

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

**ALICI SU ORTAMI BAZLI DEŞARJ LİMİTLERİNİN
SİMÜLASYON-OPTİMİZASYON MODELLERİ
KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DERYA SADAK

DENİZLİ, HAZİRAN - 2019

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



**ALICI SU ORTAMI BAZLI DEŞARJ LİMİTLERİNİN
SİMÜLASYON-OPTİMİZASYON MODELLERİ
KULLANILARAK BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DERYA SADAK

DENİZLİ, HAZİRAN - 2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

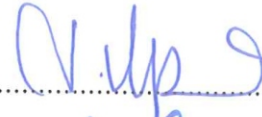
DERYA SADAK tarafından hazırlanan “ALICI SU ORTAMI BAZLI DEŞARJ LİMITLERİNİN SİMÜLASYON-OPTİMİZASYON MODELLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 20.06.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Prof. Dr. Mustafa Tamer AYVAZ



Üye

Prof. Dr. Alper ELÇİ

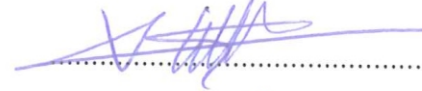
Dokuz Eylül Üniversitesi



Üye

Prof. Dr. Abdullah Cem KOÇ

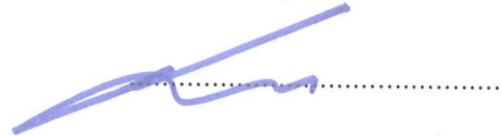
Pamukkale Üniversitesi



Üye

Prof. Dr. Emrah DOĞAN

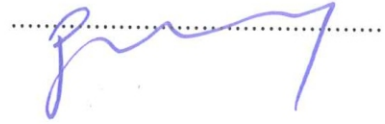
Sakarya Üniversitesi



Üye

Doç. Dr. Gürhan GÜRARSLAN

Pamukkale Üniversitesi



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 03/07/2019 tarih ve 27/11 sayılı kararıyla onaylanmıştır.



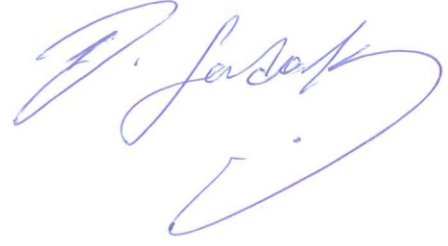
Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 116Y414 nolu proje ile desteklenmiştir.

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

DERYA SADAK



ÖZET

ALICI SU ORTAMI BAZLI DEŞARJ LİMİTLERİNİN SİMÜLASYON- OPTİMİZASYON MODELLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DERYA SADAK

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

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

DENİZLİ, HAZİRAN- 2019

Bu çalışma kapsamında Avrupa Birliği Su Çerçeve Direktifi ve ülkemizde kullanılan su kalitesi standartlarını dikkate alarak alıcı ortam bazlı deşarj limitlerinin belirlenebildiği entegre bir simülasyon-optimizasyon yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımı kullanılarak alıcı su ortamında çevresel kalite standartlarını (ÇKS) aşan parametrelerin ilgili ÇKS limit değerlerine çekilmesini sağlayacak şekilde noktasal kaynaklardan deşarj edilen kirletici yükleri belirlenebilmektedir. Geliştirilen yaklaşımın simülasyon aşamasında farklı su kalite parametreleri için kirlilik konsantrasyon değerleri ilgili sistemin AQUATOX su kalitesi modeli üzerinde modellenmesi ile belirlenmiştir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken husus AQUATOX'un bağımsız bir model olması ve üretilen yük kombinasyonu için optimizasyon modeli içinden doğrudan çalıştırılmayacağıdır. Bu nedenle doğrudan AQUATOX model sonuçları kullanılarak bir konsantrasyon tepki matrisi geliştirilmiş ve simülasyon modeli kapsamında kullanılmıştır. Bu aşamanın ardından geliştirilen konsantrasyon tepki matrisi genel indirgenmiş gradyan (GRG) yaklaşımının kullanıldığı bir optimizasyon modeline entegre edilmiştir. Önerilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımının performansı Küçük Menderes Havzası'nın bir bölümü üzerinde $NH_3\&NH_4$, NO_3 , TP, TSP ve $CBOD_5$ su kalitesi parametreleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, farklı optimizasyon parametrelerinin, yük tahsis katsayılarının ve başlangıç çözümlerinin sonuç duyarlılığı üzerindeki etkisini test edebilmek amacıyla detaylı bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar önerilen simülasyon-optimizasyon yaklaşımı kullanılarak modellenen her bir su kalitesi parametresi için ÇKS limit değerleri sağlanacak şekilde noktasal kaynaklara yük tahsisinin etkin bir şekilde yapılabildiğini göstermiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: Su Kalitesi Modelleme, Simülasyon-Optimizasyon Modeli, Alıcı Ortam Bazlı Deşarj Limiti, Havza Ölçekli Yaklaşım

ABSTRACT

IDENTIFICATION OF RECEIVING WATER BODY BASED DISCHARGE LIMITS BY USING SIMULATION-OPTIMIZATION MODELS

MSC THESIS

DERYA SADAK

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING

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

DENİZLİ, JUNE 2019

In this study, a linked simulation-optimization approach is proposed to determine the receiving body based discharge limits by considering the discharge standards used in European Union Water Framework Directive and water quality standards used by Turkey. By using the proposed simulation-optimization approach, pollution loads of the point sources can be determined in such a way that the parameters exceeding the Environmental Quality Standards (EQS) in the receiving water environment meet the relevant EQS limit values. In the simulation part of the proposed approach, pollution concentrations for different water quality parameters are determined by modeling the given system on AQUATOX water quality simulation model. Note that AQUATOX is an independent simulation model and it is not possible to execute it from the optimization model for the generated load combinations. Therefore, a concentration response matrix is developed by directly using the AQUATOX model results and used as the simulation model. After this process, the developed concentration response matrix is integrated to an optimization model where generalized reduced gradient (GRG) optimization approach is used. The performance of the proposed simulation-optimization approach is evaluated on a part of the Küçük Menderes River Basin by considering the water quality parameters of $\text{NH}_3\&\text{NH}_4$, NO_3 , TP, TSP and CBOD_5 . Also, a detailed sensitivity analysis is conducted in order to determine the effect of different optimization parameters, load allocation parameters, and initial solutions on solution accuracy. Identified results indicated that the proposed simulation-optimization approach can effectively allocate the pollution loads to different point sources by considering the EQS values for each modeled water quality parameter.

KEYWORDS: Water Quality Modelling, Simulation-Optimization Model, Receiving Water Body Based Discharge Limit, Basin Scale Approach

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	viii
KISALTMALAR LİSTESİ.....	xiii
ÖNSÖZ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Problemin Tanımı.....	1
1.2 Literatür Taraması	4
1.3 Tezin Amacı	8
1.4 Tezin Kapsamı.....	9
2. SİMÜLASYON MODELİ	10
2.1 AQUATOX Su Kalitesi Modeli	10
2.2 Vekil Simülasyon Modeli.....	15
2.2.1 Doğrusal Süperpozisyon Prensibi	16
2.2.1.1 Tepki Matrisinin Doğrulanması	19
3. OPTİMİZASYON MODELİ.....	20
3.1 Problem Formülasyonu	20
3.2 Genel İndirgenmiş Gradyan (GRG) Optimizasyon Tekniği	25
4. ÇALIŞMA SAHASI	30
4.1 Küçük Menderes Havzası.....	30
4.2 Baskı Analizi ve Su Kalitesi İzleme Çalışmaları	32
4.3 Uygulama Sahası	33
4.4 Saha Çalışmaları.....	35
4.5 Belirli Kirlenmeler	36
4.5.1 İncelenen Parametreler	37
4.5.1.1 NH ₃ &NH ₄	37
4.5.1.2 NO ₃	37
4.5.1.3 TP	38
4.5.1.4 TSP.....	38
4.5.1.5 CBOD ₅	38
4.5.2 ÇKS Limitleri	39
4.6 AQUATOX Modelinin Kurulumu	40
4.7 Vekil Simülasyon Modelinin Kurulumu	42
4.8 Vekil Simülasyon Modelinin Doğrulanması.....	44

5. MODEL UYGULAMASI	46
5.1 Problemin Kurulumu ve Modelin Test Edilmesi	46
6. DUYARLILIK ANALİZİ	56
6.1 Optimizasyon Modelinde Yer Alan Parametreler için Duyarlılık Analizi	56
6.2 Yük Tahsis Katsayısının Farklı Değerleri İçin Duyarlılık Analizi.....	64
6.3 Farklı Başlangıç Değerleri İçin Model Performansının Test Edilmesi.....	68
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	71
7.1 Sonuçlar.....	71
7.2 Öneriler.....	73
8. KAYNAKLAR	74
9. EKLER	79
EK A Tepki Matrisinin Hesaplanması İçin Elde Edilen AQUATOX Modeli Sonuçları	79
EK B AQUATOX Modeli ile Elde Edilen Arka Plan Konsantrasyonları.....	80
EK C Uygulama Sahası İçin Elde Edilen Tepki Matrisi	81
EK D Farklı Deşarj Yükleri İçin Vekil Simülasyon Modeli ile AQUATOX Modeli Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	82
EK E Duyarlılık Analizinde Kullanılan Parametre Kombinasyonları	94
10. ÖZGEÇMİŞ	95

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: AQUATOX su kalitesi modeline ait kavramsal model	11
Şekil 2.2: AQUATOX ile besin elementlerinin modellenmesi.....	12
Şekil 2.3: Çalışma sahası ve simülasyon modeli arasındaki ilişki	14
Şekil 2.4: Tepki matrisinin doğrulanması	19
Şekil 3.1: Geliştirilen simülasyon-optimizasyon modeline ait kavramsal model	22
Şekil 3.2: Geliştirilen simülasyon-optimizasyon modeline ait akış diyagramı.	24
Şekil 4.1: Küçük Menderes Havzası	30
Şekil 4.2: Geliştirilen modelin uygulamasının yapıldığı saha ve dikkate alınan noktasal kaynakların ve izleme noktalarının saha üzerindeki konumu.....	34
Şekil 4.3: Çalışma kapsamında incelenen parametreler.....	37
Şekil 4.4: AQUATOX su kalitesi modeli arayüzü.....	41
Şekil 4.5: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması	45
Şekil 5.1: Senaryo 1-4 için kaynaklara tahsis edilen deşarj yüklerinin oransal değişimi	49
Şekil 5.2: Senaryo 1 için izleme noktalarında gözlenen kirletici konsantrasyonları	50
Şekil 5.3: Senaryo 2 için izleme noktalarında gözlenen kirletici konsantrasyonları	51
Şekil 5.4: Senaryo 3 için izleme noktalarında gözlenen kirletici konsantrasyonları	52
Şekil 5.5: Senaryo 4 için izleme noktalarında gözlenen kirletici konsantrasyonları	52
Şekil 5.6: Tüm senaryolar için izleme noktalarında gözlenen NH ₃ &NH ₄ konsantrasyonları	53
Şekil 5.7: Tüm senaryolar için izleme noktalarında gözlenen NO ₃ konsantrasyonları	54
Şekil 5.8: Tüm senaryolar için izleme noktalarında gözlenen TSP konsantrasyonları	54
Şekil 5.9: Tüm senaryolar için izleme noktalarında gözlenen TP konsantrasyonları	55

Şekil 5.10: Tüm senaryolar için izleme noktalarında gözlenen CBOD ₅ konsantrasyonları	55
Şekil 6.1: Tanımlanan CD_j^k ölçütünün hesabına ilişkin kavramsal model.....	58
Şekil 6.2: 64 parametre seti sonucunda elde edilen Toplam Amonyum Azotu için ağırlık merkezleri	59
Şekil 6.3: 64 parametre seti sonucunda elde edilen Nitrat Azotu için ağırlık merkezleri.....	59
Şekil 6.4: 64 parametre seti sonucunda elde edilen Toplam Çözünebilir Fosfor için ağırlık merkezleri	60
Şekil 6.5: 64 parametre seti sonucunda elde edilen Askıda ve Çözünmüş Organik Madde için ağırlık merkezleri	60
Şekil 6.6: 64 parametre seti ile Toplam Amonyum Azotu için hesaplanan CD_j^k değerlerinin değişimi.....	61
Şekil 6.7: 64 parametre seti ile Nitrat Azotu için hesaplanan CD_j^k değerlerinin değişimi	61
Şekil 6.8: 64 parametre seti ile Toplam Çözünebilir Fosfor için hesaplanan CD_j^k değerlerinin değişimi.....	62
Şekil 6.9: 64 parametre seti ile Askıda ve Çözünmüş Organik Madde için hesaplanan CD_j^k değerlerinin değişimi.....	62
Şekil 6.10: Farklı yük tahsis katsayıları için Toplam Amonyum Azotu deşarj yükü.....	65
Şekil 6.11: Farklı yük tahsis katsayıları için Nitrat Azotu deşarj yükü.....	65
Şekil 6.12: Farklı yük tahsis katsayıları için Toplam Çözünebilir Fosfor deşarj yükü.....	66
Şekil 6.13: Farklı yük tahsis katsayıları için Askıda ve Çözünmüş Organik Madde deşarj yükü	66
Şekil 6.14: Farklı başlangıç çözümleri için elde edilen yakınsama grafiği (Senaryo 1)	68
Şekil 6.15: Farklı başlangıç çözümleri için elde edilen yakınsama grafiği (Senaryo 2)	69
Şekil 6.16: Farklı başlangıç çözümleri için elde edilen yakınsama grafiği (Senaryo 3)	69
Şekil 6.17: Farklı başlangıç çözümleri için elde edilen yakınsama grafiği (Senaryo 4)	69
Şekil D.1: Doğrulama çözümü 2: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması	85
Şekil D.2: Doğrulama çözümü 3: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması	86

Şekil D.3: Doğrulama çözümü 4: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması	87
Şekil D.4: Doğrulama çözümü 5: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması	88
Şekil D.5: Doğrulama çözümü 6: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması	89
Şekil D.6: Doğrulama çözümü 7: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması	90
Şekil D.7: Doğrulama çözümü 8: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması	91
Şekil D.8: Doğrulama çözümü 9: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması	92
Şekil D.9: Doğrulama çözümü 10: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması	93

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1: Projenin iş paketlerine ayrılması	3
Tablo 4.1: İncelenen parametreler ve ÇKS limitleri	40
Tablo 4.2: Doğrulama çözümü 1 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları	44
Tablo 5.1: Model analizinde kullanılan yük tahsis katsayıları.....	47
Tablo 5.2: Tüm senaryolar için elde edilen simülasyon-optimizasyon modeli sonuçları	48
Tablo 6.1: Yük tahsis katsayısı aralığının belirlenmesi için kullanılan veri seti	65
Tablo 6.2: Farklı başlangıç çözümleri için model sonuçlarının istatistiksel değerlendirmesi	70
Tablo A.1: Noktasal kaynaklardan 100 mg/L deşarj yapılması durumunda elde edilen konsantrasyon değerleri	79
Tablo B.1: AQUATOX modeli ile belirlenen arka plan konsantrasyonları.....	80
Tablo C.1: Çalışma sahası için elde edilen tepki matrisi	81
Tablo D.1: Doğrulama çözümü 2 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları	82
Tablo D.2: Doğrulama çözümü 3 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları	82
Tablo D.3: Doğrulama çözümü 4 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları	82
Tablo D.4: Doğrulama çözümü 5 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları	83
Tablo D.5: Doğrulama çözümü 6 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları	83
Tablo D.6: Doğrulama çözümü 7 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları	83
Tablo D.7: Doğrulama çözümü 8 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları	84
Tablo D.8: Doğrulama çözümü 9 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları	84
Tablo D.9: Doğrulama çözümü 10 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları	84
Tablo E.1: Optimizasyon modelinde kullanılan parametrelerin duyarlılık analizi için oluşturulan kombinasyonlar	94

SEMBOL LİSTESİ

- TSP : Toplam çözünebilir fosfor
- Frc : Fosfor kullanım oranı
- P_{Total} : Toplam fosfor yükü
- $P_{SuspDetritus}$: Askıda bulunan detritus yükünün içerisindeki fosfor yükü
- $P_{SuspPlants}$: Askıdaki bitkilerden gelen fosfor yükü
- dO_2/dt : Çözünmüş oksijen konsantrasyonunun zamanla değişimi
- n_d : Noktasal kirletici kaynak sayısı
- n_c : Deşarj edilen kirletici madde sayısı
- n_o : İzleme noktalarında takip edilen kirletici madde sayısı
- n_m : Modellenen sistem üzerindeki izleme noktalarının sayısı
- n_t : Modelleme yapılan zaman adımı sayısı
- $q_{i,j}$: i numaralı kaynaktan j nolu kirletici madde için girilen kirletici yük değeri
- $\hat{c}_{k,l}(t)$: Alıcı ortamda l nolu izleme noktasında gözlenen k nolu maddenin t nolu zaman adımıdaki konsantrasyon değeri
- $c_{k,l}^0(t)$: Alıcı ortamda l nolu izleme noktasında gözlenen k nolu maddenin deşarj yapılmadan önceki arka plan konsantrasyon değeri
- $\alpha_{i,j,k,l}(t)$: i nolu noktasal kaynaktan j nolu kirletici maddenin birim yük miktarı için deşarj edilmesi durumunda alıcı ortamda bulunan l nolu izleme noktasında gözlenen k nolu maddenin t nolu zaman adımıdaki konsantrasyon değerini temsil eden kompozit tepki katsayısı
- α : $\alpha_{i,j,k,l}(t)$ tepki katsayılarının saklandığı $n_c \times n_o \times n_t$ adet satır ve $n_d \times n_m$ adet sütundan oluşan konsantrasyon tepki matrisi
- $c_{k,l}(t)$: AQUATOX modeli tarafından hesaplanan ve l nolu izleme noktasında gözlenen k nolu maddenin t nolu zaman adımıdaki konsantrasyon değeri

- Z : Maksimize edilecek amaç fonksiyonu değeri
- $\mathcal{P}_{i,j}^1$: 1 numaralı ceza fonksiyonu
- $\mathcal{P}_{i,j}^2$: 2 numaralı ceza fonksiyonu
- β_i : 1 numaralı ceza fonksiyonunun amaç fonksiyonuna entegrasyonu için kullanılan katsayı
- λ_i : 2 numaralı ceza fonksiyonunun amaç fonksiyonuna entegrasyonu için kullanılan katsayı
- ω_i : i nolu noktasal kaynağa ait yük tahsis katsayısı
- q_j^* : Deşarj edilecek j nolu kirleticiye ait yük tahsisinin noktasal kaynaklar arasında adil yapılabilmesini sağlayan ve tüm ω_i değerlerinin 1 olması durumunda $q_{i,j}$ değerlerinin ortalamasına eşit olan tahsis yükü
- Q_i : i nolu noktasal kaynağın deşarj yaptığı akarsu kolundaki akış debisi
- $\mathcal{C}_{i,j}$: i nolu noktasal kaynaktan deşarj edilen j nolu kirletici konsantrasyonu
- \mathcal{C}_j^{\max} : Tüm noktasal kaynaklardan deşarj edilen j nolu kirleticiye ait maksimum deşarj konsantrasyonları
- \mathcal{C}_j^{\min} : Tüm noktasal kaynaklardan deşarj edilen j nolu kirleticiye ait minimum deşarj konsantrasyonları
- B : Yük tahsis katsayısı ω_i 'nin değerinin 1'den farklı olması durumunda λ_i 'nin değerinin ayarlanmasında kullanılan pozitif bir tamsayı
- \tilde{C}_k : İzleme noktalarında takip edilen k nolu maddeye ait ÇKS değeri
- $f(\mathbf{x})$: Minimize edilecek amaç fonksiyonu değeri
- $h_j(\mathbf{x})$: Eşitsizlik kısıt fonksiyonu
- $l_k(\mathbf{x})$: Eşitlik kısıt fonksiyonu
- m_1 : Eşitsizlik kısıtlarının sayısı
- m_2 : Eşitlik kısıtlarının sayısı
- n : Karar değişkenlerinin sayısı

- x_i^{\min} : i nolu karar değişkeninin alt sınırı
 x_i^{\max} : i nolu karar değişkeninin üst sınırı
 $g_j(x)$: Eşitsizlik ve eşitlik kısıtlarının toplanmasıyla elde edilen kısıt fonksiyonu
 y : Bağımsız değişken
 z : Bağımlı değişken
 G_R : Genel İndirgenmiş Gradyan vektörü
 S : Doğrultu vektörü
 ξ : Adım aralığı
KM-19 : Uygulama sahasında bulunan izleme noktası
KM-20 : Uygulama sahasında bulunan izleme noktası
KM-22 : Uygulama sahasında bulunan izleme noktası
 ND_1 : Uygulama sahasında bulunan 1 numaralı noktasal kirletici kaynak
 ND_2 : Uygulama sahasında bulunan 2 numaralı noktasal kirletici kaynak
 ND_3 : Uygulama sahasında bulunan 3 numaralı noktasal kirletici kaynak
 ND_4 : Uygulama sahasında bulunan 4 numaralı noktasal kirletici kaynak
 ND_5 : Uygulama sahasında bulunan 5 numaralı noktasal kirletici kaynak
 CP_j^* : j nolu kirletici için esas çözümde belirlenen deşarj yüklerine ait ağırlık merkezi
 CP_j^k : j nolu kirletici için k numaralı veri seti kullanılarak yapılan çözüm sonucu elde edilen deşarj yüklerine ait ağırlık merkezi
 \tilde{x}_j^* : j nolu kirletici için esas çözüm sonucu belirlenmiş deşarj yükü ağırlık merkezi yatay koordinatları
 \tilde{y}_j^* : j nolu kirletici için esas çözüm sonucu belirlenmiş deşarj yükü ağırlık merkezi düşey koordinatları

