> (Erişim Tarihi: Eylül 2014)
- Anonim-III 2010. <http://www.cnnturk.com/2010/turkiye/04/10/isparta.keciborluda-ishal.salgini/571631.0/> (Erişim Tarihi: Eylül 2014)
- Anonim-IV 2013. İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik. 07/03/2013 tarihli ve 28580 sayılı Resmi Gazete.
- Araujo, L. Ramos, H. and Coelho, S. 2006. Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management. *Water Resources Management*, 20 (1): 133-149.
- Beale, M.H. Hagan, M.T. and Demuth, H.B. 2010. Neural Network Toolbox 7 User's Guide. The MathWorks, Inc., Natic MA, USA.
- Biscos, C. Mulholland, M. Lann, M.V.L. Buckley, C.A. and Brouckaert, C.J. 2003. Optimal operation of water distribution networks by predictive control using MINLP. *Water Sa*, 29 (4): 1-12.
- Biswas, P. Lu, C. and Clark, R.M. 1993. A model for chlorine concentration decay in pipes. *Wat. Res.* 27(12): 1715–1724.



- Brown, D. Bridgeman, J. and West, J.R. 2011. Predicting chlorine decay and THM formation in water supply systems. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 10: 79-99.
- Bowden, G.J. Nixon, J.B. Dandy, G.C. Maier H.R. and Holmes, M. 2006. Forecasting chlorine residuals in a water distribution system using a general regression neural network. *Mathematical and Computer modelling*, 44(5-6): 469-484.
- Chambers, V.K. Creasey, J.D. and Joy, J.S. 1995. Modelling free and total chlorine decay in potable water distribution systems, *J. Wat. Suppl.: Res & Technol - AQUA* 44(2): 60-69
- Clark, R.M. Geldreich, E.E. Fox, K.R. Rice, E. Johnson, C.H. Goodrich, J.A. Barnick, J.A. and Abdesaken, F. 1996. Tracking a Salmonella serovar typhimurium outbreak in Gideon, Missouri: role of contaminant propagation model. *J. Wat. Suppl.: Res & Technol - AQUA*, 45(4): 171-196.
- Clark, R.M. and Sivaganesan, M. 2002. Predicting chlorine residuals in drinking water: a second order model. *J. Water Resour Plan Manag.*, 128:152-161.
- Cordoba, G.A.C. Tuhovčák, L. and Taus, M. 2014. Using artificial neural network models to assess water quality in water distribution networks. *Procedia Engineering*, 70:399-408.
- Crozes, G. White, P. and Marshall, M. 1995. Enhanced coagulation: it's effect on NOM removal and chemical costs. *Journal of American Water Works Association*, 87: 78-89.
- Çelik, Ö. Ertuğrul, H. ve Ertuğrul, Ş. 2008. İnsan operatörlerin akıllı sistemlerle modellenmesi. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*. 13-15 Kasım. İTÜ Ayazağa Kampüsü Süleyman Demirel Kültür Merkezi, İstanbul.
- Demirel, I. Ozden, T. Palanci, I. Karadirek, I.E. and Muhammetoglu, H. Monitoring And Management Of Water Distribution Network In Antalya City, Using The Scada System. 2nd Regional Workshop on Water Loss Reduction in Water & Sanitation Utilities, November 16-18, 2009, Sofia, Bulgaria.
- Dongwen, S. Guqiao, L. and Zhengyu, Y. 2006. Setup of Water Distribution Network Model in Zhengzhou and Its Application Study. 4th Asia-Pacific DHI Software Conference, November 28, Shanghai, China.
- Donlon, R.M. and Pipes, W.O. 1986. Pipewall Biofilm in Drinking Water Mains. AWWA Water Quality Technology Conference, November 16-20, Portland, Oregon, USA.
- EECD (European Economic Community Directive) 1997. "Amended proposal for a council directive concerning the quality of water intended for human consumption-common position". In: *Proceedings of the Council of the European Union, Directive 80/778/EEC, Com (97) 228 final 95/0010 SYN, Brussels.*

- EPA 1990. Technologies for upgrading existing or designing new drinking water treatment facilities. US - Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.
