



**İÇME SUYU BORULARINDA KLOR BOZUNMA KATSAYISININ
SAYISAL ANALİZLERİ**

Sumardi SUMARDI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim

Sumardi SUMARDI

15/05/2025

İÇME SUYU BORULARINDA KLOR BOZUNMA KATSAYISININ SAYISAL ANALİZLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Sumardi SUMARDI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2025

ÖZET

Su şebekesinde, sağlık sorunları nedeniyle klor eklenmesi yaygın bir uygulama olarak kabul edilmektedir. Klor ekleme uygulamalarını düzenleyen sıkı yönetmelikler, su borularındaki klor kaybı ile ilgili detaylı bir analiz gerektirmektedir. Bu bağlamda, birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve literatürde çeşitli ve yüksek kaliteli makaleler yayımlanmıştır. Klorun su şebekesi borularındaki taşınımı, bir boyutlu veya iki boyutlu konsantrasyon taşınımı olarak modellenabilir. Problemin iki boyutlu çözümünü ağ hidrolik çözüm denklemleri ile birleştirmenin karmaşıklığı göz önüne alındığında, genellikle EPANET adlı bir programda basitleştirilmiş bir boyutlu form kullanılmaktadır. Bu çalışma, problemin iki boyutlu çözümlerinin sonuçlarını yaklaşık olarak veren bir düzeltme faktörü (F_C) içeren bir boyutlu çözümü tanıtmaktadır. Düzeltme faktörü (F_C), probleme ilişkin Buckingham Pi teoremi (boyutsal analiz) kullanılarak türetilmiştir. Bu çalışma, klor difüzyon oranlarını etkileyen difüzyon katsayısını ayarlamak amacıyla son dönem deneysel araştırma verilerini kullanmakta ve klor bozunma tahminlerinde yeni bir düzeltme faktörü (F_C) türetmek için bir FORTRAN programından yararlanmaktadır. Boyutsal analiz ve hesaplamalardan elde edilen düzeltme faktörü (F_C) formu, ABD’de mevcut bir şebekede uygulanmıştır. Sonuç olarak, geliştirilen model kullanılarak DYNAQ ve EPANET çıktılarından elde edilen simüle edilmiş sonuçlar ile seçilen örnekleme noktalarındaki saha ölçümleri arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Hem DYNAQ hem de EPANET modellerinden elde edilen sonuçlar, örnekleme noktalarındaki gözlemlenen değerlerden farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar, talep ile ilgili belirsizlik (talebin mekansal toplanması) ve örnekleme noktalarında uygulanan talep faktörleri ile ilişkilendirilebilir.

Bilim Kodu : 91133
Anahtar Kelimeler : Klor, bozunma, difüzyon, dispersiyon, su temini, şebeke, EPANET
Sayfa Adedi : 77
Danışman : Prof. Dr. Osman Nuri ÖZDEMİR

ANALYSIS OF CHLORINE DECAY COEFFICIENT IN WATER SUPPLY PIPES

(M.Sc. Thesis)

Sumardi SUMARDI

GAZI UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2025

ABSTRACT

In the water distribution network, the addition of chlorine is widely regarded as a common practice due to health concerns. Strict regulations governing chlorine addition practices necessitate a detailed analysis of chlorine disappearance or loss in water pipes. In this context, numerous studies have been conducted, and several high-quality articles have been published in the literature. The transport of chlorine within water supply pipes can be modeled as one-dimensional or two-dimensional concentration transport. Given the complexity of integrating the two-dimensional solution of the problem with network hydraulic solution equations, a simplified one-dimensional form is typically employed in a program known as EPANET. This study presents a one-dimensional solution that incorporates a correction factor (F_C) that approximately reflects the results of the two-dimensional solutions of the problem. The correction factor (F_C) has been derived using the Buckingham Pi theorem (dimensional analysis) relevant to the problem. This research utilizes recent experimental data to adjust the diffusion coefficient affecting chlorine diffusion rates and employs a FORTRAN program to derive a new correction factor (F_C) for chlorine decay predictions. The form of the correction factor (F_C) obtained from dimensional analysis and calculations has been applied to an existing network in the United States. Consequently, a comparison has been made between the simulated results obtained from DYNAQ and EPANET outputs and the field measurements at selected sampling points. The results derived from both DYNAQ and EPANET models exhibit discrepancies when compared to the observed values at the sampling points. These discrepancies can be attributed to uncertainties related to demand (spatial aggregation of demand) and the demand factors applied at the sampling points.

Science code : 91133

Keywords : Chlorine, decay, diffusion, dispersion, water supply, network, EPANET

Page Number : 77

Supervisor : Prof. Dr. Osman Nuri ÖZDEMİR

TEŞEKKÜRLER

Prof. Dr. Osman Nuri ÖZDEMİR'e çalışma boyunca gösterdiği rehberlik ve destek için teşekkür ederim. Bana her zaman verdiği cesaret ve motivasyon için müteşekkirim.

Sonsuz destekleri, sabırları ve sevgileri için aile üyelerime sevgi ve şükranlarımı sunarım. Bana ve yeteneğime her zaman inandılar, özellikle de her zaman sırtımı dayadığım babama ve sevgili kız ve erkek kardeşlerime. Bu çalışma, beni her zaman cennette izleyen annemin ruhuna adanmıştır.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜRLER	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. SU ŞEBEKE BORULARINDA KLOR BOZULMASININ KAVRAMLARI	5
2.1. Klor Kimyası	5
2.2. Biyofilm.....	6
2.3. Klor Bozunması.....	6
2.3.1. Boru çeperi bozunması	7
2.3.2. Hacimsel bozunması	8
2.4. İçme Suyu Borularında Klor Bozunmasını Etkileyen Faktörler	10
2.4.1. Sıcaklık	10
2.4.2. Boru malzemesi	10
2.4.3. Akış koşulları	11
2.4.4. Organik ve inorganik bileşikler	11
2.4.5. pH ve su kimyası.....	11
2.4.6. Biyofilmler	12
2.5. Borularda Kütle Taşınımı	12

Sayfa

2.6. Klor Bozunma Modellemesi.....	14
2.6.1. Dinamik modeller	14
2.6.2. Kinetik modeller	16
2.7. Düzeltme Faktörü	17
2.8. Klor Bozunmasında Boyutsuzlaştırma (Buckingham Pi Teoremi)	19
2.9. EPANET	22
2.9.1. EPANET'te klor bozunmasının modellenmesi	23
2.9.2. Çıktı ve analiz	23
2.9.3. EPANET'te klor bozunma modellemesinin uygulanması.....	24
2.10. İçme Suyunda Klor Bozunması hakkında Önceki Çalışmalar	24
3. ARAŞTIRMA YÖNTEMİ.....	29
3.1. Model Seçimi.....	29
3.1.1. EPANET için veri giriş prosedürü	31
3.1.2. DYNAQ programı için veri giriş prosedürü	33
3.2. Veri Toplama ve Çalışma Örneği.....	36
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	39
4.1. Düzeltme Faktörü	39
4.2. EPANET ile İçme Suyu Borularında Klor Tahmini.....	42
4.3. DYNAQ ile İçme Suyu Borularında Klor Tahmini	43
4.4. EPANET ve DYNAQ ile Klor Bozunma Tahmininin Karşılaştırılması.....	45
5. SONUÇLAR.....	51
KAYNAKLAR	53
EKLER.....	59
Ek-1. Tüm Düğümler için Karşılaştırma Sonuçları	60

Sayfa

Ek-2. Düğümlerin ve Boruların Karakteristiğı	74
ÖZGEÇMİŞ	77



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Literatürden birinci derece bozunma sabitleri	10
Çizelge 2.2. Klor bozunma kinetiği modelleri	17
Çizelge 4.1. Her bir Reynolds Sayısı için difüzyon katsayıları	40



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Cherry Hills/Brushy Plains (CHBP) Şebekesinin Yerleşimi.....	37
Şekil 4.1. Klor ve flor için difüzyon katsayısı	39
Şekil 4.2. Mevcut düzeltme faktörü (F_C)	40
Şekil 4.3. $F_C = fnc (Z, Re)$ 'nin yeni kompakt formu	41
Şekil 4.4. 3 numaralı düğüm noktalarında DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini	45
Şekil 4.5. 6 numaralı düğüm noktalarında DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini	46
Şekil 4.6. 10 numaralı düğüm noktalarında DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini	46
Şekil 4.7. 11 numaralı düğüm noktalarında DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini	47
Şekil 4.8. 19 numaralı düğüm noktalarında DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini	47
Şekil 4.9. 28 numaralı düğüm noktalarında DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini	48
Şekil 4.10. 34 numaralı düğüm noktalarında DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini	48
Şekil 4.11. Model sonuçları ve saha ölçümleri arasındaki toplam hata karşılaştırması.	49

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan semboller ve kısaltmalar, açıklamalarıyla birlikte aşağıda sunulmuştur.

Semboller	Açıklamalar
A_0	Boyutsuz parameter
A_1	Boyutsuz parametre
A_2	Boyutsuz parametre
a	ivme (m/s^2)
C	Su içindeki serbest klor konsantrasyonu (mg/L)
C_0	Su içindeki başlangıç kloru (mg/L)
C_{1D}	1D çözümü için ortalama konsantrasyon
C_{2D}	2D çözümü için ortalama konsantrasyon
D	Difüzyon/dispersiyon katsayısı (m^2/s)
d	Boru çapı (m)
F_C	Düzeltilme Faktörü
h	Yükseklik (m)
k	Bulk akış reaksiyonu için bozunma sabiti (1/s)
k_b	Hacimsel bozunma katsayısı (m/gün)
k_f	Kütle katsayısı (m/gün)
k_w	Boru iç çeperi bozunma katsayısı (m/gün)
L	Boru uzunluğu (m)
Pe_a	Peclet sayısı
Q	Debi (m^3/s)
r_0	Boru yarıçapı (m)
R_c	Homojen bulk bozunma reaksiyonu
Re	Reynolds sayısı
T	Sıcaklık ($^{\circ}C$)
t	Zaman (s)
U	Hız (m/s)
W_d	Boru duvarındaki klor tüketim oranı (m/s)
x	Boru boyunca mesafesi (m)

Semboller**Açıklamalar**

Z	Boyutsuz parametre
ν	Viscosity (m^2/s)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AOC	Assimilable organic carbon (Asimile edilebilir organik karbon)
AWWARF	The American water works association research foundation (Amerikan Su İşleri Birliği Araştırma Vakfı)
CHBP	Cherry Hills/Brushy Plains Network (Cherry Hills/Brushy Plains Şebekesi)
CV	Control volume (Kontrol hacmi)
DBPs	Disinfection by-product (Dezenfeksiyon yan ürünü)
EPS	Extracellular polymeric substance (Ekstraselüler polimerik madde)
FO	First order (Birinci derece)
IMTARED	An Eulerian-lagrangian advection-dispersion-reaction model (Bir Eulerian-lagrangian adveksiyon-dispersiyon-reaksiyon modeli)
MOC	Method of characteristics (Karakteristiklerin yöntemi)
NOM	Natural organic matter (Doğal organik madde)
PVC	Polyvinyl chlorine (Polivinil klor)
TFC	Total free chlorine (Toplam serbest klor)
TOC	Total organic carbon concentration (Toplam organik karbon konsantrasyonu)
USEPA	Unites states environmental protection agency (Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı)

1. GİRİŞ

Su dağıtım sistemi halk sağlığının korunmasında hayati bir rol oynamaktadır ve buna ek olarak su dağıtım sisteminin birincil işlevi arıtılmış suyu taşımaktır. Bu sistemde dikkate alınması gereken önemli bir husus, tüketicilere ulaşana kadar dağıtılan suyun kalitesidir. İçme suyunu dezenfekte etmek için ozon, ultraviyole ışınlar ve klor gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemler arasında ekonomik ve uygulama kolaylığı açısından en çok tercih edilen yöntem klorlama işlemidir. Su kalitesinin iyi kalmasını sağlamak için birçok şebeke dağıtım sistemi ana dezenfektan olarak klor kullanır. Klor, hastalığa neden olabilecek çeşitli patojen mikroorganizmaların öldürülmesinde etkilidir. Ancak su şebeke borularından akarken klor konsantrasyonu azalabilir. Klor konsantrasyonunun azaldığı bu süreç klorun bozunması olarak bilinir.

Klor konservatif bir madde değildir. Bu nedenle, kalıntısının tüketimi; su ile reaktivite, boru çeperi malzemesi, hidrolik akış rejimleri, kalma süresi, pH kontrolü, sıcaklık ve organik madde, mikroorganizmalar ve biyofilmlerin varlığı, boru çeperinin korozyonu ve benzeri faktörlere bağlıdır. Klor bozunması için iki bileşen düşünülebilir: boru çeperinde meydana gelen reaksiyonlar ve hacimsel reaksiyonlar (Clark vd. 1993).

Klorun bozunması, etkileri tam olarak karakterize edilmemiş çeşitli faktörlerden etkilenebilir: (1) şebekenin ve sistem bileşenlerinin fiziksel özellikleri (Clark vd. 1993; Holt vd. 1998; Hallam vd. 2002) kör uçlar, tank geometrisi, boru malzemesi ve yaşı; (2) su kalitesi parametreleri (Powell vd. 2000(a); Hallam vd. 2003; Vieira vd. 2004) sıcaklık, başlangıç klor konsantrasyonu, organik madde, demir içeriği ve yeniden klorlama sayısı; (3) sistem işletme bakımı-tankların depolama kapasitesi, gerçek su kayıpları, aralıklı işletme; (4) ve hidrolik koşullar (LeChevalier 1988; Menaia vd. 2002), akış koşulları ve basınç değişimleri. Tüm bu etkiler, genellikle sabit ya da neredeyse sabit olduğu kabul edilen, ancak sabit olmayan hidrolik taşıma mekanizmalarının üzerine bindirilir. Modelleme literatüründe neredeyse tamamen ihmal edilmiş olan potansiyel bir su kalitesi bozulma süreci, geçici akış koşullarının etkisidir. Aslında, su kalitesinin sadece önemli basınç değişimleri nedeniyle boru arızası riskinin artmasıyla değil, aynı zamanda yüksek akış hızları ile taşınmaya daha duyarlı olan boru çeperinde biyofilm, korozyon ve tüberkül oluşumuyla da bozunması mümkündür.

Tzatchkov ve diğerkleri (2002) tarafından yapılan çalışmada, ölçülen klor ile modellenen klor arasındaki farklara dikkat çekilmiştir. Özellikle, izlenen boruların uç noktalarında ölçülen ve modellenen hızlar arasında düşük farklar gözlenmiş ve nedenleri belirtilmiştir. Bu çalışmada, gerçek bir şebekede yapılan analizlere göre, ölçülen ve modellenen klor ve florürün ihmal edilmesinden dolayı farklı konsantrasyonlarda dağıldığı da sonuç olarak gösterilmiştir. Geliştirdikleri daha detaylı modelde (IMTARED) boru içi dağılımları da dikkate almışlar ve daha iyi sonuçlar bulmuşlardır. Çalışmanın sonuç bölümünde, modelin daha iyi çalışmasının ancak klor ve florür için uygun dağılım katsayılarının belirlenmesiyle mümkün olabileceği belirtilmiştir, ayrıca şu hususların da mümkün olabileceği belirtilmiştir.

Ozdemir ve Ger (1998) borulardaki klor bozunmasının simülasyonu üzerine bir araştırma yapmışlardır. Deneylerde kullanılan test borusu 24,3 m ve 15 cm çapında astarsız dökme demir borudur. Sürekli giriş ve çıkış klor konsantrasyonlarını ölçmek için, giriş ve çıkış bölümlerine serbest klor ölçen iki adet Hach Cl 17 analitik cihazı yerleştirilmiştir. Şişe bozunma testi sonuçlarına göre giriş hacimsel bozunma sabiti $1,0 \times 10^{-3}$ /saat iken, çıkış hacimsel bozunma sabitleri borudaki akış hızına bağlı olarak $0,8 \times 10^{-3}$ /saat ile $5,0 \times 10^{-3}$ /saat arasında değişmektedir.

Bunun dışında, Ozdemir ve Ger (1998) yöntemin kullanımını kolaylaştırmak için kullanılan bir düzeltme faktörü (F_c) de getirmiştir, böylece 1B çözüm boru eksenı boyunca klor konsantrasyonunun bozunmasının kesin tahminini sağlayacak şekilde düzeltilebilir.

Ozdemir ve diğerkleri (2021), su borularındaki klor ve florür difüzyon/dispersiyon katsayılarının hesaplanması üzerine bir araştırma yapmışlardır. Çalışma, su şebekesi borularına eklenen hem klor hem de florür için etkili difüzyon ve boylamsal dağılım katsayıları için deneysel sonuçları raporlamak üzere tasarlanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şunlardır: ilk olarak, bir borudaki konsantrasyon hareketinin iki boyutlu (2B) adveksiyon-difüzyon-reaksiyon denkleminin çözümü. İkinci olarak, bir boyutlu (1B) adveksiyon-dispersiyon-reaksiyon denkleminin analitik çözümü. Üçüncü olarak, sayısal ve analitik çözümler kullanılarak, klor ve florürün etkin difüzyon ve boylamsal dağılım katsayıları hesaplanmıştır.

Ozdemir ve Ger (1998) tarafından tanıtılan 1 boyutlu çözüm için düzeltme faktöründen (F_C) ve Ozdemir ve diğerleri (2021) tarafından bildirilen tek boyutlu (1B) klor difüzyonundan yola çıkarak, bu çalışma Ozdemir ve diğerlerin (2021) yeni klor difüzyonunu kullanarak boru eksen boyunca klor konsantrasyonunun bozulmasının kesin tahminini sağlamak için düzeltilebilecek yeni bir düzeltme faktörü (F_C) yapacaktır.

Su şebekesi borularındaki klor ayrışma katsayısı hakkında derinlemesine araştırma yapılması çok önemlidir. Bu katsayı klor konsantrasyonundaki azalma oranını tanımlar ve su kimyası, boru malzemesi ve sıcaklık gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Bu katsayının iyi anlaşılması, su dağıtımının planlanması ve yönetimine yardımcı olacak, böylece su kalitesi dağıtımın son noktasına kadar korunacaktır.

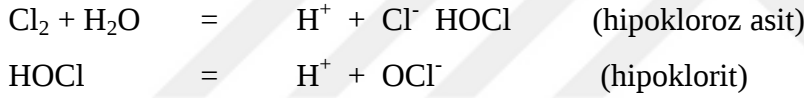


2. SU ŞEBEKE BORULARINDA KLOR BOZULMASININ KAVRAMLARI

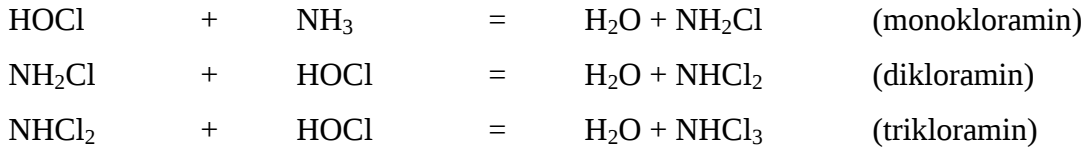
2.1. Klor Kimyası

Klor, başta metaller ve ametaller olmak üzere birçok elementle kolayca bileşik oluşturan oldukça reaktif bir halojendir. Yedi değerlik elektronuna sahiptir ve kararlı bir oktet elde etmek için bir elektron daha kazanma eğilimindedir ve klorür iyonları (Cl^-) oluşturur. Klorun dezenfekte etme özelliği onu su arıtma, sanitasyon ve çamaşır suyu üretiminde hayati bir öneme sahip kılar. Su ile reaksiyona girerek mikroorganizmaları öldürmede etkili olan hipokloröz asit (HOCl) ve hipoklorit asit (OCl^-) oluşturur.

Bu kimyasal reaksiyonun önemi, HOCl 'nin mikrop öldürücü etkinliğinin OCl^- iyonundan çok daha fazla olmasıdır (Ozdemir, 1997). Reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:



Cl_2 , HOCl ve OCl^- 'nin toplam miktarı toplam serbest klor (TFC) veya klor kalıntısı olarak adlandırılabilir. Suda bulunan amonyum (NH_3) klor ile birleşerek kloraminleri oluşturabilir. Bunlar:



Sudaki her bir kloraminin miktarı pH, Cl_2 ve suda bulunan NH_3 miktarına bağlıdır. Kloraminlerin mikrop öldürücü etkileri HOCl ile karşılaştırıldığında daha düşüktür. Serbest klor ve bileşik klorun toplam ağırlığı toplam klor veya aktif klor olarak adlandırılabilir (Ozdemir, 1997).

2.2. Biyofilm

İçme suyu şebeke sistemlerinde biyofilmler, biyokütleyi çevresel ve kayma streslerinden koruyan hücre dışı polimerik maddenin (EPS) varlığı ile mikrobiyal büyümenin baskın modudur. Biyofilm formasyonu, patojenler de dahil olmak üzere potansiyel bir bakteriyel kontaminasyon kaynağı olarak içme suyu endüstrisi için önemli bir sorun teşkil eder ve birçok durumda içme suyunun tadını ve kokusunu etkiler ve boruların korozyonunu teşvik eder.

Su dağıtım sistemlerinde gelişebilen biyofilmler polimerik matriks içinde tutulan bakterilerden oluşur ve klor talebinde bulunarak artık dezenfektanın sağladığı korumayı azaltabilir (Lu vd. 1999). Bu filmlerin içindeki bakteriler aynı zamanda bu sistemlerdeki suyun kalitesi üzerinde de bir dizi etkiye sahip olabilir:

- Asellus gibi gözle görülebilen organizmaların çoğalmasına yol açan trofik bir besin ağının başlangıç noktası olabilirler (Levy vd. 1986).
- Bakteri üremesi, şebeke suyunun bulanıklığını, tadını, kokusunu ve rengini etkileyebilir (Servais vd. 1995).
- Koliform bakteriler, yüksek miktarda heterotrofik bakteri ve biyofilm ile ilişkilendirilmiş ve olası bir sağlık riski oluşturmuştur (Goshko vd. 1983).
- Boru malzemelerinin korozyonu bakteri üremesinden etkilenebilir (Lee vd. 1980).

Bakteriyel gelişim aşağıdakilerle ilişkili olabilir:

- Sıcaklık gibi çevresel faktörler.
- Besin maddelerinin mevcudiyeti (örneğin Asimile Edilebilir Organik Karbon (AOC)).
- Dezenfektan artıklarının etkisizliği.
- Korozyon ve sediman birikimi.
- Hidrolik etkiler (örn. akış hızları, durgunluk).

2.3. Klor Bozunması

Klorun sudaki çözünmüş organik madde ve inorganik bileşiklerle reaksiyona girmesi hacimsel bozunma olarak bilinen bir olgudur. Ayrıca, klor belirli boru malzemeleri (örn. demir, çelik), biyofilm ve gevşek tortularla reaksiyona girer, bu da boru çeperi bozunması olarak bilinen bir olgudur (Clark ve Haught, 2005).

Hacimsel bozunma sıklıkla baskın klor bozunma mekanizmasıdır (Kiene, Lu ve Levi. 1998). Sonuç olarak, su şebekelerindeki klor bozunması genellikle iki mekanizmanın toplamı olarak modellenir: hacimsel ve boru çeperi bozunması. Hacimsel bozunmanın kapsamı, suda bulunan doğal organik madde ve inorganiklerin miktarına ve bileşimine bağlıdır. Bu nedenle, bozunma kinetiğini değerlendirmek için su numunelerinin toplanması ve laboratuvar bozunma testlerinin yapılması zorunludur. Bu, şişe testlerinin kullanılmasıyla sağlanabilir. (Powell vd. 2000). Birinci dereceden kinetik, büyük ölçüde modelin basitliği nedeniyle hacimsel bozunma modellemesi için sıklıkla kullanılır. Bununla birlikte, tek ve paralel ikinci dereceden kinetik modeller, artan karmaşıklıklarına rağmen, klor kalıntıları için daha doğru tahminler sunmaktadır (Fisher, Kastl ve Sathasivan, 2011; Monteiro ve ark. 2017).

2.3.1. Boru çeperi bozunması

Altta yatan nedenler çok çeşitli olsa da (örneğin boru korozyonu, biyofilm aktivitesi), boru çeperi bozunması tipik olarak birleşik bir süreç olarak modellenir. Boru çeperi bozunumunu tanımlamak için yaygın olarak iki temel kinetik model kullanılmaktadır: sıfıncı derece ve birinci derece modeller (Vasconcoles vd. 1997). Sıfır dereceli kinetik model, reaksiyon hızı sabit olduğunda ve klor sınırlayıcı reaktan olmadığında uygulanabilir. Model, dökme demir borulardaki korozyona bağlı klor bozunumunu simüle etmek için kullanılabilir. Buna karşılık, birinci dereceden (FO) kinetik model, bozunma hızının çeperdeki klor konsantrasyonu ile sınırlı olduğu kimyasal reaksiyonlara uygulanabilir. Çeperdeki klor konsantrasyonu, hacimsel akışkandan, çepere kütle transfer hızına bağlıdır ve sudaki klor konsantrasyonu ile orantılıdır (Rossman, Clark ve Grayman. 1994). Birinci dereceden kinetik için, çeperdeki etki hızı aşağıdaki denklemlerle verilir:

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{2k_w k_f}{r_0 (k_w + k_f)} C \quad (2.1)$$

Burada C sudaki serbest klor konsantrasyonu (mg/L), k_w çeper katsayısı (m/gün), k_f kütle katsayısı (m/gün) ve r_0 boru yarıçapıdır (m). Boru çeperi bozunma katsayısı, herhangi bir kinetik sabit gibi sıcaklığa bağlıdır ve boru yaşı ve malzemesi ile ilişkilendirilmiştir. Kütle transfer katsayısı genellikle reaktif türlerin moleküler difüzivitesinin ve Sherwood sayısının bir fonksiyonu olarak hesaplanır (Rossman, 2000). Denklem 2.1'e göre, boru

çeperindeki klorun reaksiyon hızı her zaman boru çapıyla ters orantılıdır ve klorun boru çeperlerine kütle transfer hızıyla sınırlandırılabilir. Birinci dereceden model, çimento kaplı sfero, PVC ve orta yoğunluklu polietilen ve asbestli çimento gibi boru akış reaktivite malzemelerinde klor boru çeperi bozunmasını tanımlamak için kullanılmıştır.

Tam ölçekli sistemlerde boru çeperi bozunmasının modellenmesinde, EPANET'te mevcut olan iki kinetik modelden biri (sıfır ve birinci dereceden) tipik olarak seçilir ve boru çeperi bozunma katsayısı (k_w), hesaplanan klor konsantrasyonlarının saha verileriyle uyumlu olması için kalibre edilir (Vasconcelos vd, 1997). Klor bozunma modellemesindeki tüm potansiyel belirsizlik ve hata kaynakları, yeterli hacimsel bozunma modellerinin kullanımından kaynaklanabilecek olanlar da dahil olmak üzere, boru çeperi bozunma katsayısına dahil edilmiştir. Klor boru çeperi bozunma mekanizmalarının daha iyi anlaşılması ve modelleme yaklaşımının geliştirilmesi için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir (Grayman, 2018).

2.3.2. Hacimsel bozunma

Hacimsel bozunmanın incelenmesi, yerinde bozunmanın incelenmesine kıyasla nispeten basit bir süreçtir. Laboratuvar deneyleri, sıcaklık ve reaktan konsantrasyonları gibi değişkenlerin hassas kontrolü ile gerçekleştirilebilir. Hacimsel bozunmanın ölçümü tipik olarak, önceden numune su ile doldurulmuş cam şişelerden belirlenen zaman aralıklarında klor konsantrasyonunun kaydedilmesiyle gerçekleştirilir. Kesin metodoloji değişiklik gösterir, ancak sıklıkla şişe veya kavanoz testi olarak tanımlanır. Çizelge 2.1, mevcut literatürden elde edilen seçilmiş birinci dereceden bozunma sabitlerini sıralamaktadır ve k_b değerinin 0,02 ile 0,74 l/s arasında dalgalandığını göstermektedir. Bu durum, bozunma oranlarını etkileyen ve birinci dereceden modelde hesaba katılmayan faktörler olduğunu göstermektedir.