\tilde{x}_j^k : j nolu kirletici için k numaralı veri kullanılarak yapılan çözüm sonucu belirlenen deşarj yükü ağırlık merkezi yatay koordinatları

\tilde{y}_j^k : j nolu kirletici için k numaralı veri kullanılarak yapılan çözüm sonucu belirlenen deşarj yükü ağırlık merkezi düşey koordinatları

\tilde{x}_i : i numaralı noktasal kirletici kaynağın yatay koordinatı

\tilde{y}_i : i numaralı noktasal kirletici kaynağın düşey koordinatı

CD_j^k : j nolu kirletici için k nolu veri setinin kullanılması durumunda belirlenen ağırlık merkezinin esas çözüme yakınlığı (merkez uzaklığı)



KISALTMALAR LİSTESİ

AB	:	Avrupa Birliği
ABD	:	Amerika Birleşik Devletleri
CBOD₅	:	Karbonlu Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı
CD	:	Merkez Uzaklığı
ÇKS	:	Çevre Kalite Standartları
ÇŞB	:	Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
EPA	:	ABD Çevre Koruma Ajansı
GA	:	Genetik Algoritma
GMTY	:	Günlük Maksimum Toplam Yük
GP	:	Genetik Programlama
GRG	:	Genel İndirgenmiş Gradyan Optimizasyon Tekniği
İP	:	İş Paketi
MAM	:	Marmara Araştırma Merkezi
OSB	:	Organize Sanayi Bölgesi
SÇD	:	Su Çerçeve Direktifi
SKKY	:	Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği
TP	:	Toplam Fosfat
TSP	:	Toplam Çözünebilir Fosfat
YSA	:	Yapay Sinir Ağları
YSKY	:	Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği
YSKYY	:	Yüzeysel Su Kalitesi Yönetimi Yönetmeliği

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca çalışmalarımda beni yönlendiren, bilgi birikimi ile her daim çalışmalarımın katkı sağlayan ve yol gösteren, her zaman sabırla, büyük bir ilgi ve emekle bana destek olan tez danışmanım Prof. Dr. Mustafa Tamer AYVAZ'a,

Bu tezin oluşturulmasında büyük katkı sağlayan ve jürimde yer alan Prof. Dr. Alper ELÇİ'ye,

Tez jürimde yer alan Prof. Dr. Abdullah Cem KOÇ, Prof. Dr. Emrah DOĞAN ve lisans hayatımdan bu yana eğitimimde büyük emeği olan Doç. Dr. Gürhan GÜRARSLAN'a,

Tezim ile ilgili gerekli kaynaklara ve verilere ulaşmamı sağlayan TÜBİTAK-MAM Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü Müdürü Dr. Selma AYZAZ'a, Uzman Araştırmacı Dr. Mehmet DİLAVER'e ve Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü'nün diğer çalışanlarına,

Her daim yanımda olan ve bu süreçte beni yalnız bırakmayan başta annem olmak üzere tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

1.1 Problemin Tanımı

Ülkemiz havzalarında su kalitesini korumaya yönelik Tarım ve Orman Bakanlığı, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ve TÜBİTAK gibi kuruluşlar tarafından çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda havza ölçekli su kalitesi hedefleri, koruma eylem planları ve su kirliliğinin tespitine ilişkin raporlar hazırlanmaktadır. Bu çalışma ve raporlardan yola çıkarak oluşturulan ülkemiz su kaynaklarını korumaya yönelik çeşitli yönetmelikler bulunmaktadır. Ancak, su kaynaklarının korunmasında uygulanan en önemli yönetmelik olan Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğine (SKKY) göre her su kütlesinin aynı nitelikte olduğu kabul edilerek aynı sektörel deşarj standartları geçerli sayılmaktadır. Bu varsayımın aksine alıcı ortama deşarj edilen her su kütlesinin aynı nitelikte olmadığı ve farklı tesislerde üretilen ürünlerin oluşturduğu atıklar ile kullanılan arıtma sistemine bağlı olarak bu niteliğin değiştiği bilinmektedir. Bu yaklaşımdan dolayı, Tarım ve Orman Bakanlığı ile Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın Türkiye havzalarında yaptığı izleme çalışmaları sonucunda bazı havzalarda su kalitesinin istenen seviyede olmadığı görülmektedir. Bu noktadan yola çıkarak Avrupa Birliği tarafından yayımlanan Su Çerçeve Direktifi (SÇD)'de belirtildiği üzere su kaynaklarının korunmasında alıcı ortam su kalitesi göz önüne alınarak deşarj standartlarının belirlenmesi gerekmektedir.

Ülkemizde alıcı su ortamının korunmasında noktasal ve yayılı kaynaklı kirleticilerin Çevresel Kalite Standartları (ÇKS) limitleri dikkate alınmakta ve bu değerlerin aşılmaması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, noktasal ve yayılı kaynaklı kirleticiler için alıcı su ortamlarının mevcut kalitesinin ortaya konularak, ÇKS limitlerinin aşılp aşılmadığının kontrolünün yapılması ve ÇKS'lerin aşıldığı durumlarda ise her bir noktasal kirletici için yük bazında kirlilik azaltım ihtiyaçlarının belirlenmesi önem arz etmektedir. Gerek Avrupa Birliği ülkelerinde gerekse ABD'de bu durum dikkate alınarak alıcı ortam bazlı deşarj limitlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen Günlük Maksimum Toplam Yük

(GMTY) yaklaşımı bu çalışmalara örnek verilebilir. ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından geliştirilen bu yaklaşım ile su kaynaklarına direkt kirletici deşarjını önlemek, azaltmak ve kaynakların kirletici etkisine göre deşarj limitlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, GMTY yaklaşımı ile bir su kütlesinde bulunabilecek maksimum kirletici madde miktarı hesaplanarak noktasal ve yayılı kirletici kaynaklar için deşarj standartları belirlenmektedir. Deşarj standartlarının belirlenmesinde ise genel olarak teknoloji ve su kalitesi bazlı yöntemler kullanılmaktadır. Teknoloji bazlı yöntemler, su kalitesi göz önüne alınmadan mevcut durumun iyileştirilmesi için noktasal kaynaklarda kullanılan arıtma sistemlerini içermekte olup su kalitesi bazlı yaklaşımlar ise, alıcı ortamın maksimum yükleme kapasitesinin dikkate alınarak deşarj standartlarının belirlenmesi işlemlerini kapsamaktadır.

Literatürde alıcı ortam su kalitesi dikkate alınarak yapılan çalışmalar incelendiğinde Burn ve diğ. (2001), Cho ve diğ. (2004), Yandarumi ve diğ. (2006), Özbayrak ve Bakan (2013), Ölmez (2014), Su ve diğ. (2019) genel olarak modelleme tabanlı ya da modellemeye dayanmayan yaklaşımlar kullanılarak deşarj standartlarının belirlendiği görülmektedir. Modellemeye dayanmayan yaklaşımlar daha çok alıcı ortamda müsaade edilebilir deşarj yükünün belirlendikten sonra noktasal ve yayılı kirletici kaynaklarda farklı yük-azaltım senaryolarının oluşturularak deşarj standartlarının belirlenmesi işlemlerini kapsamaktadır. Ancak bu yaklaşım yapılan çalışma sahasına özgü nitelikte olup farklı havzalar için senaryoların tekrar belirlenmesi gerekmektedir Modelleme tabanlı yaklaşımlar ise daha karmaşık bir yapıya sahip olmakla beraber deşarj standartlarının matematiksel modeller ile belirlendiği, alıcı ortamda su kalitesinin simülasyon modelleri ile yansıtıldığı çalışmaları içermektedir. Modellemeye dayanmayan yaklaşımlar daha basit yapıda olmasına rağmen modelleme tabanlı yaklaşımların farklı çalışma sahalarında uygulanabilir oluşu aynı zamanda hassas sonuçlar elde ederek deşarj standartları belirlendiği için daha avantajlı bir yaklaşım olduğu görülmektedir.

Ülkemizde ise alıcı ortam su kalitesi göz önünde bulundurularak deşarj standartlarının belirlenmesi adına GMTY yaklaşımının uygulanabilirliği için 2013 yılında Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından araştırmalar yapılmış, bu doğrultuda Nilüfer Çayı Alt Havzası'nda deşarj limitlerinin modellemeye dayanmayan

yaklaşımlar ile belirlenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir (Ölmez 2014). Ancak hala deşarj standartlarının belirlenmesinde modelleme tabanlı yaklaşımlar ile ilgili bir çalışma yapılmamıştır. Bu eksiklik ülkemiz havzalarında yerüstü suları için istenilen kaliteye ulaşmada bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yukarıda anlatılan probleme çözüm olarak **TÜBİTAK-1003 Öncelikli Alanlar Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı** kapsamında “*Alıcı Ortam Bazlı Deşarj Limiti Belirlenmesi – Küçük Menderes Havzası Örneği*” başlıklı 116Y413 (Alt Proje No: 116Y414, 116Y415) numaralı TÜBİTAK projesi yürütülmektedir. Yapılan bu çalışma, ilgili projenin bir bölümünü kapsamaktadır. İlgili proje kapsamında, alıcı ortam bazlı deşarj limitlerinin ÇKS limit değerleri dikkate alınarak her bir noktasal kirletici kaynak için belirlenebildiği simülasyon-optimizasyon tabanlı bir yaklaşım geliştirilecektir. Projede çalışma sahası olarak Küçük Menderes Havzası seçilmiştir. Projede yapılacak olan çalışmalar genel olarak beş ayrı bölüme ayrılarak Tablo 1.1’de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 1.1: Projenin iş paketlerine ayrılması

İş Paketi (İP)	Hedefler
1	Proje hazırlık çalışmaları, Havzanın karakterizasyonu ve baskı etki analizi
2	Alıcı ortamda su kalitesi izleme çalışmaları, Su kalitesi haritalarının Coğrafi Bilgi Sistemi ortamında hazırlanması, Analiz sonuçlarının değerlendirilmesi
3	Akım ve su kalitesi modelinin kurulması ve çalıştırılması, Model sonuçlarının hassasiyet analizi ve modellerin kalibrasyonu
4	Simülasyon-optimizasyon modeli ile alıcı ortam bazlı deşarj limitlerinin belirlenmesi
5	Proje ile ilgili nihai çıktılar elde edilmesi ve değerlendirilmesi

Tablo 1.1’den görüleceği gibi her bir bölüm farklı alanları kapsamakta olup bu bağlamda gerçekleştirilen proje çok disiplinli bir yapıya sahiptir. Bu çalışma önerilen iş kalemleri arasından 4 numaralı iş paketini kapsamakta olup alıcı ortam bazlı deşarj limitlerinin entegre çalışan bir simülasyon-optimizasyon modeli kurularak belirlenmesini amaçlamaktadır. Bu kapsamda ekolojik hassasiyeti dikkate alan ve saha ölçümleri kullanılarak kalibre edilmiş (İP 3) bir su kalitesi modeline ait çıktılar kullanılarak bir vekil simülasyon modeli geliştirilmiştir. Bu model, su kalitesi

modelinin birim kirletici yükleri için vermiş olduğu tepkinin bir matris içerisinde saklanması ve farklı durumlar için bu matris kullanılarak sistemin su kalitesi bakımından verdiği tepkinin belirlenmesine dayanmaktadır. Matematiksel olarak ifade edilen bu vekil simülasyon modeli ardından bağımsız çalışan bir optimizasyon modeline entegre edilmiş ve ÇKS değerleri dikkate alınacak şekilde alıcı ortam bazı deşarj limitleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, noktasal kaynaklardan girilen yüklerin, alıcı ortamdaki konsantrasyonu vekil simülasyon modeli ile belirlenmekte ve bu konsantrasyonların ÇKS limitlerini aşmaması optimizasyon modeli ile sağlanmaktadır.

1.2 Literatür Taraması

Literatürde simülasyon-optimizasyon modellerinin özellikle simülasyon aşamasında vekil modeller ile kullanıldığı pek çok uygulama bulunmaktadır. Bu uygulamaların büyük bir çoğunluğu kalite ve miktar bakımından yeraltı suyu yönetim problemlerinin çözümü ile ilgili olup yüzeysel su kaynaklarının yönetimi ile ilgili çalışmalardaki uygulamaları oldukça sınırlıdır.

Genel olarak, bir simülasyon-optimizasyon modelinin simülasyon aşamasında vekil model kullanılmasının ana amacı optimizasyon modeli tarafından belirlenen parametre değerleri için simülasyon sürecinin çok daha kısa sürede tamamlanabilmesidir. Örnek olarak, kullanılacak simülasyon modeli ile 15 dakikada tamamlanabilecek bir modelleme süreci, bu model kullanılarak üretilmiş olan çoklu veri seti yardımıyla geliştirilecek bir vekil model ile 1-2 saniye gibi kısa bir sürede tamamlanabilmektedir. Optimizasyon modelinin her bir hesap adımında belirlenen parametre değerleri için sistemin vereceği tepki belirleneceğinden dolayı özellikle büyük çözüm bölgeleri ve uzun zaman periyotlarının gerektiği durumlarda vekil model kullanılarak çözüme ulaşmak çok daha mantıklı olmaktadır. Literatürde bu modelleme yaklaşımının dikkate alındığı bazı çalışmalar bulunmaktadır.

Rao (2006) 3 boyutlu bir akifer sistemindeki bilinmeyen yer altı suyu kirletici kaynaklarının yerlerinin ve kirlilik yüklerinin mevcut gözlem kuyularında ölçülen sınırlı sayıdaki konsantrasyon ölçümü ile belirlenebildiği bir model geliştirmiştir. Geliştirilen model kapsamında optimizasyon sürecinin her bir işlem adımında yeraltı suyu akım ve kirletici süreçlerinin benzeşiminin yapılması gerektiğinden dolayı uzun bilgi-işlem süreleri ile çözüme ulaşılmaktadır. Bu sorunu önlemek için ilgili çalışma kapsamında tavlama benzetimi tabanlı optimizasyon modeline Yapay Sinir Ağları (YSA) tabanlı bir vekil model entegre edilmiş optimum çözüme ulaşma süresi 80-90 kat daha azalmıştır.

Srekanth ve Datta (2010) kıyı akiferlerindeki tuzlu su girişimi probleminin çözümüne yönelik bir model geliştirmek amacı ile YSA ve genetik programlamaya (GP) dayanan vekil modelleri çok amaçlı genetik algoritma (MOGA) yöntemine dayanan bir optimizasyon modeline entegre etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar özellikle MOGA-GP entegrasyonunun oldukça etkili sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Wu ve diğ. (2015) ise geniş nehir havzalarında yüzeysel su-yeraltı suyu etkileşim sürecini modellemek amacı ile GSFLOW modeli kullanmıştır. Ancak, optimizasyon aşamasında doğrudan GSFLOW ile çözüme ulaşmak uzun bilgi işlem süreleri gerektirdiğinden GSFLOW yerine vekil simülasyon modeli kullanılması tercih edilmiştir.

Yapılan bu çalışmalar incelendiğinde vekil simülasyon modeli olarak literatürde YSA, GP, destek vektör makineleri gibi kara kutu modellerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu modeller genel olarak ilgili problemle alakalı olarak oluşturulmuş girdi ve çıktı değerleri arasında doğrusal ve doğrusal olmayan ilişkilerin matematiksel olarak kurulmasına dayanmaktadır. Girdi ve çıktı değerleri arasındaki bu ilişkiler belirlendikten sonra optimizasyon modeli tarafından belirlenen karar değişkeni değerleri vekil modele girdi olarak verilmekte ve bu girdi için modelin verdiği çıktı tekrar optimizasyon modeline aktarılabilir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biri vekil modelin sağladığı çıktı değerleri ile gerçek çıktı değerlerinin birbirine olan uyumudur. Bu kapsamda uyumlu sonuçların elde edilebilmesi amacıyla vekil modelin farklı girdi-çıkıtı değerleri kullanılarak eğitilmesi gerekmektedir. Bu sürecin yapılabilmesi için ise çoklu veri setlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken diğer bir husus vekil modelin

eğitimi amacıyla sağlanacak girdi ve çıktı değerleri arasındaki ilişkinin davranışıdır. Yukarıda bahsedilen YSA ve GP gibi modeller girdi ve çıktılar arasındaki ilişkinin hem doğrusal hem de doğrusal olmaması durumları için etkin olarak kullanılabilir. Buna karşın, girdilerle çıktılar arasında şayet doğrusal bir ilişki varsa YSA veya GP gibi herhangi bir vekil modele gerek kalmadan sistemin vereceği tepki bir konsantrasyon tepki matrisi kurularak belirlenebilmektedir (Gorelick 1982). Literatürde alıcı ortam bazlı deşarj limitlerinin simülasyon-optimizasyon süreci kapsamında vekil simülasyon modeli kullanılarak belirlenebildiği bazı çalışmalar bulunmaktadır.

Burn ve diğ. (2001) tarafından Willamette nehri üzerinde yapılan çalışmada su kalitesini iyileştirmeye yönelik üç farklı senaryo incelenerek simülasyon-optimizasyon modelinin bir arada kullanıldığı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Çalışmada ilk olarak, çözünmüş oksijen için tanımlanmış KS değerleri ile alıcı ortam içerisindeki çözünmüş oksijen konsantrasyonu arasındaki fark minimize edilerek noktasal kaynaklardaki deşarj yükünün hesaplandığı Genetik Algoritma (GA) tabanlı optimizasyon modeli kurulmuştur. Alıcı ortamda su kalitesi QUAL2E su kalitesi modeli kullanılarak belirlenmiştir. Su kalitesi modelinin optimizasyon modeli ile bütünleşik olarak çalışması için QUAL2E su kalitesi modelindeki kirlilik yükü taşınım süreçlerinin tanımlandığı tepki matrisi yaklaşımı ile vekil simülasyon modeli geliştirilmiştir. Daha sonra problemi her bir noktasal kaynaktan eşit yük deşarj edilmesi koşulunun dikkate alındığı durum için ele alarak noktasal kaynaklardan deşarj edilen yükleri belirlenmiştir. Son olarak ilk iki çözüm yaklaşımını bir arada kullanarak alıcı ortamda su kalitesinin maksimizasyonu yapılmıştır.

Cho ve diğ. (2004) tarafından yapılan çalışmada alıcı ortamda su kalitesini arttırmaya yönelik alınabilecek atıksu arıtma önlemleri (filtre, aktif çamur, çökeltici ekleme, adsorpsiyon) için maliyet optimizasyonu yapılmıştır. İlk olarak alınan önlemler için QUAL2E su kalitesi modeli kullanılarak su kalitesindeki iyileşme yüzdeleri ve maliyet hesaplanmıştır. Farklı kombinasyonlarda meydana gelen iyileşme yüzdelerine karşı maliyet değerleri, deşarj edilen yüke bağlı olarak formüle edildikten sonra GA tabanlı optimizasyon yaklaşımı ile belirlenmiş minimum maliyeti veren önlem planı oluşturulmuştur.

Yandarumi ve diğ. (2006)'da, Burn ve diğ. (2001) tarafından yapılan çalışmaya benzer bir çalışma gerçekleştirerek simülasyon-optimizasyon modelini bütünleşik olarak kullanmıştır. Çalışmada amaç fonksiyonu üç farklı değer toplamından oluşmakta olup GA tabanlı optimizasyon modeli ile çözüm yapılmıştır. İlk olarak alıcı ortam içerisindeki izleme noktalarında çözünmüş oksijen konsantrasyonu ile limit değerini aştığı durumlar için arasındaki fark, daha sonra çözünmüş oksijen konsantrasyonunun limit değerini aştığı izleme noktalarının sayısı ve son olarak bütün izleme noktaları için çözünmüş oksijen konsantrasyonu ile limit değeri arasındaki farkın toplamı alınarak amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Simülasyon modeli alıcı ortam içerisinde çözünmüş oksijen konsantrasyonunun kimyasal taşınım süreçlerinin matematiksel olarak ifade edilmesi ile belirlenmiştir.