- Erdoğan, H. Güral, E. Ata, E. ve Akpınar, B. 2005. Dinamik Sistemlerin Tanımlanması, 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı. ss. 1 – 9, 28 Mart–1 Nisan, ODTÜ Kültür ve Kongre Merkezi, Ankara.
- Eroğlu V., 2008. Su Tasfiyesi. Çevre ve Orman Bakanlığı Yayını, Başak Matbaacılık, Ankara, 410 s.
- Hart, F.L. Wheeler, W.A. and Daly, W.J. 1992. Chlorine Residual Distribution in a Municipal Water Network.  
[http://cee.wpi.edu/ce\\_faculty/faculty\\_pages/hart\\_pdf\\_files/concord.pdf](http://cee.wpi.edu/ce_faculty/faculty_pages/hart_pdf_files/concord.pdf). (Son erişim tarihi: Ekim 2009)
- Georgescu, A.M. and Georgescu, S.C. 2012. Chlorine Concentration Decay in the Water Distribution System of a Town with 50000 Inhabitants. U.P.B. Sci. Bull., Series D, 74(1): 1-12.
- Grayman, W. Clark, R. and Males, R. 1988. Modeling Distribution System Water Quality: Dynamic Approach. Journal of Water Resour. Plann. Manage., 114(3): 295-312.
- Grayman, W.M. 2006. Use of Distribution System Water Quality Models in Support of Water Security, Security of Water Supply Systems: from Source to Tap. NATO Security through Science Series, 8: 39-50.
- Günay, A. 2005. Su Kimyası. Haliç Çevre Teknolojileri ve Mühendislik Hizmetleri Tic. Paz. Ltd. Şti., İstanbul, 280 s.
- Goyal, R.V. and Patel, H.M. Analysis of residual chlorine in simple drinking water distribution system with intermittent water supply. DOI 10.1007/s13201-014-0193-7
- Haas, C.N. and Karra, S.B. 1984. Kinetics of wastewater chlorine demand exertion. J Water Pollut. Control Federation, 56(2):170–173.
- Hallam, N.B. Hua, F. West, J.R. Forster, C.F. and Simms, J. 2003. Bulk decay of chlorine in water distribution systems. Journal of water resources planning and management, 129(1): 78-81.
- Hua, F. West, J.R. and Barker, R.A. 1999. Modelling of chlorine decay in municipal water supplies. Water Research, 33(12): 2735-2746.
- Huusom, J. Poulsen, N.K. Jorgensen, S.B. and Jorgensen, B.J. 2010. ARX-Model based Model Predictive Control with Offset-Free Tracking. Computer Aided Chemical Engineering, 28: 601-606.

- Huusom, J. Poulsen N.K. Jorgensen, S.B. and Jorgensen, B.J. 2011. Systematic identification and robust control design for uncertain time delay processes. *Computer Aided Chemical Engineering*, 29: 442-446.
- Ingeduld, P. and Svitak, Z. 2006. Modelling Intermittent Water Supply Systems with EPANET. 8th Annual WD Symposium, August 27-30, EPA Cincinnati, OH, USA.
- Izquierdo, J. Montalvo, I. Garcia, R.D. and Matias, A. 2012. On the complexities of the design of water distribution networks. *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 947961, 25 p.
- Jespersion, K. 2001. Distribution 101: How does water get from the source to your tap? [http://www.nesc.wvu.edu/ndwc/articles/ot/sp01/distribution\\_101.html](http://www.nesc.wvu.edu/ndwc/articles/ot/sp01/distribution_101.html) (Son erişim tarihi: 04.06.2014)
- Kara, S. İçmesuyu Dağıtım Şebekelerinde Basınç Yönetimi ve Hidrolik Modellemenin Entegre Edilerek Su Kayıplarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, 129 s.