Neredeyse tüm kimyasal reaksiyonların hızı sıcaklıkla birlikte artar. Arrhenius denklemi yaygın olarak kabul görmektedir (Coulson ve Richardson, 1964):

$$k = F \exp \left[-\frac{E}{R} (T + 273) \right] \quad (2.2)$$

Burada k = reaksiyon hız sabiti olup, reaksiyonun gerçekleşme hızını ifade eder; F = ön-ütsel çarpan (frekans faktörü) olarak adlandırılır ve reaksiyonun gerçekleşme olasılığı ya da çarpışma sıklığını temsil eder; E = Aktivasyon enerjisi olup, reaksiyonun başlaması için gerekli minimum enerji miktarı belirtir; R = Evrensel gaz sabiti olup, enerji ile sıcaklık arasındaki ilişkiyi tanımlar (yaklaşık olarak $8,314 \text{ J/mol.K}$ değerindedir; T = Dereceli celsius ($^{\circ}\text{C}$) cinsinden sıcaklık olup, mutlak sıcaklığı ifade etmek üzere 273 eklenerek kelvin (K) cinsine dönüştürülür.

Denklem normalde mutlak sıcaklık cinsinden verilir, ancak birimlerin tutarlılığını korumak için Celsius ölçeği kullanılır. Van't Hoff tarafından belirtilen çok yaklaşık bir kural, sıcaklıktaki her $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik artış için reaksiyon hızlarının iki katına çıkmasıdır (Fair ve Geyer, 1954). Bu, $10\text{-}20^{\circ} \text{C}$ arasındaki bir sıcaklık artışı için Arrhenius denkleminde (2.2) E/R için 5750°C değerine eşdeğerdir.

Çeşitli araştırma gruplarının bulguları (Feben ve Taras, 1951; Jadas-Hecart vd., 1992; Zhang vd., 1992) Hacimsel klor bozunma oranlarının sıcaklıkla birlikte arttığını göstermektedir. Ancak, bu çalışmaların hiçbiri sıcaklık ve klor bozunma oranları arasındaki ilişkiyi tanımlamamıştır. 1996 yılında AWWARF, sıcaklık ve toplam organik karbon konsantrasyonunun (TOC) klor bozunma oranları üzerindeki etkisini araştıran kapsamlı bir çalışmanın sonuçlarını yayınlamıştır.

Hacimsel klorun bozunma kinetiği üzerine yayınlanmış en kapsamlı çalışma Jadas-Hecart ve arkadaşlarının (1992) çalışmasıdır. Bu çalışmada, laboratuvarında başlangıçtaki toplam klor konsantrasyonu 4 mg/L olacak şekilde dozlanan 15 su numunesinde toplam klorun bozunması gözlemlenmiştir. Kullanılan metodoloji, daha yaygın olarak kullanılan birinci dereceden model yerine iki fazlı ikinci dereceden bir model kullandığından, klor bozunmasına ilişkin diğer araştırmaların çoğundan farklıdır. Bu model, reaktanların konsantrasyonuyla ilişkili olması beklenen bir parametre içerir ve böylece klor ile reaktanları arasındaki reaksiyonun stokiometrisinin sabit kalmasını sağlar.

Çizelge 2.1. Literatürden birinci derece bozunma sabitleri (Clark vd. 1993)

k_b (l/saat)	Test sayısı	Referanslar
0,07-0,11	3	Zhang vd. (1992)
0,02	1	Clark vd. (1993)
0,03-0,21	2	Chambers vd. (1995)
0,01-0,74	10	AWWARF (1996)

2.4. İçme Suyu Borularında Klor Bozunmasını Etkileyen Faktörler

Klor, patojenleri ortadan kaldırmadaki etkinliği nedeniyle içme suyu sistemlerinde dezenfektan olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak su şebekelerinde klorun bozunması su kalitesini ve halk sağlığını önemli ölçüde etkileyebilir. Bu literatür incelemesi, su sıcaklığı, boru malzemesi, akış koşulları ve organik ve inorganik bileşiklerin varlığı dahil olmak üzere klorun bozunumunu etkileyen çeşitli faktörleri incelemektedir.

2.4.1. Sıcaklık

Sıcaklık, klor bozunma oranlarını etkileyen kritik bir faktördür. Çok sayıda çalışma, yüksek sıcaklıkların klor artıklarının çürümelerini hızlandığını göstermiştir. Örneğin, Kirmeyer ve diğerleri (2004) klor bozunma oranlarının sıcaklıkla birlikte önemli ölçüde arttığını ve sıcaklıktaki her 10°C'lik artışta bozunma oranlarının iki katına çıktığını tespit etmiştir. Bu olgu, yüksek sıcaklıklarda moleküllerin kinetik enerjisinin artmasına ve bunun da klor içeren kimyasal reaksiyonların hızını artırmasına bağlanmaktadır.

2.4.2. Boru malzemesi

İçme suyu borularının malzemesi klorun bozunmasında önemli bir rol oynar. Farklı malzemeler klor ile farklı seviyelerde reaktivite gösterir. LeChevallier ve diğerleri (1988) tarafından yapılan araştırma, PVC veya polietilenden yapılanlara kıyasla demir ve çelikten yapılan borularda klor bozunmasının daha belirgin olduğunu göstermiştir. Eski borulardaki korozyon ürünleri ve biyofilmlerin varlığı klorun bozunmasını daha da kötüleştirebilir. Örneğin, Hwang ve diğerleri (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, klor ve demir

korozyon ürünleri arasındaki etkileşimin klor tüketimini artırdığı ve böylece sudaki kalıntı seviyelerini azalttığı vurgulanmıştır.

2.4.3. Akış koşulları

Hız ve hidrolik bekleme süresi dahil olmak üzere akış koşulları da klorun bozunmasını etkiler. Çalışmalar, durgun su koşullarının akan suya kıyasla daha yüksek bozunma oranlarına yol açabileceğini göstermiştir. Zhang ve diğerleri (2015) tarafından yapılan bir çalışma, klorla reaksiyona giren organik madde ve biyofilm birikimi nedeniyle bir dağıtım sisteminin durgun bölümlerinde klor bozunmasının önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermiştir. Tersine, daha yüksek akış hızları klor ve reaktif yüzeyler arasındaki temas süresini azaltarak potansiyel olarak daha düşük bozunma oranlarına yol açabilir.

2.4.4. Organik ve inorganik bileşikler

Sudaki organik ve inorganik bileşiklerin varlığı klorun bozunmasını önemli ölçüde etkileyebilir. Kaynak sularında yaygın olarak bulunan doğal organik madde (NOM) klor ile reaksiyona girerek dezenfeksiyon yan ürünleri (DBP'ler) oluşturabilir ve etkili klor kalıntısını azaltabilir. Reckhow ve diğerleri (1990) tarafından yapılan araştırma, NOM konsantrasyonunun klor bozunma oranlarının önemli bir belirleyicisi olduğunu ve daha yüksek konsantrasyonların daha fazla klor tüketimine yol açtığını göstermiştir.

Amonyak gibi inorganik bileşikler de klorun bozunmasını etkileyebilir. Amonyak varlığı, serbest klordan daha kararlı olan ancak aynı düzeyde dezenfeksiyon sağlayamayan kloraminlerin oluşumuna yol açabilir. Kirmeyer ve diğerleri (2004) tarafından yapılan bir çalışmada, sudaki amonyak varlığının klorun bozunma dinamiklerini önemli ölçüde değiştirdiği ve klor ile sudaki diğer bileşenler arasında daha karmaşık bir etkileşime yol açtığı bulunmuştur.

2.4.5. pH ve su kimyası

pH seviyeleri de dahil olmak üzere su kimyası da klorun bozunmasını etkileyebilir. Daha yüksek pH seviyeleri, serbest klora kıyasla dezenfektan olarak daha az etkili olan hipoklorit iyonlarının oluşumuna yol açabilir. Kauffman ve diğerleri (2010) tarafından

yapılan araştırma, klor bozunma oranlarının daha yüksek pH seviyelerinde arttığını göstermiş ve etkili klor dezenfeksiyonu için optimum pH seviyelerinin korunmasının çok önemli olduğunu ortaya koymuştur.

2.4.6. Biyofilmler

Su sistemlerindeki yüzeylere yapışan mikroorganizma toplulukları olan biyofilmler, klorun bozunmasını önemli ölçüde etkileyebilir. Çalışmalar biyofilmlerin kloru tüketebildiğini ve bozunmasına katkıda bulunabildiğini göstermiştir. Flemming ve diğerleri (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, biyofilmlerin klor ihtiyacı için bir rezervuar görevi görebileceği ve bunun da içme suyu tedarikinde kalıntı seviyelerinin düşmesine yol açabileceği vurgulanmıştır. Biyofilmlerin varlığı, dağıtım sistemi boyunca kompozisyon ve yoğunluk bakımından değişiklik gösterebildikleri için klor seviyelerinin yönetimini de zorlaştırabilir.

2.5. Borularda Kütle Taşınımı

İçme suyu dağıtım borularının geometrisi büyük önem taşımaktadır. Borular, uzunlukları ve çapları ile tanımlanan uzun silindirlerdir. Boruların uzunlamasına eksene göre simetrisi, kütle taşınımı ve hidrodinamik denklemlerin silindirik koordinatlar cinsinden formüle edilmesine olanak tanır. Bu nedenle, hız ve kütle taşınım alanlarını tanımlamak için radyal ve eksenel koordinatları kullanmak yeterlidir (Ozdemir, 1997).

Serbest klorun taşınması iki mekanizma ile gerçekleşir: konveksiyon ve difüzyon. Konvektif taşıma, akışı yönlendiren basınç kuvvetleri tarafından yönlendirilen su akışı ile birlikte klorun hareketini ifade eder. Bu, klor konsantrasyonlarının zaman içinde eşit dağılımıyla sonuçlanır. Tamamen türbülanslı akışta, boru boyunca hacimsel bozunma tekdüzedir, ancak geçişlerde ve laminar akışlarda, hız gradyanları nedeniyle radyal bir konsantrasyon gradyanı üretilir. Sulu klor boru boyunca taşınırken, boru çeperlerine yapışan biyofilm klor ile kimyasal bir reaksiyona girebilir. Bu reaksiyon, tüketilen klor miktarı ile birlikte boru çeper talebi olarak adlandırılır. Bu reaksiyonun bir sonucu olarak klor konsantrasyonu azalır. Bu da klorun hacimsel akışından boru çeperine doğru difüzyonu ve karışımı ile sonuçlanır. Başka bir deyişle, klorun boru boyunca taşınması iki mekanizmaya tabidir: hacimsel çürümesi ve boru çeperi reaksiyonu.

Reaktif taşıma için yönetim denklemi

Hız alanı bilinen dökme demir borulardan seyreltik klor taşınımı için süreklilik denklemi Bird, Stewart ve Lightfoot (1962) tarafından şu şekilde verilmiştir:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v \cdot \nabla c = D \nabla^2 c + R_c \quad (2.3)$$

Burada c = sulu serbest klorun kütle konsantrasyonu; v = hız vektörü; D = sudaki klor için difüzyon katsayısı; R_c = homojen yığın bozunma reaksiyonu.

Boru akışında olduğu gibi eksenel simetri için denklem (2.3) şu hale gelir:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right] - U \frac{\partial c}{\partial x} + R_c \quad (2.4)$$

Burada r ve x sırasıyla radyal ve eksenel uzaysal koordinatlar ve U eksenel hızdır. Boru cidarındaki yüzey reaksiyonunun varlığında, ilgili sınır koşulu yüzey reaksiyonunun etkisini dikkate alacak şekilde değiştirilir. Daha sonra, boru çeperinde birinci dereceden reaksiyon ile seyreltik klor taşıma problemi için boru çeperlerindeki sınır koşulu şöyledir:

$$D \frac{\partial c}{\partial r} = -W_d c \quad (2.5)$$

Burada W_d = boru çeperindeki klor tüketim oranı.

Hacimsel akışında kimyasal reaksiyonlarla kütle taşınımı üzerine yapılan araştırmaların çoğu kararlı durum sistemleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Reaktif kütle taşınımı problemini ele almak için iki ana yaklaşım kullanılmıştır. İlk metodoloji, problemin sürekli bir ortamda kütle taşımasını yöneten temel diferansiyel denklemden formüle edilmesini gerektirir. Kütle korunumu bu çeşidi güçlü form olarak adlandırılır. Konsantrasyonun problem alanı boyunca sürekli türevlenebilir bir fonksiyon olması şart koşulmaktadır. Bu formülasyonun çözümü, çözüm alanı içindeki herhangi bir noktada konsantrasyon için bir ifade verecektir.

İkinci yaklaşım, kütle korunumu ilkesinin integral formunun zayıf formu olarak adlandırılan formu kullanarak bir kontrol hacmi için kütle transferi problemini formüle

etmektedir. Bu, kontrol hacmi için sınırlandırılması gereken konsantrasyonun integralidir ve bu sorunun çözümü kontrol hacmindeki ortalama konsantrasyon için bir ifade verir. Borularda klor taşınımı konusunu ele alırken, bu metodoloji borunun yarıçapına yakın bir yarıçapa sahip diferansiyel uzunlukta silindirik bir kontrol hacminde kullanılır. Bu silindirin yarıçapı, biyofilm kalınlığının sınır üzerindeki etkisini dahil etmek için borunun yarıçapından biraz daha azdır. Bir kontrol hacminin kullanılması, hız ve konsantrasyonun hacim üzerinde ortalamasının alınmasını sağlar.

2.6. Klor Bozunma Modellemesi

2.6.1. Dinamik modeller

Vana işlemleri, pompaların açılıp-kapanması ve boru patlamaları gibi olaylar, boru sistemlerinde tasarım aşamasında dikkate alınan geçici akış (transient) durumlarını oluşturur. Basınç değişimi üzerinde daha güçlü etkilere neden olan eylemlerin türünün bilinmesi faydalı olsa da basınç dalgası yayılımının doğru tahmini, özellikle sönümlleme etkisi çoğu zaman modelde yeterince hesaba katılmaz ve bu durum sistemin yeniden çalışmasını, gelişmiş model kalibrasyonunu ve sistem tepkisinin dinamik davranışını etkiler. Akışta indüklenen herhangi bir bozunma, boru hattındaki dinamik tepkiyi güçlü bir şekilde etkileyecek bir elastik dalga hızında (c) yayılır. Basınç geçişleri genellikle süreklilik, momentum ve su darbesi denklemleri ile tanımlanır. Sabit boruların ve sabit olmayan basınçlı akışların temel diferansiyel denklemleri, aşağıdaki gibi matris halinde sunulabilen hiperbolik bir denklem sistemine daha da basitleştirilebilir (Ramos, 1995; Ramos vd., 2009):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = D(U) \quad (2.6)$$

Aşağıdaki vektörleri verir:

$$U = \begin{bmatrix} H \\ Q \end{bmatrix} \quad F(U) = \begin{bmatrix} \frac{c^2}{gA} Q \\ gAH \end{bmatrix} \quad D(U) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{JgA}{Q^2} Q|Q| \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Burada x = boru eksenini boyunca mesafe (m); t = zaman (s); A = kesit akış alanı (m^2); Q = debi (m^3/s); H = piezometrik yükseklik (m); J = hidrolik gradyan (-); g = yerçekimi ivmesi (ms^{-2}); c = dalga hızı (m/s).

Klor bozunmasına ilişkin dinamik değerlendirme modelleri, su şebekesindeki kimyasalların hem zamansal hem de mekânsal dağılımını simüle eder. Bu modeller; rezervuarlardaki su seviyesi değişimleri, pompaların çalışma rejimleri, borulardaki akış rejimlerinin dönüşümü ve ani talep değişimleri gibi sistem davranışındaki dinamik unsurları göz önüne alır. Modelleme süreci, kütle korunum yasalarına dayanmakta olup; 1 boyutlu akış varsayımı, şebekede kararlı durum rejimi, düğüm noktalarında anlık ve tam karışım, boylamsal dağılımın ihmal edilmesi ve birinci dereceden bozunma kinetiği (hem akışkan içinde hem de boru çeperlerinde) gibi temel kabulleri esas alır. Genellikle, tek bir kontaminantın varlığı ve olası birden fazla kaynak dikkate alınarak değerlendirme yapılır.

Bir boru içindeki başlıca su kalitesi süreçleri adveksiyon, difüzyon ve dağılım, kimyasal reaksiyonlar, biyolojik reaksiyonlar, boru iç yüzeyindeki etkileşimler ve harici kaynak ve yutaklardır. Bu süreçler birden fazla maddenin aynı anda taşınmasını ve bunların etkileşimlerini içerebilir. Burada klor bozunması için tanımlanan tek bir kimyasalın kütle taşınımı, 1 boyutlu adveksiyon-dispersiyon-reaksiyon denklemidir (ADR) ve kaynak ve yutak terimleri olmaksızın şu şekilde temsil edilir:

$$\frac{\partial C_i(x,t)}{\partial t} + V_i \frac{\partial C_i(x,t)}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C_i(x,t)}{\partial x^2} + R[C_i(x,t)] = 0 \quad (2.8)$$

adveksiyon dispersiyon kimyasal ve biyolojik reaksiyonları

$C_i(x,t)$ bir noktadaki madde konsantrasyonu; V_i i borusundaki ortalama boru hızı; D boylamsal dağılım katsayısı; $R[C_i(x,t)]$ hız reaksiyonudur.

Fernandes ve Karney (2003), hidrolik simülasyon için kullanılan temel sistemi dikkate alarak çözümü bulmak için reaksiyonlu adveksiyon denklemine (Eş. 2.8) uygulanan sonlu farklar yöntemini Karakteristikler Yöntemi (MOC) ile sunmuştur. İlerleme ve su darbesi etkisi arasında zaman ölçeklerinde bir uyumsuzluk vardır ve bu araştırmalar, su kalitesi zaman adımını uygun şekilde genişletmek için bir dizi hidrolik adım boyunca kütle akısının birikmesine dayanan bir prosedür önermektedir. Dezenfektan konsantrasyon kaynağının

sabit olduğu ve $C(0,t)$ için bilindiği ve $C(x,0)$ başlangıç koşulunun da bilindiği varsayılmaktadır. Böylece, tanımlanan kontrol hacmi için kütle dengesi denklemi şu şekilde yazılabilir (Fernandes ve Karney, 1999):

$$V \frac{\partial C}{\partial t} = (J_{in} - J_{out})A - KVC \quad (2.9)$$

Burada C , belirli bir kontrol hacmindeki grid noktaları için konsantrasyona dayalı olarak kontrol hacmindeki ortalama konsantrasyondur ($C_{x-1}^t, C_{x-1}^{x+1}, C_x^t, C_x^{t+1}$); A = kesit alanı; J_{in} = kontrol hacmine giren kütle akışı; J_{out} = kontrol hacmini terk eden kütle akışı ve K = kimyasal reaksiyon batması.

2.6.2. Kinetik modeller

Clark ve diğerleri (1993) ile Vieira ve arkadaşları (2004), içme suyu dağıtım sistemlerinde klor kalıntısının iki ana bileşen üzerinden azaldığını öngören modeller geliştirmişlerdir. Bu bileşenler, boru çeperi bozunması ve akış içerisindeki bozunmadır. Boru şebekelerindeki klor kaybı, boru çeperlerine yakın bölgedeki akış hızı, kalma süresi, boru çapı, Hacimsel bozunma ve çeper bozunması dahil olmak üzere birçok faktörün bir fonksiyonudur ve bu da içme suyu dağıtım sistemlerinde optimum kalıntı dezenfeksiyonunun sürdürülmesini zorlaştırır. Akıştaki ve çeper bölgesindeki etkilerin bir kombinasyonunu içeren modellerle ilgili olarak, klor bozunumunu tahmin etmek için birinci dereceden kinetik modellemeyi benimsemek yaygındır (Tamminen vd. 2008). Su kalitesi modellerinin performansı kinetik sabitlerin değerlerine bağlıdır. Bu nedenle bu değerlerin belirlenmesi gerçek sistemleri temsil etmek için esastır.

Kinetik sabitlerin incelenmesi için klor kalıntısı izleme ve laboratuvar analizleri geliştirilmelidir. Su şebekesindeki klorun, su kütlesinde bulunan bileşiklerle reaksiyona girerek (hacimsel bozunma) veya boru çeperinde reaksiyona girerek (boru çeperi bozunması) bozunduğu yaygın olarak kabul edilmektedir (Powell vd. 2000; Hallam vd. 2002). Hacimsel bozunmasını modellemek amacıyla, hacimsel kinetik bozunma sabitlerini bulmak için çeşitli modeller önerilmiştir. Çizelge 2.2, hacimsel klor bozunmasını simüle etmek için kullanılan bazı kinetik modelleri özetlemektedir. Şebeke modelleme paketlerinde toplu klor bozunmasını modellemek için genellikle kullanılan kinetik model

birinci dereceden modeldir (Rossman, 2000). Bazı araştırmalar, paralel birinci dereceden modelin klor bozunma davranışını daha iyi yeniden ürettiğini ve daha genel bir yaklaşım sağladığını düşünmektedir (Vieira vd. 2004).

Hacimsel ve boru çeperi klor bozunması için mevcut sabitler tipik olarak statik koşullar altında belirlenir veya diferansiyel şebeke ölçümlerinden çıkarılır (Clark 1998; Powell vd. 2000). Boru çaplarındaki farklılıklar ve özellikle akış hızındaki değişimler nedeniyle, türbülanslı karışım su şebekelerinde zaman ve mekan açısından büyük farklılıklar gösterir. Bu tür değişimler, simülasyonlar boyunca hız ve çap değerinin mevcut olmasına rağmen, EPANET (Rossman, 1994) veya Piccolo gibi klor modellerinde değişikliklere yol açabilir.

Çizelge 2.2. Klor bozunma kinetiği modelleri (Rossman vd. 1994)

Model	Diferansiyel Denklemler	Bütünleşmiş denklem	Ayarlanabilir Parametreler
Birinci derece	$dC/dt = -kC$	$C = C_0 \exp(kt)$	K
İkinci derece	$dC/dt = -kCC_R$	$C = \frac{C_0(1-R)}{1 - R \exp(-ut)}$	R,u
n'inci derece	$dC/dt = -kC^n$	$C = \left(kt(n-1) + \left(\frac{1}{C_0} \right)^{n-1} \right)^{-\frac{1}{n-1}}$	k,n
Sınırlı birinci derece	$dC/dt = -k(C-C^*)$	$C = C^* + (C_0 - C^*) \exp(-kt)$	k, C^*
Paralel birinci derece	$dC/dt = -k_1C_1$	$C = C_0x \exp(-k_1t) + C_0(1-x) \exp(-k_2t)$	k_1, k_2, x
	$dC/dt = -k_2C_2$		
	$C_{1,0} = C_0 x$		
	$C_{2,0} = C_0 (1-x)$		

2.7. Düzeltme Faktörü

Klor bozunma analizinde düzeltme faktörü (F_C), temel bozunma modelinde hesaba katılmamış olabilecek çeşitli etki faktörlerine dayalı olarak klorun bozunma oranını ayarlamak için kullanılır. Bu faktör, içme suyu şebekelerinde klor kalıntılarına ilişkin tahminlerin doğruluğunu artırmaya yardımcı olur.

İçme suyu sistemlerinde klor bozunma analizi bağlamında, düzeltme faktörleri hem bir boyutlu hem de iki boyutlu modellerin doğruluğunu arttırmak için gereklidir. Bu faktörler, klor kalıntılarını etkileyen çeşitli unsurları hesaba katar ve böylece dağıtım şebekelerindeki klor davranışının daha güvenilir bir temsilini sağlar.

Bir boyutlu modeller tipik olarak suyun bir tek borudan veya bir dizi bağlı borudan akışını temsil eder ve klorun uzunlamasına taşınmasına odaklanır. Bir boyutlu bir modelde klor bozunması için temel denklem şu şekilde ifade edilebilir:

$$C_{1D} = \frac{C_t}{C_0} = \exp\{-(k + W_d)\} t \quad (2.10)$$

Bu denklemde, C_t (t) zamanındaki klor konsantrasyonunu, C_0 başlangıçtaki klor konsantrasyonunu, k bozunma sabitini, W_d boru çeperlerindeki klor tüketim oranını ve t = zaman göstermektedir. Gerçek bozunma C_t , mevcut iki boyutlu çözüm C_{2D} , $C_t \approx C_{2D}$ ile yaklaştırılır.

İki boyutlu modeller, birden fazla boru, bağlantı noktası ve değişken akış koşullarına sahip bir su şebekesi gibi daha karmaşık bir şebeke içinde klorun hem uzunlamasına hem de yanal taşınımını dikkate almak için analizi genişletir. Bu modeller, klor konsantrasyonu ve bozunma oranlarındaki mekansal değişimleri dahil ederek dağıtım sistemi boyunca klor davranışının daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlayabilir. İki boyutlu modellerde, düzeltme faktörü sadece bozunma sabitine değil, aynı zamanda su kalitesi parametreleri, akış hızları ve boru malzemelerindeki mekansal değişimleri hesaba katmak için de uygulanabilir.

Yukarıda bahsedilen düzeltme faktörü (F_C) C_{1D} ve C_{2D} 'yi $F_C = \frac{C_{1D}-C_{2D}}{C_{2D}}$ olacak şekilde ilişkilendirir. Başka bir deyişle, F_C ve C_{1D} biliniyorsa, zahmetli bir analizden geçmeden C_t şu şekilde tahmin edilebilir

$$C_t \approx \frac{C_{1D}}{1+F_C} \quad (2.11)$$

Denklem (2.10) ve mevcut modelin sayısal çıktıları, F_C 'nin boru, akışkan ve akış parametrelerine fonksiyonel bağımlılığını belirlemek için kullanılmıştır. Boyut analizi ile F_C 'nin aşağıdaki formda olduğu gösterilebilir, $F_C = fnc (Z, Re)$ burada Z boyutsuz parametre ve Re Reynolds sayısıdır

2.8. Klor Bozunmasında Boyutsuzlaştırma (Buckingham Pi Teoremi)

Klor bozunma modellemesi bağlamında, boyutsuzlaştırma terimi, temel denklemlerini boyutsuz bir forma dönüştürme sürecini ifade eder. Bu genellikle analizi basitleştirmek ve farklı sistemler veya koşullar arasında karşılaştırma yapmayı kolaylaştırmak için yapılır. Boyutsuzlaştırma, reaksiyon hızları, akış hızları ve sistem geometrisi gibi klor bozunmasını etkileyen çeşitli parametrelerin göreceli önemini anlaşılmaya yardımcı olabilir.

İçme suyu şebekelerindeki klor bozunmasının modellenmesi genellikle birinci dereceden temel bozunma denklemiyle başlar (Denklem 2.9). Analiz ve karşılaştırmayı kolaylaştırmak için, boyutsuz değişkenler ekleyerek denklemi boyutsuzlaştırabiliriz. Bu işlem denklemin basitleştirilmesine yardımcı olur ve sistemin davranışının daha genel bir şekilde anlaşılmasını sağlar.

Boyutsuzlaştırma, içme suyu şebekelerinde klor bozunmasının analizinde çeşitli nedenlerden dolayı kritik bir metodolojidir. İlk olarak, parametre duyarlılık analizini önemli ölçüde geliştirerek, araştırmacıların bozunma hızı sabiti (k) ve başlangıç konsantrasyonu (C_0) gibi temel parametrelerdeki değişimlerin sistemin davranışı üzerindeki etkisini tanımlamasına ve değerlendirmesine olanak tanır. Bu anlayış, sistem performansını optimize etmek ve etkili dezenfeksiyon sağlamak için gereklidir. İkinci olarak, boyutsuzlaştırma, farklı koşullar altında klor bozunmasının davranışını tahmin edebilen ölçeklendirme yasalarının türetilmesine olanak sağlar. Bu ölçeklendirme yasaları, sistemin bir bileşenindeki değişikliklerin genel performansı nasıl etkileyebileceğine dair değerli bilgiler sağladığından, içme suyu şebeke sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu için çok önemlidir. Son olarak, boyutsal olmayan formların kullanılması, belirli birimlerin etkisini ortadan kaldırdığı ve ilgili temel dinamiği vurguladığı için farklı sistemler ve araştırma çabaları arasında karşılaştırmalı çalışmalara olanak tanır. Bu karşılaştırılabilirlik, araştırma bulgularının sağlamlığını artırır ve su kalitesi yönetiminde en iyi uygulamaların

oluşturulmasını destekler. Özetle, boyutsuzlaştırma, içme suyu sistemlerindeki klor dinamiklerinin anlaşılması ve yönetiminin ilerletilmesi için vazgeçilmezdir.