Su ve diğ. (2019)'da simülasyon-optimizasyon modelinin yine bütünleşik kullanıldığı bir yaklaşım geliştirmiştir. Problemin amaç fonksiyonu deşarj yüklerinin alıcı ortamda ÇKS değerlerini sağlayacak şekilde maksimize edilmesi olup problemin simülasyon aşamasında Gorelick (1982) tarafından yeraltı suyu kirlilik kaynaklarının iyileştirilmesi için yapılan çalışma kapsamında geliştirilen tepki matrisi yaklaşımı kullanılmıştır. Çalışmada tepki matrisinin oluşturulması aşamasında üç boyutlu hidrodinamik biyolojik su kalitesi modeli kullanılmıştır. Modele girdi olarak verilen deşarj yüklerine karşılık alıcı ortamda elde edilen kirlilik konsantrasyonları arasında kabul edilen doğrusallık koşulu ile bu girdi-çıkıtı ilişkisinin yansıtıldığı katsayılar hesaplanarak tepki matrisi oluşturulmuştur. Bu yaklaşım ile deşarj noktalarından girilen yük değerlerinin elde edilen tepki matrisi ile çarpılması sonucunda alıcı ortamdaki kirlilik konsantrasyonu elde edilmektedir. Mevcut simülasyon modeli MATLAB ortamında yinelemeli olarak çözüme ulaşılabilen matris tabanlı optimizasyon modeline entegre edilerek çalıştırılmıştır.

Literatürde deşarj limitlerinin belirlenmesi ve su kalitesinin iyileştirilmesi adına yapılan simülasyon-optimizasyon çalışmaları genel olarak incelendiğinde, simülasyon aşamasında daha çok YSA modellerinin kullanıldığı ancak son yıllarda yapılan çalışmalarda uzun işlem süreçleri alan bu modeller yerine tepki katsayılarının kullanıldığı görülmektedir. Özellikle Su ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada tez kapsamında geliştirilen yaklaşım ile benzer şekilde simülasyon-optimizasyon modelinin bütünleşik olarak çalıştığı ve simülasyon sürecinin tepki katsayıları ile

belirlendiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Burn ve diğ. (2001)'de yapılan çalışmada ise bu tez kapsamında ele alınan problem incelenmiş ve noktasal kaynaklarda KS limitlerini sağlayacak şekilde deşarj standartları belirlenmiştir. Ancak yapılan çalışma kapsamında alıcı ortamda su kalitesini belirlemek için yalnızca çözünmüş oksijen ele alınmiş diğer kirletici parametrelerin KS limitleri kontrol edilmemiştir. Aynı zamanda noktasal kaynakların her birine eşit yük tahsis edilmesi durumu dikkate alınırken kaynakların kapasitesine göre yük dağılımının yapılması dikkate alınmamıştır. Bu alışma noktasal kaynaklardan deşarj edilen kirletici yüklerinin izleme noktalarındaki KS limit değerleri sağlanacak şekilde maksimize edildiği bir simülasyon-optimizasyon yaklaşımı geliştirilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalara ek olarak, geliştirilen optimizasyon modeli ile noktasal kaynaklara deşarj yükleri belirtilen önem derecesine göre tahsis edilebilmektedir. Ayrıca yapılan diğer çalışmalarda alıcı ortamda tek bir parametrenin KS limit değerini sağlaması amaçlanırken, bu çalışma kapsamında birden fazla parametre dikkate alınarak deşarj standartları belirlenmiştir. Bu anlamda çalışma kapsamında geliştirilen simülasyon-optimizasyon modeli alıcı ortam baz alınarak deşarj limitlerinin belirlenmesinde yeni bir yaklaşım olarak literatüre katkı sağlamaktadır.

1.3 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, alıcı ortama deşarj yapan noktasal kirletici kaynakların deşarj limitlerinin, KS değerlerini aşmayacak şekilde belirlenebildiği bir simülasyon-optimizasyon yaklaşımı geliştirmektir. Bu kapsamda Küçük Menderes Nehri üzerinde yapılan saha çalışmaları ile AQUATOX su kalitesi modeli kurulmuştur. AQUATOX modeli ile KS limitlerine çekilmesi istenilen parametrelerin alıcı ortamda gözlenen konsantrasyon değerleri noktasal kaynakların deşarj yüklerine bağlı olarak belirlenebilmektedir. Bu bağlamda AQUATOX modeli kullanılarak elde edilen girdi çıktı ilişkileri kullanılarak konsantrasyon tepki matrisi yaklaşımı ile vekil bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. Oluşturulan vekil simülasyon modeli ardından deterministik tabanlı bir optimizasyon modeline entegre edilmiş ve model kapsamında belirlenen noktasal kaynaklardan deşarj edilen kirletici yükleri ölçüm noktalarında SD'de verilen KS limit değerlerini aşmayacak şekilde maksimize edilerek deşarj yükleri belirlenmiştir.

1.4 Tezin Kapsamı

- Bölüm 1: Bu bölümde tez ile ilgili genel bilgiler verilmiş, tezin amaç ve kapsamına değinilmiştir.
- Bölüm 2: Problem ile ilgili simülasyon modelinin kurulumundan bahsedilmiştir. Bu noktada su kalitesi modeli için kullanılan AQUATOX yazılımı hakkında bilgi verilmiş ve bu modelin girdi ve çıktıları kullanılarak vekil simülasyon modelinin nasıl oluşturulduğu anlatılmıştır. Doğrusal süperpozisyon prensibi açıklanarak tepki matrisinin oluşturulması ve doğrulanması için gerekli formülasyon verilmiştir.
- Bölüm 3: Optimizasyon modeli matematiksel olarak ifade edilmiş ve kullanılan optimizasyon yönteminin temel işleyiş mantığı anlatılmıştır. Simülasyon modelinin optimizasyon modeli ile bütünleşik çalışması açıklanmıştır.
- Bölüm 4: Bu bölümde çalışma sahasından bahsedilmiş ve elde edilen veriler ile kurulan AQUATOX su kalitesi modeli sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile vekil simülasyon modeli oluşturulmuştur. Farklı girdi değerleri için AQUATOX ile vekil simülasyon modelinin sonuçları karşılaştırılmış ve kurulan konsantrasyon tepki matrisinin doğrulaması yapılmıştır.
- Bölüm 5: Çalışma sahası için incelenen parametreler ve ÇKS limit değerleri verilmiştir. Oluşturulan vekil simülasyon modeli optimizasyon modeli içerisine entegre edilerek çalıştırılmış ve model sonuçları değerlendirilmiştir.
- Bölüm 6: Optimizasyon modeli için farklı parametre ve başlangıç değerleri ile model çalıştırılarak duyarlılık analizi yapılmıştır.
- Bölüm 7: Son olarak bu bölümde elde edilen sonuçlar açıklanmış ve gerekli öneriler sunulmuştur.

2. SİMÜLASYON MODELİ

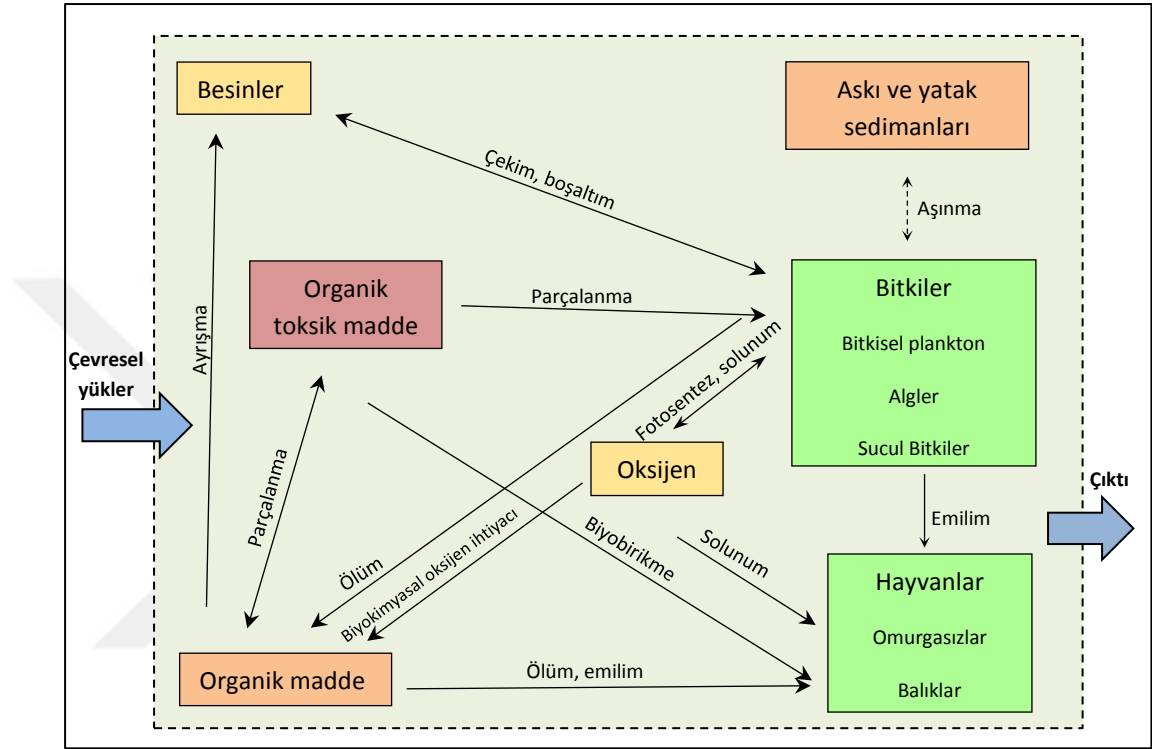
Genel anlamda simülasyon, gerçek hayatta karşılaşılan bir sürecin bilgisayar ortamında benzeşiminin yapılarak modellenmesi olarak ifade edilmektedir. Bu kapsamda, gerçekleştirilen bu çalışma için noktasal kaynaklardan deşarj edilen kirleticilerin alıcı ortamın su kalitesi üzerine etkilerinin belirlenebildiği bir simülasyon modelinin kurulumu gerekmektedir. Bu bölümde, AQUATOX yazılımı kullanılarak kurulan simülasyon modeli ve bu modelin optimizasyon modeli içerisinde kullanılabilmesi için oluşturulan vekil simülasyon modelinden bahsedilmektedir.

2.1 AQUATOX Su Kalitesi Modeli

Ülkemizde, özellikle sanayileşmenin yoğun olarak gözlendiği akarsu bölgelerinde bulunan sanayi tesisleri, yapılmakta olan imalatlara bağlı olarak farklı kirlilik derecesindeki atıklarını alıcı ortama deşarj etmektedir. Alıcı ortama deşarj edilen bu kimyasal maddeler gerçekleşen bazı kimyasal süreçler sonucunda yeni maddeleri oluşturabilmektedir. Bu maddelerin alıcı su ortamında oluşturduğu etkilerin bilgisayar ortamındaki benzeşiminin yapılabilmesi için bu süreçlerin matematiksel olarak temsil edilebildiği modellerin kullanılması gerekmektedir. Bu modellerin gerçekte karşılaşılan durumu temsil edebilmesi için saha çalışmaları yapılarak çeşitli verilerin toplanması ve modelin kalibre edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında, örnek bir çalışma sahası için alıcı su ortamına noktasal kaynaklardan deşarj edilen kirletici yüklerinin belirlenen izleme noktalarında oluşturacağı etkiler ilgili taşınım sürecinin AQUATOX su kalitesi modelleme yazılımı kullanılarak modellenmesi ile elde edilmiştir. AQUATOX Amerikan Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından geliştirilen, besinler ve organik kimyasallar gibi çeşitli kirletici maddelerin balık, omurgasızlar ve su bitkileri dahil üzere ekosisteme etkilerini tahmin eden ve sucul sistemler için geliştirilen bir modelleme yazılımıdır (Park ve Clough 2006).

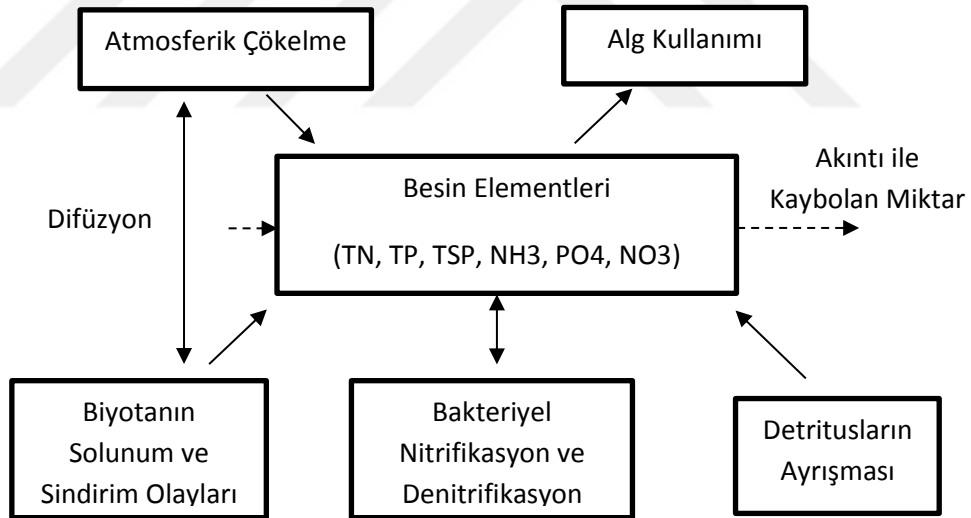
Bu model kullanılarak insan kaynaklı (antropojenik) faaliyetlerin doğal sucul ortam üzerindeki etkileri belirlenebilmektedir. AQUATOX su kalitesi modeline ait kavramsal modelleme süreci Şekil 2.1’de verilmiştir. Görüleceği gibi AQUATOX kapsamında alıcı su ortam içerisindeki kimyasal ve biyolojik süreçler birlikte dikkate alınarak su kalitesindeki değişim belirlenmektedir.



Şekil 2.1: AQUATOX su kalitesi modeline ait kavramsal model (Park ve Clough 2014)

AQUATOX ile su kalitesindeki değişimin yanı sıra sucul ekosistemdeki organizmaların ve kimyasalların konsantrasyonlarında meydana gelen değişimin de benzeşimi yapılabilmektedir. Bu kapsamda sucul ortamdaki organizmaların durumunun tekil olarak modellenemediği diğer su kalitesi modellerinden daha kullanışlıdır. Bu modeller organizmaların bireysel türlerinin yaşamsal faaliyetlerine olan etkilerinin modellenmesinde iyi sonuçlar vermesine karşın toksik kimyasal maddelerde meydana gelen değişimin belirlenmesinde yetersiz kalmaktadır. AQUATOX ile bu boşluk doldurulabilmekte ve genel olarak besin elementlerinin miktarındaki değişimin etkisi altında sucul sistemlerdeki su kalitesi modellenebilmektedir.

Ekosistemde karşılaşılan süreçlerin benzeşiminin yapılabildiği pek çok modelde olduğu gibi AQUATOX modeli de veri girişi gerektiren birden fazla bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler sucul ortamda gerçekleşen biyotik durum değişkenlerinin benzeşiminin yapıldığı bölümlerdir. Model kurulumu aşamasında ilgili saha için akarsu kesit özellikleri, yatak pürüzlülük katsayıları, akış hızları, meteorolojik veriler, yan kol katılımları gibi fiziksel özelliklerin yanında noktasal ve yayılı kirletici kaynaklara ait büyüklük, konum, süre ve yük gibi karakteristiklerin belirlenerek kurulum gerçekleştirilmektedir. Kurulum aşamasının ardından AQUATOX modeli organik girdi bileşenleri de dikkate alınarak çalıştırılmakta ve incelenen zaman periyodu için çıktı olarak belirlenen kimyasal maddelerin konsantrasyonundaki değişim belirlenebilmektedir. Girdi ve çıktı verileri arasındaki bu ilişki AQUATOX'un arka planında organik ve kimyasal maddeler arasında meydana gelen reaksiyonların dikkate alınması ile belirlenmektedir. Şekil 2.2'de bu organik maddelerin ekosistemdeki diğer türler ile ilişkisi özetlenmiştir.



Şekil 2.2: AQUATOX ile besin elementlerinin modellenmesi (Güvensel 2006)

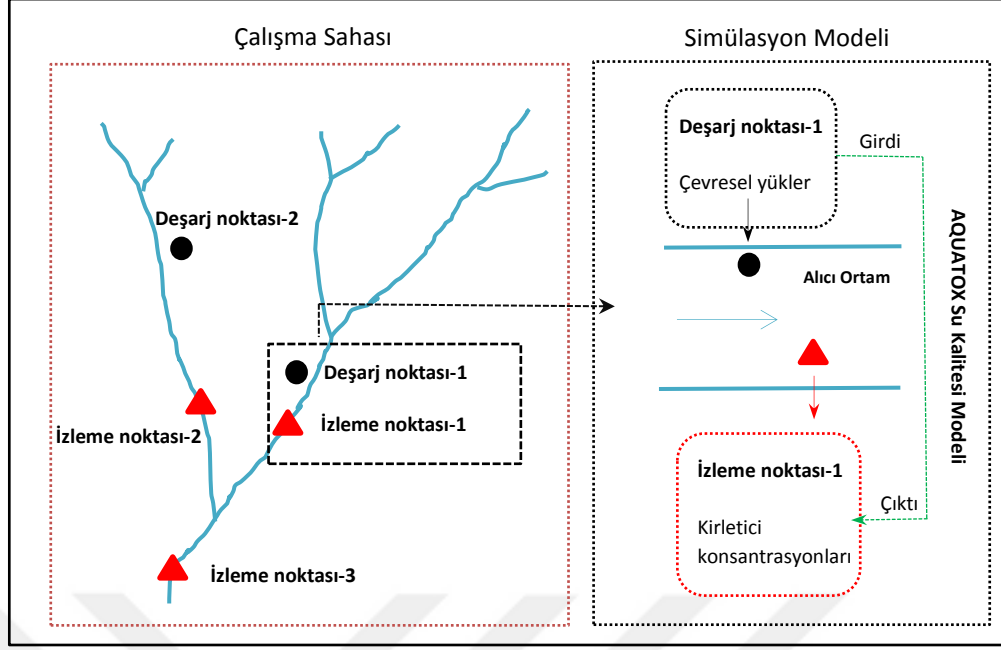
Şekil 2.2'den görüleceği gibi sucul bir ortamda organizmaların ve meydana gelen biyolojik süreçlerin sonucunda çeşitli besin maddeleri meydana gelmektedir. Bu durumun gerçekleştiği ortamdaki suyun kalitesi genel olarak organik madde toplam azot, toplam fosfor ve çözülmüş oksijen gibi parametreler kullanılarak belirlenmektedir. Örnek olarak toplam fosfor'un (TSP) su kalite parametresi olarak alınması durumu Denklem (2.1)'de verilmiştir.

$$TSP = Frc \times (P_{Total} - P_{SuspDetritus} - P_{SuspPlants}) \quad (2.1)$$

Burada TSP su ortamında toplam çözünebilir fosfor miktarını [g/m^3d], Frc kullanıcı tarafından girilen fosfor kullanım oranını, P_{Total} modele girdi olarak verilen toplam fosfor yükünü [g/m^3d], $P_{SuspDetritus}$ askıdaki detritus yükünün içerisindeki fosfor yükünü [g/m^3d] ve $P_{SuspPlants}$ ise askıdaki bitkilerden gelen fosfor yükünü [g/m^3d] göstermektedir. Daha önceden belirtildiği gibi TSP kalitenin ortaya koyulması için kullanılan besin elementlerinden biridir. Benzer şekilde kalite parametresi olarak çözülmüş oksijenin kullanılması durumunda AQUATOX aşağıda verilen denklem yardımı ile hesaplama yapmaktadır:

$$\frac{dO_2}{dt} = \text{Girdi} + \Delta O_2 + \text{Fotosentez} - \text{Oksijen ihtiyacı} - \sum \text{Solunum} - \text{Nitrifikasyon} - \text{Kayıp} + \text{Kazanç} \mp \text{Difüzyon} \quad (2.2)$$

Burada su ortamındaki çözülmüş oksijen konsantrasyonunun zamanla değişimi (dO_2/dt) girdi yüküne, çözülmüş oksijen konsantrasyonundaki değişime (ΔO_2), fotosentez yolu ile gelen oksijen miktarına, biyokimyasal süreçler için gerekli oksijen ihtiyacına, bütün organizmalarda solunum için gerekli oksijen miktarına, nitrifikasyon sırasında gerekli oksijen miktarına, akış yukarisından aşağı ilerlerken kaybedilen oksijen miktarına, farklı segmentlerin bağlanması ile gelen oksijen miktarına, iki segment arasında gerçekleşen difüzyon sırasında meydana gelen kayıp ya da kazanca bağlı olarak hesaplanmaktadır. Yukarıdaki denklemlerden AQUATOX'un alıcı ortamın kalitesini belirlerken biyolojik ve kimyasal süreçleri dikkate aldığı ve belirlenen kirletici maddenin konsantrasyonunu çıktı olarak hesapladığı görülmektedir. Sonuç olarak bu çalışma kapsamında AQUATOX modeli bu girdi-çıkı ilişkisi kullanılarak çalıştırılacak ve alıcı ortam kalitesi belirli kirleticiler için ortaya koyulacaktır. Şekil 2.3'de ilgili problem için kurulacak AQUATOX su kalitesi modeli ve çalışma sahası kavramsal olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Çalışma sahası ve simülasyon modeli arasındaki ilişki

Burada akarsu üzerindeki deşarj noktalarının her biri farklı bir kirlenici kaynağı temsil etmektedir. Yapılan saha çalışmaları ile akarsuyun karakteristik özellikleri ve noktasal kaynaklardan yapılan deşarjların ilgili izleme noktalarında neden olduğu kirlenici konsantrasyonları belirlenmektedir. Elde edilen bu veriler ile AQUATOX modeli kurularak bu kaynaklardan deşarj edilen çevresel yükler modele girdi olarak verildiğinde çıktı olarak ilgili gözlem noktalarındaki kirlenici konsantrasyonları zamana bağlı olarak elde edilebilmektedir. Bölüm 4’de AQUATOX modelinin kurulması ve kalibre edilmesi amacıyla yapılan saha çalışmalarından ve modelin hangi kirlenici parametreler için çalıştırıldığından detaylı olarak bahsedilmiştir. Sonuç olarak AQUATOX su kalitesi modeli su kalitesi modelleme sürecinin bilgisayar ortamında gerçekleştirilmesi anlamında oldukça büyük bir öneme sahiptir. AQUATOX modeli kullanılarak noktasal kaynaklardan alıcı su ortamına deşarj edilen kirlenici yüklerinin belirlenen izleme noktalarında yine belirlenen parametreler bakımından oluşturacağı etki belirlenebilmektedir. Diğer bir deyişle noktasal girdi değerleri ile zamanla değişen çıktı değerleri arasındaki ilişki belirlenebilmektedir. Bu ilişkinin simülasyon-optimizasyon modelleri kapsamında kullanılması ile alıcı ortam bazlı deşarj limitlerinin matematiksel olarak belirlenmesi mümkün olabilecektir.