- Kara, S., Karadirek, İ.E. Muhammetoğlu, A. and Muhammetoğlu, H. Real Time Monitoring Of Water Distribution Networks For Safe And Sufficient Water To The Consumers In Antalya City. ICWRE 2014: Role of Governance in the Management of Water Resources and Environment, May 13-15 2014, Antalya, Turkey.
- Karadirek, İ.E. Altındal, T. Özden, T. Demirbaş, E. Demirel, İ. Palancı, İ. ve Muhammetoğlu, H. İçme Suyu Dağıtım Şebekelerinde Scada, Cbs Ve Modelleme Teknikleri Kullanılarak Klor Yönetimi. 2. Bursa Su sempozyumu, 22-24 Mart 2010, Bursa, Türkiye.
- Karadirek, İ.E. Kara, S. Altındal, T. Muhammetoğlu, H. Muhammetoğlu, A. Soyupak, S. Kitiş, M. Özden, T. Palancı, İ. Demirbaş, E. ve Cengiz, K. Su Dağıtım Şebekelerinde Modelleme Teknikleri Kullanılarak Serbest Bakiye Klor Konsantrasyonlarının Yönetimi: Antalya-Konyaaltı Bölgesi Örneği. 6. Kentsel Altyapı Sempozyumu, 14-15 Ekim 2011, Antalya, Türkiye.
- Muhammetoglu, H. Karadirek, I.E. Kara, S. Muhammetoglu, A. Soyupak, S. Kitis, M. Demirel, I. Palanci, I. and Ozden, T. Water Loss Reduction By Integrating Pressure Management With Hydraulic Modelling. *Efficient 2011*, March 29 – April 2 2011, Dead sea, Jordan.
- Karadirek, I.E. Kara, S. Yilmaz, G. Muhammetoglu, A. and Muhammetoglu, H. 2012a. Implementation of Hydraulic Modelling for Water-Loss Reduction Through Pressure Management. *Water Resources Management*, 26(9): 2555-2568.
- Karadirek, İ.E. Kara, S. Yılmaz, G. Altındal, T. Muhammetoğlu, H. Muhammetoğlu, A. Kitiş, M. Soyupak, S. Yiğit, N.Ö. Harman, B.İ. Plancı, İ. Özden, T. and Cengiz,

- K. 2012b. Antalya Konyaalti Bölgesi İçme Suyu Kalitesinin İzlenmesi ve Yönetimi. Çevre Bilim & Teknoloji Dergisi, 4(1): 35-40.
- Karadirek, I.E. Kara, S., Altindal, T. Muhammetoglu, H. Muhammetoglu, A. and Cengiz, K. Chlorine Dosage Determination At The Feeding Stations Using Gis, Scada And Modeling. 8th International Conference Of EWRA: Water Resources Management in an Interdisciplinary and Changing Context, June 26-29 2013, Porto, Portugal.
- Karadirek, I.E. Kara, S. Muhammetoglu, A. and Muhammetoglu, H. 2014a. Management of Chlorine Dosing Rates in Urban Water Distribution Networks Using Online Continuous Monitoring and Modeling. Urban Water Journal. DOI: 10.1080/1573062X.2014.992916 (Baskıda).
- Karadirek, I.E. Muhammetoglu, H. and Soyupak, S. 2014b. Some System Identification Based Dynamic Models For Predicting Chlorine Concentrations In Water Distribution Networks. ICWRE 2014: Role of Governance in the Management of Water Resources and Environment, May 13-15 2014, Antalya, Turkey.
- Karakuzu, C. 2011. Nöral Sistemlere Giriş ders notu. [http://bm.bilecik.edu.tr/Dosya/Icerik/107/DosyaEki/nsg\\_ders\\_notu.pdf](http://bm.bilecik.edu.tr/Dosya/Icerik/107/DosyaEki/nsg_ders_notu.pdf) (Erişim tarihi: Eylül 2014).