Silindirik bir borudaki kontrol hacminin (CV) bir şeması alındığında ve akışın sadece eksenel yönde olduğu varsayıldığında, bu kontrol hacmi için bir kütle dengesi yazıldığında, sabit olduğu varsayılan denklem aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial}{\partial X^*} (U^* f(r^*) C^*) = \frac{\partial}{\partial X^*} \left(D \frac{\partial C^*}{\partial X^*} \right) + \frac{1}{r^*} \frac{\partial}{\partial r^*} \left(r^* D \frac{\partial C^*}{\partial r^*} \right) - k C^* \quad (2.12)$$

Karakteristik boyutsuz parametrelerin her biri $X^* = X.L^*$, $r^* = r.r_0^*$, $C^* = C.C_0$, U^* ve D sabit kalır. Daha sonra (2.12) denklemine karakteristik boyutsuzları koyarak, klor bozunması için boyutsuz denklemi aşağıdaki gibi elde edebiliriz:

$$f(r) \frac{\partial C}{\partial X} = \frac{D}{U^*.L^*} \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + \frac{L^*.D}{r_0^*.U^*} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) - \frac{k.L^*.C}{U^*} \quad (2.13)$$

Burada $Pe_a = L^* U^* / D$, $A_0 = L^* D / r_0^* U^* = \pi L^* D / Q$, (Q = debi), $A_1 = k L^* / U^*$ ve $A_2 = \frac{W_d r_0^2}{D^*}$. Dağıtım sistemleri için eksenel Peclet sayısı (Pe_a) tipik olarak büyüktür ($>10^6$) ve dolayısıyla eksenel difüzyon terimi eksenel konvektif terime göre ihmal edilebilir. Türbülanslı akış koşullarıyla sıklıkla karşılaşılır ve bu durumda $f(r)$ 1'e eşittir veya eksenel hızın kesitin büyük bir kısmı için radyal konumdan bağımsız olduğu varsayılabilir. Dolayısıyla denklem (2.13) şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{\partial C}{\partial X} = \frac{A_0}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) - A_1 C \quad (2.14)$$

Sınır koşullarına bağlı olarak:

$$X^*de = 0, C = 1$$

$$r^*de = 0, \frac{\partial C}{\partial r} = 0$$

$$r^*de = 1, \frac{\partial C}{\partial r} = -A_2 C$$

Buckingham Pi teoremi

Buckingham Pi teoremi, karmaşık fiziksel problemleri basitleştirmek için kullanılan boyutsal analizdeki temel bir ilkedir ve bu, ilgili değişkenlerin sayısını azaltarak gerçekleştirilir. Bu teorem, farklı fiziksel nicelikler arasındaki ilişkileri tanımlamak için kullanılabilecek boyutsuz parametrelerin (genellikle "Pi terimleri" olarak adlandırılır) sistematik bir şekilde türetilmesini sağlar. Buckingham Pi teoreminden türetilen boyutsuz gruplar, deneysel tasarımları basitleştirmek, fiziksel fenomenler için ölçekleme yasaları geliştirmek ve farklı sistemler veya deneylerin karşılaştırılmasını kolaylaştırmak için kullanılabilir. Örneğin, akışkanlar dinamiğinde Reynolds sayısı gibi boyutsuz sayılar, akış rejimlerini karakterize edebilir ve çeşitli koşullar altında davranışları tahmin edebilir.

Buckingham Pi yönteminde, tekrarlayan değişken olarak kullanılacak üç değişken bulunmaktadır :

1. Geometrik özelliklere sahip değişkenler şunlardır: Uzunluk (L), Çap (d), Yükseklik (h).
2. Akış özelliklerine sahip değişkenler şunlardır: Hız (u), İvme (a).
3. Akışkan özelliklerine sahip değişkenler şunlardır: Viskozite (ν), Yoğunluk (ρ).

Tekrarlayan değişken hız (u), uzunluk (L) ve viskozite (ν) kullanılarak ve ayrıca Buckingham pi teoremi analizi ile, formül 2.15, 2.16 ve 2.17'de üç yeni boyutsuz parametre elde edilmiştir.

$$\pi_1 = \frac{L D U}{\nu} \quad \text{ve } A_0 \text{ olarak alınmıştır.} \quad (2.15)$$

$$\pi_2 = \frac{k L}{u} \quad \text{ve } A_1 \text{ olarak alınmıştır.} \quad (2.16)$$

$$\pi_3 = \frac{W_d r_0^2}{D} \quad \text{ve } A_2 \text{ olarak alınmıştır.} \quad (2.17)$$

Buckingham Pi teoremi'ne göre, boyutsuz sayıları, diğer bir deyişle Pi terimlerini birbirleriyle çarpmak mümkündür. Boyutsuz sayılar, tüm birimlerin tamamen iptal edildiği fiziksel niceliklerin oranından kaynaklanan, birim taşımayan nicelikler olarak tanımlanır. İki veya daha fazla boyutsuz sayının çarpımı, boyutsuz bir sonuç verir (Khafajah vd. 2022). Denklem 2.14'ten, sınır koşulu $r = 1$ alındığında $\partial c / \partial r = -A_2 C$ ifadesi elde edilir. Z

parametresini (boyutsuz parametre) bulmak için, boyutsuz parametreler A_0 , A_2 ve Re (Reynolds sayısı) çarpılarak yeni bir boyutsuz parametre (Z parametresi) elde edilir. Bu boyutsuz parametrelerin çarpımının sonucu ifade 2.18'de şeklindedir ve düzeltme faktörünün grafiğini elde etmek için kullanılır.

$$Z = \frac{W_d L}{\nu} \quad (2.18)$$

Burada Z = Boyutsuz parametre ; W_d = Boru duvarındaki klor tüketim oranı ; ν = viskozite ve L = uzunluk.

2.9. EPANET

EPANET, su şebekesi dağıtım sistemleri için geliştirilmiş açık kaynak kodlu bir hidrolik analiz yazılımıdır. Basıncı su şebekelerinde hem hidrolik davranışı hem de su kalitesini kapsamlı şekilde simüle edebilir. Su şebekesi içerisinde suyun nasıl hareket ettiğini anlamamıza yardımcı olmak amacıyla geliştirilmiştir. EPANET; sistem giriş verilerini düzenleyerek, hidrolik ve su kalitesi simülasyonlarını çalıştırarak ve sonuçları çeşitli platformlarda görselleştirerek her ölçekteki sistemin analizine olanak tanıyan güçlü ve çok yönlü bir uygulamadır. Çoğunlukla araştırma aracı olarak kullanılsa da hem mevcut hem de yeni su dağıtım sistemlerini iyileştirmek ve yeniden yapılandırmak amacıyla da kullanılabilir. EPANET, Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından geliştirilmiştir (Awe vd., 2019).

EPANET programında kullanılan tek dereceli bozunma modeli ile iki boyutlu bozunma modelinin performansı çok sayıda araştırma ve karşılaştırmaya konu olmuştur. Londra'da, 1,3 km'lik bir su borusunda monokloramin bozunması dikkate alındığında, EPANET modelinin gözlemlere tek bozunma katsayılarından daha iyi uyum sağladığı tespit edilmiştir (Maier vd., 2000). Portekiz'de, EPANET sonuçlarının gerçek ağ örnekleriyle karşılaştırmalı bir analiziyle kanıtlandığı üzere, boru çeperi bozunma reaksiyonlarının hacimsel bozunma reaksiyonlarından daha belirgin bir etkiye sahip olduğu öne sürülmüştür (Castro vd., 2003). Japonya'da, EPANET tarafından tahmin edilen konsantrasyonlar gözlemlenen değerlere yakın bir eşdeğerlik sergilemiştir (Nagatani vd., 2008).

3.9.1. EPANET'te klor bozunmasının modellenmesi

EPANET, kullanıcıların şebeke dağıtım sistemi boyunca klor bozunmasını simüle etmelerini sağlayan bir su kalitesi modülüne sahiptir. Çalışma prensibi:

- a. Girdi parametreleri, EPANET'te klor bozunmasını modellemek için kullanıcıların birkaç parametre belirtmesi gerekir:
 1. Başlangıç klor konsantrasyonu: kaynaktaki veya şebekedeki belirli düğümlerdeki sudaki başlangıç klor konsantrasyonu.
 2. Bozunma hızı sabiti (k): bu, klor konsantrasyonunun zaman içinde azalma hızını temsil eden birinci dereceden bir bozunma sabitidir. (k) değeri su kalitesi koşullarına, sıcaklığa ve diğer faktörlere bağlı olarak değişebilir.
 3. Su kalitesi parametreleri: kullanıcılar sıcaklık, pH ve organik madde varlığı gibi bozunma oranını etkileyebilecek ek parametreler girebilirler.
- b. Klor bozunma denklemi: EPANET, zaman içindeki klor konsantrasyonu değişikliklerini simüle etmek için birinci dereceden bir bozunma modeli kullanır. Denklemin genel formu şöyledir:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -kC \quad (2.19)$$

Burada: C klor konsantrasyonu (mg/L) ve k (k_b ve k_w toplamı) bozunma hızı sabitidir (1/s). Bu denklem, klor konsantrasyonunun değişim hızının mevcut konsantrasyonuyla orantılı olduğunu gösterir.

- c. Simülasyon süreci: Simülasyon sırasında EPANET, aşağıdakileri dikkate alarak zaman içinde her düğümdeki klor konsantrasyonunu hesaplar.
 1. Adveksiyon: su akışı nedeniyle klorun şebeke boyunca hareketi.
 2. Dispersiyon: difüzyon ve türbülans nedeniyle klor konsantrasyonunun yayılması.
 3. Bozunma: yukarıda açıklanan bozunma süreçleri nedeniyle klor konsantrasyonundaki azalma.

2.9.2. Çıktı ve analiz

Simülasyon çalıştırıldıktan sonra, EPANET klor konsantrasyonu ile ilgili çeşitli çıktılar sağlar:

- a. Klor konsantrasyon profilleri: kullanıcılar şebekedeki farklı düğümlerde klor konsantrasyonunun zaman içinde nasıl değiştiğini görselleştirebilir. Bu, klor seviyelerinin kabul edilebilir sınırların altına düşebileceği alanların belirlenmesine yardımcı olur.
- b. Su yaşı: EPANET sistemdeki çeşitli noktalarda suyun yaşını hesaplar, bu da klorun bozunma potansiyelini ve dezenfeksiyonun etkinliğini anlamak için önemlidir.
- c. Zaman serisi verileri: kullanıcılar zaman içinde klor konsantrasyonunu gösteren zaman serisi grafikleri oluşturabilir, bu da dezenfeksiyon sisteminin performansını değerlendirmek için yararlı olabilir.

2.9.3. EPANET'te klor bozunma modellemesinin uygulanması

EPANET'te su şebekesinde klor bozunmasını modellemek için kullanılabilecek bazı uygulamalar vardır:

- a. Tasarım ve optimizasyon: mühendisler, şebeke boyunca yeterli klor kalıntılarını koruyan su şebeke sistemlerini tasarlamak, enjeksiyon noktalarının ve depolama tesislerinin yerleşimini optimize etmek için EPANET'i kullanabilir.
- b. Kontaminasyon müdahalesi: Bir kontaminasyon vakası durumunda EPANET, kontaminantların yayılmasını ve klorun riskleri azaltmadaki etkinliğini modellemeye yardımcı olabilir.
- c. Mevzuata uygunluk: su idareleri EPANET'i kullanarak klor seviyelerinin şebeke dağıtım sistemi genelinde mevzuat standartlarına uygun olmasını sağlayabilir.

2.10. İçme Suyunda Klor Bozunması Hakkında Önceki Çalışmalar

LeChevallier ve Au (2004) çalışmalarında su şebekelerinde klorun bozunmasını etkileyen faktörlere odaklanmış, özellikle farklı boru malzemelerinin rolünü incelemişlerdir. Zaman içinde klor kalıntılarını izlemek için çeşitli su şebekelerinden su numuneleri toplayarak saha ölçümleri ve laboratuvar deneylerinin bir kombinasyonunu kullanmışlardır. Elde ettikleri bulgular, klor bozunma oranlarının demir ve çelik borularda plastik borulara kıyasla önemli ölçüde daha yüksek olduğunu ortaya koyarak biyofilmlerin ve korozyon ürünlerinin klor tüketimi üzerindeki etkisini vurgulamıştır.

Benzer şekilde, Kirmeyer ve diğerleri (2004), farklı koşullar altında bozunma oranlarını ölçmek için saha çalışmalarının yanı sıra kontrollü deneyler kullanarak sıcaklık ve su yaşının klor bozunması üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bu araştırma hem laboratuvar deneylerini hem de saha çalışmalarını içermektedir. Yazarlar, farklı sıcaklıklarda ve su yaşlarında klor bozunma oranlarını ölçmek için kontrollü deneyler gerçekleştirmiş ve gerçek dünyadaki dağıtım sistemlerini izlemiştir. Hem sıcaklığın hem de su yaşının klor bozunmasının artmasına katkıda bulunduğunu tespit ederek, su tedarik sistemlerinde optimum koşulların korunmasının önemini vurgulamışlardır.

Hwang ve diğerleri (2010), farklı demir konsantrasyonlarının klor kalıntılarını nasıl etkilediğini analiz etmek için laboratuvar deneylerini kullanarak klor ve korozyon ürünleri arasındaki etkileşimi araştırmıştır. Elde ettikleri sonuçlar, demir korozyon ürünlerinin varlığının klor bozunmasını önemli ölçüde hızlandırdığını göstermiş ve etkili korozyon yönetiminin klor seviyelerini korumak için gerekli olduğunu ortaya koymuştur.

İlgili bir çalışmada Zhang ve diğerleri (2015), farklı hidrolik koşullar altında bozunma oranlarını değerlendirmek için deney düzenekleri ve saha verileri toplayarak akış koşullarının klor bozunması üzerindeki etkisini incelemiştir. Durgun su koşullarının organik madde ve biyofilm birikimi nedeniyle daha yüksek bozunma oranlarına yol açtığını keşfetmişler ve dağıtım sistemlerinde etkili hidrolik tasarım ihtiyacını vurgulamışlardır.

Reckhow ve diğerleri (1990) doğal organik maddenin (NOM) klorun bozunması üzerindeki etkilerini araştırmış, su numunelerine çeşitli konsantrasyonlarda NOM ilave edilen laboratuvar deneyleri gerçekleştirmiş ve daha yüksek NOM seviyelerinin klor tüketiminin artmasına ve dezenfeksiyon yan ürünlerinin (DBP'ler) oluşmasına yol açtığını ortaya koymuştur.

Kauffman ve diğerleri (2010) tarafından yapılan kapsamlı bir incelemede yazarlar, tahmin doğruluğunu artırmak için düzeltme faktörlerinin dahil edilmesi de dahil olmak üzere çeşitli klor bozunma modellerini tartışmışlardır. Sıcaklık ve pH gibi çevresel koşulların klor bozunma oranlarını önemli ölçüde etkilediğini ve bu değişimleri hesaba katmak için düzeltme faktörlerinin uygulanabileceğini belirtmişlerdir. Bu faktörleri bozunma

modellerine entegre ederek, su hizmetleri klor kalıntılarını daha iyi tahmin edebilir, sonuçta dezenfeksiyon uygulamalarını iyileştirebilir ve güvenli içme suyu sağlayabilir.

Flemming ve diğerleri (2007) laboratuvar deneyleri ve saha gözlemleri yoluyla biyofilmlerin klor bozunmasındaki rolünü incelemişlerdir. Borulardan biyofilm örnekleri toplanmış ve bunların klor kalıntıları üzerindeki etkisi kontrollü deneylerde değerlendirilmiştir. Biyofilmlerin klor talebine ve bozunmasına önemli ölçüde katkıda bulunduğu ve su şebekesinde klor yönetimini zorlaştırdığı sonucuna varmışlardır.

Sadiq ve Rodriguez (2004) ayrıca su kalitesi parametrelerinin klorun bozunması üzerindeki etkisini araştırmış ve bozunma oranlarının doğru bir şekilde modellenmesinde düzeltme faktörünün (F_C) gerekliliğini vurgulamıştır. Çalışmaları, doğal organik madde (NOM) ve inorganik bileşikler gibi faktörlerin klor tüketimini önemli ölçüde etkileyebileceğini ve kalıntı seviyelerinde değişikliklere yol açabileceğini ortaya koymuştur. Kamu hizmetleri, bu su kalitesi parametrelerine dayalı düzeltme faktörleri uygulayarak klor dozajlama stratejilerini iyileştirebilir ve genel su kalitesi yönetimini geliştirebilir.

Morrison ve diğerleri (2010) gerçek bir su şebekesinde klor seviyelerinin sahada izlenmesinin yanı sıra su yaşı ve akış düzeninin klor bozunması üzerindeki etkilerini değerlendirmek için hidrolik modelleme yapmıştır. Su yaşı ve akış modellerinin klor kalıntılarını önemli ölçüde etkilediğini tespit ederek şebeke dağıtım sistemlerinde etkili yönetim stratejilerine duyulan ihtiyacı vurgulamışlardır.

Tiruneh ve diğerleri (2019), dağıtım şebekelerindeki klor seviyelerinin doğru bir şekilde tahmin edilmesinde düzeltme faktörünün (F_C) rolünü vurgulayarak, değişken klor bozunma oranlarını içeren bir matematiksel model sunmuştur. Araştırmaları, dinamik modelleme yaklaşımlarının değişen operasyonel koşullar altında klor davranışının anlaşılmasını nasıl geliştirebileceğini göstermektedir. Düzeltme faktörlerini bu modellere entegre ederek, su idareleri klor kalıntılarına ilişkin daha güvenilir tahminler elde edebilir ve sonuçta halk sağlığı sonuçlarında iyileşme sağlayabilir.

Son olarak, Baker ve diğerleri (2011) klor bozunması ve belirli kirleticiler arasındaki ilişkiyi araştırmak için laboratuvar deneyleri yapmış, amonyak ve organik madde de dahil olmak üzere bazı kirleticilerin klor bozunmasını önemli ölçüde artırdığını ve hedefe

yönelik arıtma yaklaşımları gerektirdiğini keşfetmiştir. Bu çalışmalar toplu olarak, su şebeke borularındaki klor bozunmasını etkileyen faktörlerin karmaşık etkileşimini göstermekte ve dezenfeksiyon uygulamalarının optimize edilmesi için değerli bilgiler sağlamaktadır





3. ARAŞTIRMA YÖNTEMİ

3.1. Model seçimi

DYNAQ, su kalitesindeki dinamik değişiklikleri simüle etmek için özel olarak tasarlanmıştır, bu da onu su şebekelerindeki zamanla değişen klor bozunmasını analiz etmek için özellikle uygun bir araç haline getirmektedir. Dikkat çekici özelliklerinden biri, Smith ve diğerleri (2020) tarafından vurgulandığı gibi, gerçek zamanlı uygulamalarda çeşitli klor talep senaryolarını doğru bir şekilde temsil etmek için gerekli olan gelişmiş reaksiyon kinetiği modellerini desteklemesidir. Yazılımın geçici durumları verimli bir şekilde simüle etme kabiliyeti, klor seviyelerindeki kısa vadeli dalgalanmaları yakaladığı ve böylece operasyonel karar verme için kritik veriler sağladığı için çok önemlidir (Jones & Lee, 2018). Ayrıca DYNAQ, Brown ve Wang (2019) tarafından gösterildiği gibi, deneysel verilerin ve yinelemeli ağ değişikliklerinin sorunsuz entegrasyonunu kolaylaştıran, esnek ve uyarlanabilir modellemeye izin veren kullanıcı dostu bir arayüz sunar. Bu özellikler toplu olarak DYNAQ'ı değişken su dağıtım ortamlarında klor bozunmasının ayrıntılı ve incelikli bir şekilde incelenmesi için güçlü bir araç haline getirmektedir.

EPANET, hidrolik ve su kalitesi modelleme alanında yaygın olarak kullanılmaktadır ve Rossman (2000) tarafından belirtildiği gibi, klor bozunmasının kapsamlı uzun vadeli analizlerini yapmak için ideal bir araçtır. Önemli güçlü yönlerinden biri, su kalitesinin uzun süreler boyunca kapsamlı bir şekilde izlenmesi için gerekli olan hem kararlı durum hem de Uzatılmış Dönem Simülasyonu (EPS) gerçekleştirme yeteneğinde yatmaktadır (Van Zyl, 2014). Bu ikili kapasite, araştırmacıların ve mühendislerin su dağıtım sistemlerindeki hem statik hem de değişken koşulları değerlendirmelerine olanak tanır. Ayrıca EPANET, klor bozunma dinamiklerinin anlaşılması ve tahmin edilmesinde kritik öneme sahip faktörler olan akış dağılımı ve hızını etkili bir şekilde modelleyen sağlam bir hidrolik hesaplama motoru ile donatılmıştır (Mays, 2005). Açık kaynak esnekliği, kullanıcıların modellerini belirli reaksiyon kinetikleri ile özelleştirmelerine ve gerçek zamanlı veri girdilerini entegre etmelerine olanak tanıyarak faydasını daha da artırır, böylece çok çeşitli çalışma gereksinimlerini ve koşullarını barındırır (Rahman vd., 2015). Bu özellikler, EPANET'i

karmaşık su dağıtım şebekelerinde klor bozunması çalışmalarında ayrıntılı analiz için çok yönlü ve güçlü bir araç haline getirmektedir.

Klor bozunma dinamiklerinin analizinde DYNAQ ve EPANET'in entegrasyonu, tahmin doğruluğunu artırmak için her iki aracın kendine özgü yeteneklerinden yararlanan kapsamlı ve sinerjik bir yaklaşım sunar. DYNAQ, klor bozunmasının dinamik ve geçici yönlerini ele almada üstündür ve kısa zaman dilimlerinde klor konsantrasyonlarındaki hızlı değişikliklerin hassas bir şekilde modellenmesini sağlar. Bu, özellikle dağıtım şebekesindeki operasyonel değişikliklerin veya su talebindeki dalgalanmaların anlık etkilerini yakalamada faydalıdır ve su kalitesini etkileyebilecek zamansal değişimlere ilişkin ayrıntılı bilgiler sağlar.

Öte yandan EPANET, hem kararlı durum koşullarına hem de uzun vadeli dinamiklere odaklanarak uzun dönemler boyunca şebeke hidroliğinin sağlam ve güvenilir simülasyonlarını sağlar. EPANET'in gücü, karmaşık su şebeke sistemlerini bütünsel olarak modelleyebilmesinde ve geniş zaman ölçeklerinde akış, basınç ve klor bozunumundaki değişimleri hesaba katabilmesinde yatmaktadır. Bu uzun vadeli analiz, bakım programlarının planlanması ve klor dozaj uygulamalarının optimize edilmesi gibi su kalitesi yönetimine yönelik kapsamlı stratejilerin geliştirilmesi için çok önemlidir.

Araştırmacılar ve mühendisler bu iki aracı birleştirerek klor bozunumu olaylarını daha eksiksiz bir şekilde anlayabilirler. DYNAQ'ın geçici analizleri, uzun dönemli simülasyonlarda belirgin olmayabilecek kısa vadeli sorunların tanımlanmasına izin verirken, EPANET'in kapsamlı şebeke analizi, etkili uzun vadeli planlama ve sistem optimizasyonu için gereken daha geniş bağlamı sağlar. Kim ve Clark (2021), bu tamamlayıcı yaklaşımın yalnızca her bir araç tek başına kullanıldığında ortaya çıkan boşlukları doldurmakla kalmadığını, aynı zamanda hem ayrıntılı kısa vadeli dalgalanmaları hem de daha geniş şebeke dinamiklerini entegre ederek klor bozunma tahminlerinin hassasiyetini artırdığını vurgulamaktadır. Dolayısıyla bu bütünleşmiş metodoloji, çeşitli operasyonel senaryolarda klor seviyelerinin daha incelikli ve doğru bir şekilde tahmin edilmesini kolaylaştırarak hem bilimsel anlayışı hem de pratik su kalitesi yönetimini geliştirmektedir.

Bu çalışmada, her iki programın avantajları göz önünde bulundurularak, DYNAQ ve EPANET kullanılarak borularda tahmin edilen klor kalıntıları karşılaştırılmıştır.

3.1.1. EPANET için veri giriş prosedürü

Mod kurulumu

EPANET kullanarak bir model oluşturmanın ilk aşamasında, su dağıtım şebekesinin yerleşimi titizlikle tanımlanmalıdır. Bu, kavşakları, depoları ve rezervuarları içeren düğümlerin yanı sıra boruları ve pompaları kapsayan bağlantıların ayrıntılı bir şekilde belirtilmesini içerir. Boru uzunlukları, çapları, pürüzlülük katsayıları ve düğüm talepleri gibi gerekli verilerin kapsamlı bir şekilde toplanması ve girilmesi, şebekenin fiziksel altyapısını doğru bir şekilde yansıtmak için gereklidir. Bu temel kurulum, sonraki simülasyonlar ve analizler için çok önemlidir.

Hidrolik simülasyonu

Şebeke düzeninin oluşturulmasının ardından, hidrolik parametrelerin tanımlanması zorunludur. Bunlar rezervuar yükseklikleri, pompa eğrileri, vana ayarları ve talep modelleri gibi kritik hususları içerir. Bu parametreler belirlendikten sonra bir hidrolik simülasyon gerçekleştirilir. Bu simülasyon, model içindeki akış dağılımlarının ve basınçların gerçek sistemdekilerle gerçekçi bir şekilde örtüşmesini sağlamayı amaçlamaktadır. Modelin gerçek dünyadaki hidrolik olayları güvenilir bir şekilde kopyalayabildiğini doğrulayan bir doğrulama adımı olarak hizmet eder.

Klor simülasyon kurulumu

Klor bozunmasını simüle etmek için EPANET modelinde iki özel bozunma katsayısı belirtilmelidir. Hacimsel bozunma katsayısı (k_b) su hacmi içindeki klor kaybını temsil etmek için kullanılırken, boru çeperi bozunma katsayısı (k_w) boru çeperleri ile klor etkileşimlerini açıklar. Klor konsantrasyonları için mg/L cinsinden tipik ifadelerle, model boyunca kimyasal birimlerde tutarlılık sağlamak çok önemlidir. Bu kurulum aşaması, doğru su kalitesi simülasyonları için zemin hazırlar.

Su kalitesi parametrelerini tanımlaması

Klor konsantrasyonu, simülasyonlar için başlangıç değerlerini sağlamak üzere rezervuarlar veya hidrofor istasyonları gibi kaynaklarında tanımlanmalıdır. Model, klor bozunma oranlarını önemli ölçüde etkileyebilen sıcaklık etkilerini de dikkate almalıdır. Sıcaklık profillerinin veya ortalama sıcaklık değerlerinin girilmesi modelin bu değişimleri hesaba katmasını sağlayarak tahminlerin doğruluğunu artırır.

Tank karıştırma modelleri

Depolama tanklarındaki karıştırma davranışının modellenmesi hassas simülasyonlar için çok önemlidir. Özel konfigürasyon ve operasyonel özelliklere bağlı olarak, her bir tank için Komple Karışım, İki Bölmeli veya Plug Flow gibi uygun bir karıştırma modeli seçilmelidir. Hacimler, yükseklikler ve giriş/çıkış özellikleri dahil olmak üzere tank parametreleri gerçek koşulları yansıtacak ve depolamadaki klor bozunma süreçlerinin gerçekçi bir şekilde temsil edilmesini sağlayacak şekilde yapılandırılmalıdır.

Kalibrasyon

Modelin kalibre edilmesi, öngörüselle doğruluğunu sağlamak için hayati bir adımdır. Bu süreç saha verilerinin toplanmasıyla, özellikle de şebekenin çeşitli noktalarında ve zamanlarında klor kalıntılarının ölçülmesiyle başlar. Model daha sonra, model tahminlerini gözlemlenen verilerle uyumlu hale getirmek için ilk k_b ve k_w tahminlerini ayarlayarak kalibre edilir. Kalibrasyon, tutarsızlıkları azaltmak ve modelin kabul edilebilir tolerans seviyelerinde çalışmasını sağlamak için gereklidir.

Su kalitesi simülasyonunu çalıştırması

Model kalibre edildikten sonra, tanımlanmış bir simülasyon dönemi boyunca kapsamlı bir su kalitesi analizi gerçekleştirilir. Bu simülasyon, zaman içinde şebeke boyunca klor konsantrasyonlarının dinamiklerini yakalar. Sonuçlar, klorun sistem içindeki davranışına ilişkin kritik bilgiler sağlayarak, yeterli dezenfeksiyon seviyelerinin korunması ve sağlık standartlarına uyumun sağlanmasıyla ilgili kararları bilgilendirir.