2.2 Vekil Simülasyon Modeli

Bu çalışmada, alıcı ortama deşarj yapan noktasal kirletici kaynakların deşarj yüklerinin belirlenen parametreler için izleme noktalarındaki ÇKS değerlerini aşmayacak şekilde belirlenebildiği entegre bir simülasyon-optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model kapsamında optimizasyon modeli tarafından üretilen deşarj yükleri için modellenen sistemin izleme noktalarında su kalitesi bakımından oluşturacağı tepki ilgili deşarj yüklerinin AQUATOX modeline girdi olarak verilmesi ve modelin çalıştırılması sonucunda elde edilmektedir. Diğer bir deyişle, optimizasyon modelinin her bir hesap adımında belirlenen deşarj yükleri için AQUATOX modelinin çalıştırılması gerekmektedir. Ancak, her ne kadar AQUATOX açık kaynak kodlu olacak şekilde geliştirilmiş olsa da optimizasyon modelinin hazırlandığı programlama dili içinden girdilerinin değiştirilmesi ve çalıştırdıktan sonra elde edilen sonuçların tekrar optimizasyon modeline geri gönderilmesi şu aşamada mümkün değildir. Diğer yandan bu şekilde bir entegrasyon mümkün olsa bile AQUATOX modelinin her bir adımda çalıştırılması modelleme yapılan zaman periyoduna bağlı olarak uzun zaman alabilmekte ve optimizasyon modeli ile yapılan ardışık çözümler saatlerden günler mertebesine ulaşabilmektedir. Bu nedenle AQUATOX modelini doğrudan optimizasyon modeli içinde kullanmak yerine AQUATOX'un verdiği sonuçlarla uyumlu sonuçlar üretebilen vekil bir simülasyon modelinin kurularak optimizasyon modeline entegre edilmesi gerekmektedir.

Yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda, bu çalışma kapsamında AQUATOX modelinin sonuçları kullanılarak doğrusal süperpozisyon prensibine dayanan bir tepki matrisi yaklaşımı geliştirilmiş ve vekil simülasyon modeli olarak kullanılmıştır. Geliştirilen tepki matrisi yaklaşımında AQUATOX modeline noktasal kaynaklardan girdi olarak verilen kirletici deşarj yükleri ile modelin izleme noktalarında çıktı olarak verdiği kirletici konsantrasyonları arasında doğrusal bir ilişki olduğu kabul edilerek ilgili tepki katsayıları hesaplanmaktadır. Birim kirletici yükleri için hesaplanan bu tepki katsayıları kullanılarak noktasal kaynaklardan farklı durumlar için deşarj edilen yüklere bağlı olarak izleme noktalarındaki kirletici konsantrasyonları AQUATOX modelinin çalıştırılmasına gerek duyulmadan belirlenebilmektedir. Uygulanan doğrusal süperpozisyon prensibinin dayandığı temel felsefe ve tepki katsayılarının matematiksel hesabı aşağıda detaylı olarak anlatılmaktadır.

2.2.1 Doğrusal Süperpozisyon Prensibi

Doğrusal süperpozisyon prensibi kalite modelleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan bir yaklaşım olup problemle alakalı girdi ve çıktı değerleri arasında doğrusal bir ilişki olması durumunda kullanılabilir. Literatürde doğrusal süperpozisyon prensibi ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde yeraltı suyu kalitesinin belirlenmesi aşamasında kullanılan örnekleri oldukça fazla olmakla beraber yüzeysel sularda kalitenin belirlenmesi aşamasında uygulamaları kısıtlıdır (Ayvaz 2016, Sciortino ve diğ. 2000, Mahar ve Datta 2000, Gorelick 1983). Yüzeysel sularda yapılan çalışmalara bakıldığında Su ve diğ. (2019) tarafından, alıcı ortama yapılan deşarj-kirletici konsantrasyonu girdi-çıkıtı ilişkisinin kullanılarak doğrusal süperpozisyon prensibine dayalı simülasyon modeli oluşturulduğu bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışma ile deşarj edilen kirletici madde konsantrasyonu ile alıcı ortamda incelenen parametre konsantrasyonu arasında doğrusal bir ilişki olduğu kabul edilerek tepki katsayıları ile ifade edilmiştir. Ancak deşarj edilen kirletici maddenin alıcı ortamda birden fazla parametre ile girdi-çıkıtı ilişkisi olması durumu için doğrusal süperpozisyon prensibinin kullanıldığı çalışmalar literatürde mevcut değildir. Oysa ki, pratikte deşarj edilen kirletici madde alıcı ortamda birden fazla parametrenin konsantrasyonunu etkilemektedir. Yapılan bu çalışma kapsamında pratikte meydana gelen durum dikkate alınarak noktasal kaynaklardan deşarj edilen su kütlesinde bulunan kirletici maddelerin alıcı ortamda birden fazla parametreyi etkilemesi durumu göz önüne alınmıştır. Bu durum dikkate alındığında, doğrusal süperpozisyon prensibine göre birden fazla girdinin modellenen sistem üzerindeki etkisi her bir girdinin sistem üzerinde ayrı ayrı oluşturacağı etkilerin toplamına eşit olmaktadır. Bu yaklaşımın kullanılabilmesi için aşağıda verilen iki eşitlikte verilen toplanabilirlik ve homojenlik özelliklerinin sağlanması gerekir:

$$F(x_1 + x_2 + \dots) = F(x_1) + F(x_2) + \dots \quad (2.3)$$

$$F(ax) = aF(x) \quad (2.4)$$

Burada x_1 ve x_2 sistem girdileri, $F(x_1)$ ve $F(x_2)$ bu girdiler için ayrı ayrı hesaplanan çıktıları, a ise sabit bir değeri göstermektedir. Görüleceği gibi, birden çok girdi için sistem üzerinde oluşan tepki her bir girdi için hesaplanan çıktı değerleri ayrı

ayrı toplanarak elde edilebilmektedir. Bu kapsamda doğrusal süperpozisyon prensibi gereği akarsu kollarının birleştiği bölgelerde her bir noktasal kaynaktan alıcı su ortamına deşarj edilen yüklerin neden olacağı kirletici konsantrasyonu, her bir noktasal kaynaktan deşarj edilen yükün ayrı ayrı oluşturacağı kirletici konsantrasyonlarının toplamına eşit olacağı kabul edilmektedir.

Yukarıda öngörülen yaklaşım çerçevesinde modellenecek akarsu sistemi üzerindeki i nolu noktasal kaynaktan j nolu kirletici maddenin $q_{i,j}$ yük değerine bağlı olarak deşarj edilmesi durumu için alıcı ortamda bulunan l nolu izleme noktasında gözlenen k nolu maddenin t nolu zaman adımıdaki konsantrasyon değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\hat{c}_{k,l}(t) = \sum_{i=1}^{n_d} \sum_{j=1}^{n_c} \alpha_{i,j,k,l}(t) \cdot q_{i,j} + c_{k,l}^0(t) \quad ; \quad \alpha_{i,j,k,l}(t) \in \alpha \quad (2.5)$$

$$(k = 1, 2, 3, \dots, n_o, l = 1, 2, 3, \dots, n_m, t = 1, 2, 3, \dots, n_t)$$

Burada n_d , alıcı ortama deşarj yapılan noktasal kaynak sayısını; n_c , deşarj yapılan kirletici madde sayısını; n_o , izleme noktalarında takip edilen kirletici maddelerin sayısını; n_m , modellenen sistem üzerindeki izleme noktalarının sayısını; n_t , modelleme yapılan zaman adımı sayısını; $q_{i,j}$, i numaralı kaynaktan j nolu kirletici madde için girilen kirletici yük değerini; $\hat{c}_{k,l}(t)$, alıcı ortamda l nolu izleme noktasında gözlenen k nolu maddenin t nolu zaman adımıdaki konsantrasyon değerini; $c_{k,l}^0(t)$, alıcı ortamda l nolu izleme noktasında gözlenen k nolu maddenin deşarj yapılmadan önceki arka plan konsantrasyon değerini; $\alpha_{i,j,k,l}(t)$, i nolu noktasal kaynaktan j nolu kirletici maddenin birim yük miktarı ($q_{i,j} = 1$) için deşarj edilmesi durumunda alıcı ortamda bulunan l nolu izleme noktasında gözlenen k nolu maddenin t nolu zaman adımıdaki konsantrasyon değerini temsil eden kompozit tepki katsayısını; α ise $\alpha_{i,j,k,l}(t)$ tepki katsayılarının saklandığı $n_c \times n_o \times n_t$ adet satır ve $n_d \times n_m$ adet sütundan oluşan konsantrasyon tepki matrisini göstermektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken en önemli husus α tepki matrisinin her bir elemanının hesaplanabilmesi için her bir noktasal kaynaktan her bir deşarj edilen kirletici yük değerleri için su kalitesi simülasyon sürecinin birim yükleme durumu için ($q_{i,j} = 1$)

ayrı ayrı yapılması gerektiğidir. Bu işlem AQUATOX modeli kullanılarak yapılmakta olup her bir yükleme durumu için model çalıştırılmakta ve izleme noktalarında hesaplanan konsantrasyon değerleri saklanmaktadır. Yapılan bu $n_d \times n_c$ adet model simülasyonunun ardından α tepki matrisinin her bir elemanı aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$\alpha_{i,j,k,l}(t) = \frac{\partial (c_{k,l}(t) - c_{k,l}^0(t))}{\partial q_{i,j}} \quad (2.6)$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, n_d, j = 1, 2, 3, \dots, n_c)$$

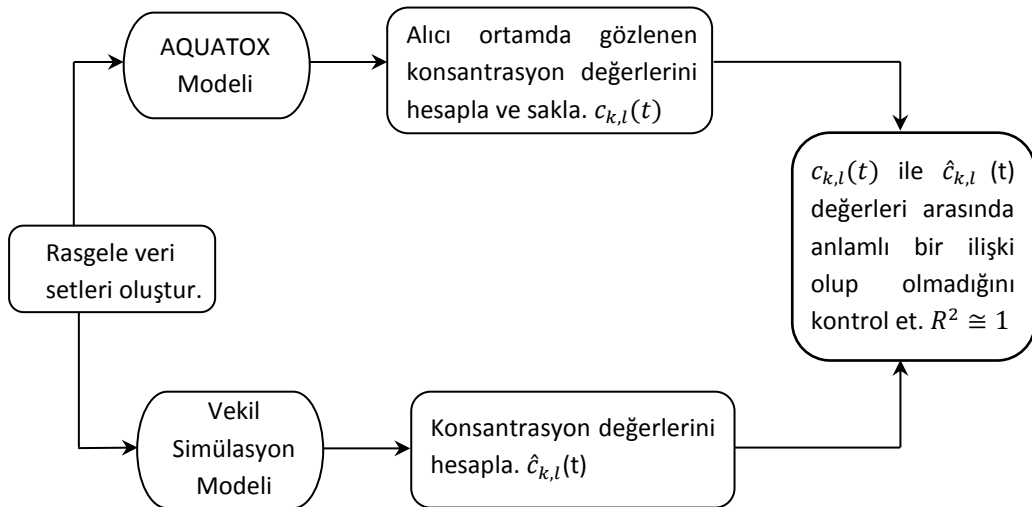
$$(k = 1, 2, 3, \dots, n_o, l = 1, 2, 3, \dots, n_m, t = 1, 2, 3, \dots, n_t)$$

Burada $c_{k,l}(t)$, AQUATOX modeli tarafından hesaplanan ve l nolu izleme noktasında gözlenen k nolu maddenin t nolu zaman adımındaki konsantrasyon değerini göstermektedir. Denklem 2.6'dan görüleceği gibi $\alpha_{i,j,k,l}(t)$ tepki katsayılarının hesabında AQUATOX modeli tarafından hesaplanan konsantrasyon değerinden arka plan konsantrasyon değeri çıkarılmakta ve bu sonucun yükleme üzerindeki değişimi dikkate alınmaktadır. Yukarıda belirtildiği gibi $\alpha_{i,j,k,l}(t)$ tepki katsayıları alıcı ortamdaki izleme noktalarında gözlenen her bir madde için her bir deşarj noktasından su ortamına bırakılan her bir madde için zamana bağlı olarak değişen ayrı değerlerden oluşmaktadır. Bu kapsamda örnek olarak 2 numaralı noktasal kaynaktan deşarj edilen 4 numaralı kirletici maddenin 3 numaralı gözlem noktasında neden olduğu 1 numaralı kirletici konsantrasyonunun 5 nolu zaman adımındaki değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\hat{c}_{1,3}(5) = \sum_{t=1}^{n_t} \alpha_{2,4,1,3}(5) \cdot q_{2,4} + c_{1,3}^0(5) \quad (2.7)$$

2.2.1.1 Tepki Matrisinin Doğrulanması

Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi modellenen akarsu sistemi üzerindeki noktasal kaynaklardan verilen bir kirletici madde için belirlenen izleme noktalarında gözlenen kirletici konsantrasyonları ilgili sistemin AQUATOX modeli üzerinde modellenmesi ile belirlenebilmektedir. Bu kapsamda probleme ait girdi ve çıktı değerleri arasında doğrusal bir ilişki olması durumunda ilgili konsantrasyon değerleri, AQUATOX ile modelleme yapmak yerine doğrudan AQUATOX çıktıları kullanılarak oluşturulmuş konsantrasyon tepki matrisi kullanılarak belirlenebilmektedir. Diğer bir deyişle, oluşturulan tepki matrisi verilen girdi ve çıktı değerleri arasında matematiksel bir ilişki kurmakta ve verilen farklı yükleme durumları için izleme noktalarındaki konsantrasyon değerlerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Bu noktada AQUATOX model girdileri ile çıktıları arasındaki ilişkinin her yükleme durumu için doğrusal olarak değişip değişmediğinin belirlenmesi amacıyla model sonuçlarının doğrulanması büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda farklı girdi değerleri (deşarj yükleri) için AQUATOX modeli tarafından hesaplanan konsantrasyon değerleri ($c_{k,l}(t)$) ile konsantrasyon tepki matrisinin vermiş olduğu sonuçlar ($\hat{c}_{k,l}(t)$) karşılaştırılarak kapsamlı bir değerlendirme yapılması gerekmektedir. Bu değerlendirme ise her bir madde için regresyon analizi kullanılarak yapılmıştır. Bu analiz genel olarak Şekil 2.4’de verilen işlem adımları takip edilerek yapılmış olup sonuçlarla alakalı detaylı bilgi ilerleyen bölümlerde verilmiştir.



Şekil 2.4: Tepki matrisinin doğrulanması

3. OPTİMİZASYON MODELİ

Bu bölümde, ilk olarak çalışma kapsamında geliştirilen simülasyon-optimizasyon modeline ait problem formülasyonu matematiksel olarak ifade edilmiştir. Ardından, optimizasyon probleminin çözümü amacıyla kullanılan optimizasyon yaklaşımı hakkında bilgi verilmiştir.

3.1 Problem Formülasyonu

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi bu çalışma kapsamında modellenen akarsu sistemi üzerindeki noktasal kirletici kaynaklardan deşarj edilen maddelere ait kirlilik yüklerinin tanımlanmış olan izleme noktalarındaki ÇKS limit değerleri aşılmayacak şekilde belirlenebildiği entegre bir simülasyon-optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Bu problemin çözümü aşamasında aşağıdaki hususların dikkate alınması gerekmektedir:

- i.* Noktasal kaynaklardan alıcı su ortamına yapılan deşarjların sonucunda tanımlanan izleme noktalarında incelenen parametreler için hesaplanan konsantrasyon değeri ilgili parametre için yönetmeliklerde tanımlanmış olan ÇKS limitlerini aşmamalı,
- ii.* İncelenen parametreler için izleme noktalarındaki ÇKS değerleri aşılmayacak şekilde noktasal kaynaklardan mümkün olabilecek en büyük miktarda kirletici madde yükü deşarj edilebilmeli,
- iii.* Modellenen akarsu sistemi üzerindeki noktasal kirletici kaynaklara adaletli deşarj tahsisi yapılmalı ya da kaynakların önem derecesine göre müsaade edilebilir deşarj dağılımı belirlenebilmeli.

Yukarıda verilen bu üç madde dikkate alınacak şekilde ilgili problemin çözümü aşağıdaki matematiksel model kullanılarak yapılabilmektedir:

$$Z = \max \left\{ \sum_{i=1}^{n_d} \sum_{j=1}^{n_c} (q_{i,j} - \beta_i \times \mathcal{P}_{i,j}^1 - \lambda_i \times \mathcal{P}_{i,j}^2) \right\} \quad (3.1)$$

Kısıtlar:

$$\mathcal{P}_{i,j}^1 = (q_{i,j} - \omega_i \times q_j^*)^2 \quad ; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_d \quad , \quad j = 1, 2, 3, \dots, n_c \quad (3.2)$$

$$\mathcal{P}_{i,j}^2 = (C_j^{\max} \times Q_i - q_{i,j}) \quad ; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_d \quad , \quad j = 1, 2, 3, \dots, n_c \quad (3.3)$$

$$q_{i,j} = C_{i,j} \times Q_i \quad ; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_d \quad , \quad j = 1, 2, 3, \dots, n_c \quad (3.4)$$

$$\lambda_i = \begin{cases} 1 & \text{eğer } \omega_i = 1 \\ B & \text{aksi halde} \end{cases} \quad ; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_d \quad (3.5)$$

$$q_j^* = \frac{\sum_{i=1}^{n_d} q_{i,j}}{\sum_{i=1}^{n_d} \omega_i} \quad (3.6)$$

$$\hat{c}_{k,l}(t) = \sum_{i=1}^{n_d} \sum_{j=1}^{n_c} \alpha_{i,j,k,l}(t) \times q_{i,j} + c_{k,l}^0(t) \quad (3.7)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, n_o \quad , \quad l = 1, 2, 3, \dots, n_m$$

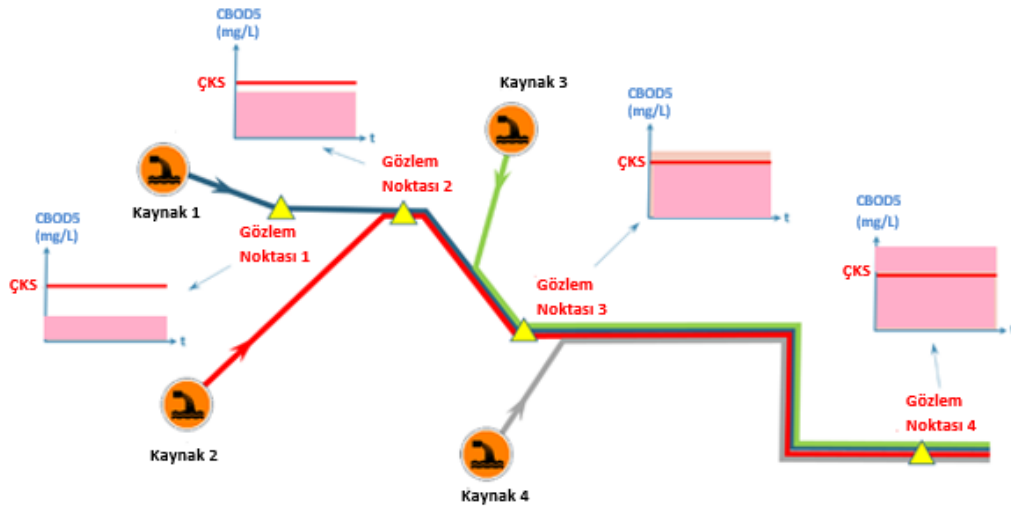
$$\hat{c}_{k,l}(t) \leq \tilde{C}_k \quad ; \quad k = 1, 2, 3, \dots, n_o \quad , \quad l = 1, 2, 3, \dots, n_m \quad , \quad t = 1, 2, 3, \dots, n_t \quad (3.8)$$

$$C_j^{\min} \leq C_{i,j} \leq C_j^{\max} \quad ; \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_d \quad , \quad j = 1, 2, 3, \dots, n_c \quad (3.9)$$

Burada Z, değeri maksimize edilecek amaç fonksiyonu değerini; $\mathcal{P}_{i,j}^1$ ve $\mathcal{P}_{i,j}^2$, sırasıyla noktasal kirletici kaynaklar arasında adil ve sıfırdan büyük yük tahsisi yapılmasını sağlayan ceza fonksiyonlarını; β_i ve λ_i , deşarj noktası bazında değişim gösteren ve sırasıyla $\mathcal{P}_{i,j}^1$ ile $\mathcal{P}_{i,j}^2$ ceza fonksiyonlarının amaç fonksiyonuna entegrasyonu aşamasında kullanılan ceza parametrelerini; ω_i , i nolu noktasal kaynağa ait yük tahsis katsayısını; q_j^* , deşarj edilecek j nolu kirleticiye ait yük tahsisinin noktasal kaynaklar arasında adil yapılabilmesini sağlayan ve tüm ω_i değerlerinin 1 olması durumunda $q_{i,j}$ değerlerinin ortalamasına eşit olan tahsis yükünü; Q_i , i nolu

noktasal kaynağın deşarj yaptığı akarsu kolundaki akış debisini; $C_{i,j}$ i nolu noktasal kaynaktan deşarj edilen j nolu kirletici konsantrasyonunu; C_j^{\min} ve C_j^{\max} , tüm noktasal kaynaklardan deşarj edilen j nolu kirleticiye ait minimum ve maksimum deşarj konsantrasyonlarını; B , yük tahsis katsayısı ω_i 'nin değerinin 1'den farklı olması durumunda λ_i 'nin değerinin ayarlanmasında kullanılan pozitif bir tamsayıyı; \tilde{C}_k ise izleme noktalarında takip edilen k nolu maddeye ait KS değerini temsil etmektedir.