- Karpuzcu, M. 2005. Su Temini ve Çevre Sağlığı, Kubbealti Neşriyatı/Yayınevi Genel Dizisi, İstanbul.
- Kasaplı, K. 2014. İçmesuyu Şebekelerinde Maliyet Tahmini Amacıyla Yapay Sinir Ağları Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 104 s.
- Kiene, L. and Levi, Y. 1995. Influence of corrosion on chlorine decay in distribution systems. In: Proceedings of the AWWA Water Quality Technology Conference, AWWA, Denver, CO.
- Kitis , N.O. Yigit, Harman, B.I. Muhammetoglu, H. Muhammetoglu, A. Karadirek, I.E. Demirel, I. Ozden, T. and Palanci, I. 2010. Occurrence of Trihalomethanes in Chlorinated Groundwaters with Very Low Natural Organic Matter and Bromide Concentrations. Environmental Forensics, 11:264–274.
- Koroglu, M. Yakupogullari, Y. Otlu, B. Ozturk, S. Ozden, M. Ozer, Ali. Sener, K. and Durmaz, R. 2011. A waterborne outbreak of epidemic diarrhea due to group A rotavirus in Malatya, Turkey, New Microbiologica, 34: 17-24.
- Laursen, E.O., Mygind, O., Rasmussen, B. and Ronne, T. 1994. Gastroenteritis: a waterborne outbreak affecting 1600 people in a small Danish town. J. Epidemiol Comm. Hlth., 48: 453–458.

- Lawson, H.W. Braun, M.M. Glass, R.I. Stine, S.E. Monroe, S.S. Atrash, H.K. Lee, L.E. and Englender, S.J. 1991. Waterborne outbreak of Norwalk virus gastroenteritis at a southwest US resort:role of geological formations in the contamination of well water. *The Lancet*, 337 (8751): 1200–1204.
- Levy, R. V. Hart, F.L. and Cheetham, R.D. 1986. The Occurrence and Public Health Significance of Invertebrates in Drinking Water Supplies and Distribution Systems. *J. AWWA*, 78: 105-110.
- Liu, B. Reckhow, D.A. and Li, Y.A. 2014. A two-site chlorine decay model for the combined effects of pH, water distribution temperature and in-home heating profiles using differential evolution. *Water Research*, 53:47-57.
- Lippai, I. and Wright, L. 2005. Critical analysis case study: Zone 7 water distribution system. *The Pipeline Division Specialty Conference*, pp. 662-673, August 21-24, Houston, Texas, USA.
- Ljung, L. and Glad, T. 1994. *Modeling of Dynamic Systems*. PTR PrenticeHall, Upper Saddle River, NJ
- Ljung, L. 2009. *System Identification Toolbox™ 7 User's Guide*, The MathWorks Inc., 3 Apple Hill Drive Natick, MA, 531 p.
- Ljung, L. 2010, *System Identification Toolbox™ 7 User's Guide*, The MathWorks Inc., 3 Apple Hill Drive Natick, MA, 531 p.
- Machell, J. Mounce, S.R. and Boxall J.B. 2009. Online modelling of water distribution systems: a UK case study. *Drinking Water Engineering and Science*. <http://www.drink-water-eng-sci.net/3/21/2010/dwes-3-21-2010.pdf>. (Erişim Tarihi: Eylül 2014)
- Males, R.M. Clark, R.M. Wehrman, P.J. and Gates, W.E. 1985. Algorithm for mixing problems in water systems. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 111(2): 206-219.
- Males, R.M. Grayman, W.M. and Clark, R.M. 1988. Modeling water quality in distribution systems. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 114(2): 197-209.
- Marunga, A. Hoko, Z. and Kaseke, E. 2006. Pressure management as a leakage reduction and water demand management tool: The case of the City of Mutare-Zimbabwe. *Physics and Chemistry of the Earth*, 31(15-16): 763- 770.
- Mathieu, L. Block, J.C. Dutang, M. Maillarda, J. and Reasoner, D. 1993. Control of biofilm accumulation in drinking water distribution systems. *Water Supply*, 11(3/4): 365-376.