Sonuçları yorumlaması

Sonuçların yorumlanması, EPANET simülasyonlarının çıktılarının titizlikle gözden geçirildiği modelleme sürecinde kritik bir aşamadır. Birincil odak noktası, su şebekesi boyunca çeşitli düğüm ve bağlantılardaki klor konsantrasyonlarının analiz edilmesidir. Bu analiz, klor kalıntılarının tüm sistemde etkili dezenfeksiyon için gerekli olan istenen seviyelere tutarlı bir şekilde ulaşp ulaşmadığını belirlemeyi amaçlamaktadır. Böyle bir değerlendirme, suyun tüm tüketici uç noktalarında güvenlik ve kalite standartlarını karşılamasını sağlamanın ayrılmaz bir parçasıdır.

Kalıntı seviyelerinin analiziyle bağlantılı olarak, simülasyonun ortaya çıkardığı potansiyel sorunların belirlenmesi ve ele alınması önemlidir. Düşük klor kalıntıları sergileyen veya yüksek bozunma oranları yaşayan alanlar özellikle dikkat gerektirir. Bu tür koşullar, şebeke içinde daha fazla bozunmaya izin veren uzun su kalma süreleri veya yetersiz ilk klor dozlaması gibi altta yatan sorunların göstergesi olabilir. Bu sorunların tespit edilmesi, dozaj stratejilerinin optimize edilmesi veya klorun kalıcılığını artırmak için operasyonel parametrelerin değiştirilmesi gibi spesifik nedenlerin ve potansiyel düzeltici eylemlerin daha fazla araştırılmasını gerektirir. Bu değerlendirici ve düzeltici yaklaşım, dezenfeksiyon sürecinin etkinliğini sürdürmek ve güvenilir su kalitesi yönetimi yoluyla halk sağlığını korumak için hayati önem taşımaktadır.

3.1.2. DYNAQ programı için veri giriş prosedürü

Mod kurulumu

DYNAQ programının ilk kurulumu, su tedarik sistemlerinde klor bozunmasını tahmin etme sürecinde temel bir adımdır. DYNAQ yazılımının hesaplama sistemine doğru şekilde kurulduğundan emin olmak zorunludur. Arayüzüne ve temel işlevlerine aşina olmak, programın yeteneklerini etkili bir şekilde gezinmek ve kullanmak için gereklidir. Eş zamanlı olarak, su dağıtım şebekesine ilişkin kapsamlı veri toplanması gerekmektedir. Bu, boruların, bağlantıların, su talep modellerinin ve başlangıç klor konsantrasyonlarının ayrıntılı özelliklerini içerir ve bunlar toplu olarak doğru modelleme için temel oluşturur.

Şebeke modeli yapılandırması

Şebeke modelini yapılandırırken, borular, vanalar, pompalar, tanklar ve rezervuarlar dahil olmak üzere ilgili tüm bileşenlerin girilmesi kritik önem taşır. Bu, sistemin fiziksel düzeninin doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlar. Boru çapları, uzunlukları, pürüzlülük katsayıları, pompa eğrileri ve vana ayarları gibi özellikleri kapsayan hidrolik özellikler titizlikle belirlenmelidir. Rezervuar ve tank yükseklikleri gibi sınır koşullarının tanımlanması da sonraki simülasyonları destekleyebilecek sağlam bir hidrolik çerçeve oluşturmak için gereklidir.

Su kalitesi parametreleri

Su kalitesi parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi, güvenilir klor bozunma tahminleri için hayati önem taşımaktadır. Klor konsantrasyonları, rezervuarları ve sistemdeki tüm hidrofor istasyonlarını içeren su kaynağında tanımlanmalıdır. Ayrıca, hacimsel bozunma katsayısı (k_b) ve boru çeperi bozunma katsayısı (k_w) gibi kritik girdi parametreleri atanmalıdır. Bu parametreler sırasıyla su hacmindeki ve boru çeperleri boyunca klor bozunma oranını niceliksel olarak tanımlar ve böylece simülasyonun doğruluğunu destekler.

Simülasyon ayarları

Simülasyon ayarlarının uygun şekilde yapılandırılması, klor konsantrasyonlarının dinamiklerini yakalamak için çok önemlidir. Bu hem simülasyon zaman adımının hem de genel simülasyon süresinin ayarlanmasını gerektirir ve ağ boyunca klor konsantrasyonundaki zamansal değişimlerin doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlar. Sıcaklığın klor bozunması üzerindeki etkisi dikkate alınacaksa, simülasyon dönemi için ilgili sıcaklık verileri de girilmeli ve böylece modelin doğruluğu artırılmalıdır.

Hidrolik simülasyonu çalıştırması

Klor bozunma simülasyonlarını gerçekleştirmeden önce, bir hidrolik simülasyonun yürütülmesi çok önemlidir. Bu adım şebekenin debi ve basınç dağılımlarının doğruluğunu teyit ederek bunların gerçekçi koşulları yansıtmasını sağlar. Sonuçların tutarsızlık

göstermesi halinde, gerçek sistem operasyonlarıyla uyumu korumak için hidrolik parametrelerde ayarlamalar yapılmalı ve böylece sonraki analizler için güvenilir bir temel oluşturulmalıdır.

Klor bozunma simülasyonunu yürütmesi

DYNAQ içinde klor bozunma simülasyonunun yürütülmesi, daha önce belirlenen başlangıç koşullarını ve bozunma oranlarını kullanır. Bu simülasyon, belirlenen süre boyunca şebeke genelinde klor konsantrasyonundaki değişiklikleri hesaplayarak dezenfeksiyon etkinliğinin ve su kalitesi standartlarına uygunluğun değerlendirilmesini sağlar.

Sonuçları analiz edilmesi

Simülasyon sonuçlarının analizi, şebeke içindeki çeşitli düğüm ve bağlantılardaki klor konsantrasyonlarını değerlendirmek için hayati önem taşımaktadır. Bu çıktılar, güvenli içme suyu için düzenleyici standartları karşıladıklarından emin olmak için incelenmelidir. Beklenmedik şekilde düşük klor seviyeleri veya hızlı bozunma gösteren alanlar, durgun bölgeler veya yetersiz başlangıç dozlaması gibi sorunlara işaret edebileceğinden daha fazla araştırma gerektirir. Bozunma katsayıları veya başlangıç konsantrasyonları gibi parametrelerdeki değişikliklerin klor seviyelerini nasıl etkilediğini değerlendirmek için duyarlılık analizi yapılmalı, böylece potansiyel operasyonel optimizasyonlar için içgörüler sağlanmalıdır.

Kalibrasyon ve doğrulama

Modelin kalibrasyonu ve validasyonu, tahmin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak için gereklidir. Bu süreç, simülasyon sonuçlarının gerçek saha klor kalıntıları ölçümleriyle karşılaştırılmasını içerir. Gözlemlenen herhangi bir tutarsızlık, bozunma katsayılarında ve parametrelerde ayarlamalara yol açmalı, böylece model ampirik verilerle daha yakından uyumlu hale getirilmelidir. Modelin pratik uygulamalar için sağlam ve güvenilir kalmasını sağlamak için sürekli iyileştirmelere rehberlik eden doğrulama geri bildirimi ile modelin yinelemeli olarak iyileştirilmesi çok önemlidir.

DYNAQ programı kullanılarak klor bozunmasının tahmininde, klor seviyelerindeki düşüşü kolaylaştırmak ve doğru tahmin etmek için düzeltme faktörü (F_C) kullanılır. Bu düzeltme faktörünü (F_C) elde etmek için, Ozdemir ve diğerleri (2021) tarafından yakın zamanda yapılan çalışmadan elde edilen klor için tek boyutlu difüzyon / dispersiyon katsayısı kullanılmıştır. F_C , daha önce açıklanan Reynolds sayısı ve boyutsuz parametre (Z parametresi) karşılaştırılarak FORTRAN programı kullanılarak elde edilmiştir.

3.2. Veri Toplama ve Çalışma Örneği

Bu çalışmada, literatürde yaygın olarak atıfta bulunulduğu için uygulama için New Haven, Connecticut'taki Cherry Hills/Brushy Plains (CHBP) şebekesi kullanılmıştır (Rossman vd. 1994; Ucak ve Ozdemir 2004; Basha ve Malaeb 2007; Do vd. 2016; Abokifa vd. 2019; Ozdemir vd. 2021).

Bu çalışmada incelenen gerçek şebeke çeşitli türlerde hatalar içerebilir. Bu hataların potansiyel kaynakları arasında Abokifa ve diğerleri (2019) tarafından tartışıldığı gibi düşük debili borulardaki dispersiyon, Do ve diğerleri (2016) tarafından özetlendiği gibi düğüm talep çarpanları ve gözlemlenen saha konsantrasyonlarındaki yanlışlıklarla birlikte tüketici taleplerinin mekansal olarak toplanması yer alabilir. Ayrıca, hata kaynakları daha önce yayınlanmış bir makalede tanımlanmamıştır. Hata kaynaklarını en aza indirmek için mevcut çalışmada, bu çalışmada elde edilen düzeltme faktörü uygulanmıştır.

Cherry Hills/Burry Plains şebekesi 40 boru ve 36 düğüm noktasından oluşmakta olup boru uzunlukları 76 ila 731 metre arasında değişmekte ve sabit çapları 20,3 cm ve 30,5 cm'dir. Su, düğüm 1'de bulunan ve klor konsantrasyonunun 1,15 mg/L'de tutulduğu bir pompa istasyonundan temin edilmektedir. Ayrıca, 26 numaralı düğüm noktasında değişken seviyeli bir tank bulunmaktadır. Şebekenin yerleşimi Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Model sonuçlarının önceki çalışmalarla karşılaştırılmasında tutarlılığı sağlamak için boru çeperi bozunma değeri 0,15 m/gün, hacimsel bozunma değeri ise 0,55 gün⁻¹ olarak belirlenmiştir. Etkili bir karşılaştırma yapabilmek için hem DYNAQ hem de EPANET modelleri için aynı hidrolik verilerin, çeper ve hacimsel bozunma değerlerinin ve kalite zaman adımlarının kullanılmasına özellikle dikkat edilmiştir.

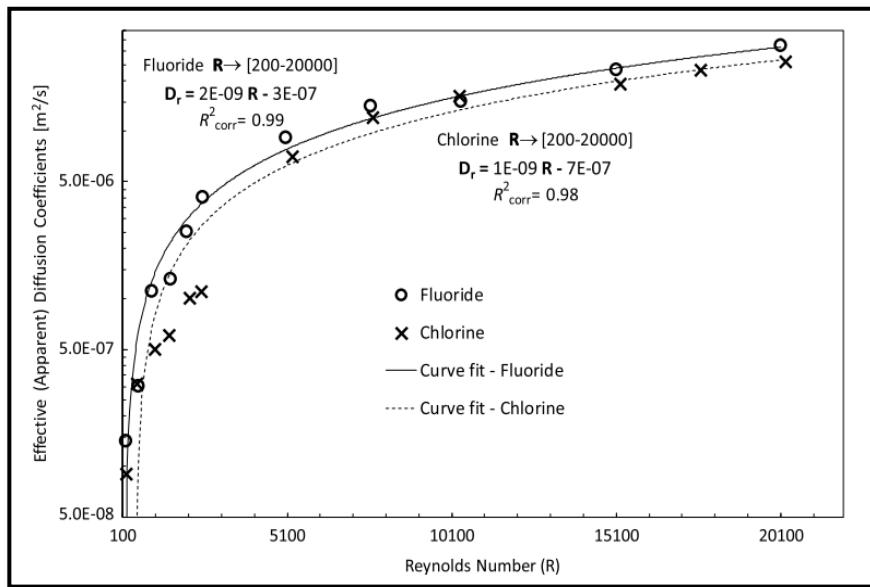


4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Başlangıçta da belirtildiği gibi, bu çalışma Ozdemir ve diğerleri (2021) tarafından elde edilen klor için difüzyon/dispersiyon katsayısını kullanarak düzeltme faktörünü (F_C) bulmak için yapılmaktadır. Elde edilen yeni düzeltme faktörü, su şebekesi borularındaki klor konsantrasyonunu tahmin etmek için kullanılacaktır. DYNAQ programı, doğru tahmin yapmak için düzeltme faktörü ekleyerek klor konsantrasyonunu tahmin etmek için kullanılmıştır. Ayrıca EPANET programı da su borularındaki klor konsantrasyonunu tahmin etmek için kullanılmış, ardından her iki sonuç karşılaştırılarak hangi programın su borularındaki klor konsantrasyonu için daha yakın tahmin vereceği görülmüştür. Önceki DYNAQ sonuçları (2021) da bu mevcut çalışma için bir karşılaştırma olarak alınmıştır. Şebekenin bazı düğümlerinde, hangi sonuçların daha yakın tahmin verdiğini ve en düşük hataları verdiğini görmek için ölçüm yapılmış ve bu saha verileri alınmıştır.

4.1. Düzeltme Faktörü

Ozdemir ve diğerleri (2021) tarafından yürütülen çalışmadan elde edilen klor difüzyon katsayısı, bu çalışmada klor bozunmasını tahmin etmek için yeni bir düzeltme faktörü (F_C) modeli geliştirmek için kullanılmıştır. Ortaya çıkan grafik aşağıda Şekil 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Klor ve flor için difüzyon katsayısı (Ozdemir vd. (2021))

Reynolds sayısı 200-20000 aralığında olan klor için aşağıdaki formül ile difüzyon katsayısı elde edilebilir:

$$D_r = 1 \times 10^{-9} R - 7 \times 10^{-7} \quad (4.1)$$

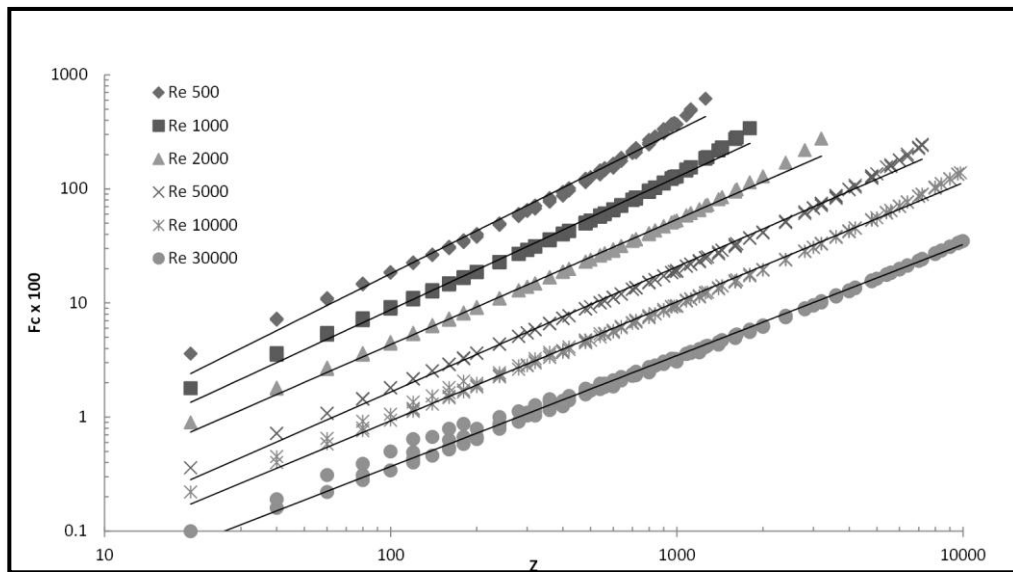
Burada D_r = difüzyon katsayısı ve R = Reynolds sayısı

Daha önce de belirtildiği gibi, bu çalışma Ozdemir ve Ger (1998) tarafından yapılan aynı modelle fortran dili programı kullanılarak yürütülmüş ve difüzyon katsayısı için denklem (4.1) kullanılmıştır. Her bir Reynolds sayısı için çizelge 4.1’de gösterildiği gibi difüzyon katsayıları elde edilmiş ve bu difüzyon katsayıları yeni düzeltme faktörü (F_C) modelini elde etmek için fortran programına girilmiştir.

Çizelge 4.1. Her bir Reynolds Sayısı için difüzyon katsayıları (mevcut çalışma)

Re	500	1000	1500	2000	2500	3500	5000	7500
D_r	0,0000004	0,0000009	0,0000014	0,0000019	0,0000024	0,0000034	0,0000049	0,0000074

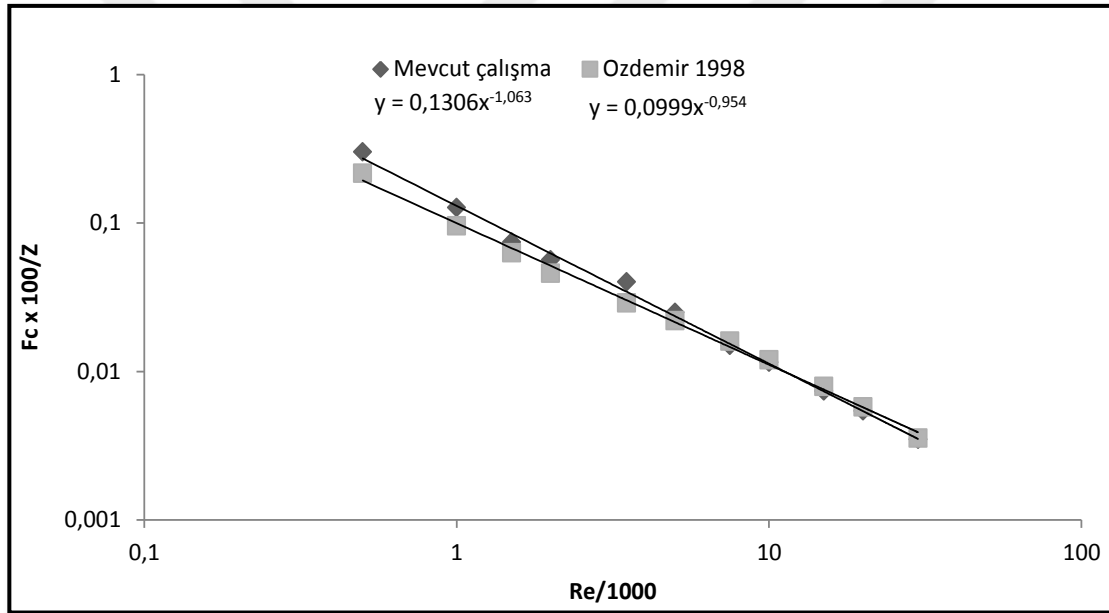
Fortran'ın sayısal model sonuçları elde edilmiştir, sonuçlar faktör düzeltmesinin (F_C) varyasyonudur. Sonuçlar aşağıdaki şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Mevcut düzeltme faktörü (F_C). (mevcut çalışma)

Şekil 4.2'de her bir Reynolds sayısı için düzeltme faktörü çizgisi gösterilmektedir. 1000'den büyük Z değerlerine ulaşan düzeltme faktörleri, daha önce elde edilen düzeltme faktörlerine (Ozdemir vd. 1998 tarafında araştırma yapılmıştır) kıyasla artmaktadır. Önceki çalışmada kullanılan difüzyon katsayıları, özellikle 10 000'i aşan Reynolds sayıları için mevcut çalışmada kullanılan difüzyon katsayılarından daha küçüktür; bu nedenle, mevcut çalışmada elde edilen doğrular önceki araştırmadakilerden farklıdır.

Şekil 4.2'de gösterildiği gibi en uygun eşleştirme çizgisi kullanılarak veriler, Şekil 4.3'te gösterildiği gibi F_C/Z 'yi Reynolds sayısı ile ilişkilendirecek şekilde sıkıştırılabilir. Ayrıca, bir dizi Reynolds sayısı ile ilişkili olan en uygun eşleştirme çizgisi de şekle dahil edilmiştir.



Şekil 4.3. $F_C = fnc (Z, Re)$ 'nin yeni kompakt formu. (mevcut çalışma)

Şekil 4.3'ten grafik denklemini elde edildi: $y = 0,1306x^{-1,063}$, burada y $F_C \times 100/Z$ ve x $Re/1000$ 'dir. Bu nedenle denklemden aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$\log \left(F_C \times \frac{100}{Z} \right) = 2,305 - 1,063 \log (Re) \quad (4.2)$$

Bu çalışmada elde edilen yeni model (Denklem 4.2) ile klor seviyelerindeki düşüş kolay ve doğru bir şekilde tahmin edilebilir.

Yeni türetilen düzeltme faktörü (Eşitlik 4.2'de sunulduğu gibi), bu çalışmada su dağıtım borularındaki klor konsantrasyonunun tahminini geliştirmek için kullanılacaktır. Bu düzeltme faktörü, dağıtım ağındaki klor konsantrasyonunu tahmin etmek için bir araç olarak hizmet eden DYNAQ programına entegre edilecektir. DYNAQ programı, EPANET araç seti ile etkileşimde bulunan bir Visual Basic .NET (VB.NET) Windows Forms uygulaması olarak geliştirilmiştir. Su dağıtım sistemindeki hidrolik ve su kalitesi dinamiklerinin simülasyonunu kolaylaştırır. Uygulama, bir EPANET modelinden giriş verilerini okumak, hidrolik simülasyonları gerçekleştirmek ve zaman içinde klor konsantrasyonunu hesaplamak üzere tasarlanmıştır.

4.2. EPANET ile İçme Suyu Borularında Klor Tahmini

Simülasyon hesaplamalarının ilk aşamasında, The Cherry Hills/Brushy Plains (CHBP) Şebekesinin hidrolik modeli EPANET 2.0 yazılımında hazırlanmış ve analiz için gerekli veriler girilmiştir. Şebeke karakteristiği, boru karakteristiği ve düğüm karakteristiği açıklanmış ve ek 2'de (çizelge 1.1 ve 1.2) gösterilmiştir. Ayrıca boru çeperi bozunması ve hacimsel bozunma ile ilgili spesifik veriler de yukarıda belirtilmiştir. Seçilen düğüm noktaları için içme suyu borularındaki klor seviyelerini tahmin eden simülasyon sonuçları şekil 4.4'ten şekil 4.10'a kadar gösterilmektedir.

Klor seviyelerini tahmin eden simülasyon sonuçları, 3, 6, 28 ve 34 numaralı düğüm noktalarının EPANET sonuçlarıyla iyi bir uyum gösterdiğini ortaya koymaktadır. Düğüm noktası 10, 28 ve 34'e giden su boruları, düşük su talepleri nedeniyle çok uzun seyahat sürelerine sahiptir. Bu nedenle, sahada oldukça büyük bekleme süreleri ve yüksek klor bozunma değerleri gözlemlenmiştir. EPANET ile klor konsantrasyonu tahmininin doğruluğunu görmek için şekil 4.11'de hataların karelerinin toplamı ile daha net görülebilir.

Şekil 4.11'den, en düşük hataların 34 numaralı düğüm noktasında, en yüksek hataların ise 19 numaralı düğüm noktasında meydana geldiği görülmektedir. Her iki düğüm noktası da Reynolds Sayısına bağlı olarak farklı akış tiplerine sahiptir; 19 numaralı düğüm noktası türbülanslı akış tipine, 34 numaralı düğüm noktası ise laminar akış tipine sahiptir. Ayrıca bu iki düğüm noktası arasındaki seyahat süresi de önemli farklılıklar göstermektedir. Akış türü—laminar veya türbülanslı—su borularındaki klor konsantrasyonunun tahmini

üzerinde derin bir etkiye sahiptir. Türbülanslı akış, genellikle klorun daha iyi karışımını ve dağıtımını teşvik etmesine rağmen, aynı zamanda artan bozulma oranları ve konsantrasyondaki değişkenliklere yol açabilir. Öte yandan, laminar akış daha öngörülebilir bozulma oranları sağlayabilir, ancak düzensiz klor dağılımına neden olabilir. Bu dinamiklerin anlaşılması, etkili su kalitesi yönetimi için ve dağıtım sisteminde yeterli klor seviyelerinin korunmasını sağlamak açısından hayati öneme sahiptir. Ayrıca, bu iki kavşak arasındaki seyahat süreleri de önemli farklılıklar göstermektedir.

4.3. DYNAQ ile İçme Suyu Borularında Klor Tahmini

DYNAQ iki program modülü içerir. İlki FORTRAN dilinde yazılmış bir koddur. Bu kısımda boru numaraları ve ilgili düğümler, boru uzunlukları ve çapları, deşarjlar ve akış hızları, değişken tank sayısı ve bağlantı boru numaraları kaydedilir. Boru hızları kullanılarak her bir borudaki seyahat süresi de hesaplanmaktadır. İkinci modül Visual Basic'te kodlanmıştır. Modül, aşağıda açıklanan zaman odaklı bir yöntem kullanarak her bir düğüm noktası için klor konsantrasyonlarını hesaplar.

Tipik olarak yaklaşık bir saat olarak ayarlanan ilk hidrolik zaman periyodu sırasında, şebeke içindeki her boru, akış hızına bağlı olarak sabit süreli aralıklara bölünür. Bu segmentler arasına, analizi kolaylaştırmak için hayali alt düğümler yerleştirilmiştir. Her bir boru segmentinde bulunan kütle, aşağı akış alt düğümüne aktarılmadan önce bir reaksiyon sürecinden geçer. Aşağı akış alt düğümünün şebeke içindeki bir düğüm noktasına karşılık geldiği durumlarda, düğüm noktasına giren kütle, diğer bağlı borulardan halihazırda alınmış olan kütle ile toplanır. Daha sonra bu karışım, akışı düğüm noktasından uzağa taşıyan bağlantı borularının ilk segmentine bırakılır. Bu işlem dizisi yeni bir hidrolik değişiklik tespit edilene kadar tekrarlanır.

Yeni bir hidrolik zaman adımı için, hız ve akıştaki değişiklikler üç farklı senaryoya ayrılabilir. İlk senaryo, boru içindeki hız ve akış yönü değişmediğinde ortaya çıkar. Bu durumda, yeni bir segmentasyon gerekmez ve boru segmentleri içindeki kütle basitçe önceki zaman adımından mevcut olana taşınır. İkinci senaryo, yeni hidrolik zaman adımı için aynı akış yönünü korurken hızda bir değişiklik içerir. Bu durumda, segment sayısında bir artış ya da azalma içerebilecek yeni segmentasyon gereklidir. Yeni segmentasyondan sonra, her bir segmentin sonundaki her bir alt düğümün klor konsantrasyonu yeni zaman

adımı için belirlenmelidir. Üçüncü senaryo, boru içindeki akışın hem yönünde hem de hızında bir değişiklik olduğunda ortaya çıkar. Bu durumda, yeni zaman adımı için alt düğümlerdeki konsantrasyonlar ikinci senaryoda açıklandığı gibi hesaplanır. Ancak, segmentler ters yönde reaksiyona girer (veya bozunur).

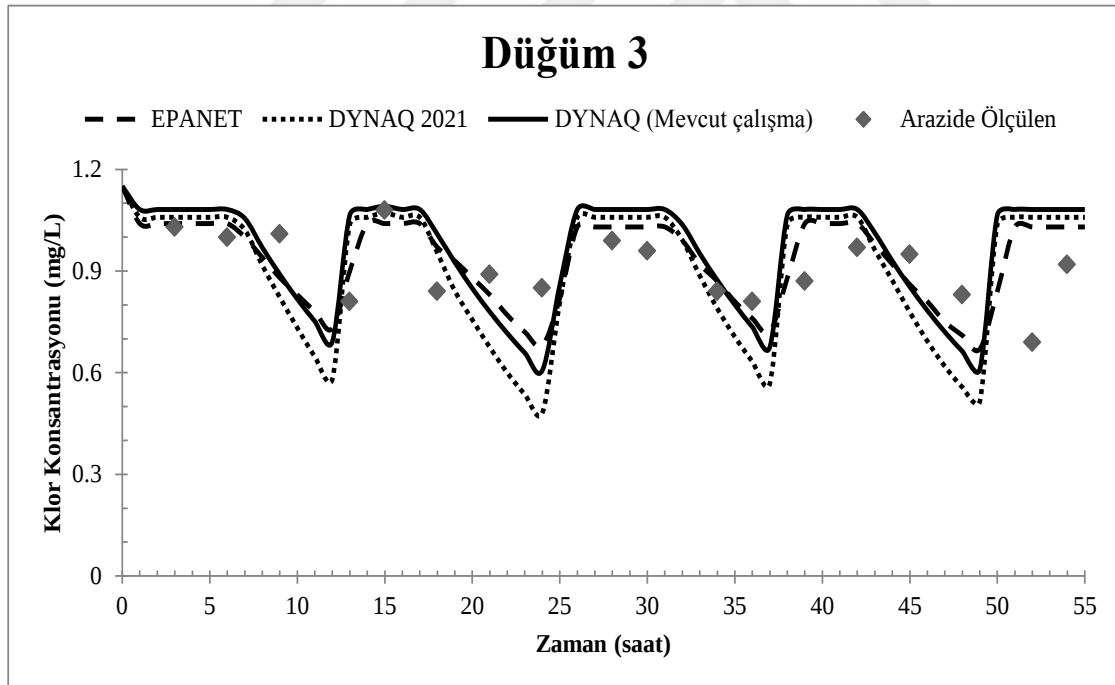
Genel olarak, program konsantrasyonları hesaplamak için zaman odaklı bir çerçevede çalışır. Bununla birlikte, bir borudaki hız sıfıra yaklaşırsa ve suyun bir alt düğümden diğerine hareket etme süresi 100 saniyeyi aşarsa, hesaplamalar olay odaklı bir çerçeveye kayabilir. Bu bağlamda, herhangi bir alt düğümdeki konsantrasyon, borudaki bir su cephesi bir sonraki alt düğüme ulaştığında belirlenir.