Yukarıda verilen matematiksel formölasyondan görölceği gibi, geliştirilen simölasyon-optimizasyon modelinin amacı izleme noktalarında belirlenen parametreler için hesaplanan konsantrasyon değerleri ilgili parametreler için verilen KS değerlerini aşmayacak şekilde noktasal kaynaklardan alıcı su ortamına deşarj edilen kirletici yüklerinin maksimize edilmesidir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken en önemli husus modellenen akarsu sisteminde bulunan tüm izleme noktaları için KS limit değerlerinin aşılmaması ve bu durumu sağlayacak şekilde noktasal kaynaklara yük tahsisinin yapılması gerektiğidir. Bu problem kavramsal olarak şekil 3.1'de özetlenmiştir.

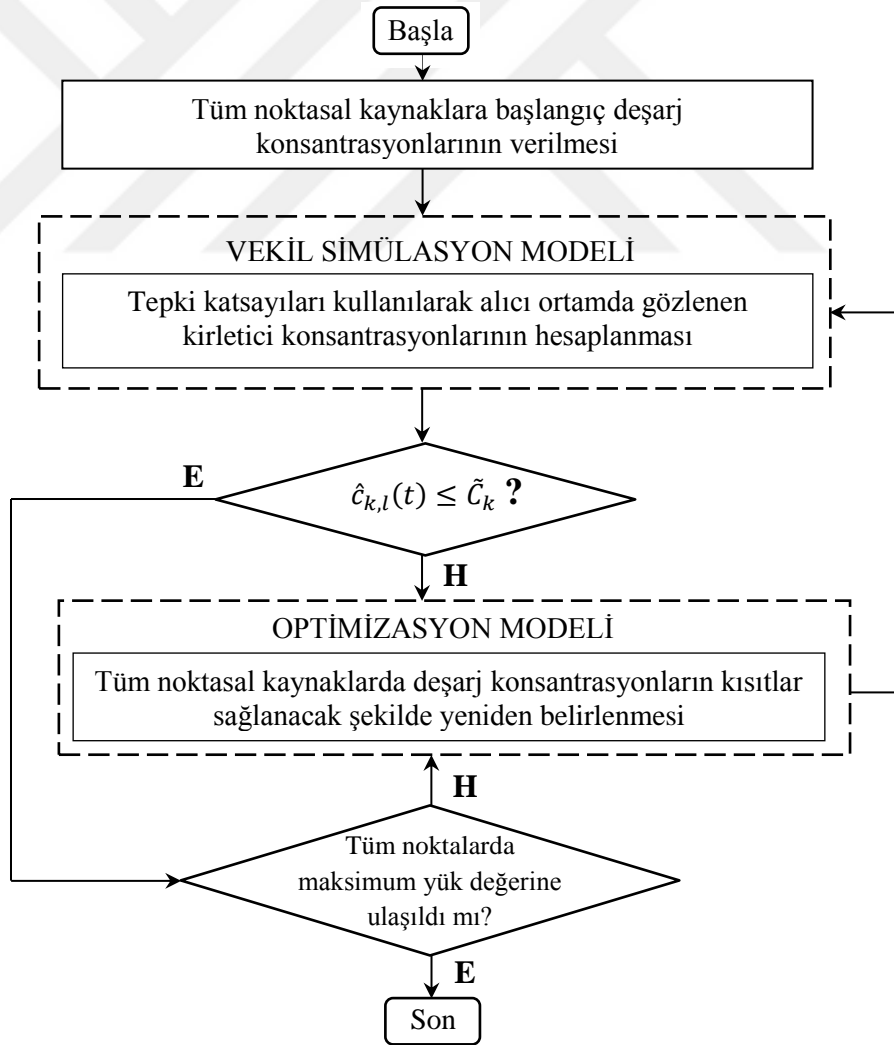


şekil 3.1: Geliştirilen simölasyon-optimizasyon modeline ait kavramsal model

şekil 3.1'den görölceği gibi modellenen sistem üzerinde 4 adet noktasal kaynak ve 4 adet izleme noktası bulunmaktadır. Bu aşamada örnek olarak birinci kaynak ve izleme noktası dikkate alınarak Denklem (3.1) ile (3.9) arasında verilen optimizasyon problemi çözüldüğünde birinci kaynağa ait yük değeri birinci izleme noktasındaki KS değeri aşılmayacak şekilde maksimize edilecektir. Ancak böyle bir

durumda ilgili izleme noktasının akış aşağısında bulunan diğer kaynakların alıcı su ortamına deşarj yapmaları ÇKS limit değerinin aşıma durumundan dolayı mümkün olmayacaktır. Bu nedenle modellenen sistem üzerinde bulunan tüm noktasal kaynakların adil bir şekilde deşarj yapmasına izin verilmesi ve izleme noktalarındaki ÇKS değerlerinin tüm kaynaklar dikkate alınarak kontrol altında tutulması gerekmektedir. Bu sürecin gerçekleştirilebilmesi için amaç fonksiyonuna Denklem (3.2)'de verilen ceza fonksiyonu eklenmiştir. Bu ceza fonksiyonu dikkate alınarak bütün noktasal kirletici kaynaklara eşit miktarda veya belirlenen ölçülerde farklı olacak şekilde yük tahsisi yapılabilmektedir. Bu süreç, model içerisinde tanımlanmış olan ω_i yük tahsis katsayısına bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. Öyle ki, tüm kaynaklar için $\omega_i = 1$ alınması durumunda her bir kirletici kaynağın eşit miktarda deşarj yapması sağlanmaktadır. Bununla beraber herhangi bir kaynak için bu katsayının değerinin 1'den büyük alınması durumunda (diğer kaynaklar için 1) ilgili kaynağın yük tahsis katsayısı ile paralel olacak şekilde daha fazla deşarj yapmasına imkan verilmektedir. Bu sayede optimizasyon modeli içerisinde kaynakların önem derecesine göre yük paylaşımının yapılması mümkün olabilmektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus Denklem (3.2)'de verilen ceza fonksiyonu kullanılarak ω_i 'nin farklı değerleri için yük tahsisinin verilen amaç fonksiyonuna ceza uygulanması ile mümkün olabildiğidir. Bu aşamada ω_i 'nin farklı değerleri için çözüm yapılırken Denklem (3.2) tarafından amaç fonksiyonuna eklenen ceza değerlerinin minimum düzeyde tutulabilmesi amacıyla optimizasyon modeli tarafından ilgili kaynaklara ait yük değerleri sıfıra yaklaştırılmaktadır. Bu durum Denklem (3.8)'de verilen koşul sağlanmış olduğundan model tarafından uygun bir çözüm olarak nitelendirilmektedir. Ancak pratik anlamda noktasal kaynaklara sıfır veya sıfıra yakın deşarj yükü ataması yapıldığından dolayı anlamlı olmamaktadır. Bu durumun üstesinden gelmek amacıyla Denklem (3.3)'de verilen ceza fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon kapsamında herhangi bir kaynağa ait yük değerinin sıfıra yaklaşması durumunda ilgili amaç fonksiyonu değeri $\lambda_i \times (C_j^{\max} \times Q_i - q_{i,j})$ büyüklüğünde bir cezaya maruz kalmaktadır. Burada kullanılan λ_i ceza katsayısı dinamik bir niteliğe sahip olup ω_i 'nin değerinin 1'den farklı olması durumunda büyük bir tamsayıya (B) eşit olacak şekilde tanımlanmıştır.

Denklem (3.1) ile (3.9) arasında tanımlanmış olan matematiksel formülasyon kapsamında model sonuçları üzerinde etkili 3 parametre bulunmakta olup (β_i, B, C_j^{\max}) model performansının bu parametrelerin değişimine ne ölçüde bağlı olduğunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda bu parametrelerin değişiminin model üzerindeki etkisinin belirlendiği bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Sonuç olarak geliştirilen simülasyon-optimizasyon modeli ile ilgili problemin çözümü Denklem (3.1) ile (3.9) arasında tanımlanan amaç fonksiyonu ve kısıtlar dikkate alınarak yapılmaktadır. Optimizasyon modelinde kullanılan karar değişkenleri $C_{i,j}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n_d, j = 1, 2, 3, \dots, n_c$) olarak alınmıştır. İlgili problemin çözümü optimizasyon modeli kapsamında deterministik tabanlı genel indirgenmiş gradyan (generalized reduced gradient-GRG) tekniği kullanılarak yapılmıştır. Geliştirilen simülasyon-optimizasyon modeline ait akış diyagramı Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2: Geliştirilen simülasyon-optimizasyon modeline ait akış diyagramı

3.2 Genel İndirgenmiş Gradyan (GRG) Optimizasyon Tekniği

Gradyan tabanlı optimizasyon teknikleri mühendislik ve bilimin diğer alanlarında karşılaşılan pek çok optimizasyon probleminin çözümünde kullanılmaktadır. Bu tekniklerin dayandığı temel nokta verilen bir fonksiyonun incelenen karar değişkenlerine göre kısmi türevlerini içeren gradyan vektörünün hesaplanması ve bu sayede fonksiyonun en fazla artış veya azalış gösterdiği doğrultunun belirlenmesidir. Hesaplanan gradyan vektörü ardından iteratif arama sürecinde kullanılmakta ve verilen başlangıç çözümünden yola çıkarak karar değişkenlerinin değeri tanımlanan durma koşulu sağlanıncaya kadar iteratif olarak hesaplanmaktadır. Bu hesaplama yaklaşımı kullanılarak önerilmiş olan ilk optimizasyon tekniği Cauchy tarafından 19'ncü yüzyıl ortalarında önerilen en dik iniş (steepest-descent) yöntemidir. Ardından eşlenik gradyan (conjugate gradient) ve Newton yöntemleri önerilmiş ve arama sürecindeki hafızanın ve ikinci türev bilgisinin kullanılması ile daha etkin sonuçlar elde edilebilmiştir. Bu tekniklerin en önemlilerinden biri de doğrusal olmayan yapıdaki kısıtlı ve kısıtsız optimizasyon problemlerinin çözümü amacıyla geliştirilmiş olan gradyan tabanlı GRG optimizasyon tekniğidir. Bu teknik ilk olarak Carpentier ve Lasdon ve diğer (1983) tarafından 1970'li yıllarda geliştirilmiş olup günümüzde halen pek çok farklı mühendislik probleminin çözümünde aktif olarak kullanılmaktadır. Genel olarak GRG optimizasyon tekniğine ait matematiksel model aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir (Rao 2009):

$$\min f(\mathbf{x}) \quad (3.10)$$

Kısıtlar:

$$h_j(\mathbf{x}) \leq 0 \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, m_1 \quad (3.11)$$

$$l_k(\mathbf{x}) = 0 \quad ; \quad k = 1, 2, \dots, m_2 \quad (3.12)$$

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.13)$$

Burada $f(\mathbf{x})$, minimize edilecek amaç fonksiyonu değerini; $h_j(\mathbf{x})$, eşitsizlik kısıt fonksiyonunu; $l_k(\mathbf{x})$, eşitlik kısıt fonksiyonunu; m_1 , eşitsizlik kısıtlarının sayısını; m_2 , eşitlik kısıtlarının sayısını; n , karar değişkenlerinin sayısını; $x_i \in \mathbf{x}$, i nolu karar

değişkenini; x_i^{\min} ve x_i^{\max} ise i nolu karar değişkeninin sırasıyla alt ve üst sınır değerlerini temsil etmektedir. Eşitsizlik kısıtlarının her birine negatif olmayan bir değişken eklenerek eşitsizlik kısıtları aşağıdaki ifade ile tanımlanmaktadır.

Kısıtlar:

$$h_j(\mathbf{x}) + x_{n+j} = 0 \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, m_1 \quad (3.14)$$

$$h_k(\mathbf{x}) = 0 \quad ; \quad k = 1, 2, \dots, m_2 \quad (3.15)$$

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.16)$$

$$x_{n+j} \geq 0 \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, m_1 \quad (3.17)$$

Denklem (3.14) ile (3.17) arasında verilen ifadeler daha genel bir şekilde yazıldığında GRG optimizasyon tekniği aşağıda verilen ifade ile tanımlanarak çözüme ulaşılmaktadır.

$$\min f(\mathbf{x}) \quad (3.10)$$

Kısıtlar:

$$g_j(\mathbf{x}) = 0 \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, m_1 + m_2 \quad (3.18)$$

$$x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, n + m_1 \quad (3.19)$$

burada $g_j(\mathbf{x})$, eşitsizlik ve eşitlik kısıtlarının toplanmasıyla elde edilen kısıt fonksiyonunu temsil etmektedir. Bu tanımlamalar altında bir optimizasyon probleminin GRG ile çözümü aşağıdaki hesap adımlarına göre yapılmaktadır (Joshi 1970, Rao 2009, Toplu 2017)

Adım 1: Problemi kur, karar değişkenlerinin başlangıç çözümünü ($k = 0$) al \mathbf{x}^k . Ardından \mathbf{x} 'i aşağıda verildiği gibi bağımsız (\mathbf{y}) ve bağımlı (\mathbf{z}) değişkenleri haline dönüştür:

$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{Bmatrix} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{y} = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{n-m_2} \end{Bmatrix} \Rightarrow \text{bağımsız değişkenler} \quad (3.16)$$

$$\mathbf{z} = \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_{m_1+m_2} \end{Bmatrix} \Rightarrow \text{bağımlı değişkenler} \quad (3.17)$$

Adım 2: Aşağıda verilen eşitliği kullanarak indirgenmiş gradyan vektörünü (\mathbf{G}_R) hesapla:

$$\mathbf{G}_R = \nabla_y f - ([D]^{-1}[C])^T \nabla_z f \quad (3.18)$$

Burada:

$$\nabla_y f = \left[\frac{\partial f}{\partial y_1} \quad \frac{\partial f}{\partial y_2} \quad \dots \quad \frac{\partial f}{\partial y_{n-m_2}} \right]^T \quad (3.19)$$

$$\nabla_z f = \left[\frac{\partial f}{\partial z_1} \quad \frac{\partial f}{\partial z_2} \quad \dots \quad \frac{\partial f}{\partial z_{m_1+m_2}} \right]^T \quad (3.20)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial y_{n-m_2}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_{m_1+m_2}}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial g_{m_1+m_2}}{\partial y_{n-m_2}} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial z_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial z_{m_1+m_2}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_{m_1+m_2}}{\partial z_1} & \dots & \frac{\partial g_{m_1+m_2}}{\partial z_{m_1+m_2}} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Adım 3: Hesaplanan indirgenmiş gradyanın normunu ($\|\cdot\|$) al ve verilen durma koşulu (ε) sağlanıyor mu kontrol et. Sağlanıyorsa hesaplamayı durdur.

$$\|\mathbf{G}_R\| \leq \varepsilon \quad (3.23)$$

Adım 4: Hesaplanan gradyan vektörünün ters işaretlisini al ve amaç fonksiyonu değerinin en fazla azaldığı yönü gösteren doğrultu vektörünü (\mathbf{S}) belirle.

$$\mathbf{S} = -\mathbf{G}_R \quad (3.24)$$

Adım 5: Arama doğrultusu boyunca aşağıdaki işlemleri takip ederek minimum fonksiyon değerini belirle.

$$\xi_i = \begin{cases} \frac{y_i^{\max} - (y_i)_{\text{old}}}{s_i} & \text{eğer } s_i > 0 \\ \frac{y_i^{\min} - (y_i)_{\text{old}}}{s_i} & \text{eğer } s_i < 0 \end{cases} ; \quad s_i \in \mathbf{S}, \quad \xi_i \in \xi \quad (3.25)$$

$$dz = -[D]^{-1}[C]dy \quad (3.26)$$

Burada $dy = \xi d\mathbf{S}$ alınarak aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir.

$$\mathbf{T} = -[D]^{-1}[C]\mathbf{s} \quad (3.27)$$

$$\xi_i = \begin{cases} \frac{z_i^{\max} - (z_i)_{\text{old}}}{t_i} & \text{eğer } t_i > 0 \\ \frac{z_i^{\min} - (z_i)_{\text{old}}}{t_i} & \text{eğer } t_i < 0 \end{cases} ; \quad t_i \in \mathbf{T}, \quad \xi_i \in \xi \quad (3.28)$$

Burada Denklem (3.25) ile elde edilen 1 numaralı ξ_i değeri bağımsız değişkenlerin aldığı değerlere göre; Denklem (3.28) ile elde edilen 2 numaralı ξ_i değeri ise bağımlı değişkenlerin aldığı değere göre belirlenmektedir. Bu değerler arasından küçük olan adım boyu olarak kullanılmaktadır. Bu aşamadan sonra diğer gradyan tabanlı optimizasyon tekniklerinde olduğu gibi iteratif arama süreci ile başlangıç çözümü güncellenmekte ve yeni değişken değerleri aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$\mathbf{x}^{k+1} = \begin{Bmatrix} \mathbf{y}^k + d\mathbf{y} \\ \mathbf{z}^k + d\mathbf{z} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{y}^k + \xi\mathbf{S} \\ \mathbf{z}^k + \xi\mathbf{S} \end{Bmatrix} \quad (3.29)$$

Bu aşamadan sonra yeni hesaplanan \mathbf{x} vektörünün kısıtların sağlandığı anlamlı bölgede olmaması durumunda \mathbf{z} vektörü aşağıda verilen eşitlik kullanılarak yeniden hesaplanmakta ve \mathbf{x} vektörünün bileşenleri güncellenmektedir.

$$d\mathbf{z} = [D]^{-1}(-g(\mathbf{x}) - [C]d\mathbf{y}) \quad (3.30)$$

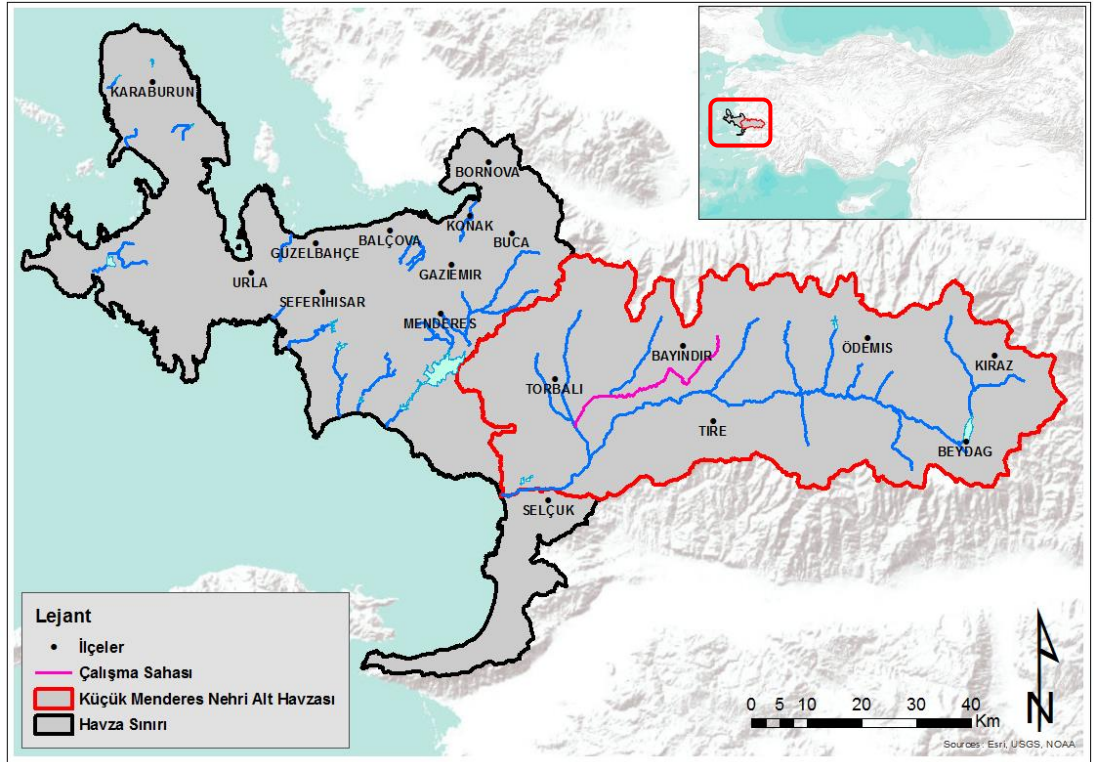
Bu aşamanın ardından Denklem (3.29) tekrar hesaplanarak \mathbf{x}^{k+1} değeri güncellenerek Adım 1'e geri dönmektedir. Yukarıda verilen hesap adımlarından görüleceği gibi, GRG yöntemi kapsamında problem kısıtlarının değeri sıfıra yaklaştırılacak şekilde en iyi çözüm elde edilmektedir. Bu sürecin gerçekleştirilmesinde indirgenmiş gradyan vektörü \mathbf{G}_R kullanılmaktadır. Denklem (3.18)'den görüleceği gibi \mathbf{G}_R , bağımlı ve bağımsız değişkenlere göre alınan türevlere bağlı olarak hesaplanmakta olup ve ilgili amaç fonksiyonunun en büyük artış doğrultusunu göstermektedir. Bu doğrultunun ters işaretlisi alınarak ($-\mathbf{G}_R$) azalış yönü belirlenmekte ve bu yönde uygun bir adım aralığı (ξ) ile minimum değere ulaşma hedeflenmektedir. Bu adımlar takip edilerek yeni bir çözüm vektörü elde edilmektedir. Ancak dikkat edilmesi gereken nokta elde edilen yeni çözüm vektörünün yapılan her bir iterasyon için kısıtların sağlandığı (feasible) bölgede olması gerektiğidir. Bu koşul sağlandıktan sonra \mathbf{x} vektörü güncellenerek çözüme ulaşılmaktadır.