- May, R.J. Maier, H.R. Dandy, G.C. and Nixon, J.B. 2004. General Regression Neural Networks for Modeling Disinfection Residual in Water Distribution Systems.

World Water and Environmental Resources Congress, June 27 – July 1, Salt Lake City, Utah, USA.

- May, R. Maier, H. and Dandy, G. 2006. Control-oriented Water Quality Modelling Using Artificial Neural Networks. Enviro 04 Convention & Exhibition, March 28 – April 1, Sydney, Australia.
- May, R.J. Dandy, G.C. Maier, H.R. and Nixon, J.B. 2008. Application of partial mutual information variable selection to ANN forecasting of water quality in water distribution systems. *Environmental Modelling & Software*, 23: 1289–1299.
- McCellel, N.I. and Maury, K.H. 1977. Water Quality Monitoring in the Distribution System. USEPA, UERL, Cincinnati, OH EPA-600/2-77-074.
- McGhee, T.J. 1991. Water Supply and Sewage. McGraw-Hill, Hightstown, NJ.
- Morrison, J. 2004. Managing leakage by District Metered Access: a practical approach. *Water 21- Magazine of the International Water Association*, 6(1):44-46.
- Monteiro, L. Figueiredo, D. Dias, S. Freitas, R. Covas, D. Menaia, J. Coelho, S.T. 2014. Modelling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX. *Procedia Engineering*, 70: 1192-1200.
- Mostafa, N.G. Matta, M.E. and Halim, H.A. 2013. Simulation of Chlorine Decay in Water Distribution Networks Using EPANET – Case Study. *Civil and Environmental Research*. 3(13): 100–116.
- Muhammetoğlu, H. Demirel, İ. Özden, T. Palancı, İ. Muhammetoğlu, A. Karadirek, İ.E. Kitiş, M. and Soyupak, S. Monitoring Of Drinking Water Distribution System By Scada In Antalya –Turkey. 35th WEDC International Conference, July 6-8 2011, Loughborough, England.
- Muhammetoğlu, H. Demirel, İ. Özden, T. Palancı, İ. Muhammetoğlu, A. Karadirek, İ.E. and Kitiş, M. Online Water Quality&Quantity Monitoring For Drinking Water Utility In Antalya City-Turkey. 14th International Conference, IWA Diffuse Pollution, September 12-17 2010, Quebec, Canada.
- Muhammetoğlu, H. Karadirek, İ.E. Özden, T. Demirel, I. and Palancı, I. Integration of Hydraulic and Water Quality Modeling with Water Losses Management: Case Study of Antalya City-Turkey. *Water Loss 2010*, June 6-9, Sao Paulo, Brasil.
- Muslu, Y. 2002. Çevre Mühendisliğinde Temel İşlemler ve Prosesler Cilt II Temel Prosesler. Su Vakfı Yayınları, ISBN: 975-92794-5-2, İstanbul.
- Muslu, Y. 2005. Çözümlü Problemlerle Su Temini ve Çevre Sağlığı, Su Vakfı Yayınları, İstanbul.

- Özaydın, Ö. 2009. Porsuk Barajı Su Seviyesinin Öngörülerinin Elde Edilmesinde Yapay Sinir Ağları ve ARMAX Modellerinin Karşılaştırmalı İncelenmesi. Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 97 s.
- Palancı, İ. 2011. Alt Bölgeler Oluşturularak ve SCADA Sistemi Kullanılarak Su Kayıplarının Yönetimi: Antalya - Konyaaltı Bölgesi Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, 54 Sayfa.
- Parent, A. Saby, S. Sardin, M. Block, J.C. and Gatel, D. 1996a. Contribution of biofilms to the chlorine demand of drinking water distribution systems. In: Proceedings of the AWWA Water Quality Technology Conference, AWWA, Denver, CO.