DYNAQ kodlama sürecinde, elde edilen düzeltme faktörü (F_C), içme suyu borularındaki klor konsantrasyonu için doğru tahmin yapmak üzere hedef olarak eklenmiştir. Seçilen düğüm noktaları için su temin borularındaki klor seviyelerini tahmin eden simülasyon sonuçları Şekil 4.4'ten Şekil 4.10'a kadar gösterilmiştir. Şekil 4.8'den, 19 numaralı düğüm noktasına ilişkin sonuçlar, saha verileri ile DYNAQ verileri arasında, özellikle belirli zaman aralıklarında, daha fazla analiz yapılması gerektiğini gösteren bazı tutarsızlıklar ortaya koymaktadır. DYNAQ klor konsantrasyonu tahmin sonuçları, her bir düğüm noktasının tahmininin EPANET programının tahmin sonuçlarıyla aynı olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, DYNAQ programından düzeltme faktörü ile tahmin edilen sonuçlar saha verilerine daha yakın sonuçlar vermiştir. DYNAQ ile klor konsantrasyonu tahmininin doğruluğunu görmek için aşağıdaki grafikte hataların karelerinin toplamı ile daha net görülebilir.

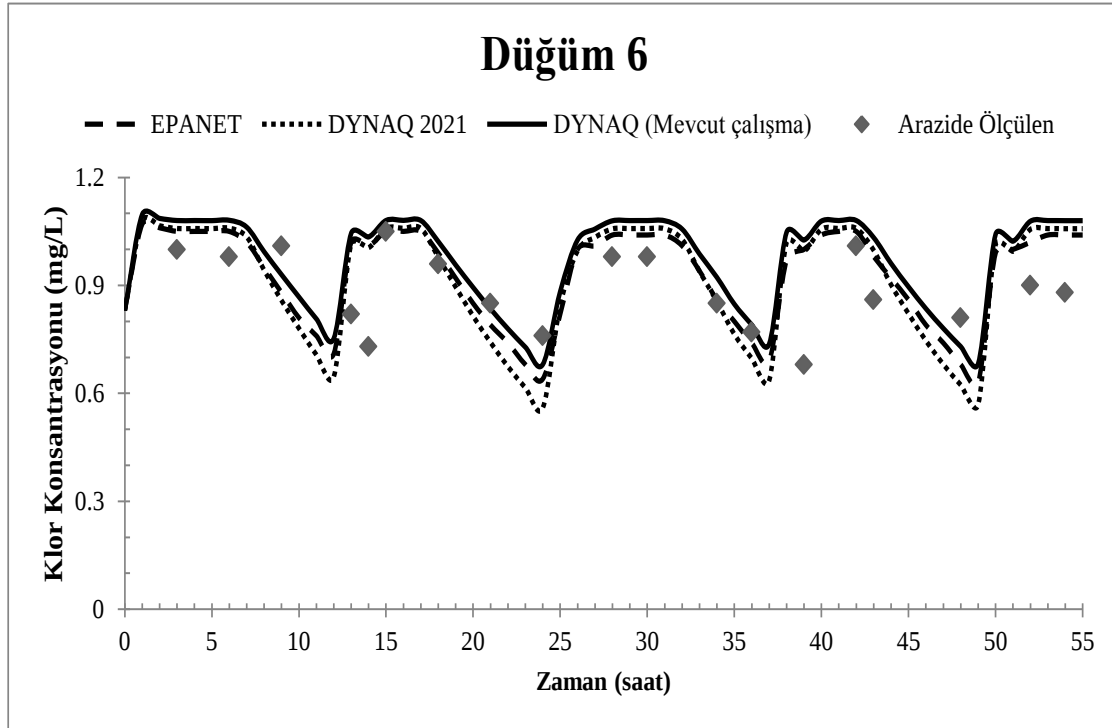
Şekil 4.11'den, en düşük hataların 34 numaralı düğüm noktasında, en yüksek hataların ise 19 numaralı düğüm noktasında meydana geldiği görülmektedir. Her iki düğüm noktası da Reynolds Sayısına bağlı olarak farklı akış tiplerine sahiptir; 19 numaralı düğüm noktası türbülanslı akış tipine, 34 numaralı düğüm noktası ise laminar akış tipine sahiptir. Ayrıca bu iki düğüm noktası arasındaki seyahat süresi de önemli farklılıklar göstermektedir. Şekil 4.5'ten, DYNAQ'dan elde edilen klor konsantrasyonu tahmin hatasının EPANET programından elde edilen tahminden daha düşük olduğunu göstermektedir. EPANET ve DYNAQ arasındaki klor konsantrasyonu tahmin sonuçlarının daha detaylı karşılaştırması aşağıdaki paragrafta açıklanmıştır.

4.4. EPANET ve DYNAQ ile Klor Bozunma Tahmininin Karşılaştırılması

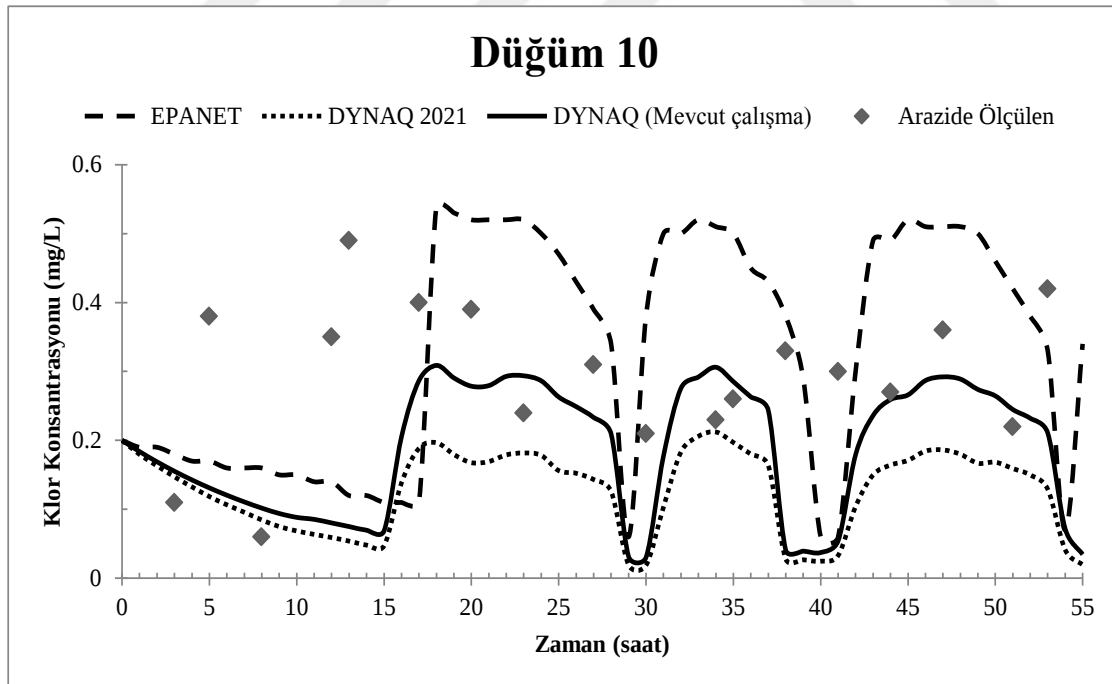
Daha önce, EPANET ve DYNAQ kullanılarak klor bozunmasının tahminleri elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, bazı noktalarda karşılaştırma yapmak amacıyla saha ölçümleri gerçekleştirilmiş; ayrıca Ozdemir ve diğerleri tarafından 2021 yılında yapılan önceki DYNAQ çalışmasının sonuçları da karşılaştırma için referans olarak kullanılmıştır. Söz konusu önceki çalışmada, aynı şebekeye sahip su borularındaki klor bozunmasını tahmin etmek için yine DYNAQ programı kullanılmıştır. Ancak, bu çalışmada kullanılan düzeltme faktörü mevcut çalışmadakinden farklıdır; çünkü mevcut çalışmada düzeltme faktörü, farklı bir difüzyon katsayısı kullanılarak elde edilmiştir. Bu nedenle, iki çalışma arasında kullanılan düzeltme faktörleri farklı değerlere sahiptir ve bu fark, hangi düzeltme faktörünün daha doğru tahminler sunduğunu ve saha verilerine daha yakın sonuçlar verdiğini ortaya koyabilir. Şekil 4.4'ten şekil 4.10'a kadar, bu çalışmada kullanılan programdan elde edilen sonuçlar arasındaki karşılaştırma sunulmaktadır.



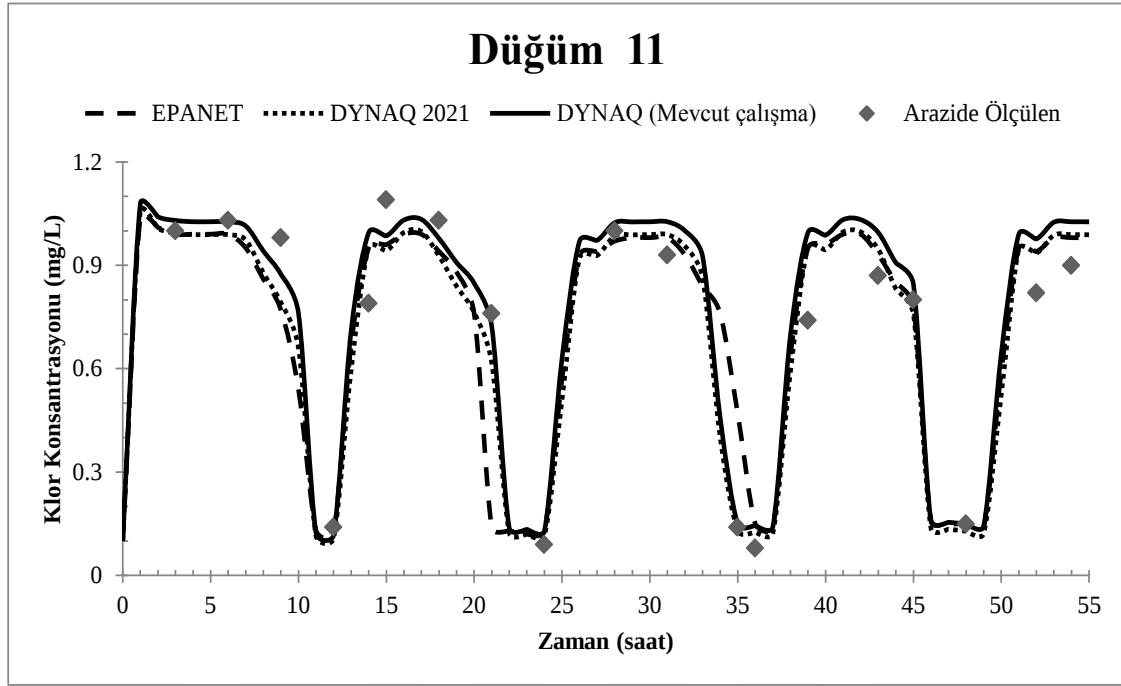
Şekil 4.4. 3 numaralı düğüm noktalarında DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini. (mevcut çalışma)



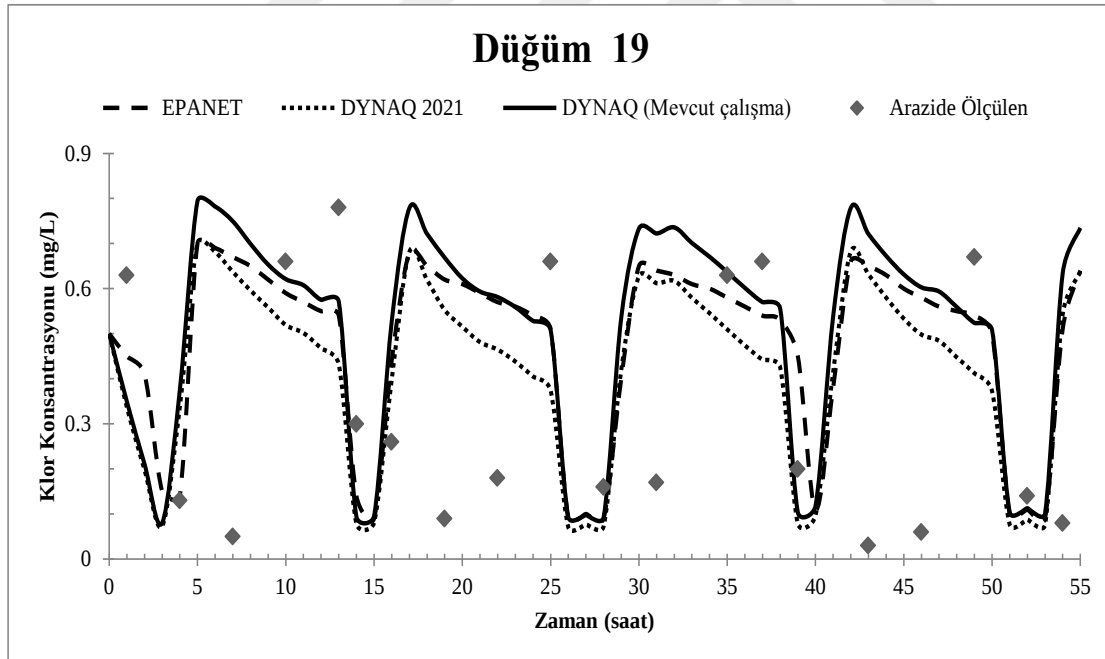
Şekil 4.5. 6 numaralı düğüm noktalarında DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini. (mevcut çalışma)



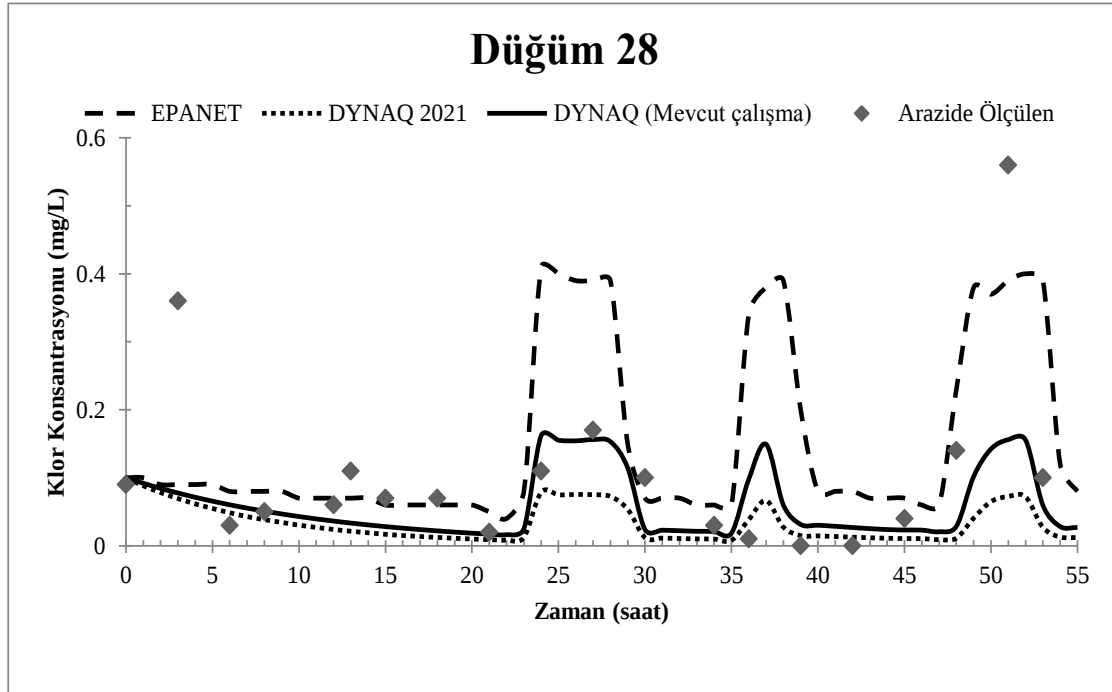
Şekil 4.6. 10 numaralı düğüm noktalarında DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini. (mevcut çalışma)



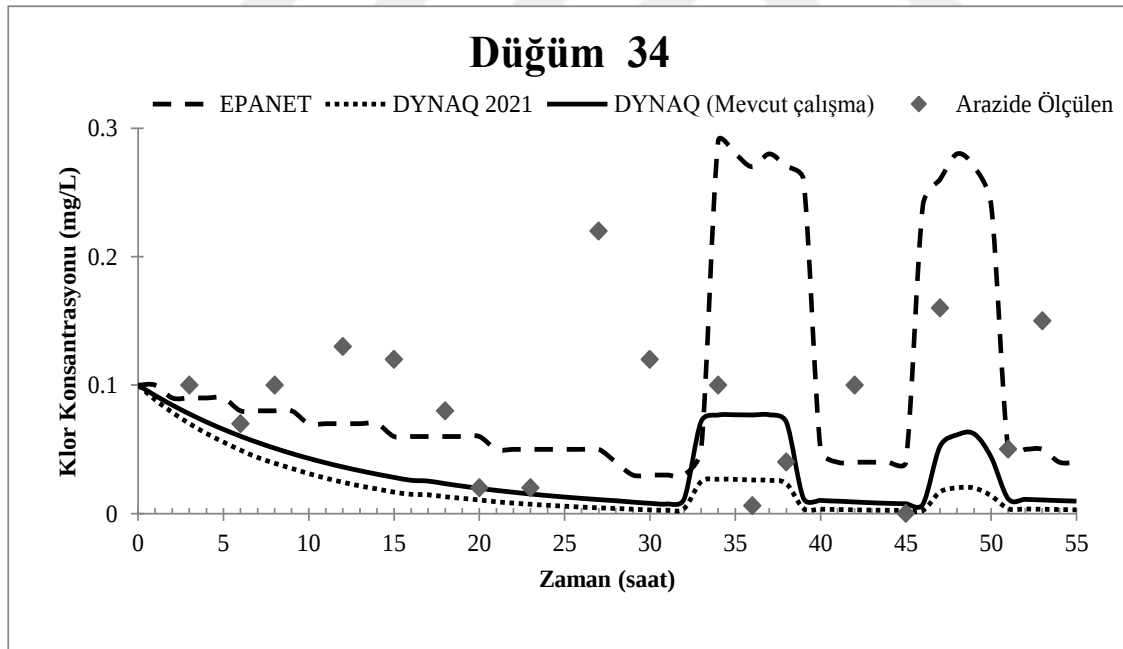
Şekil 4.7. 11 numaralı düğüm noktalarında DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini. (mevcut çalışma)



Şekil 4.8. 19 numaralı düğüm noktalarında DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini. (mevcut çalışma)



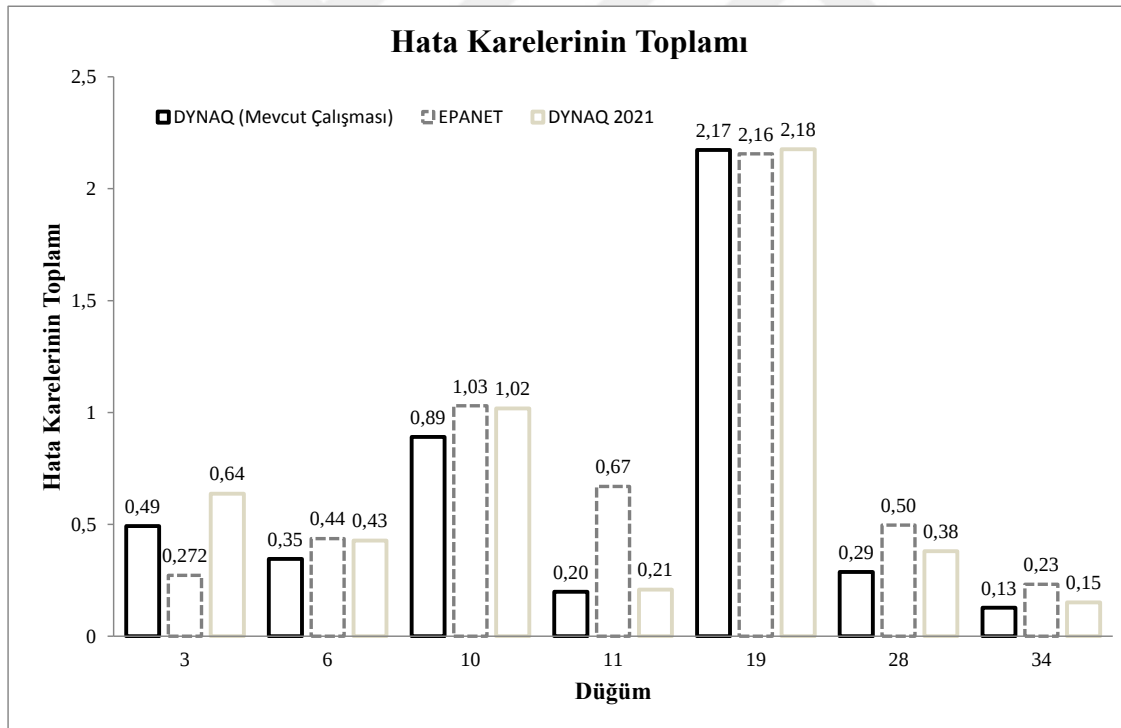
Şekil 4.9. 28 numaralı düğüm noktalarında DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini. (mevcut çalışma)



Şekil 4.10. 34 numaralı düğüm noktalarında DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini. (mevcut çalışma)

Bu düğüm noktalarına giden borulardaki su, düşük su talepleri nedeniyle 10, 28 ve 34 numaralı düğüm noktalarına giden borularda 0,01 m/s'ye eşit veya daha az olmak üzere çok düşük hıza sahiptir. Bu nedenle, sahada oldukça büyük bekleme süreleri ve yüksek klor

bozunma değerleri gözlemlenmiştir. Bu tür düğüm noktalarında klor içeriğinin kesin olarak hesaplanması daha önemli ve daha zordur. Bu tür düğüm noktalarındaki klor konsantrasyonunun zaman ve büyüklük açısından hassas bir şekilde hesaplanması, sahada gözlemlenen konsantrasyonlarla eşleşmesi açısından önemlidir. Şekil 4.4'te gözlemlenen düğüm noktalarında saha ölçümleri ve program sonuçları karşılaştırılmaktadır. Hem DYNAQ hem de EPANET sonuçları bu düğüm için gözlemlenen değerlerden bazı sapmalar göstermektedir. Bununla birlikte, sonuçların genel bir değerlendirmesi, mevcut DYNAQ'ın, Şekil 4.11'de özetlendiği gibi, gözlemlenen tüm düğümler için EPANET ve DYNAQ'a (2021) kıyasla saha ölçümlerinin daha iyi bir tahminini sağladığını ortaya koymaktadır. Her iki model (EPANET ve DYNAQ) ile bazı düğüm noktaları için yapılan ölçümler arasındaki tutarsızlık, talepteki belirsizlikten (mekânsal talep toplama işlemi) ve düğüm noktalarında uygulanan talep faktörlerinden kaynaklanmış olabilir. Ekte gösterilen tüm düğümlere ait grafik için.



Şekil 4.11. Model sonuçları ve saha ölçümleri arasındaki toplam hata karşılaştırması. (mevcut çalışma)

Şekil 4.11'de, en düşük hatanın laminar akışa sahip 34 numaralı düğümde, en büyük hatanın ise türbülanslı akışa sahip 19 numaralı düğümde meydana geldiği görülmektedir. Düğüm 19 için, düğüme bağlanan boru uzunluğa sahiptir, bu nedenle seyahat süresi bu düğüm için tahmin hatasını etkileyebilir. Daha önce de belirtildiği gibi, klorun seyahat

süresi klor bozunma tahminini etkileyebilir. Bu arada 34 numaralı düğümde, düğüme bağlı olan borunun uzunluğu kısadır.

Klor için difüzyon/dispersiyon katsayıları biyofilm yokluğunda belirlenmiştir. Diğer araştırmacıların bu katsayıları biyofilm oluşumu olan boru ağlarında kullanabilecekleri varsayılmıştır. Test borusunda bir miktar biyofilm oluşumu sadece test borusunun çıkışındaki klor konsantrasyonlarının büyüklüğünü etkileyebilir. Bununla birlikte, S-şekilli dağıtıcı cepheler elde edildiğinde çıkıştaki konsantrasyonlar normalleştirilmiştir. Difüzyon/dispersiyon katsayıları cephelerin şeklinden (dikliğinden) belirlenmiştir. Başka bir deyişle, biyofilmin varlığı ve borunun ucunda ilave klor konsantrasyonu kaybı, dispersif cephenin şeklini değiştirmeyecektir. Bu nedenle, biyofilmsiz klor için difüzyon/dispersiyon katsayılarının raporlanmasındaki hata büyük olmayacaktır. Biyofilm inşa etmenin, biyofilmin karakteristiğine (organizma sayısı ve türü) karar vermenin, biyofilmin kalınlığının ve boru malzemesinin kendisinin yarattığı ek klor talebinin sorunu önemli ölçüde karmaşıklatacağı da bilinmektedir. Böylesine karmaşık bir sorun için çözüm bulunamazdı. Dispersiyon katsayıları test borusunda bir miktar biyofilm oluşumu ile rapor edilmiş olsa bile, belirtilen koşulların hiçbirisi (biyofilmin karakteristiği, biyofilmin kalınlığı, boru malzemesinin klor ihtiyacı) başka bir şebekedeki koşulları yansıtamazdı.

5. SONUÇLAR

Ozdemir ve diğ erleri (2021) tarafından yapılan çalışmanın test sonuçları kullanılarak bulunan difüzyon/dispersiyon katsayıları düzeltme faktörü (F_C)'yi elde etmek için uygulanmıştır. FORTRAN (Ozdemir tarafından kurulmuştur) programının çalıştırılmasıyla elde edilen düzeltme faktörü, tek bir boru içinde bir boyutlu klor taşınımı ve bozunma denkleminin basitleştirilmiş bir ifadesini kullanan modelin, kullanımını kolaylaştırmak amacıyla uygulanmıştır.

Bu çalışmada geliştirilen ve su şebekelerinde klor taşınımı ve bozunmasını takip eden DYNAQ bilgisayar programı, literatürde sıklıkla kullanılan gerçek bir şebekenin bir kısmına uygulanmıştır. Uygulama için Cherry Hills/Brushy Plains, New Haven, Connecticut şebekesi kullanılmıştır. Ayrıca, EPANET programı, içme suyu şebekelerindeki klor bozunmasını tahmin etmede mevcut model için karşılaştırmalı bir araç olarak kullanılmıştır.

Modelin sonuçlarının daha önce geliştirilen modelin sonuçlarıyla karşılaştırılması, mevcut DYNAQ'ın diğ er modele ve EPANET programına kıyasla ölçüm verilerine daha yakın tahmin verdiğini göstermiştir. En düşük tahmin hatası laminar akışın olduğu düğümde, en yüksek tahmin hatası ise türbülanslı akışın olduğu düğümde gerçekleşmiştir. Ayrıca, her iki düğüm noktası da klorun seyahat süresini etkileyebilecek uzunluk farklılıklarına sahiptir. Bunun yanı sıra, düğüm noktasındaki bilinmeyen talepler ve pik faktörleri her iki model için de tutarsızlığa neden olabilir.