4. ÇALIŞMA SAHAŞI

Bu bölümde, geliştirilen simülasyon-optimizasyon modelinin uygulamasının yapıldığı çalışma sahası olan Küçük Menderes Havzası ve ilgili sahadaki yüzeysel su sistemine ait kalite sürecinin benzeşiminin yapıldığı AQUATOX su kalitesi modelinin kurulum aşamalarından bahsedilmiştir.

4.1 Küçük Menderes Havzası

Küçük Menderes Havzası, Türkiye'nin batısında Gediz ve Büyük Menderes Havzaları arasında $38^{\circ} 41' 05''$ ve $37^{\circ} 24' 08''$ kuzey enlemleri ile $28^{\circ} 24' 36''$ ve $26^{\circ} 11' 48''$ doğu boylamları arasında yer almaktadır. Çalışma kapsamında proje uygulama sahası olarak kullanılan Küçük Menderes Nehri alt havzasının yalnızca belirli bir bölümü çalışma sahası olarak seçilmiş ve geliştirilen simülasyon-optimizasyon modelinin uygulaması gerçekleştirilmiştir. Seçilen çalışma sahası ve Küçük Menderes Havzası'na ait genel bilgilere aşağıda yer verilmektedir.



Şekil 4.1: Küçük Menderes Havzası

Küçük Menderes Havzası'nın en önemli akarsuyu Küçük Menderes Nehri ve yan kolları olan Fetrek Çayı, Uladı Çayı, Ilıca Deresi, Değirmen Dere, Aktaş Deresi, Rahmanlar Deresi, Pirinçci Deresi, Yuvalı Dere, Ceriközkaya Deresi, Eğridere, Birgi Çayı, Çevlik Çayı ve Keles Çayı'dır. Havza sularını Küçük Menderes Nehri ve yan kollarıyla Ege Denizi'ne boşaltan su drenaj alanını kapsamaktadır.

Havza genel olarak, kuzeyde Kiraz ovası, kuzeybatıda İzmir'in Torbalı ilçesini de içine alan Fetrek ovası ve Ege Denizi kenarında bulunan Selçuk ovalarını bünyesinde barındırmaktadır. Havzanın iklim yapısı incelendiğinde genel olarak Akdeniz ikliminin havza üzerinde etkin olduğu görülmektedir. Bu kapsamda havza genelinde yazlar sıcak ve kurak, kışlar ise ılık ve yağışlı geçmektedir. Ege Denizi'ne komşu olan kıyı bölgelerinde kar ve don olayları genel olarak gözlenmemekle birlikte meteorolojik veriler incelendiğinde havzaya yağışın büyük oranda yağmur şeklinde düştüğü görülmektedir.

TÜBİTAK MAM tarafından 2010 yılında tamamlanan Havza Koruma Eylem Planları-Küçük Menderes Havzası Projesi kapsamında havza üzerindeki arazi kullanımı ve baskı oluşturan ana kirletici kaynaklar detaylı olarak belirlenmiştir (TÜBİTAK MAM 2010). İlgili çalışma kapsamında da belirtildiği üzere havza üzerinde sanayi önemli bir paya sahip olup havzanın büyük bir kısmını kaplayan İzmir kenti sanayileşme bakımından Türkiye'nin en gelişmiş kentlerinden biridir. Havza genelinde sanayileşme büyük oranda Torbalı ve Kemalpaşa ilçeleri civarında olup sanayi tesisleri genel olarak bireysel veya gruplar halinde organize sanayi bölgelerinde (OSB) faaliyetlerini sürdürmektedir. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın web sitesinde verilen bilgilere göre sadece İzmir ilinde toplam 13 adet OSB bulunmaktadır. Bu bölgelerde tekstil, madencilik, gıda ve metal sanayi gibi alanlara ait üretimler gerçekleştirilmektedir.

Küçük Menderes Havzası'nda arazi kullanımı üzerinde önemli etkiye sahip bir diğer faaliyet ise tarımsal faaliyetlerdir. Havza genelinde başta zeytin, pamuk ve buğday olmak üzere pek çok farklı alanda tarımsal üretim yapılmaktadır. Bu kapsamda tarımsal üretimin yapıldığı alanlar havza toplam alanının %41'lik bölümünü kapsamakta olup bu alanlar için su genel olarak yüzeysel ve yeraltı su kaynaklarından karşılanmaktadır.

Tarımsal faaliyetlerin yanında havzanın kırsal bölgelerinde yaşayan kişilerin önemli geçim kaynaklarından biri de hayvancılıktır. Havza genelinde büyük besi alanlarının sayısı göreceli olarak az olup daha çok kümes ve ahır bazında hayvancılık faaliyetleri yürütülmektedir. Arazi kullanımını bakımından hayvancılık diğer sektörlere göre daha az yoğunluk kaplamaktadır.

4.2 Baskı Analizi ve Su Kalitesi İzleme Çalışmaları

Küçük Menderes Havzası'nda gerçekleştirilen tarımsal faaliyetlerde kullanılan azot içerikli gübreler ile zirai ilaçlar, hayvancılık faaliyetlerinin neden olduğu atıklar ve sanayi tesislerinin alıcı ortama deşarj ettiği atık sular havzanın ana su kaynağı olan Küçük Menderes Nehri'nin ve yan kollarının kirlenmesine neden olmaktadır. Bu faktörler alıcı ortamda baskıya neden olan yayılı ve noktasal kirletici kaynakların ana girdilerini oluşturmakta olup bu kaynakların neden olduğu baskıyı azaltmak amacı ile havza genelindeki su kalitesi izleme çalışmaları devam etmektedir. Bu çalışmaların ana amacı havza genelinde bulunan su kaynaklarının kirlenmesine neden olan ana unsurların belirlenerek önlemeye yönelik çalışmalar yapılmasıdır. Yapılan bu çalışmaların en kapsamlı olanlarından biri TÜBİTAK MAM tarafından 2010 yılında tamamlanan Küçük Menderes Havzası-Havza Koruma Eylem Planı'dır (TÜBİTAK MAM 2010). İlgili çalışma kapsamında havza genelinde geniş bir veri tabanı oluşturularak havzada kirliliğe neden olan ana etkenler belirlenmiş, su kalitesi sınıflandırılmaları yapılmış ve öne çıkan çevresel sorunlara karşı çözüm önerileri geliştirilmiştir. Bu kapsamda ilgili havza için atık su yönetimi, entegre havza yönetimi, katı ve tehlikeli atık yönetimi, yayılı kaynak kirliliği kontrolü ve su kaynakları yönetimi gibi çeşitli planlamalar yapılarak su kalitesinin iyileştirilmesine yönelik öneriler getirilmiştir.

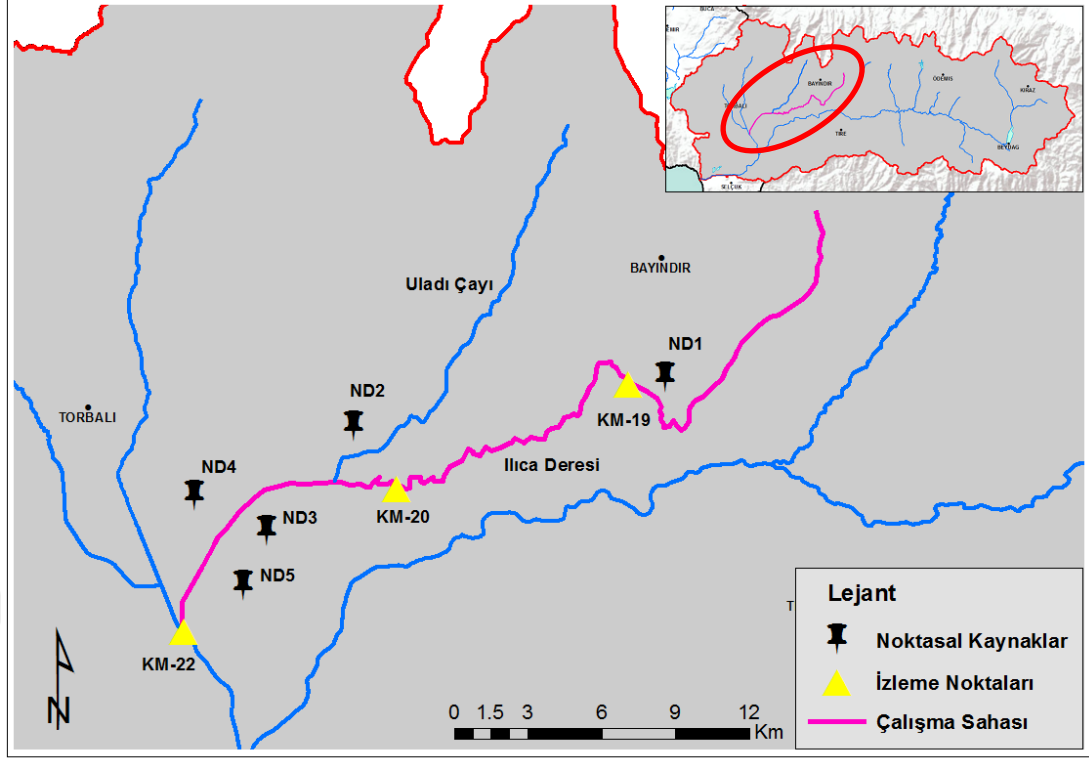
Bir diğer çalışma Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yapılmıştır. İlgili çalışma kapsamında 2011 yılından başlanarak su kalitesi izleme çalışmaları yapılmış ve havzadaki kirletici maddelerin yıllar içerisindeki değişimi hakkında değerlendirmeler yapılarak kirletici rolü oynayan ana etkenler belirlenmiştir. (Küçük Menderes Havzası Kirlilik Önleme Eylem Planı 2016).

Yukarıda verilmiş olan baskı analizi ve havza genelinde yapılmış olan çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde geçmişte yapılan çalışmaların ana amacının Küçük Menderes Nehri su kalitesinin iyileştirilmesi ve entegre havza yönetimi ile SÇD kapsamında verilen limit değerlerin sağlanması olduğu açıkça görülmektedir. Bu çalışma kapsamında bu husus dikkate alınarak Küçük Menderes Nehri'ne deşarj yapan noktasal kaynaklara SÇD'de belirtilen ÇKS limit değerleri sağlanacak şekilde yük tahsisinin yapılabilmesine imkan veren entegre bir simülasyon-optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin uygulaması Küçük Menderes Havzası üzerinde seçilen örnek bir uygulama sahası üzerinde hipotetik fakat gerçek ile uyumlu parametre değerleri dikkate alınarak yapılmıştır.

4.3 Uygulama Sahası

Bu çalışma kapsamında geliştirilen simülasyon-optimizasyon modelinin uygulaması Küçük Menderes Nehri'nin yan kollarından biri olan Fetrek Çayına bağlanan yan kol sistemi üzerinde yapılmıştır. Modelin çalıştırılacağı örnek akarsu sistemi Bayındır ilçesinden gelen Ilıca deresi ile yan kolu olan Uladı çayının birleşmesiyle oluşmaktadır. Şekil 4.2'de çalışma kapsamında seçilen uygulama sahası görülmektedir.

Uygulama sahasında yapılan saha çalışmasında Bayındır ilçesinden geçen Ilıca deresine Bayındır Atık Su Arıtma Tesisi'nin (AAT) noktasal olarak deşarj yaptığı görülmüştür (ND_1). Bu çayın su kalitesine birleşen yan kolun (Uladı çayı) etkisinin ve arka plan su kalitesinin belirlenmesi amacıyla birleşen yan kol da noktasal deşarj olarak dikkate alınmıştır (ND_2). Bu iki akış kolunun birleştiği bölgenin akış aşağısında ise panel radyatör (ND_3), salça (ND_4) ve seramik (ND_5) üretim faaliyetlerinde bulunan 3 adet sanayi tesisine ait noktasal deşarj bulunmaktadır. Geliştirilen model kapsamında bu 5 noktasal deşarj kaynağı kullanılmış olup kaynakların hepsi birer kirletici tesis olarak ele alınmıştır. Bu tesislerin uygulama sahası üzerindeki konumu Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2: Geliştirilen modelin uygulamasının yapıldığı saha ve dikkate alınan noktasal kaynakların ve izleme noktalarının saha üzerindeki konumu

Uygulama sahasında bulunan noktasal kirletici kaynakların belirlenmesinin ardından bu noktalardan gerçekleşen deşarjın alıcı ortam su kalitesi üzerindeki etkilerinin belirleneceği su kalitesi izleme noktalarının tespit edilmesi gerekmektedir.

Bu izleme noktalarından alınan su numunelerinin laboratuvar ortamında analiz edilmesi ve modellenmesi yapılacak kalite parametrelerine ait konsantrasyon değerlerinin belirlenmesi gereklidir. Belirlenen bu sonuçlar kurulacak olan AQUATOX su kalitesi modelinin kalibre edilmesi aşaması ile geliştirilen simülasyon-optimizasyon modeline ait sonuçların ilgili parametreler için tanımlanmış olan ÇKS limit değerlerini aşıp aşmadığının belirlenmesinde kullanılacaktır. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri uygulama sahasında birden fazla tesisin bulunması ve her bir tesisin neden olduğu kirliliğin etkisinin doğru bir şekilde belirlenebilmesidir. Bu kapsamda uygulama sahası üzerinde 3 adet izleme noktası belirlenmiş (KM-19, KM-20, KM-22) ve noktasal deşarjların etkisi bu noktalarda takip edilmiştir.

Belirlenen bu izleme noktalarının da uygulama sahası üzerindeki konumu Şekil 4.2’de verilmiştir. Görüleceği gibi, bu izleme noktalarından KM-19 ile ND_1 ’in su kalitesi üzerindeki etki belirlenmektedir. KM-20 ise modellenen ana kol (Ilıca deresi) ile yan kol (Uladi çayı) birleşmeden hemen önce ana koldaki su kalitesinin belirlenerek yan koldan gelen kirliliğin doğru bir şekilde tespit edilmesini sağlamaktadır. KM-22 ise uygulama sahasına ait su toplama havzasının çıkış noktasında bütün noktasal deşarjların alıcı su ortamı üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacı ile kullanılmaktadır. Sonuç olarak belirlenen izleme noktalarının tümünde yapılacak olan saha çalışmaları ile alıcı ortamın su kalitesi ortaya koyulmaktadır.

4.4 Saha Çalışmaları

Bu çalışmada belirtilen saha çalışmaları 116Y413 numaralı (alt proje numaraları: 116Y414 ve 116Y415) ve “Alıcı Ortam Bazlı Deşarj Limiti Belirlenmesi: Küçük Menderes Havzası Örneği” başlıklı TÜBİTAK projesi kapsamında yapılmıştır. Belirtilen proje kapsamında yapılan saha çalışmaları alıcı su ortamının kalitesinin belirlenmesi ve AQUATOX tabanlı su kalitesi modelinin kurularak sahada gözlenen durumun bilgisayar ortamındaki benzeşiminin yapılabilmesini sağlayan gözlem, ölçüm, numune alma ve analiz çalışmalarının tümünü kapsamaktadır. Bu amaçla Küçük Menderes Nehri ve yan kolları üzerinde yapılan saha çalışmalarına aşağıda yer verilmiştir.

- a. Alıcı ortamın mevcut su kalitesinin belirlenmesi: Bu amaç doğrultusunda SÇD kapsamında verilen öncelikli maddeler ve belirli kirleticiler izlenerek su kalitesini düşürücü etkiye sahip parametreler belirlenmiş ve YSKY’ye göre havzanın 4. sınıf su kalitesine sahip olduğu görülmüştür.
- b. Noktasal kirletici kaynakların tespit edilmesi: Uygulama sahasında bulunan endüstriyel tesislerin büyük çoğunluğu izlemeye alınarak su kalitesini olumsuz etkileyen tesisler noktasal kirletici kaynak olarak ele alınmıştır.
- c. Arka plan konsantrasyonlarının belirlenmesi: Çalışma kapsamında noktasal kaynakların neden olduğu etkiyi belirlemek için belirlenen izleme noktalarında yapılan gözlemler sonucunda incelenen parametrelerin doğal arka plan konsantrasyon değerleri belirlenmiştir.

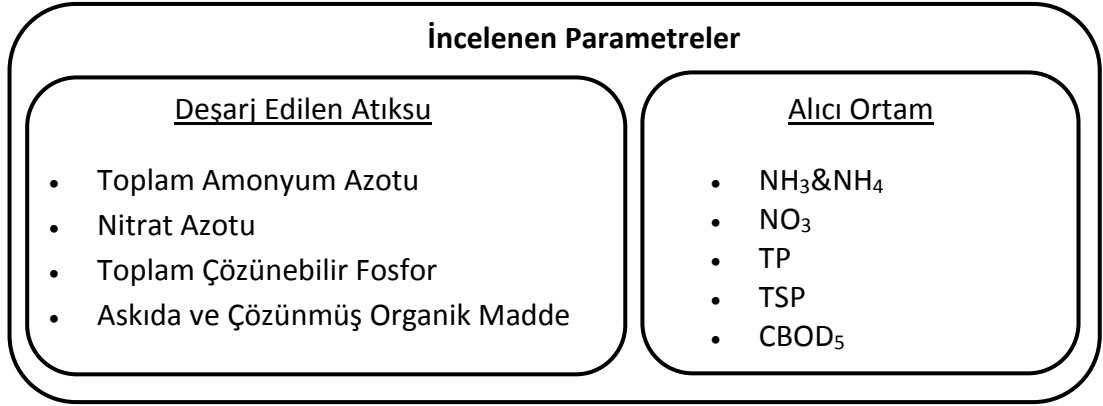
d. AQUATOX su kalitesi modeli girdilerinin oluşturulması: Çalışma sahasındaki su kalitesi değişiminin bilgisayar ortamında benzeşiminin yapılabilmesi yansıtılması için kurulan AQUATOX su kalitesi modelinde tanımlanacak akarsu kesit özellikleri, yan kol katılımları, kirletici konsantrasyonu ve yük başlangıç sınır koşulları, debi, pH, sıcaklık gibi parametreler yapılan saha ölçümleri ve laboratuvar çalışmaları sonucu elde edilmiştir. AQUATOX modelinin elde edilen bu veriler kullanılarak nasıl kurulduğu ve alıcı ortamda su kalitesinin belirlenmesi için incelenen kirletici parametrelere dair bilgi bir sonraki bölümde verilmiştir.