- Parent, A. Fass, S. Dincher, M.L. Reasoner, D. Gatel, D. and Block, J.C. 1996b. Control of coliform growth in drinking water distribution systems. J. CIWEM 10: 442-445.
- Park, M.H. 1996. Neural Network Control on a Chlorine Contact Basin. MSc Thesis, University of California, Los Angeles, USA. 73 s.
- Peker, İ. 2007. Çevre Mühendisliğinde Temel İşlemler Fiziksel Kimyasal Temel İşlemler ve Süreçler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Powell, J.C. Hallam, NB. West, J.R. Forster, C.F. and Simms, J. 2000. Factors which control bulk chlorine decay rates. Water Research, 34 (1), 117–126.
- Ratnayake, N. and Jayatilake I. N. 1999. Study of transport of contaminants in a pipe network using the model Epanet. Water Science and Technology , 40(2): 115-120.
- Rodriguez, M.J. West, J.R. Powwel, J. and S'Erodes, J. 1997. Application of two approaches to model chlorine residuals in severn trent water LTD (STW) distribution systems. Water Science and Technology, 36(5): 317-324.
- Rodriguez, M.J. and S'Erodes, J. 1998. Assessing empirical linear and non-linear modelling of residual chlorine in urban drinking water systems. Environmental Modelling and Software, 14(1): 93-102.
- Rossmann, L.A. 1993. The EPANET water quality model. In Integrated Computer Applications in Water Supply.Vol 2—Applications and Implementations for Systems Operation and Management Research Studies Press, Tauton, UK; John Wiley & Sons, New York.
- Rossmann, L.A. Clark, R.M. and Grayman, W.M. 1994. Modelling chlorine residuals in drinking-water distribution systems. J. Environ. Engng.,120(4): 803–819.
- Rossmann, L.A. 2000. EPANET 2 Users' Manual. US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, USA.

- Rossmann, L.A. Brown, R.A. Singer, P.C. and Nuckols, J.R. 2001. DBP formation kinetics in a simulated distribution system. *Water Res.*, 35(14): 3483-3489.
- Rossmann, L.A. 2006. The effect of advanced treatment on chlorine decay in metallic pipes. *Water Research*, 40: 2493-2502.
- Schal, S.L. 2013. Water Quality Sensor Placement Guidance for Small Water Distribution Systems. MSc Thesis, University of Kentucky, 221 p.
- Shank, F. 2004. Path-dependent Approach to Estimate Chlorine Wall Demand Coefficient in Water Distribution System, PhD Thesis, University of Cincinnati, OH, USA.
- Solomatine, D. See, L.M. and Abrahart, R.J. 2008. Data-Driven Modelling: Concepts, Approaches and Experiences. *Practical Hydroinformatics Water Science and Technology Library*, 68: 17-30.
- Soyupak, S. Kilic, H. Karadirek, I.E. and Muhammetoglu, H. 2011. On the Usage of Artificial Neural Networks in Chlorine Control Applications for Water Distribution Networks with High Quality Water. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, 60(1): 51-60.
- ŞEN, Z. 2004. Yapay Sinir Ağları İlkeleri. Su Vakfı Yayınları, İstanbul, 183 s.
- Thornton, J. Reinhard, S. and Kunkel, G. 2008. *Water Loss Control*. Mc Graw Hill, 285 pages, USA.
- TÜBİTAK, 2010. İçme Suyu Dağıtım Şebekelerinde Optimum Klorlama Uygulamalarının Matematiksel Modeller Kullanılarak Gerçekleştirilmesi ve Dezenfeksiyon Sistemlerinin Yönetimi, TÜBİTAK 107G088 nolu proje final raporu.
- USCDC 1997. U.S. Centers for Disease Control and Prevention, Summary of notifiable diseases; morbidity and mortality weekly report. *CDC surveillance summaries: surveillance for waterborne disease outbreaks — USA*.
- USEPA, 1998. National primary drinking water regulations: Disinfectants and Disinfection Byproducts: Final Rule, 40 CFR part 9. 141 and 142.