Bu nedenle, yeni belirlenen boylamsal difüzyon/dispersiyon katsayılarını test etmek için düğüm noktalarındaki bilinmeyen taleplerin ve pik faktörlerinin daha iyi tahmin edildiği daha fazla saha çalışması veya kontrollü laboratuvar çalışmaları önerilebilir.



KAYNAKLAR

- Abokifa A. A., Yang Y. J., Lo C. S., and Biswas P. (2016) Water quality modeling in the dead end sections of drinking water distribution network. *Water Resources*. 89 (2), 107-117.
- Abokifa A. A., Maheshwari A., Gudi R. D. and Biswa P. (2019) Influence of dead-end sections of drinking water distribution networks on optimization of booster chlorination systems. *Journal Water Resources Planning Management* 145 (12), 12-19.
- Awe O. M., Okolie S. T. A., Fayomi O. S. I. (2019) Review of water distribution systems modeling and performance analysis softwares. *Journal of Physics*. 1378(2), 120-128.
- Baker A. K., Schoch A. R., Schuck T. J., Oram D. E. (2011) Investigation of chlorine radical chemistry in the eyjafjallajokull volcanic plume using observed depletions in non-methane hydrocarbons. *Geophysical Research Letters*. 38, 14-22.
- Basha H. A. and Malaeb L. N. (2007) Eulerian-Lagrangian method for constituent transport in water distribution networks. *Journal Hydraulic Engineering* 133 (10), 1155-1166.
- Bischoff K. B. and Levenspiel O. (1963) *Advances in Chemical Engineering*. Vol. 4. New York : Academic Press.
- Biswas P., Lu C. S. and Clark R. M. (1993) Chlorine concentration decay in pipes. *Water Resources*. 27(12), 1715-1724.
- Castro P., Nves M. (2003) Chlorine decay in water distribution systems case study – lousada network. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*. 2(2), 261-266.
- Chambers W. G., Cooksey K. E., Buchberger S. G. (1995) Fouling biofilm development: a process analysis. *Biotechnology and Bioengineering*. 23, 1923-1960.
- Clark R. M., Grayman W. M., Goodrich J. A., Deininger R. A. and Skov K. (1993) Measuring and modeling chlorine propagation in water distribution systems. *Journal Water Resources Planning Management*. 120, 871-887.
- Clark R. M., Haught R. C. (2005) Characterizing pipe wall demand: implications for water quality modeling. *Journal Water Resources Planning and Management*. 131, 43-50.
- Coulson J. M., Richardson J. F. (1964) *Chemical Engineering*. India : Butterworth Heinemann.

- De Beer D., Srinivasan R. and Stewart P. S. (1994) Direct measurement of chlorine penetration into biofilms during disinfection. *Applied and Environmental Microbiology*. 60 (12), 4339-4344.
- Do N. C., Simpson A. R., Deuerlein J. W. and Piller O. (2016) Calibration of water demand multipliers in water distribution system using genetic algorithms. *Journal Water Resources Planning Management*. 142 (11), 56-63.
- Feben D., Taras M. J. (1951) Studies on chlorine demand constant. *Journal AWWA*. 43, 922-933.
- Fernandes C., Karney B. (2003) Modeling the advection equation under water hammer conditions. *Urban Water Journal*. 2(1), 97-112.
- Fisher I., Kastl G., Sathasivan A. (2011) Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems. *Water Research*. 45, 4896-4908.
- Flemming H. C., Neu T. R., Wozniak D. J. (2007) The EPS matrix: the house of biofilms cells. *Journal of Bacteriology*. 189(22), 7945-7947.
- Ghosko P. S., Gupta A. S. (1983) Effect of homogeneous and heterogenous reactions on the dispersion of a solute in the laminar flow between two plates. *Proceeding Royal Social London Series A*. 330, 59-63.
- Grayman W. M. (2018) History of water quality modeling in distribution systems. *Proceeding Water Distribution Systems Analysis*. 1, 34-40.
- Hallam N. B., Fang H. and John R. W. (2003) Bulk decay of chlorine in water distribution systems. *Journal Water Resources Planning Management*. 129, 78-81.
- Hallam N. B., West J. R. West and Powel J. C. (2002) The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems. *Journal Water Research*. 65, 129-135.
- Hinze J. O. (1975) *Turbulence*. New York : McGraw-Hill Press.
- Holt B. D., Sturchio N. C., Clausen J. L., Heraty L. J., Huang L., Abrajano T. A. (1998) Chlorine isotope investigation of natural attenuation of trichloroethene in an aerobic aquifer. *Journal Environmental Science and Technology*. 32, 67-75.
- Hunt W. A. And Kroon J. R. (1991) Model calibration for chlorine residuals in distribution systems. *Water Quality in Distribution Systems*. 225, 130-136.
- Hwang H. S., Elbaz D., Magdis G., Daddi E. (2010) Evolution of dust temperature of galaxies through cosmic time as seen by herschel. *Royal Astronomical Society*. 409, 75-82.
- Jadashecart A., Elmorero A., Stitou M. Bouillot P., Legube B. (1992) The chlorine demand of a treated water. *Water Research*. 26, 1073-1084.

- Kauffman G. J. Belden A. C. (2010) Water quality trends (1970 to 2005) along delaware streams in the delaware and chesapeake bay watersheds, USA. *Water, Air, and Soil Polution*. 208, 345-375.
- Khafajah H., Ali M. I. H., Thomas N., Janajreh I., Arafat H. A. (2022) Utilizing Buckingham Pi theorem and multiplr regression analysis in scaling up direct contact membrane distillation processes. *Desalination of Saline Wastewater*. 528, 90-101.
- Kiene L., Lu W., Levi Y. (1998) Relative importance of the phenomena responsible for chlorine decay in drinking water distribution systems. *Water Science and Technology*. 38, 219-227.
- Kirmeyer, G. J., Kauffman, H. J. and Kauffman, J. (2004) The role of disinfectant residuals in the control of biofilm in drinking water distribution systems. *Water Research*, 38(17), 3737-3746.
- LeChevallier M. W., Chawthon C. and Lee R. (1988) Inactivation of biofilm bacteria. *Application Environmental Microbiol*. 54, 2492-2499.
- LeChevallier M. W. and Au K. (2004) *Water Treatment and Pathogen Control: Process Efficiency in Achieving Safe Drinking Water*. IWA Publishing, London.
- Levy Z., Stoodley P., Altobelli S. (1986) Experimental and conseptual studies on mass transport in biofilms. *Water Science Technology*. 31, 153-162.
- Lu C., Biswas P., Clark R. M. (1999) Simultaneous transport of substrates, disinfectants and microorganisms in water pipes. *Water Resources*. 29, 881-894.
- Maier S. H., Powell R. S., Woodward C. A. (2000) Calibration and comparison of chlorine decay models for a test water distribution system. *Water Research*. 34(8), 2301-2309.
- Menaia J., Coelho S. T., Lopes A., Fonte E., Palma J. (2002) Dependency of bulk chlorine decay rates on flow velocity in water distribution networks. *Journal Water Science and Technology*. 3, 209-214.
- Monteiro L., Viegas R., Covas D., Menaia J. and Coelho S. T. (2017) Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX. *Journal of Engineering*. 70, 1192-1200.
- Morrison K. R., Yadav K. (2010) Effect of hypochlorite exposure on flux through polythersulphone ultrafiltration membranes. *Food and Bioproducts Processing*. 88(4), 419-424.
- Munavalli G. R., Mohan K. M. S. and Kulkarni M. A. (2009) Wall decay of chlorine in water distribution system. *Journal of Water Supply : Research and Technology-AQUA*. 58 (5), 316-326.

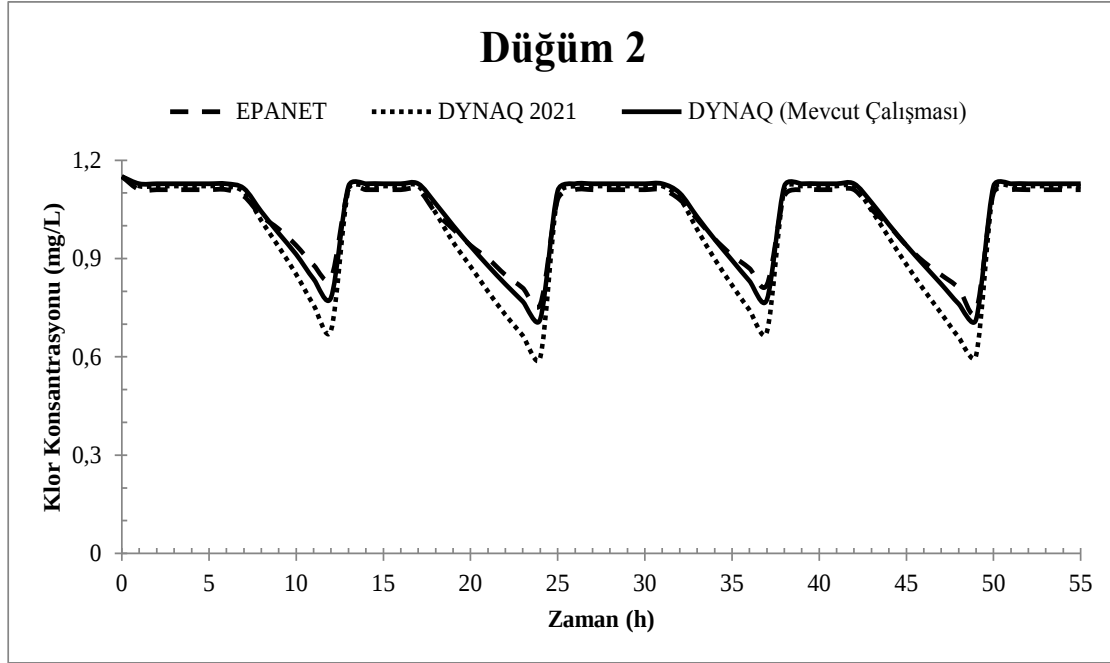
- Nagatani T., Yasuhara K., Murata K., Takeda M. (2008) *Residual chlorine decay simulation in water distribution system*. International Symposium on Water Supply Technology. Japan. 7, 65.
- Ozdemir O. N. 1997. *Simulation of chlorine decay in water supply networks*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ozdemir O. N. and A. M. Ger. (1998) Realistic numerical simulation of chlorine decay in pipes. *Water Resources*. 32(11) , 3307-3312.
- Ozdemir O. N. and Ucak A. (2002) Simulation of chlorine decay in drinking-water distribution systems. *Journal Environmental Engineering*. 128 (1), 31-39.
- Ozdemir O. N., Buyruk B. (2018) Effect of travel time and temperature on chlorine bulk decay in water supply pipes. *Journal Environmental Engineering*. 144(3), 43-51.
- Ozdemir O. N., Buyruk B. and Erkan U. (2021) Calculation of chlorine and fluoride diffusion/dispersion coefficients in water supply pipes. *Journal Water Resources Planning Management*. 147(7), 77-84.
- Powell J. C., Hallam N. B., West J. R., Forster C. F., and Simms J. (2000) Factors which control bulk chlorine decay rates. *Journal Water Resources*. 34(1), 117-126.
- Powell J. C., West J. R., Hallam N. B, Forster C. F. and Simms J. (2000) Performance of various kinetic models for chlorine decay. *Journal Water Resources Planning and Management*. 126 (1), 13-20.
- Ramos A., Parreno A., Oset E. (1995) Short range correlations in the weak decay of a hypernuclei. *Physical Review Journal*. 51, 101-110.
- Reckhow, D. A. (1990) Chlorine decay and disinfection by-product formation in the presence of natural organic matter. *Water Research*. 23, 103-108.
- Rossman L. A. (1994) *EPANET users manual*. Cincinnati : US EPA.
- Rossman L. A., Clark R. M. and Grayman W. M. (1994) Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems. *Journal Environmental Engineering*. 120(4), 803-820.
- Rossman L. A., Boulus P. F., Altman T. (2000) Discrete volume element method for network quality models. *Journal Water Resources Planning and Management*. 119(5), 58-66.
- Sadiq R., Rodriguez M. J. (2004) Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence; a review. *Science of The Total Environment*. 321, 21-46.
- Servais R. (1995) Modelling water quality in distribution systems. *Journal Water Resources Planning and Management*. 114 (2), 120-129.

- Sharp W. W., Pfeffer J. and Morgan M. (1991) In situ chlorine decay rate testing. *Water Quality Modeling in Distribution Systems*. 4, 24-30.
- Tamminen S., Ramos H., Covas D. (2008) Water supply system performance for different pipe materials part 1: water quality analysis. *Water Resources Management*. 22, 1579-1607.
- Tiruneh A. T., Debessai T. Y., Bwembya G. C., Nkambule S. J. (2019) Variable chlorine decay rate modeling of the matsapha town water network using EPANET program. *Scientific Research*. 11(1), 134-142.
- Tzatchkov, V. G., A. A. Aldama and F. I. Arreguin. (2002) Advection-dispersion-reaction modeling in water distribution networks. *Journal Water Resources Planning Management*. 128(5), 334-342.
- Ucak A. and Ozdemir O. N. (2002) Simulation of chlorine decay in drinking-water distribution systems. *Journal Environmental Engineering*. 128(1), 31-39.
- Vanzyl J. E., Piller O. (2014) Modeling control valves in water distribution systems using a continuous state formulation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 140(11), 23-31.
- Vasconcoles J. J., Rossman L. A., Grayman W. M., Boulos P. F., Clark R. M. (1997) Kinetics of chlorine decay. *Journal AWWA*. 89, 54-65.
- Vieira P., Coelho S. T. and Loureiro D. (2004) Accounting for the influence of initial chlorine concentration, TOC, iron and temperature when modeling chlorine decay in water supply. *Journal Water Supply Research Technology*. 53, 453-467.
- Wable O., Dumoutier N., Duguet J. P., Jarrige P. A., Gelas G. and Depierre J. F. (1991) Modelling chlorine concentration in a network and applications to Paris distribution network. *Water Quality Modelling in Distribution Systems*. 54, 125-131.
- Zhang T. C., Bishop P. (1992) Evaluation of tortuosity factors and effective diffusivities in biofilms. *Water Research*. 28, 2279-2287.
- Zhang X., Weiguang L., Ernest R. B., Wang X., Ren P. (2015) UV/chlorine process for ammonia removal and disinfection by-product reduction: comparison with chlorination. *Water Research*. 68, 804-811.

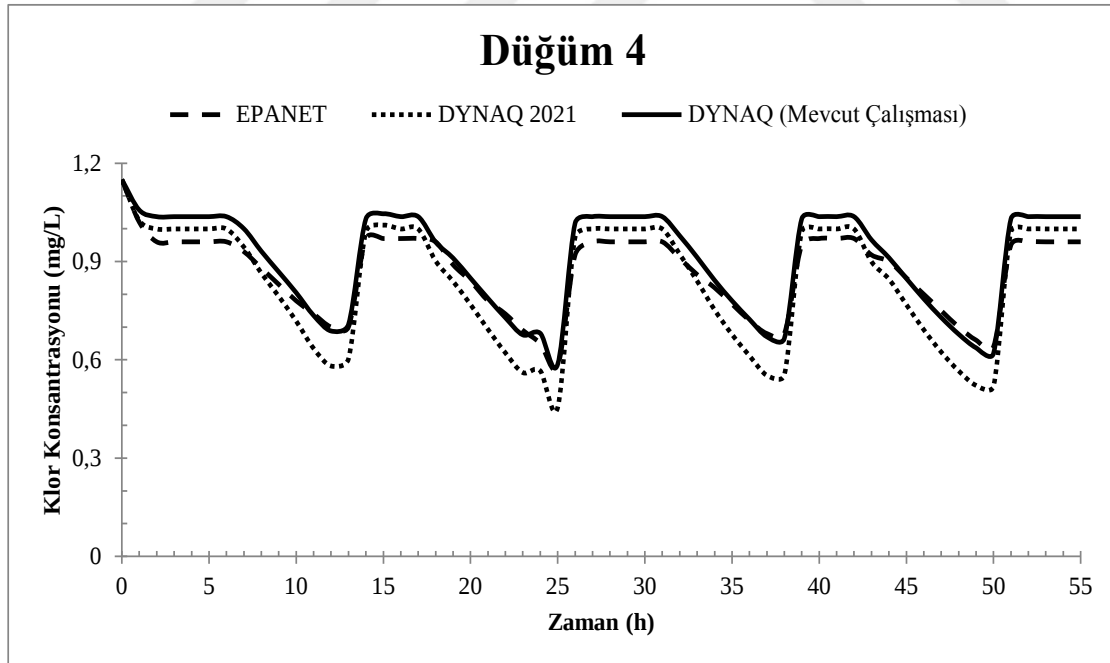




EK-1. Tüm Düğümler için Karşılaştırma Sonuçları.

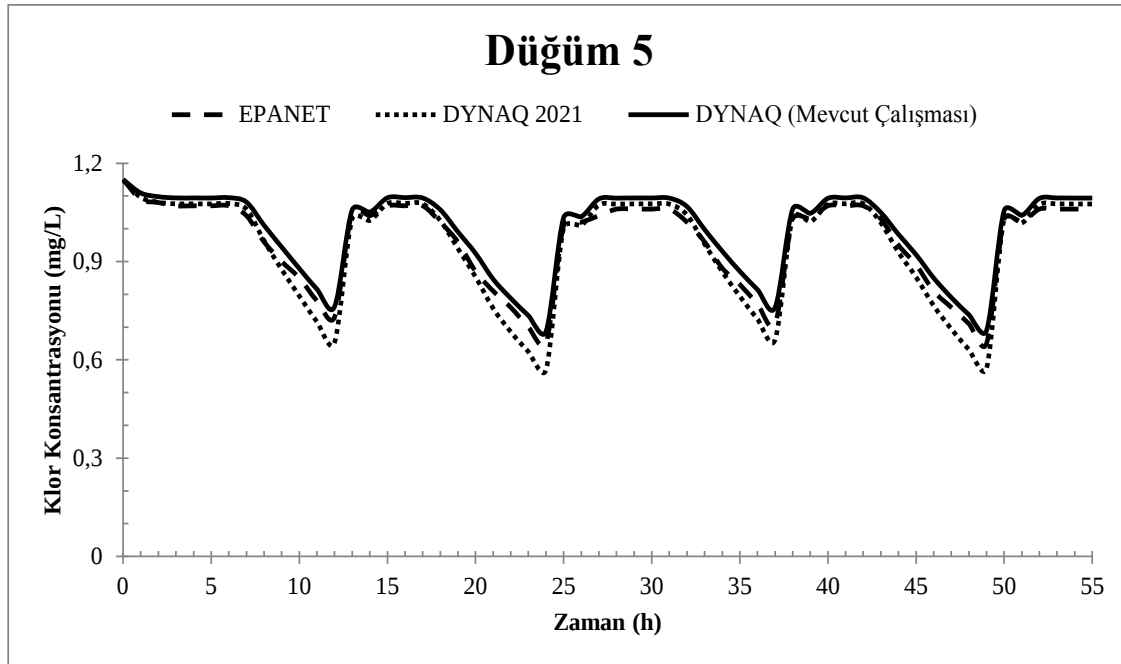


Şekil 1.1. Düğüm 2'de DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

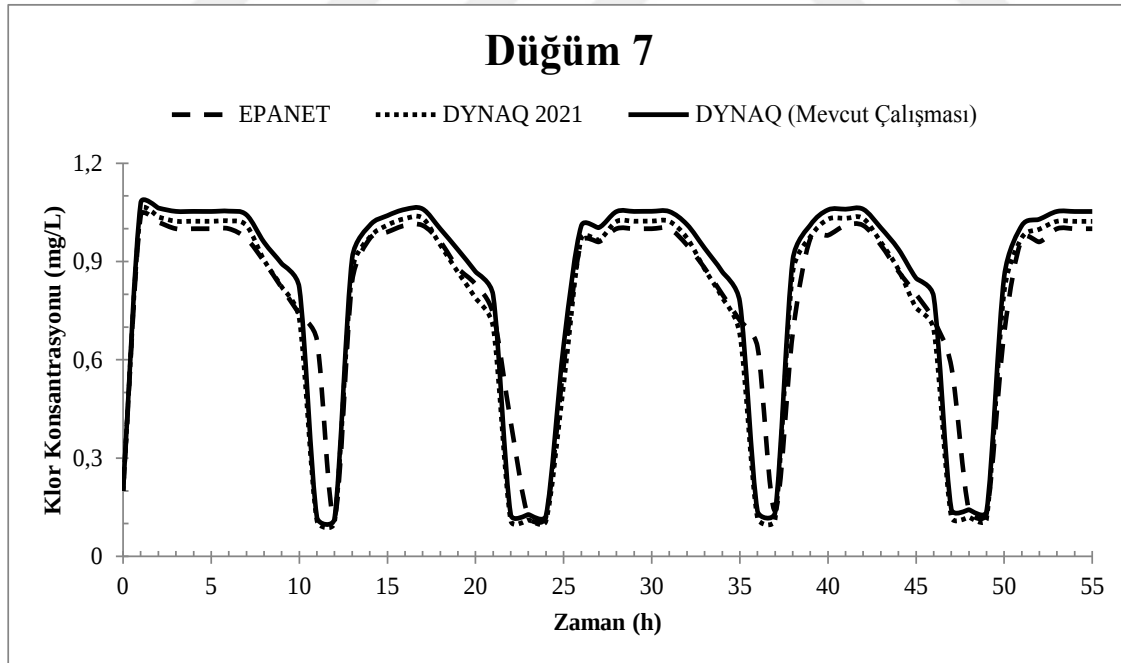


Şekil 1.2. Düğüm 4'te DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

EK-1. (devam) Tüm Düğümler için Karşılaştırma Sonuçları.

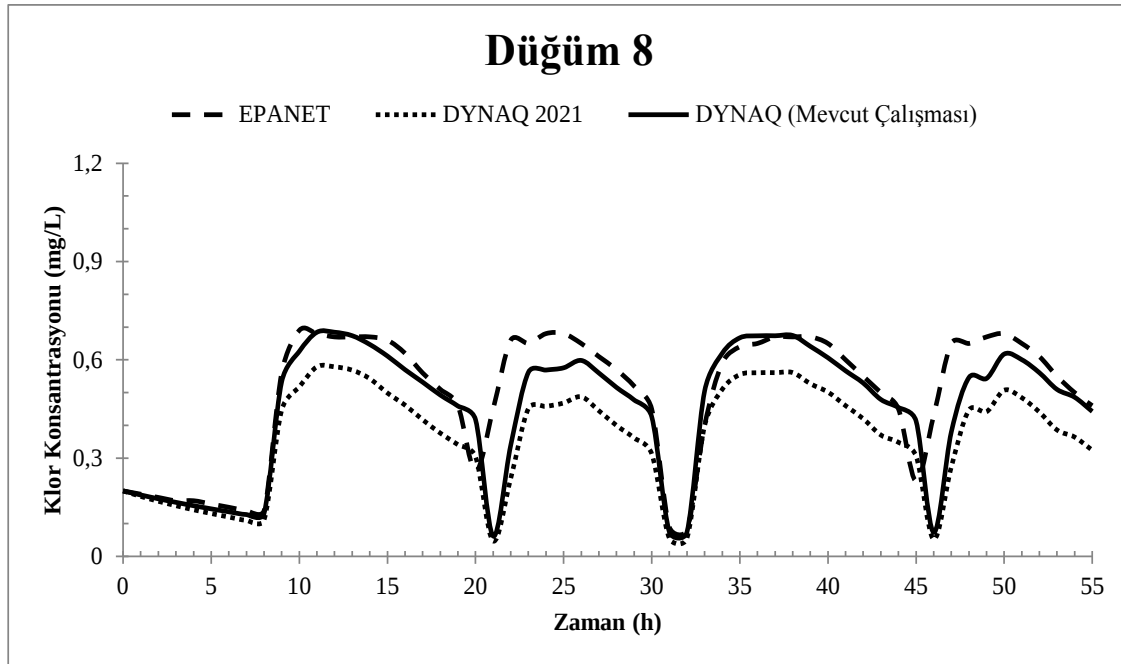


Şekil 1.3 Düğüm 5'te DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

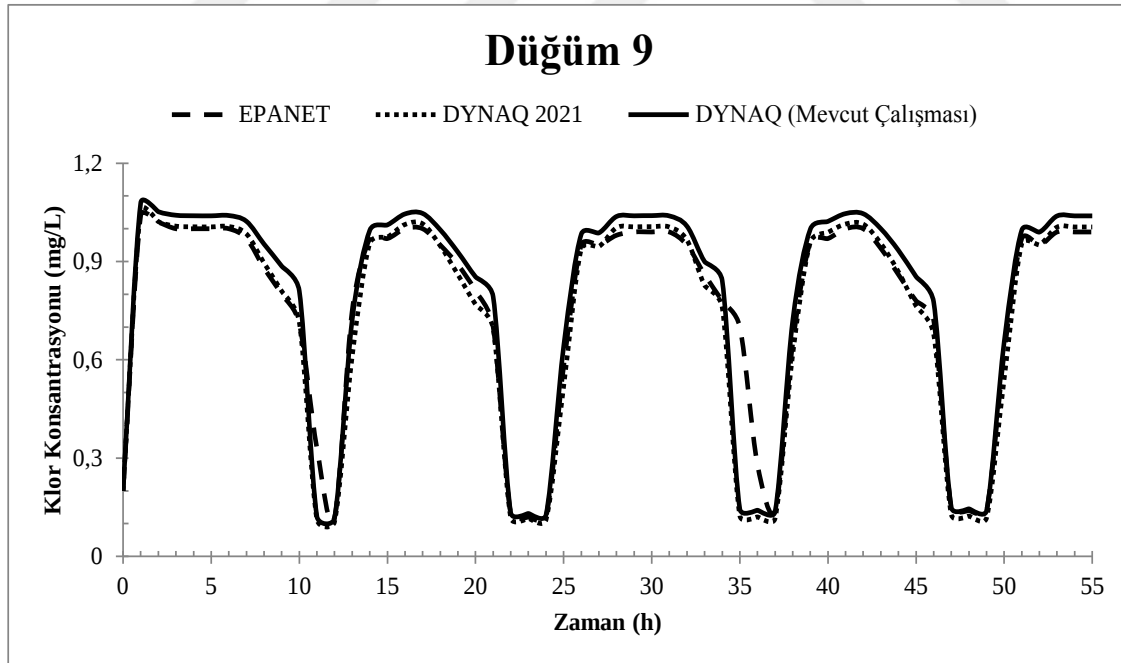


Şekil 1.4. Düğüm 7'de DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

EK-1. (devam) Tüm Düğümler için Karşılaştırma Sonuçları.