4.5 Belirli Kirleticiler

Belirli kirleticiler, su kaynaklarında kaliteyi olumsuz yönde etkileyebilecek kadar deşarj edilen madde ve madde gruplarını ifade etmektedir. Sucul ortam kalitesinin belirlenmesi, çevresel kalite standartlarının sağlanması ve gerekli önlemlerin alınması gibi hususlar genel olarak belirlenen bu madde gruplarından seçilen parametrelere özgü olarak gerçekleştirilmektedir. Ülkemizde 2012 yılında yürürlüğe giren Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği Ek 5’de belirli kirleticileri oluşturan tüm bu parametreler detaylı olarak tanımlanmaktadır. Yapılan kalite iyileştirme çalışmalarında ise genellikle alıcı ortam belirli süre ile izlenmekte ve kirletici etkisi fazla olan parametreler su kalitesinin iyileştirilmesi çalışmalarında kullanılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında yapılan saha ve laboratuvar çalışmaları sonucunda alıcı su ortamını olumsuz yönde etkileyen Amonyak ve Amonyum (NH_3 & NH_4), Nitrat (NO_3), Toplam Fosfor (TP), Toplam Çözünbilir Fosfor (TSP) ve Karbonlu Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (CBOD_5) parametreleri su kalitesinin iyileştirilmesi aşamasında dikkate alınacak parametreler olarak seçilmiştir. Belirlenen bu parametrelerin alıcı ortamdaki konsantrasyonu büyük oranda noktasal kaynaklardan deşarj edilen su kütlelerine bağlı olarak değişmektedir. Bu kapsamda uygulama sahasında bulunan 5 deşarj noktasının her birinden Şekil 4.3’de verilen kirletici maddelerin deşarj edildiği kabul edilmiştir.

4.5.1 İncelenen Parametreler



Şekil 4.3: Çalışma kapsamında incelenen parametreler

4.5.1.1 $\text{NH}_3\&\text{NH}_4$

$\text{NH}_3\&\text{NH}_4$ alıcı ortam içerisinde bulunan amonyak ve amonyumu ifade etmektedir. Sucul ortamlarda fosfat gibi diğer besinlerin bol olduğu durumlarda amonyum azotu alg gelişiminde önemli rol oynamaktadır. Ancak amonyağın nötr formu bitkiler ve sucul sistemdeki canlılar açısından oldukça tehlikeli olmaktadır. Genel olarak evsel ve endüstriyel atıklar, tarımsal kirleticiler, bitki ve hayvansal materyallerin çürümesi sonucunda gözlenmektedir.

4.5.1.2 NO_3

NO_3 alıcı ortam içindeki nitrati ifade etmektedir. Nitratin insan sağlığı açısından oldukça tehlikeli olmasının yanı sıra yapılan çalışmalar sucul sistemlerdeki canlılar için de nitrati risk faktörü olarak tanımlamıştır. Nitratlar genellikle yüksek çözünürlükleri ve biyolojik bozulmaları nedeniyle tarımsal gübre olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda metallerin sertleştirilmesi gibi endüstriyel alanlarda da kullanımı oldukça yaygındır. Sucul sistemlerde kirletici etkisinin, çoğunlukla fazla nitrat içeren gübrelerin kullanıldığı tarımsal alanlarda meydana gelen yüzeysel akıştan ve endüstriyel atıklardan kaynaklandığı belirlenmiştir.

4.5.1.3 TP

TP toplam fosforu ifade etmekte olup, fosfor akarsu ve göllerde bitki ve alglerin gelişimini doğrudan etkileyen önemli besin elementlerinden biridir. Belirli seviyelere kadar fosfor miktarındaki artış bu gelişimi olumlu yönde etkilerken sınır değerin aşılması ötrofikasyona neden olarak su kalitesini düşürmektedir. Fosforun toplam miktarı alıcı ortamda TP parametresi ile ifade edilmekte olup kalitenin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalar ile alıcı ortamda fosfor miktarını arttıran faktörlerin gübre, deterjan ve plastik kaynaklı atıklar olduğu görülmüştür.

4.5.1.4 TSP

TSP sucul ortamdaki toplam çözünmüş fosfora karşılık gelmektedir. Bu değer bitkiler tarafından doğrudan kullanılan fosfor miktarını göstermekte olup TSP konsantrasyonundaki değişimler günlük olarak dalgalanmalar göstermektedir. Bu nedenle su kalitesinin belirlenmesinde daha çok toplam fosfor dikkate alınmaktadır.

4.5.1.5 CBOD₅

CBOD₅, sucul ortamdaki karbonlu biyokimyasal oksijen ihtiyacını göstermekte olup akarsularda organik maddelerin ayrışması sırasında mikroorganizmalar tarafından tüketilen oksijen miktarını ifade etmektedir. Sucul ortamlarda bu parametrenin konsantrasyonu çözünmüş oksijen miktarını doğrudan etkilemektedir. Bu değer arttıkça akarsu içerisindeki oksijen miktarı azalmakta ve biyotada bulunan canlıların ölümüne neden olabilmektedir. CBOD₅'in alıcı ortamdaki konsantrasyonunu büyük ölçüde gübrelerden, atıksu tesislerinden ve gıda işletmelerinden deşarj edilen askıda ve çözünmüş organik madde miktarı etkilemektedir.

4.5.2 ÇKS Limitleri

ÇKS limitleri, belirlenen kirleticiler için istenilen su kalitesinin alıcı ortamda aşılmaması gereken sınır değerleri belirtmektedir. Avrupa Birliği tarafından üye ülkeler için uygulanmakta olan bu standartlar 2013/39/EU direktifinde belirtilmiştir. Ülkemizde ise uygulanmakta olan YSKY’de belirli kirleticiler için parametreler belirlenmiş olup su kalitesi sınıflandırmaları yapılarak her bir sınıf için limit konsantrasyon değerleri verilmiştir. Bu kapsamda yapılan sınıflandırmalar ve bu sınıflarda bulunan suların kullanım alanları aşağıda verilmektedir.

I. Sınıf – Yüksek Kaliteli Su

- İçme suyu olma potansiyeli yüksek olan yerüstü suları,
- Yüzme gibi vücut teması gerektiren durumlar için kullanılabilir su,
- Alabalık ve hayvan üretimi gibi çiftlik işlerinde kullanılabilir suyu ifade etmektedir.

II. Sınıf – Az Kirlenmiş Su

- İçme suyu olma potansiyeli olan yerüstü suları,
- Alabalık dışındaki balıklar için üretimde kullanılacak suyu,
- Sulama suyu kalite kriterlerini sağlamak koşulu ile sulama suyu olarak kullanılabilirler.

III. Sınıf – Kirlenmiş Su

- Gıda ve tekstil gibi nitelikli su gerektiren tesisler hariç olmak üzere, uygun bir arıtmadan geçtikten sonra su ürünleri yetiştiriciliğinde kullanılmaktadır.

IV. Sınıf – Çok Kirlenmiş Su

- İyileştirme ile III. Sınıfa ulaşabilecek suları ifade etmektedir. Bu sınıfta bulunan sular iyileştirme yapılmadan kullanılamaz.

Yönetmelikte yapılan bu sınıflandırmalarda tüm parametrelerin I. Sınıf olması ‘çok iyi’ su durumunu, I. ve II. sınıf arasındaki değerler ‘iyi’ su durumunu, II. ve III. Sınıf arasındaki değerler ‘orta’ su durumunu, III. ve IV. sınıflar arasında olması ‘zayıf’ su durumunu, tüm parametrelerin IV. sınıf olması ise ‘kötü’ su durumunu ifade etmektedir. SÇD ve YSKY’ya göre yerüstü suları için çevresel hedef ‘iyi’ su durumuna ulaşmaktır. Bu kapsamda bu çalışmada incelenen parametrelerin II. Sınıf su durumu için verilen üst limit değerleri alınarak iyi su durumuna ulaşması amaçlanmıştır. Tablo 4.1’de incelenen parametrelerin ÇKS limit değerleri görülmektedir. Bu değerler YSKY Ek 5 Tablo 5’de verilen değerler dikkate alınarak belirlenmiştir. Tablo 4.1’de verilen kirletici parametrelerin alıcı ortamdaki konsantrasyonunun belirlenmesi için kurulan AQUATOX su kalitesi modelinin uygulama sahası için kurulumundan bir sonraki bölümde bahsedilmektedir.

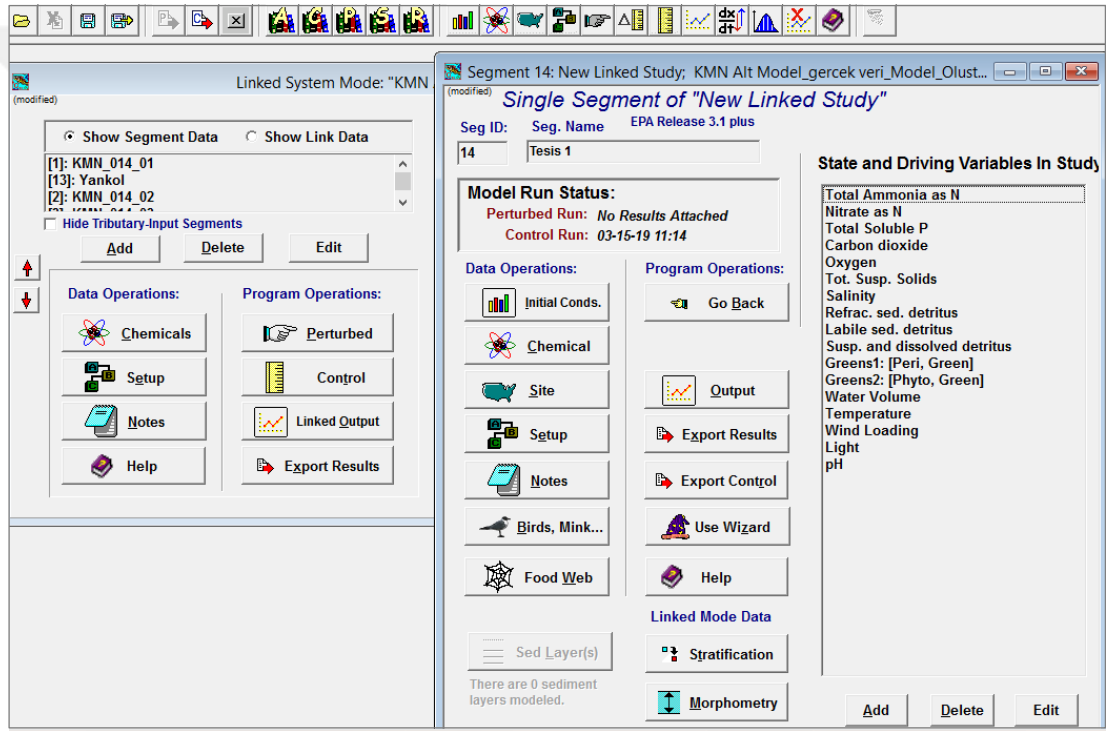
Tablo 4.1: İncelenen parametreler ve ÇKS limitleri

İncelenen Parametreler	ÇKS Limitleri (mg/L)	Su Kalite Sınıfları
NH ₃ &NH ₄	1	II
NO ₃ – N	10	II
TP	0.2	II
TSP	0.16	II
CBOD ₅	8	II

4.6 AQUATOX Modelinin Kurulumu

AQUATOX, akarsu ile ilgili fiziksel parametrelerin yanında kimyasal ve biyolojik süreçlerin tanımlanarak alıcı su ortamındaki durumun benzeşiminin yapıldığı bir su kalitesi modelidir. Yapılan saha ve laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen verilerin modele girilmesi ve kalibre edilmesiyle bu süreç gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.4’de bu çalışma kapsamında kullanılan AQUATOX modeline veri girişinin yapıldığı arayüz verilmiştir. Bu arayüz kullanılarak su kalitesi modelinin kurulumunun yapılabilmesi için ilk olarak modellenecek akarsu ile alakalı tanımlayıcı bilgilerin modele girilmesi gerekmektedir.

Bu kapsamda ilk olarak akarsu yan kol bağlantıları, noktasal kirletici kaynakların konumlarının tanımlanması gerekmektedir. İkinci aşamada ise mevcut koşulları oluşturan debi, sıcaklık, pH, ışık gibi biyolojik süreçleri etkileyen parametrelerin modele girilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda bu aşamada modellenmesi yapılacak parametrelere ait arka plan konsantrasyon değerlerinin tanımlanması gerekmektedir. Bu işlemlerin yapılmasının ardından noktasal kaynaklardan deşarj edilen kirletici maddeler için taşınım sürecinin benzeşimi yapılabilmektedir. Bu işlem her bir noktasal kaynaktan farklı yapıdaki kirletici deşarj edilecek ve bu kirleticiler arasındaki etkileşim dikkate alınacak şekilde yapılabilmektedir.



Şekil 4.4: AQUATOX su kalitesi modeli arayüzü

Çalışma kapsamında $\text{NH}_3\&\text{NH}_4$, NO_3 , TSP , TP ve CBOD_5 kirletici parametreleri su kalitesinin belirlenmesi için incelenmektedir. Bu kirletici parametrelerin alıcı ortamdaki konsantrasyonunu noktasal kaynaklardan gerçekleşen atıksu deşarjının yanı sıra akarsu içerisindeki biyolojik süreçler de etkilemektedir. Örnek olarak nitrifikasyon sonucunda amonyumun bozularak nitrit ve nitrate dönüşmesi alıcı ortamda incelenen $\text{NH}_3\&\text{NH}_4$ ve NO_3 kirleticilerinin konsantrasyonunda değişime neden olmaktadır. Benzer şekilde denitrifikasyon sonucunda alıcı ortamda bulunan nitrat ve azot içerikli maddelerin konsantrasyonunda

değişime neden olmaktadır. Bu etkilerin göz önünde bulundurulması adına AQUATOX su kalitesi modeli içerisinde maksimum nitrifikasyon oranı 0.3, maksimum denitrifikasyon oranı ise 0.09 olarak alınmıştır.

Bu duruma ek olarak model içerisinde verilen maksimum degradasyon oranı 0.0159, sedimentasyon oranı ise 0.15 olarak AQUATOX modelinde tanımlanmıştır. Bu değerlerden ilki alıcı ortam içerisindeki biyokimyasal oksijen ihtiyacını etkilemektedir. Bu durumda çalışma kapsamında incelenen CBOD₅ parametresinin konsantrasyonu bu değere bağlı olarak değişmektedir. Sedimentasyon oranı ise alıcı ortama deşarj edilen atıksu içerisinde tanımlanan askıda ve çözünmüş organik maddenin askıda bulunan kısmının çökmesini etkilemektedir. Bu değerler AQUATOX modeli içerisinde tanımlandıktan sonra noktasal kirletici kaynaklardan deşarj edilen kirletici maddelerin konsantrasyonları modele girilmekte ve analiz edilmektedir. Akarsu bağlantıları tanımlandıktan sonra noktasal kirletici kaynakların yerleri ve izleme noktalarının konumu modelde oluşturulmakta ve noktasal kirletici kaynaklara model arayüzü kullanılarak girilen deşarj konsantrasyonları için izleme noktalarında yapılan saha ve numune alma işlemleri ile tespit edilen kirletici madde konsantrasyonları AQUATOX modeli ile elde edilmektedir.

4.7 Vekil Simülasyon Modelinin Kurulumu

Bu çalışma kapsamında kurulmuş olan AQUATOX su kalitesi modelinin ana amacı Şekil 4.3'de verilen girdi ve çıktı parametreleri arasındaki ilişkinin kurulmasıdır. Bu işlem verilen parametreler için su kalitesi modelleme sürecinin ilgili kısmi diferansiyel denklemlerin verilen başlangıç ve sınır koşulları kullanılarak çözümüne dayanmaktadır. Önceki bölümlerde belirtilmiş olduğu gibi AQUATOX modeline verilen girdiler ile model tarafından hesaplanan çıktılar arasındaki ilişki doğrusal süperpozisyon prensibi ile kurulabilmektedir. Bu sayede simülasyon-optimizasyon modeli ile yapılan çözümlerde modellenen akarsu sisteminin verilen girdi parametreleri için su kalitesi bakımından vereceği tepki optimizasyon modeli içerisinde AQUATOX modelinin çalıştırılmasına gerek duyulmadan belirlenebilmektedir. Bu sayede çok daha hızlı bir şekilde sonuca ulaşmak mümkün olabilmektedir.

Modellenen akarsu sistemi için doğrusal süperpozisyon prensibine dayanan vekil simülasyon modelinin kurulabilmesi için ilk yapılması gereken işlem model kapsamında kullanılacak tepki katsayılarının hesaplanmasıdır. Bu amaçla AQUATOX modeline uygulama sahasında bulunan bütün noktasal kaynaklardan ($ND_1 - ND_5$) deşarj edilen her bir parametrenin 100 mg/L konsantrasyon değerine sahip olacak şekilde girilmesi öngörülmüştür. Toplamda 4 girdi parametresi (bkz. Şekil 4.3) ve 5 noktasal deşarj olduğu dikkate alındığında, her bir deşarj noktasından bırakılan her bir parametrenin alıcı ortamdaki etkisini belirlemek amacıyla AQUATOX modeli toplamda 20 kez çalıştırılmıştır. Örnek olarak birinci çalıştırmada ND_1 'den 100 mg/L büyüklüğünde Toplam Amonyum Azotu deşarj edilmesi durumu dikkate alınmıştır. Bu aşamada diğer bütün parametre ve deşarj noktalarının konsantrasyon değerleri 0 olarak modele girilmiştir. Böylece ND_1 'den deşarj edilen toplam amonyum azotu parametresinin izleme noktalarında (KM-19, KM-20, KM-22) değeri takip edilen $NH_3\&NH_4$, NO_3 , TSP, TP ve $CBOD_5$ kirletici konsantrasyonları üzerine olan etkisi belirlenmiştir. Ek-A'da her bir parametre konsantrasyonunun 100 mg/L olarak AQUATOX modeline girilmesi sonucunda izleme noktalarında takip edilen parametrelere ait konsantrasyon değerleri verilmiştir.

Vekil simülasyon modelinin kurulumunda ikinci aşama ise izleme noktalarında takip edilen kirleticilere ait arka plan konsantrasyon değerlerinin belirlenmesidir. Yapılan saha ve laboratuvar çalışmaları ile alıcı ortamda belirlenen kirleticilerin doğal konsantrasyon değerleri AQUATOX modeline başlangıç koşulu olarak girildiğinden, noktasal deşarjlardan salınan kirliliğin yanında arka plan konsantrasyonları da izleme noktalarında ölçülmektedir. Bu aşamada vekil simülasyon modelinde kullanılacak tepki katsayılarının sadece noktasal kaynaklardan gelen kirlilik dikkate alınarak hesaplanması gerektiğinden model kapsamında kullanılan arka plan konsantrasyon değerleri tepki matrisinin hesabında kullanılmamalıdır. Bu amaçla AQUATOX modelinde tesislerin tümünde deşarj edilen parametre konsantrasyonu 0 olarak girilmiş ve model simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonucunda $NH_3\&NH_4$, NO_3 , TSP, TP ve $CBOD_5$ parametreleri için elde edilen arka plan konsantrasyonları Ek-B'de verilmiştir. Elde edilen bu veriler Denklem 2.3'de kullanılarak ilgili katsayılar hesaplanmış ve konsantrasyon tepki matrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan konsantrasyon tepki matrisi Ek-C'de verilmiştir.