- Uslu, Ç.S. 2011. Zaman Serisi Analizi ile Yapay Sinir Ağları Kestirimlerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, İstanbul, 59 s.
- Uyak, V. ve Toröz, İ. 2006. İçme suyu kaynaklarındaki doğal organik maddelerin zenginleştirilmiş koagülasyon yöntemi ile giderilmesi. *İTÜ dergisi/e, Su Kirlenmesi Kontrolü*, 16(1-3): 115-122.
- Vasconcelos, J.J. Rossmann, L.A. Grayman, W.M. Boulos, P.F. and Clark, R.M. 1997. Kinetics of chlorine decay. *Am. Water Works Assoc.*, 89(7): 54–65.



- Venkatesh, S.R. and Dahleh, M.A. 2001. On System Identification of Complex Systems from Finite Data. *IEE Transactions on automatic control*. 46 (2): 235–257.
- Vieira, P. Coelho, S.T. and Loureiro, D. 2004. Accounting for the influence of initial chlorine concentration, TOC, iron and temperature when modelling chlorine decay in water supply. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, 53 (2004): 453–467.
- Villanueva, C.M. Fernández, F. Malats, N. Grimalt, J.O. and Kogevinas, M. 2003. Meta-analysis of studies on individual consumption of chlorinated drinking water and bladder cancer. *J. Epidemiol. Community Health*, 57: 166-173.
- Wable, O. Dumoutier, N. Duguet, J.P. Jarrige, P.A. Gelas, G. and Depierre, J.F. 1991. Modeling chlorine concentrations in a network and applications to Paris distribution network. In: *Proceedings of the Water Quality Modeling in Distribution Systems Conference*, AWWA Research Foundation, Denver, CO.
- Weissman, J.B. Craun, F.G. Lawrence, D.N. Pollard, R.A. Saslaw, M.S. and Gangarosa, E.J. 1976. An epidemic of gastroenteritis traced to a contaminated public water supply. *Am. J. Epidemiol.*, 103(4): 391–398.
- WHO 2011. *Guidelines for drinking water quality – 4<sup>th</sup> edition*, ISBN 978 92 4 154815 1
- Wood, D.J. 1980. Slurry Flow in Pipe Networks. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 106(HY1): 57-70.
- Wu, W. Dandy, G.C. and Maier, H.R. 2014. Protocol for developing ANN models and its application to the assessment of the quality of the ANN model development process in drinking water quality modelling. *Environmental Modelling and Software*, 54: 108 – 127.
- Xin, L.I. Da-ming, GU. Jing-yao, QI. Ukita, M. and Hong-bin, Z. 2003. Modeling of residual chlorine in water distribution system. *Journal of Environmental Sciences*. 15(1): 136-144.
- Yalçın, H. ve Gürü, M. 2002. *Su Teknolojisi*. Palme Yayıncılık, Ankara, 512 s.
- Zhang, G.R. Keine, L. Wable, O. Chan, U.S. and Dudget, J.P. 1992. Modelling of chlorine residual in the water distribution system network of Macao. *Environ. Technol.* 13: 937-946.

## ÖZGEÇMİŞ

İbrahim Ethem KARADİREK 1983 yılında Afyonkarahisar/Şuhut'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Şuhut'ta, lise öğrenimini Afyonkarahisar'da tamamladı. 2001 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nden 2002 yılında Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'ne yatay geçiş yaptı ve 2005 yılında Çevre Mühendisi ünvanını alarak mezun oldu. Eylül 2005 – Haziran 2008 yılları arasında Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimini tamamladı. 2008 yılında Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora öğrenimine başladı. Eylül 2012 – Mayıs 2013 tarihleri arasında A.B.D. Cincinnati Üniversitesi'nde misafir araştırmacı olarak çalışmalar yaptı. Eylül 2006 – Kasım 2014 yılları arasında Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yaptı. Kasım 2014'ten bu yana Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde Uzman olarak görev yapmaktadır.