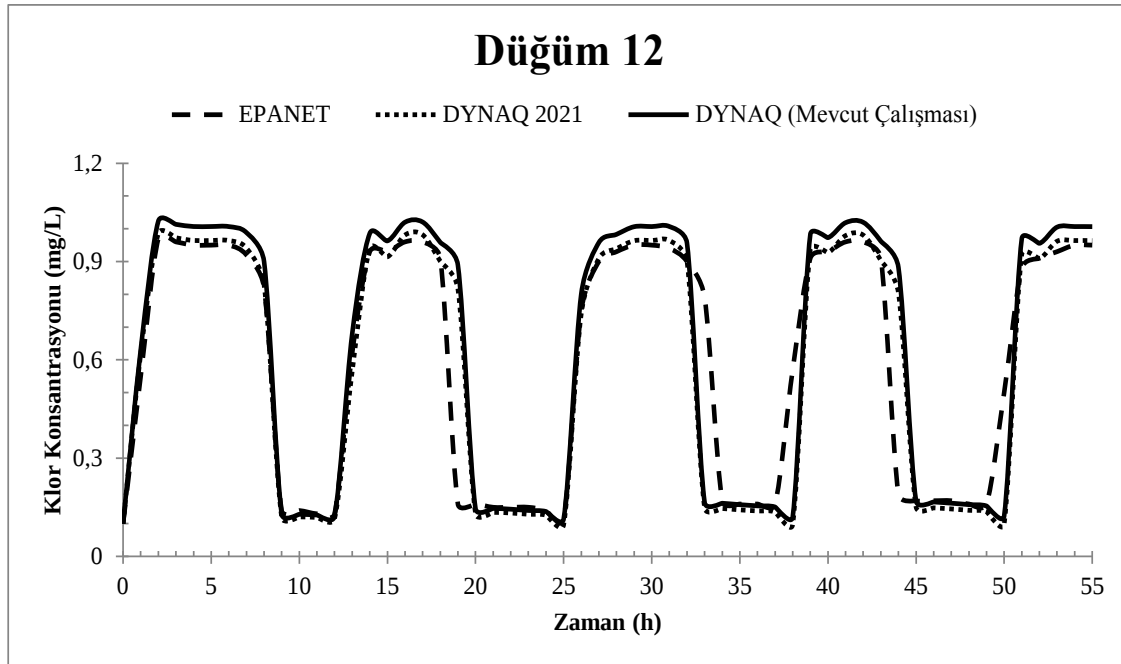


Şekil 1.5. Düğüm 8'de DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

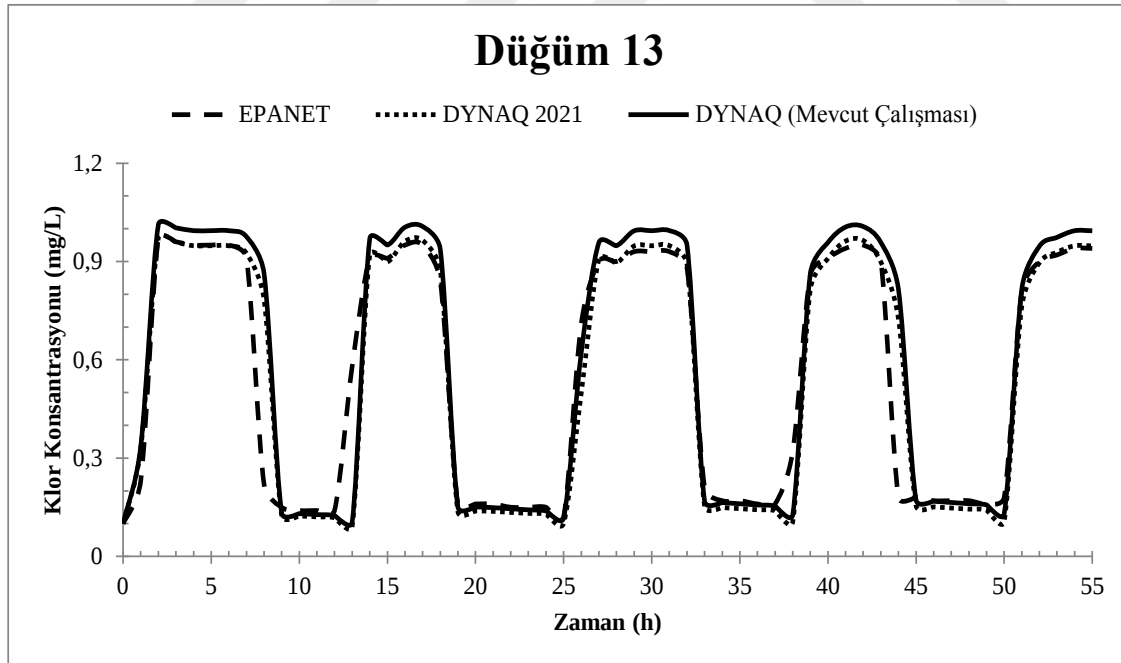


Şekil 1.6. Düğüm 9'da DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

EK-1. (devam) Tüm Düğümler için Karşılaştırma Sonuçları.

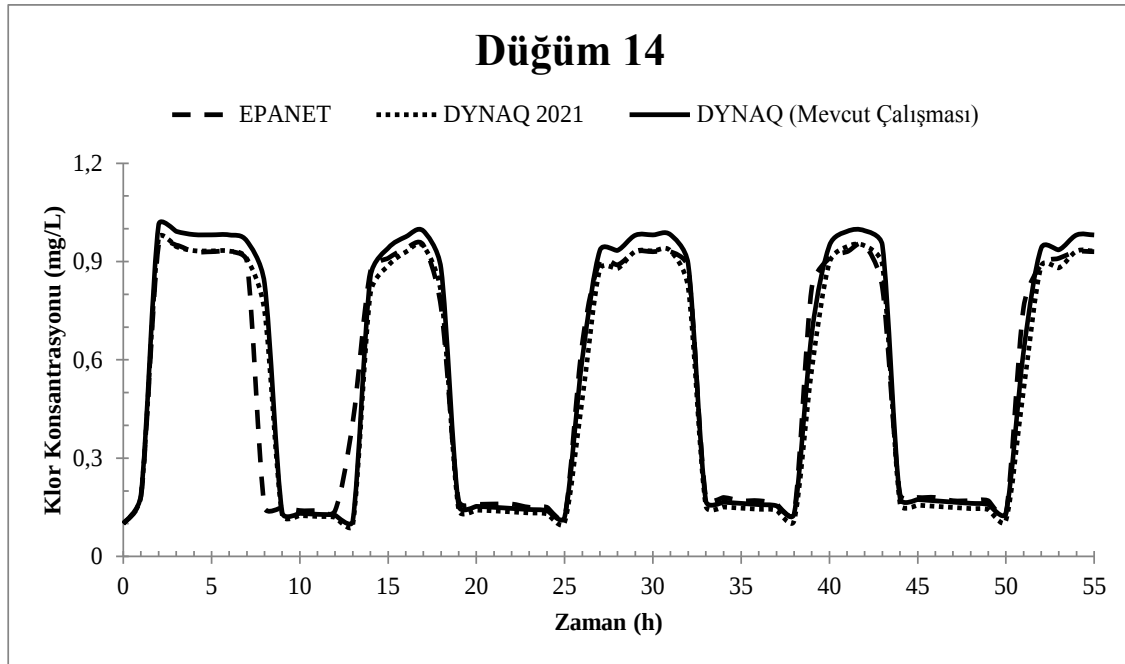


Şekil 1.7. Düğüm 12'de DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

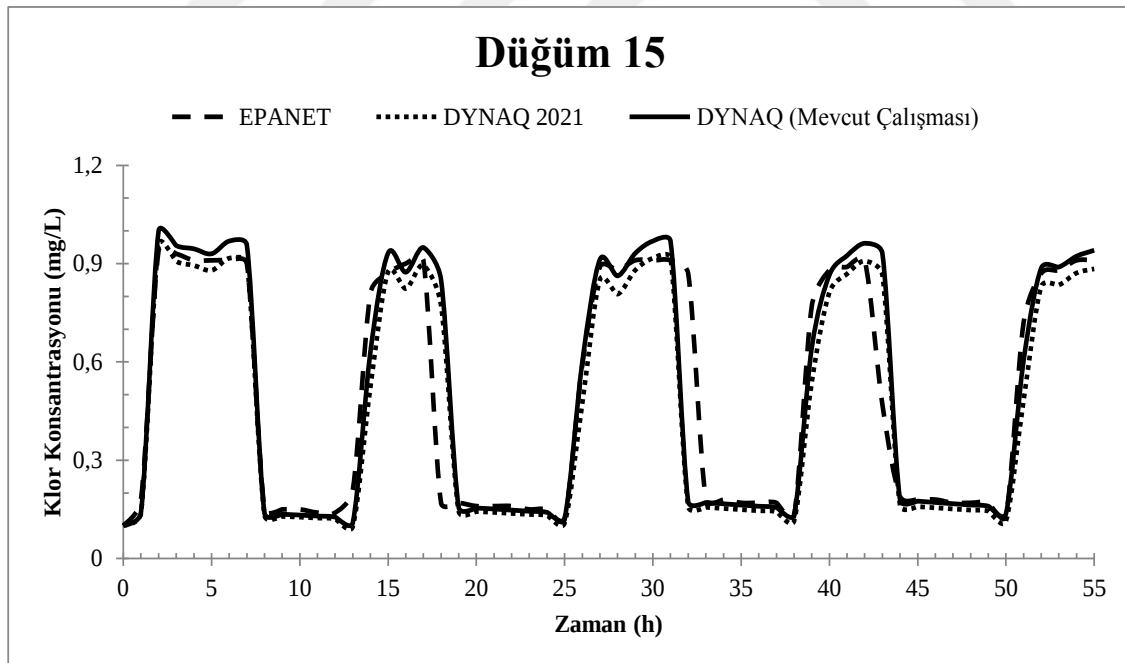


Şekil 1.8. Düğüm 13'te DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

EK-1. (devam) Tüm Düğümler için Karşılaştırma Sonuçları.

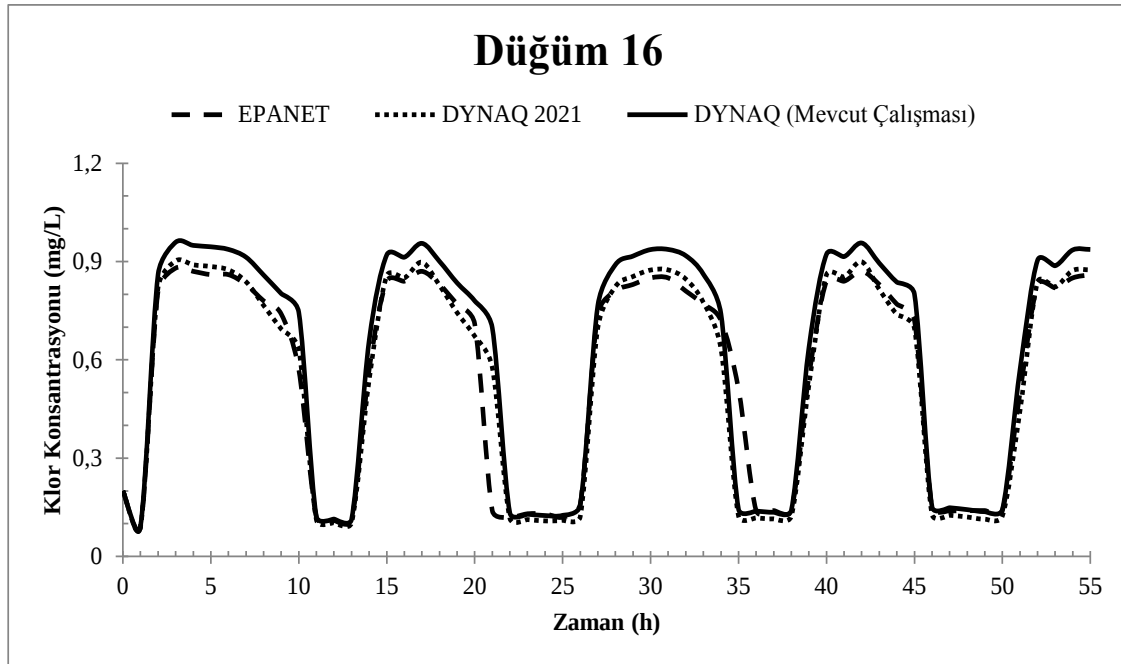


şekil 1.9. Düğüm 14'te DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

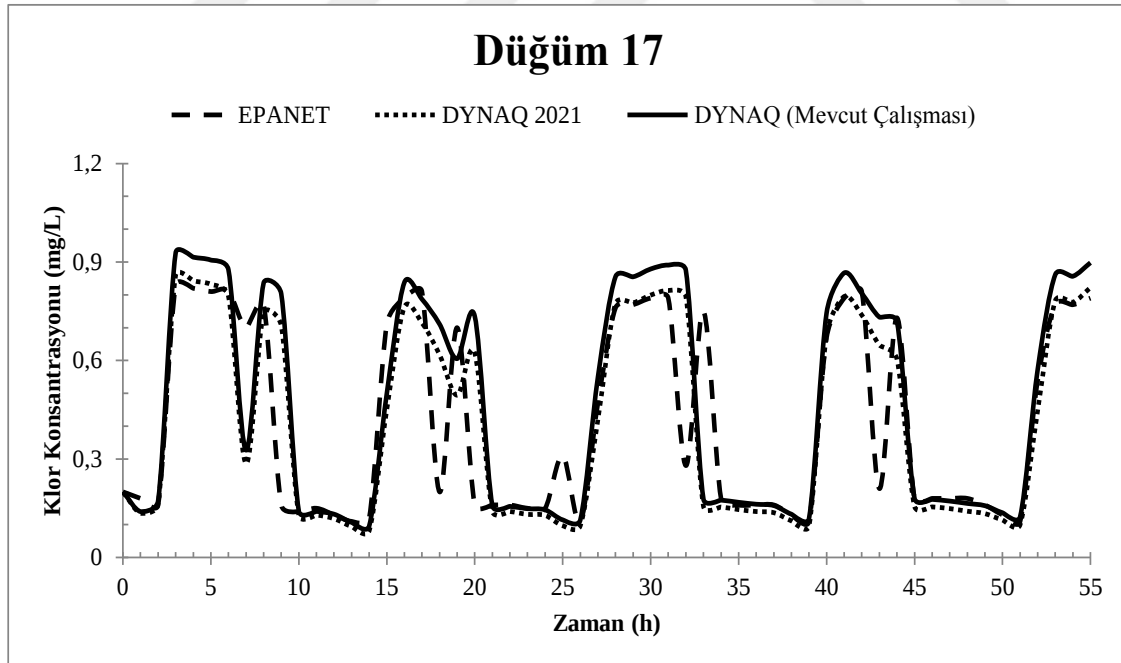


şekil 1.10. Düğüm 15'te DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

EK-1. (devam) Tüm Düğümler için Karşılaştırma Sonuçları.

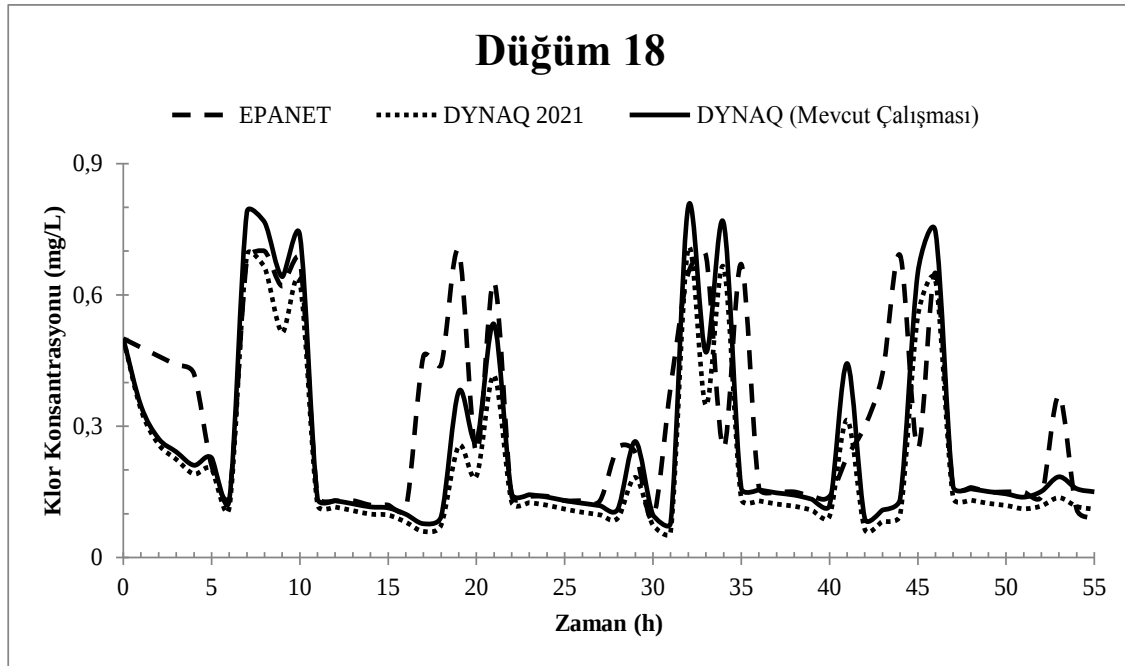


Şekil 1.11. Düğüm 16'da DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

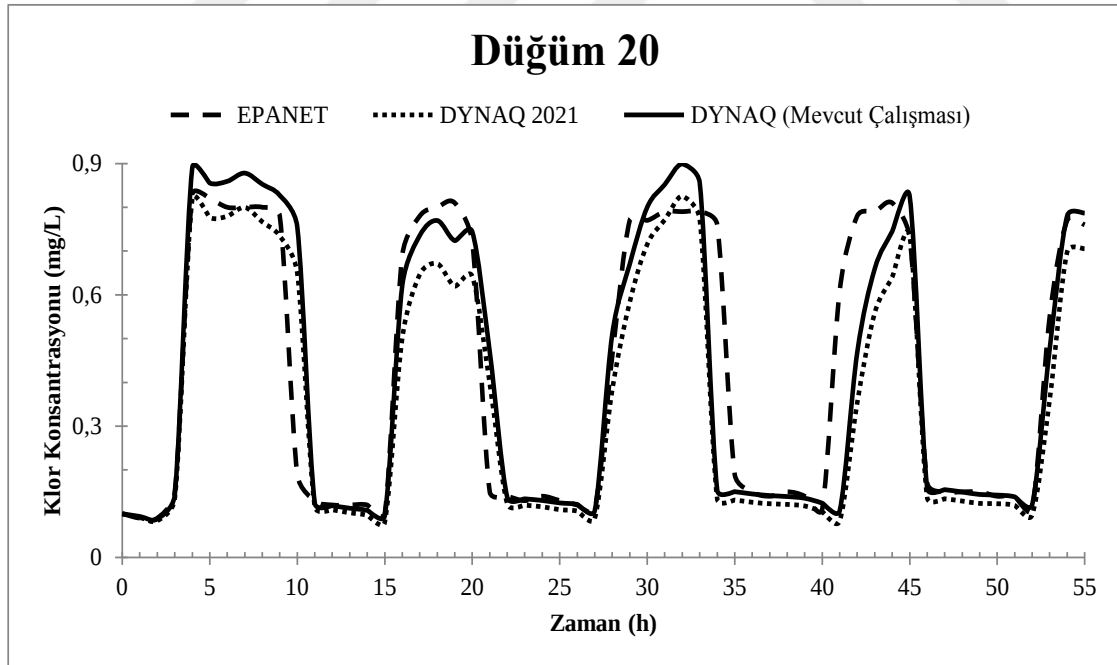


Şekil 1.12. Düğüm 17'de DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

EK-1. (devam) Tüm Dügümler için Karşılaştırma Sonuçları.

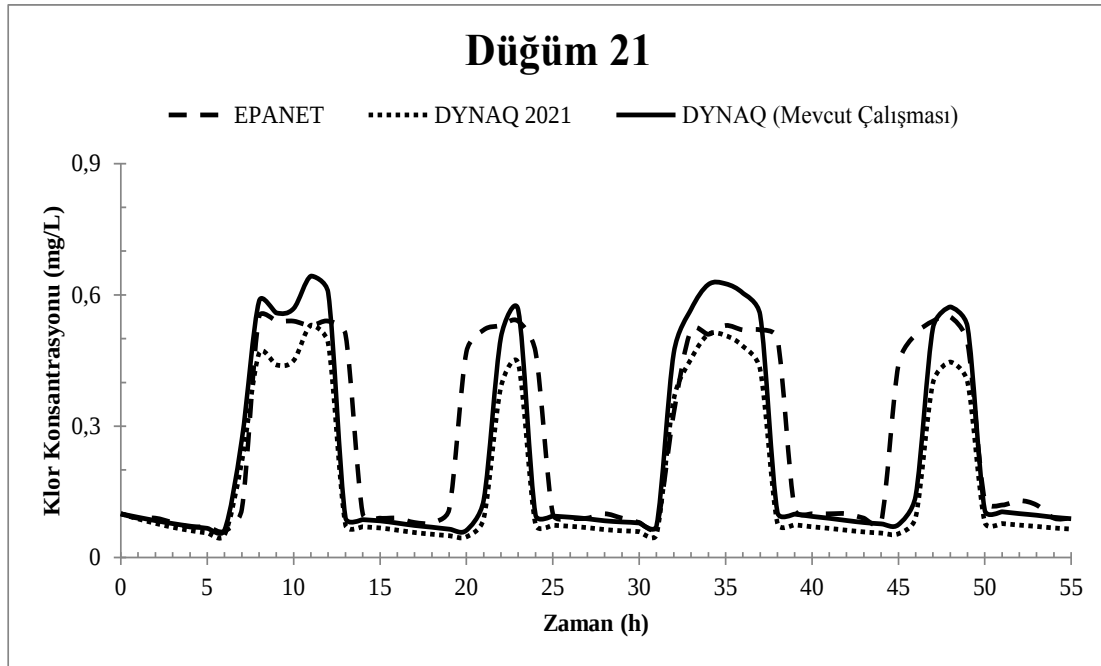


Şekil 1.13. Dügüm 18'de DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

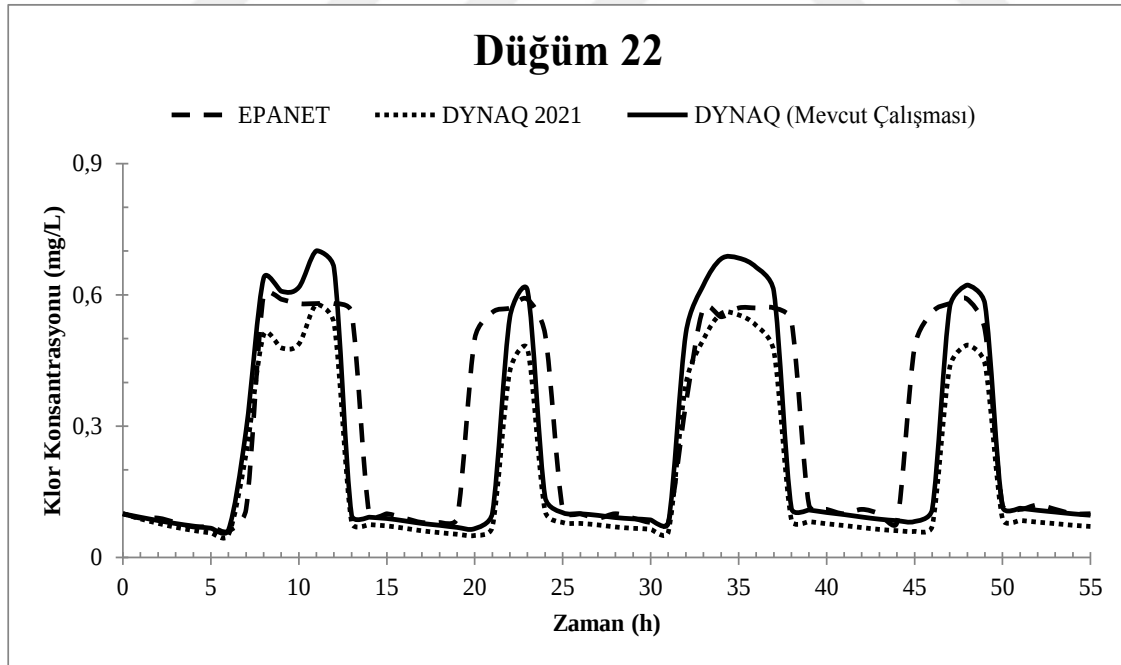


Şekil 1.14. Dügüm 20'de DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

EK-1. (devam) Tüm Dügümler için Karşılaştırma Sonuçları.

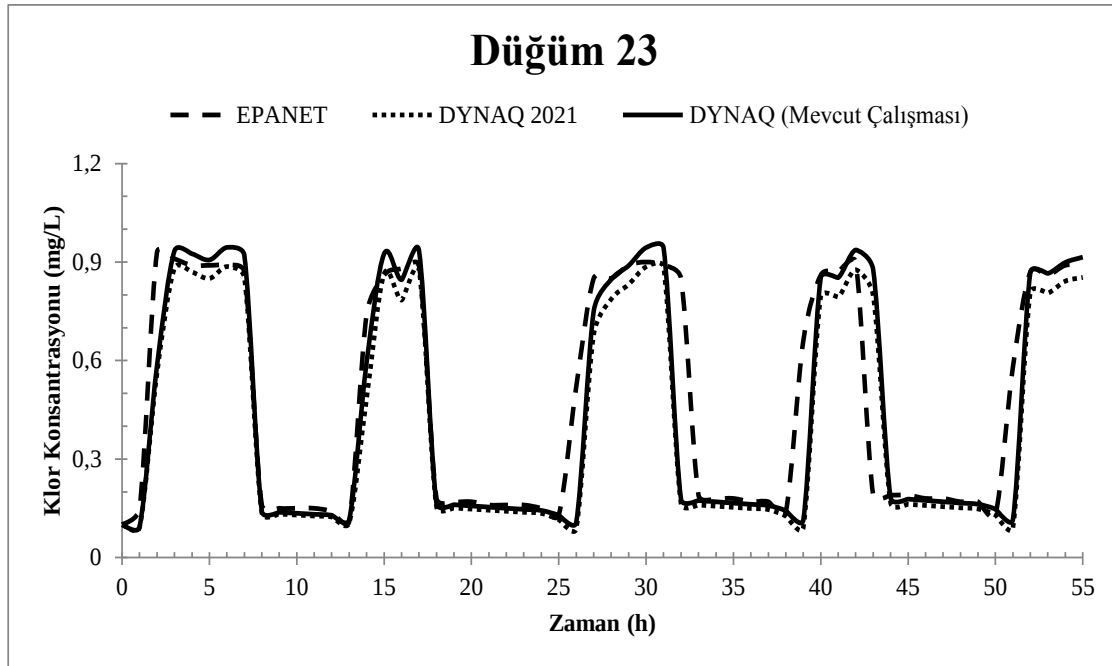


Şekil 1.15. Düğüm 21'de DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

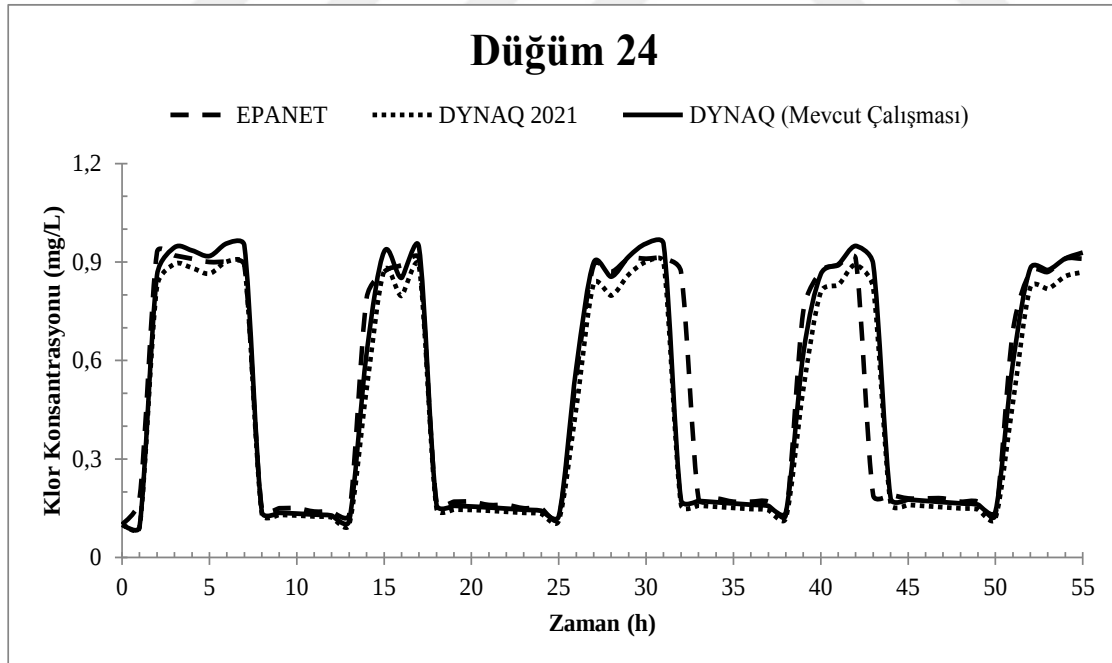


Şekil 1.16. Düğüm 22'de DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

EK-1. (devam) Tüm Dügümler için Karşılaştırma Sonuçları.

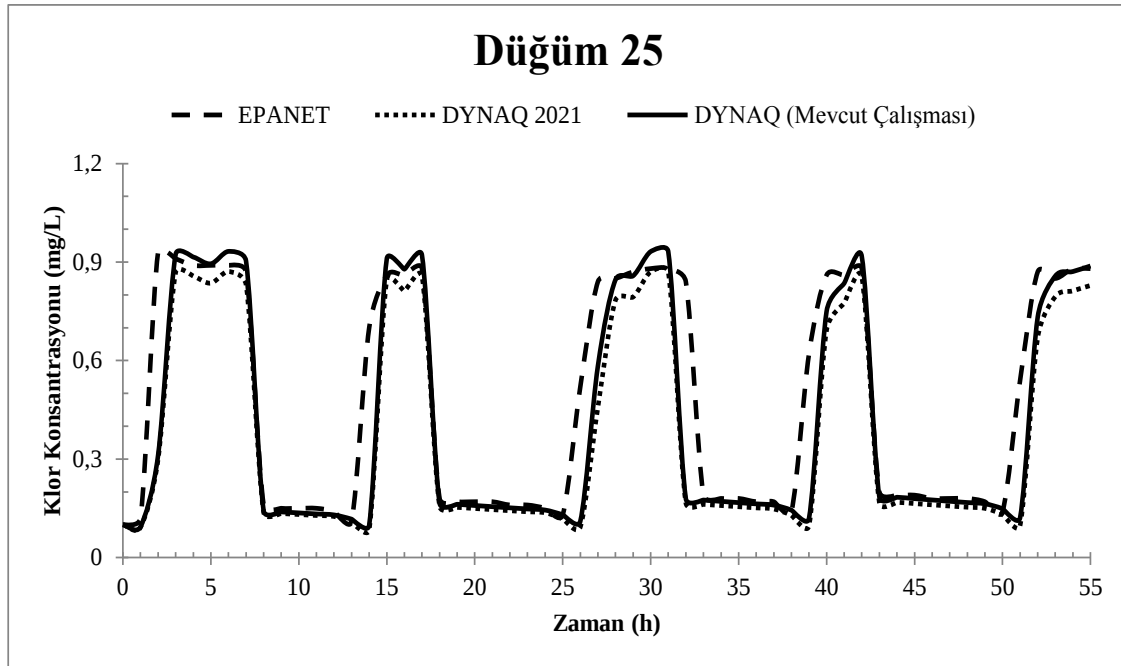


Şekil 1.17. Düğüm 23'te DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

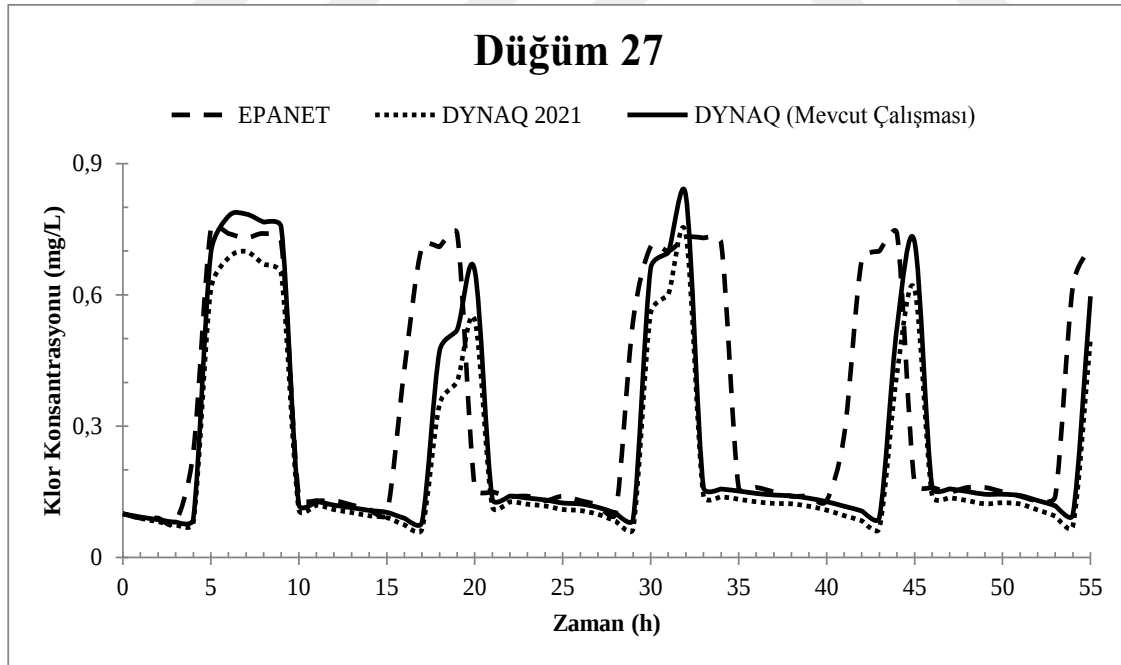


Şekil 1.18. Düğüm 24'te DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

EK-1. (devam) Tüm Düzümler için Karşılaştırma Sonuçları.

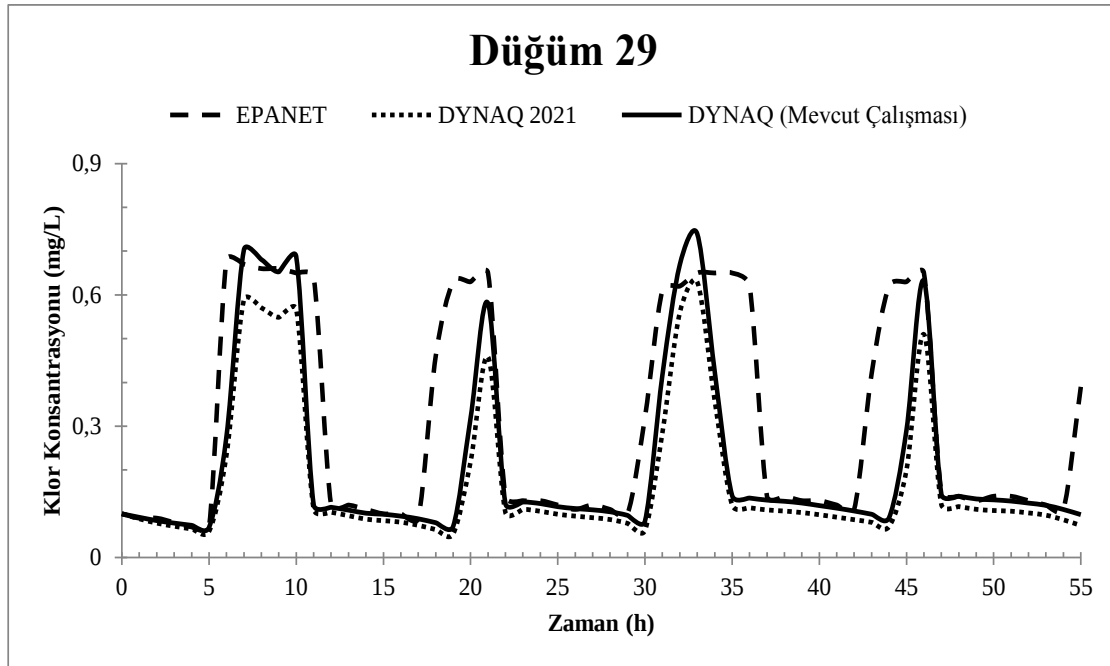


Şekil 1.19. Düzüm 25'te DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

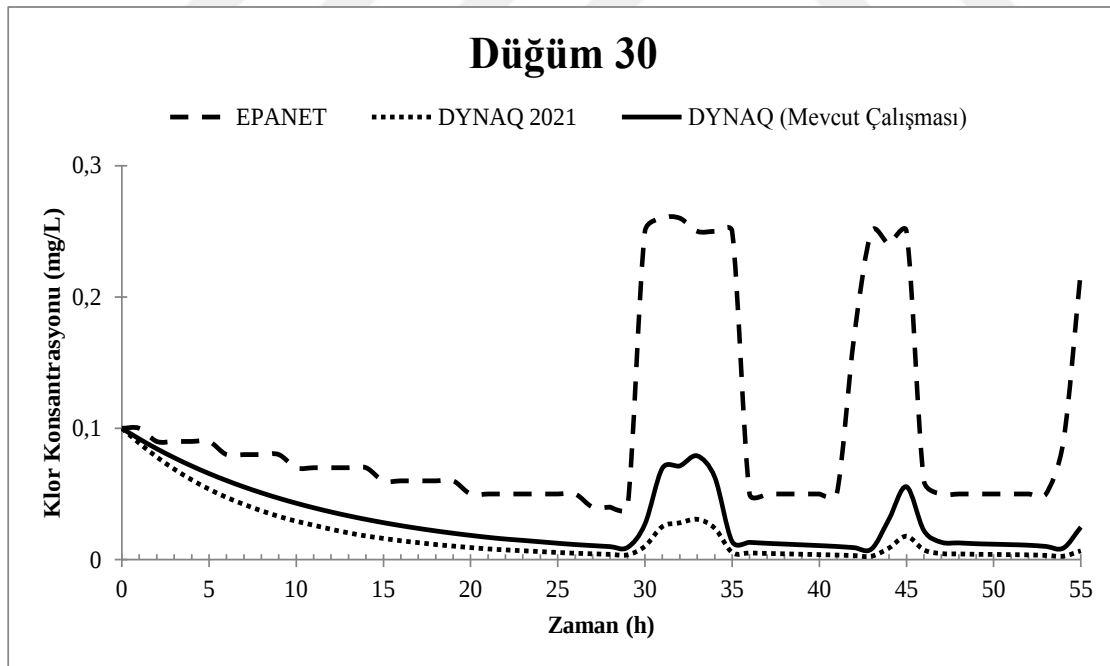


Şekil 1.20. Düzüm 27'de DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

EK-1. (devam) Tüm Dügümler için Karşılaştırma Sonuçları.

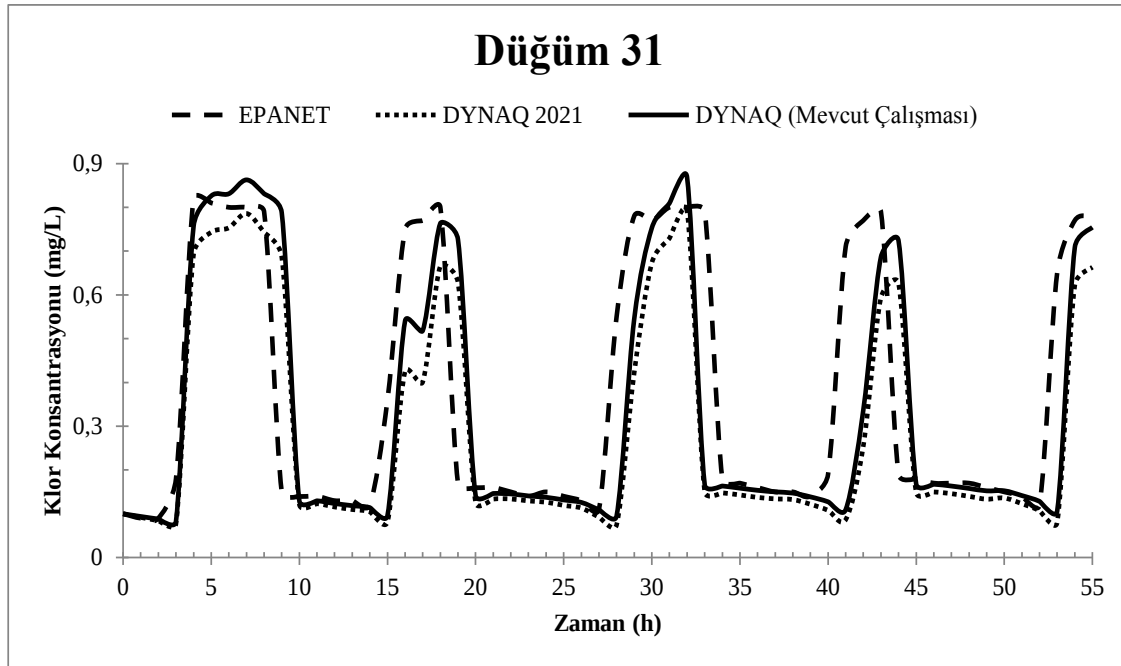


Şekil 1.21. Düğüm 29'da DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

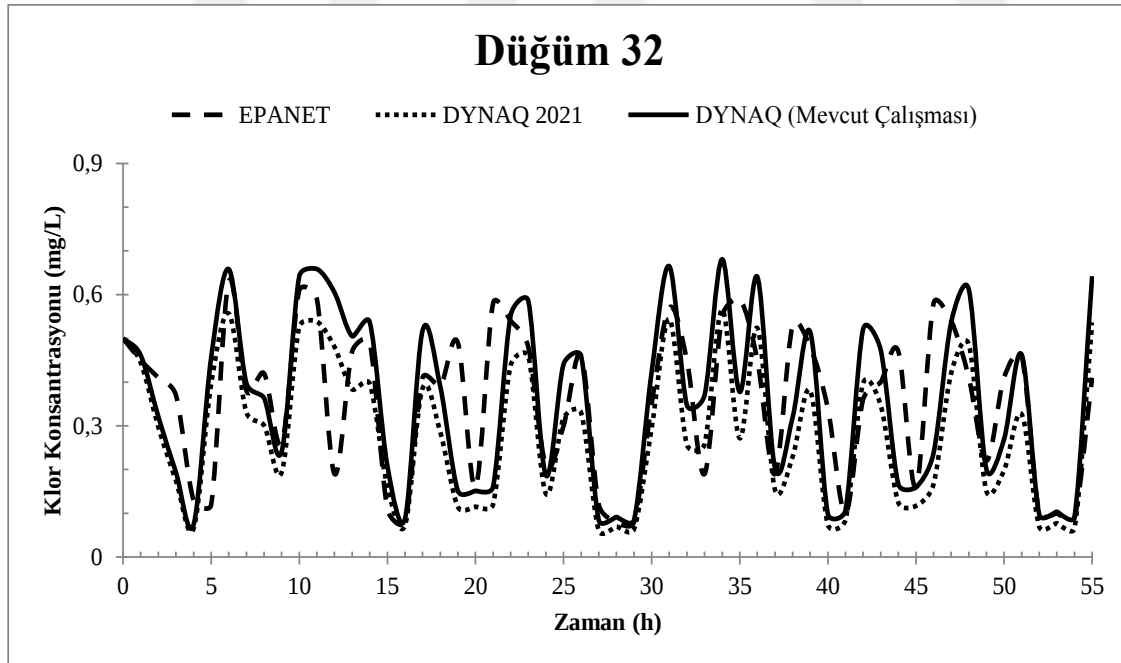


Şekil 1.22. Düğüm 30'da DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

EK-1. (devam) Tüm Düğümler için Karşılaştırma Sonuçları.

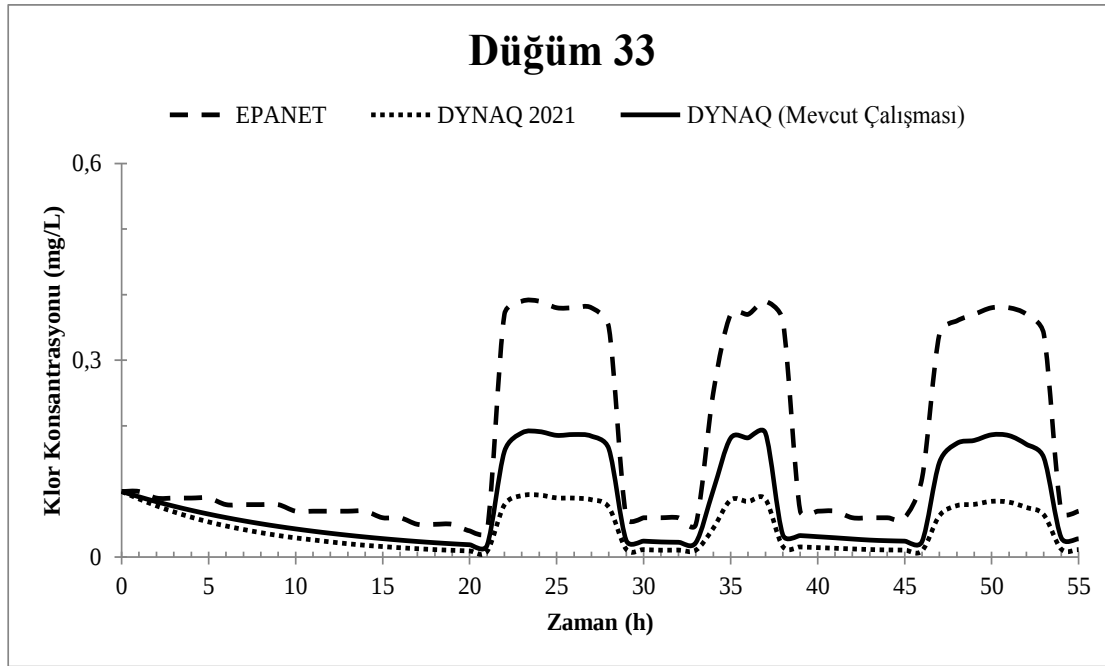


Şekil 1.23. Düğüm 31'de DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

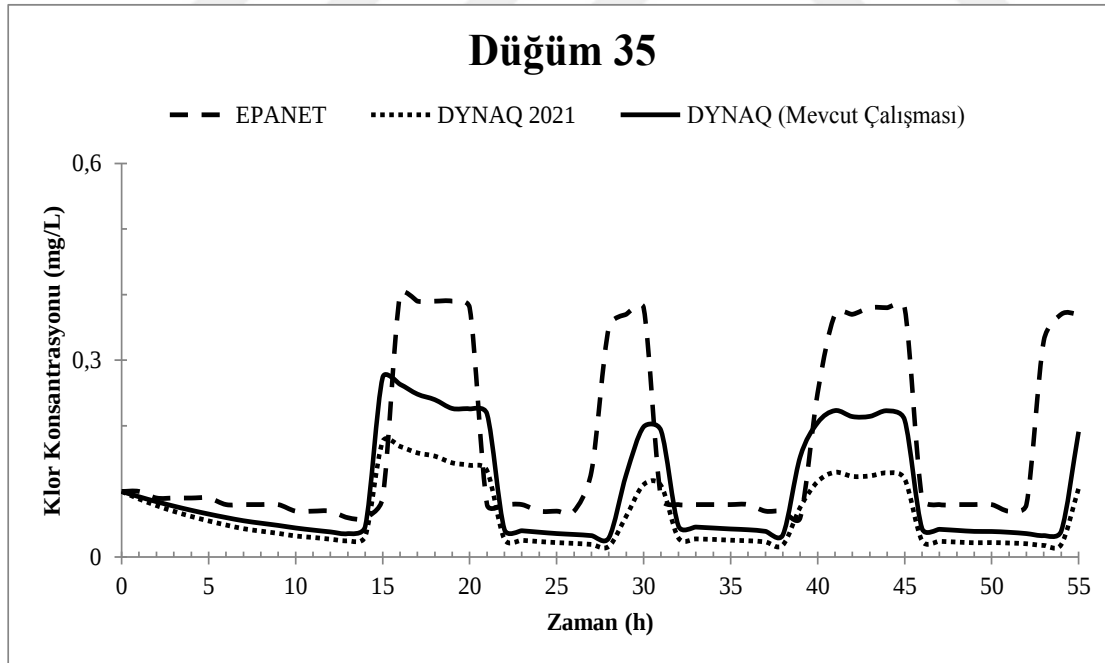


Şekil 1.24. Düğüm 32'de DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

EK-1. (devam) Tüm Düğümler için Karşılaştırma Sonuçları.

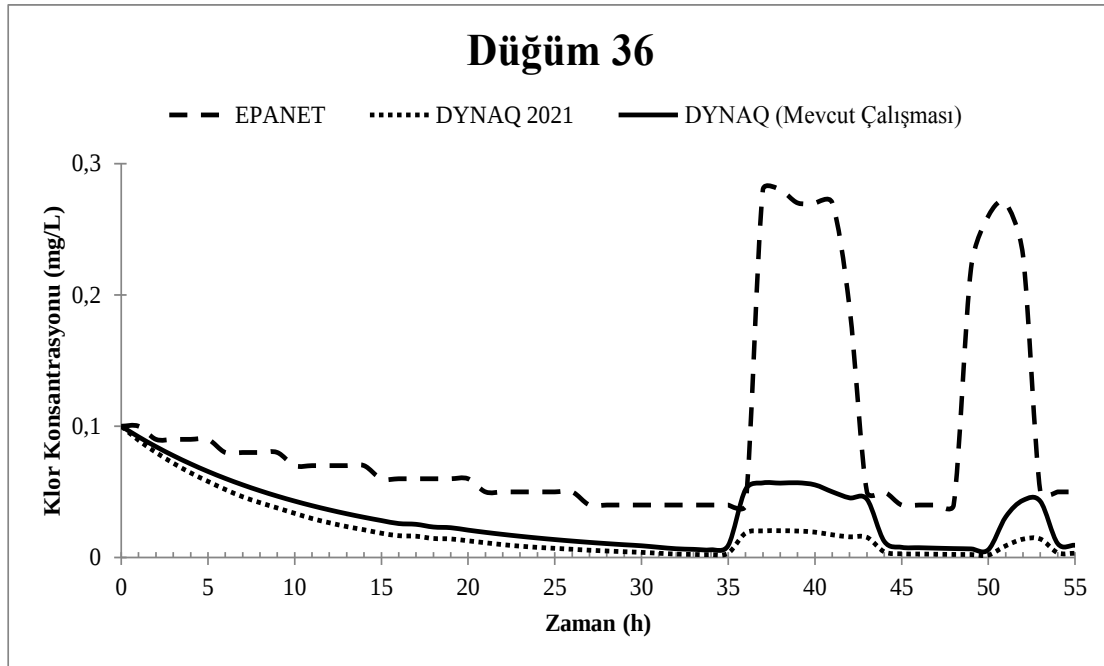


Şekil 1.25. Düğüm 33'te DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

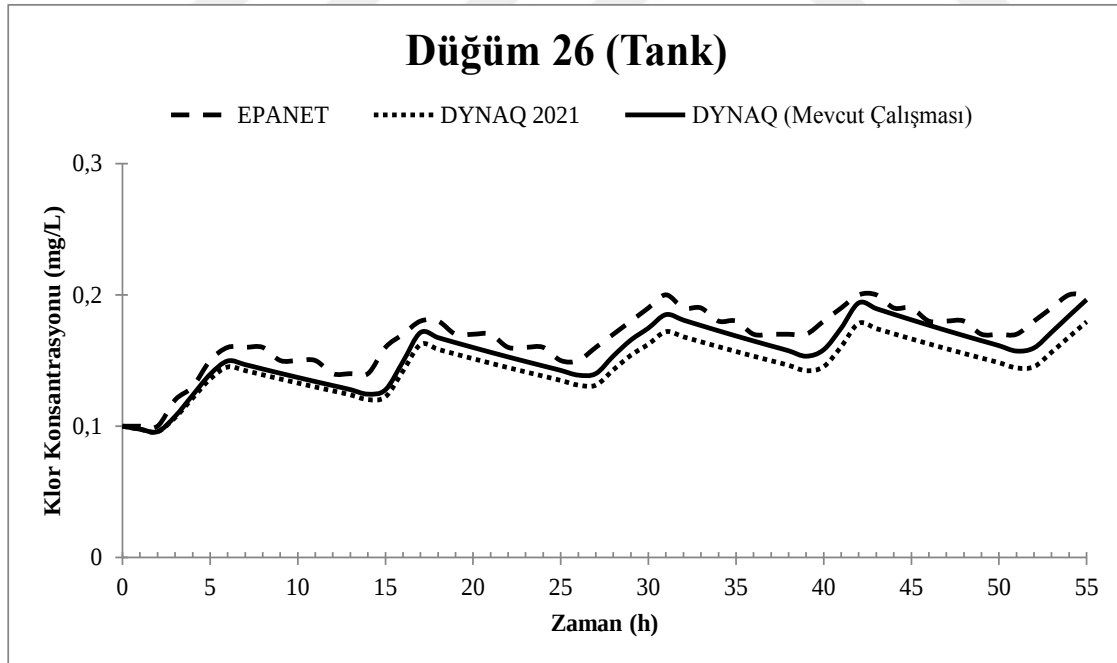


Şekil 1.26. Düğüm 35'te DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini

EK-1. (devam) Tüm Dügümler için Karşılaştırma Sonuçları.



Şekil 1.27. Düğüm 36'da DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini



Şekil 1.28. Düğüm 26'da DYNAQ ve EPANET ile klor konsantrasyonu tahmini (Tank)

EK - 2. Düğümlerin ve boruların karakteristiği

Çizelge 1.1. Şebekedeki boruların karakteristiği (EPANET)

Boru	Boru Çapı (cm)	Uzunluk (m)	Hız (m/s)	Reynolds Sayısı	Akış Tipi
1	30,48	731,52	0,51	155555	Türbülans
2	30,48	243,84	0,26	78917	Türbülans
3	20,32	396,24	0,12	23713	Türbülans
4	20,32	365,76	0,10	20642	Türbülans
5	30,48	304,8	0,04	13523	Türbülans
6	30,48	365,76	0,30	92202	Türbülans
7	30,48	822,96	0,30	92053	Türbülans
8	30,48	365,76	0,01	3670	Geçiş
9	30,48	121,92	0,30	91518	Türbülans
10	20,32	304,8	0,01	1964	Laminar
11	30,48	213,36	0,30	91101	Türbülans
12	30,48	579,12	0,30	90067	Türbülans
13	30,48	182,88	0,30	89591	Türbülans
14	30,48	121,92	0,26	80278	Türbülans
15	30,48	91,44	0,26	79766	Türbülans
16	20,32	457,2	0,12	24657	Türbülans
17	20,32	457,2	0,07	14963	Türbülans
18	20,32	182,88	0,05	9804	Türbülans
19	30,48	213,36	0,02	6978	Türbülans
20	30,48	106,68	0,01	3074	Geçiş
21	20,32	426,72	0,03	6983	Türbülans
22	30,48	335,28	0,04	12590	Türbülans
23	20,32	396,24	0,03	5726	Türbülans
24	20,32	396,24	0,002	572	Laminar
25	20,32	396,24	0,03	5683	Türbülans

EK - 2. (devam) Düğümlerin ve boruların karakteristiği

Çizelge 1.1. (devam) Şebekedeki boruların karakteristiği (EPANET)

26	30,48	182,88	0,29	89385	Türbülans
27	30,48	76,2	0,29	87822	Türbülans
28	30,48	91,44	0,29	87753	Türbülans
29	30,48	60,96	0,29	87715	Türbülans
30	30,48	182,88	0,03	9444	Türbülans
31	20,32	121,92	0,04	7475	Türbülans
32	20,32	121,92	0,02	4327	Türbülans
33	20,32	213,36	0,003	679	Laminar
34	20,32	304,8	0,005	1184	Laminar
35	20,32	121,92	0,002	599	Laminar
36	20,32	152,4	0,02	5019	Türbülans
37	20,32	152,4	0,004	892	Laminar
38	20,32	304,8	0,005	1178	Laminar
39	20,32	213,36	0,001	321	Laminar
40	20,32	91,44	0,002	410	Laminar

Çizelge 1.2. Şebekedeki düğümlerin özellikleri (EPANET)

Düğüm	Başlangıç Kloru (mg/L)	Yükseklik (m)	İhtiyaç (m ³ /s)
1	1,15	4,64	-0,002
2	1,15	9,29	3,18E-05
3	1,15	5,57	5,57E-05
4	1,15	5,57	3,18E-05
5	1,15	9,29	3,18E-05
6	0,83	11,61	1,98E-05
7	0,20	14,86	1,58E-05
8	0,20	10,22	3,58E-05
9	0,20	16,72	5,57E-05
10	0,20	12,07	1,98E-05
11	0,10	17,18	0,0001

EK - 2. (devam) Düğümünün ve boruların karakteristiği

Çizelge 1.2. (devam) Şebekedeki düğümünün özellikleri (EPANET)

12	0,10	19,51	6,36E-05
13	0,10	19,51	7,94E-06
14	0,10	18,58	7,94E-06
15	0,10	17,65	7,94E-06
16	0,20	13,93	7,96E-05
17	0,20	16,72	7,96E-05
18	0,50	9,29	7,96E-05
19	0,50	13,93	1,98E-05
20	0,10	15,79	7,56E-05
21	0,10	13,93	6,36E-05
22	0,10	18,58	3,98E-05
23	0,10	21,36	3,18E-05
24	0,10	17,65	4,37E-05
25	0,10	21,36	2,39E-05
26 (Tank)	0,10	21,83	0
27	0,10	12,07	3,18E-05
28	0,10	10,22	0
29	0,10	10,22	2,78E-05
30	0,10	12,07	1,19E-05
31	0,10	17,65	6,76E-05
32	0,50	10,22	6,76E-05
33	0,10	16,72	5,99E-06
34	0,10	17,65	5,99E-06
35	0,10	10,22	0
36	0,10	10,22	3,97E-06



Gazili olmak ayrıcalıktır