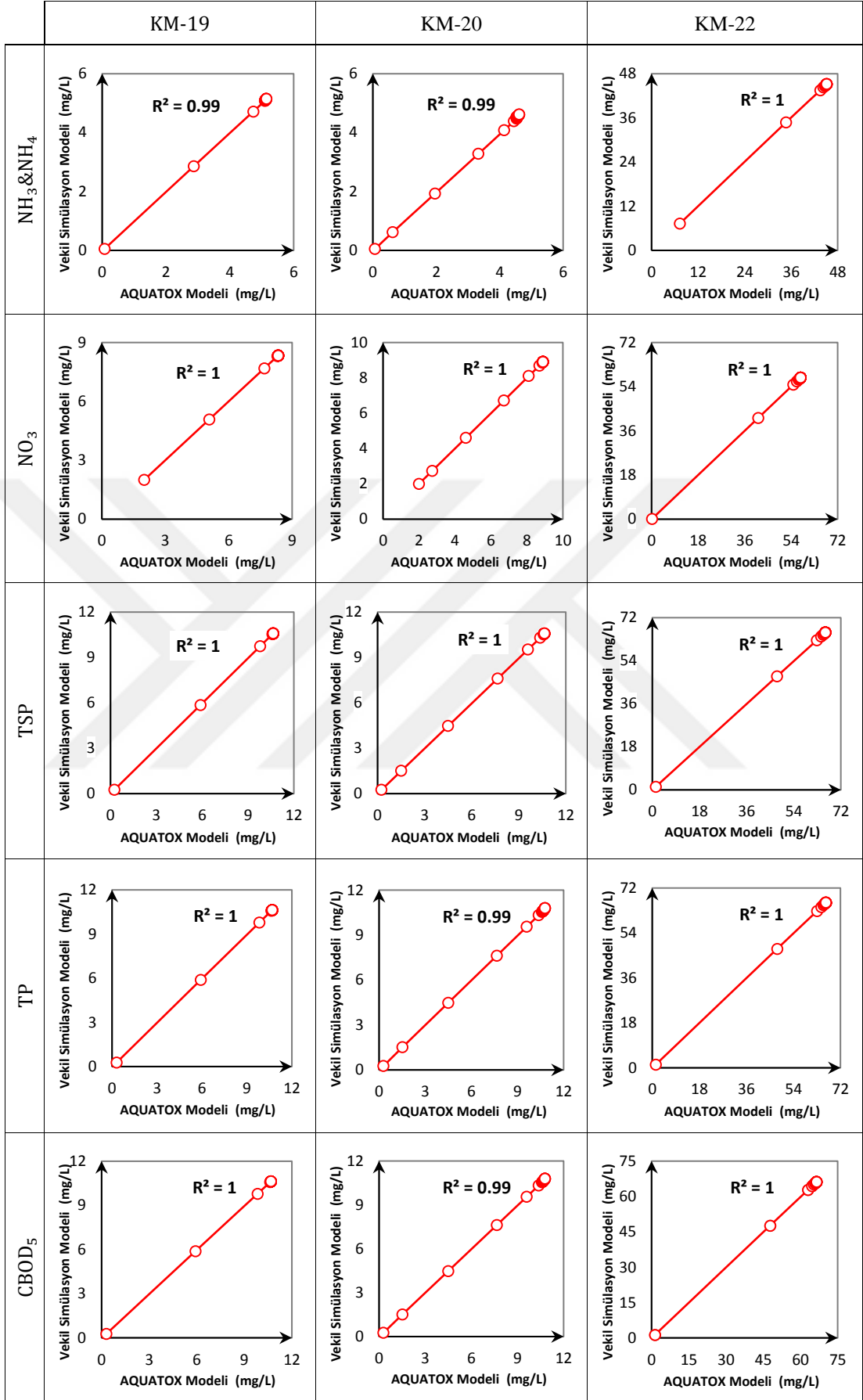
4.8 Vekil Simülasyon Modelinin Doğrulaması

Bu bölümde geliştirilen vekil simülasyon modelinin sonuçları ile AQUATOX modelinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda farklı girdi değerleri dikkate alınacak şekilde her iki model 10 ayrı doğrulama çözümü için çalıştırılmış ve izleme noktalarında takip edilen parametreler cinsinden her iki modelin vermiş olduğu sonuçlar regresyon analizi ile değerlendirilmiştir. Örnek olarak yapılan bu 10 ayrı doğrulama çözümünden birincisi için her iki modele girdi olarak verilen büyüklükler Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: Doğrulama çözümü 1 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları

Deşarj Konsantrasyonu (mg/L)	Noktasal Kaynaklar				
	ND_1	ND_2	ND_3	ND_4	ND_5
Toplam Amonyum Azotu	20	30	40	50	60
Nitrat Azotu	30	40	50	60	70
Toplam Çözünebilir Fosfor	40	50	60	70	80
Çöz. Organik Madde	50	60	70	80	90
Debi (L/g)	8000	4320	10000	10000	10000

Tablo 4.2’de verilen bu parametre değerlerinin her iki modele girilerek çalıştırılması sonucunda Şekil 4.5’de verilen saçılma grafikleri elde edilmiştir. Görüleceği gibi ilgili izleme noktalarında takip edilen tüm parametreler için vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli oldukça uyumlu sonuçlar vermiş ve tüm çıktılar için $R^2 \cong 1$ elde edilmiştir. Benzer durum Ek D’de verilen diğer denemelerde de elde edilmiş olup sonuç olarak doğrusal süperpozisyon prensibine dayalı olarak oluşturulan vekil simülasyon modelinin AQUATOX modeli yerine kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.5: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması

5. MODEL UYGULAMASI

Bu bölümde, Küçük Menderes Nehri üzerinde seçilen uygulama sahasında tez kapsamında geliştirilen simülasyon-optimizasyon modeli uygulanmıştır. Bu model ile akarsu üzerinde bulunan noktasal kirletici kaynaklara deşarj yükleri tahsis edilerek alıcı ortamda su kalitesinin incelenen parametreler baz alınarak ÇKS limit değerini aşip aşmadığı kontrol edilmiştir. Aynı zamanda modelin ÇKS limitlerini sağlaması durumunda kaynaklara mümkün mertebede maksimum deşarj yükü tahsis edip etmediği model sonuçlarına göre değerlendirilmiştir. Sonuç olarak geliştirilen simülasyon-optimizasyon modelinin uygulanabilirliği bu bölümde test edilmiş ve detaylı bir değerlendirme yapılmıştır.

5.1 Problemin Kurulumu ve Modelin Test Edilmesi

Bu çalışma kapsamında geliştirilen simülasyon-optimizasyon modelinin Bölüm 4’de verilen çalışma sahasında uygulanması için öncelikle problem formülasyonunda belirlenmesi gereken bağımsız parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler optimizasyon modelinin kurulumunda gerekli olan ceza fonksiyonlarının amaç fonksiyonuna entegrasyonu için kullanılan B , C_j^{\max} ve β_i katsayılarıdır. B değeri formülasyonda yük tahsis katsayısı ω_i ’nin değerinin 1’den farklı olması durumunda λ_i ceza katsayısının ayarlanmasında kullanılan pozitif bir tamsayıyı; C_j^{\max} , tüm noktasal kaynaklardan deşarj edilen j nolu kirleticiye ait maksimum deşarj konsantrasyonunu; β_i ve λ_i , deşarj noktası bazında değişim gösteren ve sırasıyla $\mathcal{P}_{i,j}^1$ ile $\mathcal{P}_{i,j}^2$ ceza fonksiyonlarının amaç fonksiyonuna entegrasyonu aşamasında kullanılan ceza parametrelerini göstermektedir. Modelin kurulumu aşamasında bu parametre değerleri sırası ile $B = 10$, $C_j^{\max} = 10$, $\beta_i = 1$ olarak alınmıştır. Bu parametre değerlerinin belirlenmesi ve model üzerindeki etkisinin tespit edilmesi için yapılan duyarlılık analizinden Bölüm 6’da detaylı olarak bahsedilmektedir.

Denklem (3.1)'de verilen simülasyon-optimizasyon formülasyonunun oluşturulması için gerekli olan parametreler belirlendikten sonra MS EXCEL® platformunda yer alan Çözücü (Solver) ortamında çalışma sahası için simülasyon-optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Model analiz edilmeden önce belirlenmesi gereken bir diğer husus ise noktasal kaynaklara yük dağıtımının ne şekilde yapılacağıdır. Bu bağlamda (ω_i) yük tahsis katsayısı için 4 farklı senaryo oluşturularak model analiz edilmiş ve ω_i katsayısının kullanımının uygunluğu test edilmiştir. Tablo 5.1'de oluşturulan senaryolar için noktasal kaynaklarda ω_i katsayısının aldığı değerler görülmektedir.

Tablo 5.1: Model analizinde kullanılan yük tahsis katsayıları

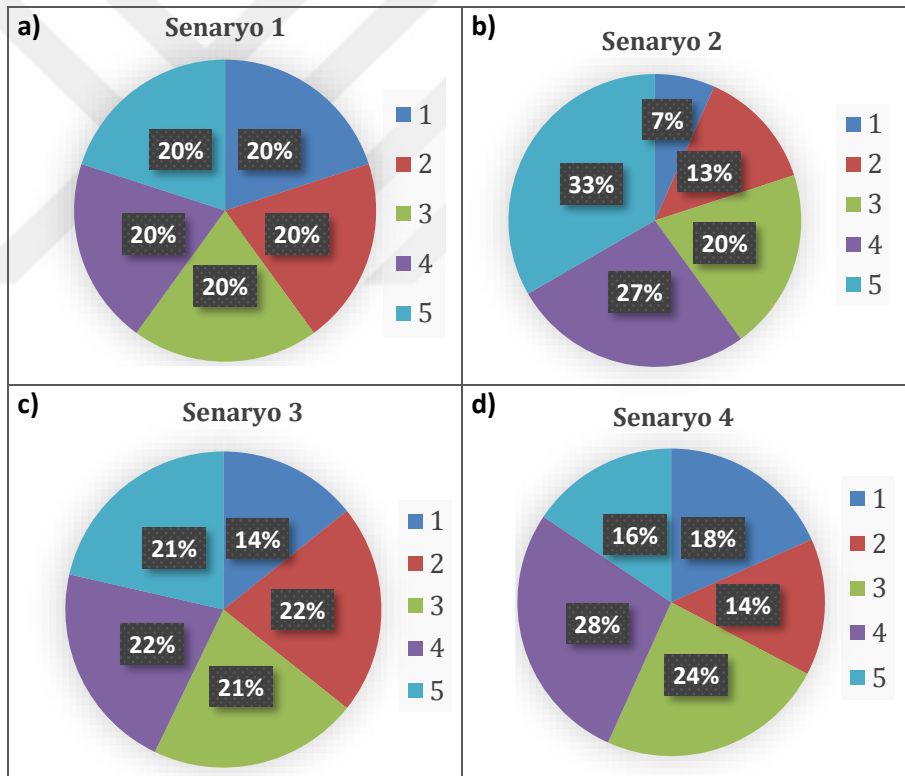
Senaryo	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
1	1	1	1	1	1
2	1	2	3	4	5
3	1	1.5	1.5	1.5	1.5
4	1.5	1.2	2	2.3	1.3

İlk olarak Senaryo 1'de ω_i değeri tüm kaynaklarda 1 olarak alınmış ve model kaynaklara eşit yük dağılımının yapılması durumu dikkate alınarak çalıştırılmıştır. Yapılan bu analiz sonucunda tüm kaynaklardan gerçekleşen deşarj yükünün eşit olması gerekmektedir. Senaryo 2'de ise mansaba en yakın olan 5 numaralı noktasal kaynaktan daha fazla deşarja müsaade edilmesi durumu incelenmiş aynı zamanda membaya doğru deşarj yükünün azaltılması istenmiştir. Bu durumda modelin 5 numaralı kaynağa diğerlerine oranla daha fazla, 1 numaralı kaynağa ise en az deşarj yükünü tahsis etmesi gerekmektedir. Benzer şekilde Senaryo 3 ve 4 içinde farklı durumlar için model çalıştırılmış ve ω_i katsayısının bu durumda etkin sonuç verip vermediği değerlendirilmiştir. Belirlenen bu 4 farklı senaryo için simülasyon-optimizasyon modeli çalıştırılmış olup her bir senaryo için elde edilen deşarj konsantrasyonları ve bu değerlerin yük tahsis katsayısına bağlı olarak değişimi Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2: Tüm senaryolar için elde edilen simülasyon-optimizasyon modeli sonuçları

Parametre	Noktasal Kaynak	Senaryo 1			Senaryo 2			Senaryo 3			Senaryo 4		
		C (mg/L)	q (g/gün)	q* (g/gün)	C (mg/L)	q (g/gün)	q* (g/gün)	C (mg/L)	q (g/gün)	q* (g/gün)	C (mg/L)	q (g/gün)	q* (g/gün)
Toplam Amonyum Azotu (mg/L)	ND ₁	1.11	8855.75		0.31	2511.04		0.74	5915.04		0.97	7761.29	
	ND ₂	2.05	8854.55		1.16	5020.47		2.05	8871.19		1.44	6203.61	
	ND ₃	0.89	8854.56	8854.79	0.75	7530.80	2510.32	0.89	8871.18	5914.25	1.03	10340.20	5170.75
	ND ₄	0.89	8854.56		1.00	10041.12		0.89	8871.18		1.19	11891.42	
	ND ₅	0.89	8854.56		1.26	12551.45		0.89	8871.18		0.67	6720.68	
Nitrat Azotu (mg/L)	ND ₁	10.86	86893.68		3.12	24985.59		7.26	58069.31		9.60	76803.70	
	ND ₂	20.11	86892.51		11.57	49969.62		20.16	87102.62		14.22	61437.56	
	ND ₃	8.69	86892.51	86892.74	7.50	74954.50	24984.89	8.71	87102.61	58068.54	10.24	102396.74	51199.02
	ND ₄	8.69	86892.51		9.99	99939.39		8.71	87102.61		11.78	117756.45	
	ND ₅	8.69	86892.51		12.49	124924.28		8.71	87102.61		6.66	66557.43	
Toplam Çözünbilir Fosfor (mg/L)	ND ₁	0.10	793.29		0.03	227.60		0.07	531.26		0.09	702.92	
	ND ₂	0.18	792.11		0.10	453.59		0.18	795.54		0.13	556.90	
	ND ₃	0.08	792.11	792.35	0.07	680.49	226.89	0.08	795.55	530.49	0.09	929.04	465.16
	ND ₄	0.08	792.11		0.09	907.38		0.08	795.55		0.11	1068.59	
	ND ₅	0.08	792.11		0.11	1134.27		0.08	795.55		0.06	603.42	
Ask. ve Çöz. Organik Madde (mg/L)	ND ₁	8.66	69280.58		2.47	19770.65		5.79	46290.50		7.62	60931.93	
	ND ₂	16.04	69278.44		9.15	39539.96		16.07	69434.61		11.28	48740.39	
	ND ₃	6.93	69279.37	69279.62	5.93	59309.61	19769.95	6.94	69434.30	46289.72	8.12	81234.28	40617.83
	ND ₄	6.93	69279.37		7.91	79079.56		6.94	69434.30		9.34	93419.63	
	ND ₅	6.93	69279.37		9.88	98849.52		6.94	69434.30		5.28	52801.80	

Tablo 5.2’de elde edilen sonuçlar incelendiğinde; Senaryo 1 için bütün kaynaklara eşit yük tahsis edilmesi durumu dikkate alınmakta ve elde edilen sonuçlar ile kaynakların tümünde incelenen parametreler için deşarj yükünün eşit olarak dağıtıldığı görülmektedir. Senaryo 2’de ise 5 numaralı kaynaktan daha fazla deşarja müsaade edilmesi durumu incelenmekte olup, sonuçlara bakıldığında ND_5 ’den deşarj edilen bütün kirletici madde yüklerinin diğer kaynaklara göre yük tahsis katsayısı ile orantılı olarak yaklaşık beş kat daha fazla olduğu görülmektedir. Benzer sonuçlar Senaryo 3 ve 4 için elde edilen model sonuçları incelendiğinde de elde edilmiş olup modele verilen ω_i yük tahsis katsayısına bağlı olarak kaynakların yük tahsisinin ayarlandığı görülmüştür. Sonuç olarak senaryoların tümü için kaynaklara tahsis edilen deşarj yükünün ω_i katsayısı ile orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Senaryolara göre elde edilen bu değişim Şekil 5.1’de yüzde-dilim grafiği olarak verilmiştir.

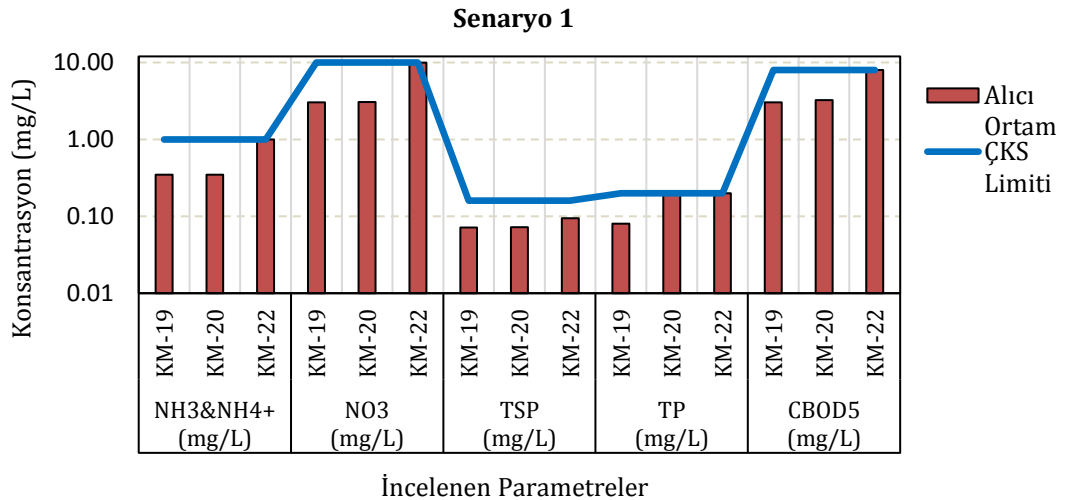


Şekil 5.1: Senaryo 1-4 için kaynaklara tahsis edilen deşarj yüklerinin oransal değişimi

Şekil 5.1’den görüleceği gibi, Senaryo 1’ için $\omega_{1,2,3,4,5} = 1$ olarak alındığından dolayı modelin bu 5 kaynağa deşarj yükünü %20 oranında eşit olarak dağıttığı görülmektedir. Senaryo 2’de ise $\omega_1 = 1$; $\omega_2 = 2$; $\omega_3 = 3$; $\omega_4 = 4$; $\omega_5 = 5$ olarak alındığından 1 numaralı kaynağa %7’lik bir deşarj yükü tahsis edilirken 5 numaralı

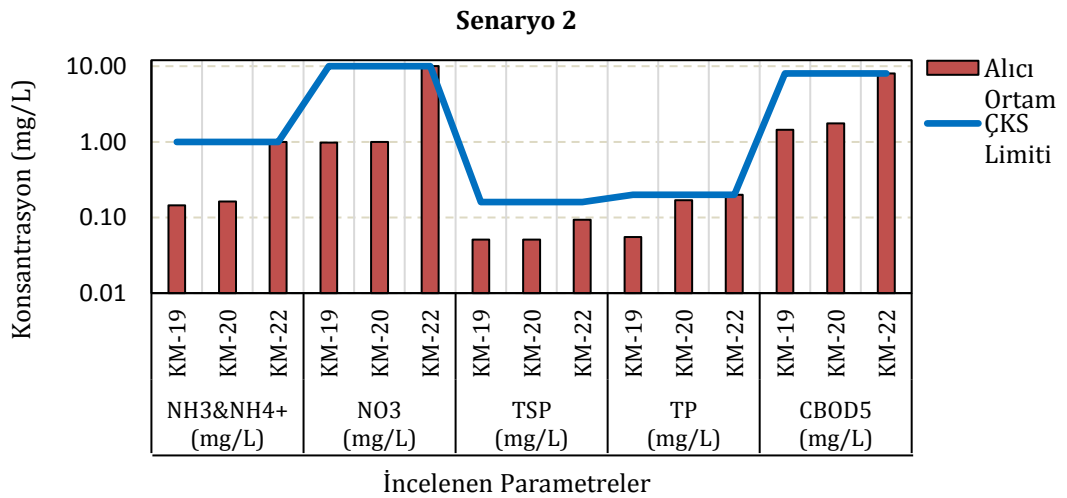
kaynağa yaklaşık olarak %33'lük bir pay düşmektedir. Senaryo 3'de ise $\omega_1 = 1$; $\omega_{2,3,4,5} = 1.5$ olarak alındığından 1 numaralı kaynaktan deşarj edilen yük yaklaşık olarak %14 mertebesinde iken diğer kaynaklara düşen deşarj payının %21 olduğu görülmektedir. Benzer şekilde Senaryo 4 için yük tahsis katsayıları $\omega_1 = 1.5$; $\omega_4 = 1.2$; $\omega_2 = 2$; $\omega_3 = 2.3$; $\omega_5 = 1.3$ olarak alındığından bu katsayılarla doğru orantılı olarak kaynaklara yük tahsisi yapılmıştır. Bu sonuçlar incelendiğinde çalışma kapsamında geliştirilen simülasyon-optimizasyon modelinde tanımlanan yük tahsis katsayısının (ω) değeri ile doğru orantılı olarak deşarj yüklerinin dağıtıldığı görülmektedir. Ancak bu katsayının çok büyük alınması durumunda bu orantı her durumda sağlanamayabilmektedir. Bu hususla alakalı olarak bir duyarlılık analizi yapılmış ve ω değerlerine bağlı olarak yük tahsisinin nasıl değiştiği ortaya konulmuştur.

Bu noktadan sonra değerlendirilmesi gereken en önemli husus ise, 4 farklı Senaryo için çalıştırılan simülasyon-optimizasyon modeli ile elde edilen yüklerin alıcı ortama deşarj edilmesi durumunda su kalitesinin istenen standartları sağlayıp sağlamadığının kontrolüdür. Optimizasyon modeli içerisine entegre edilen tepki matrisi ile karar değişkeni olarak alınan deşarj konsantrasyonları her çözüm adımında güncellendiğinde bu değerlere bağlı olarak alıcı ortamdaki kirletici parametrelerin konsantrasyonları hesaplanmakta ve modelde kısıt olarak tanımlanan ÇKS limit değerinin aşılmamasının kontrolü yapılmaktadır. Bu doğrultuda Senaryo 1 kapsamında belirlenen deşarj yükleri için KM-19, KM-20 ve KM-22 nolu izleme noktalarında hesaplanan kirletici konsantrasyonları ile sağlanması gereken ÇKS limitleri Şekil 5.2'de verilmiştir.

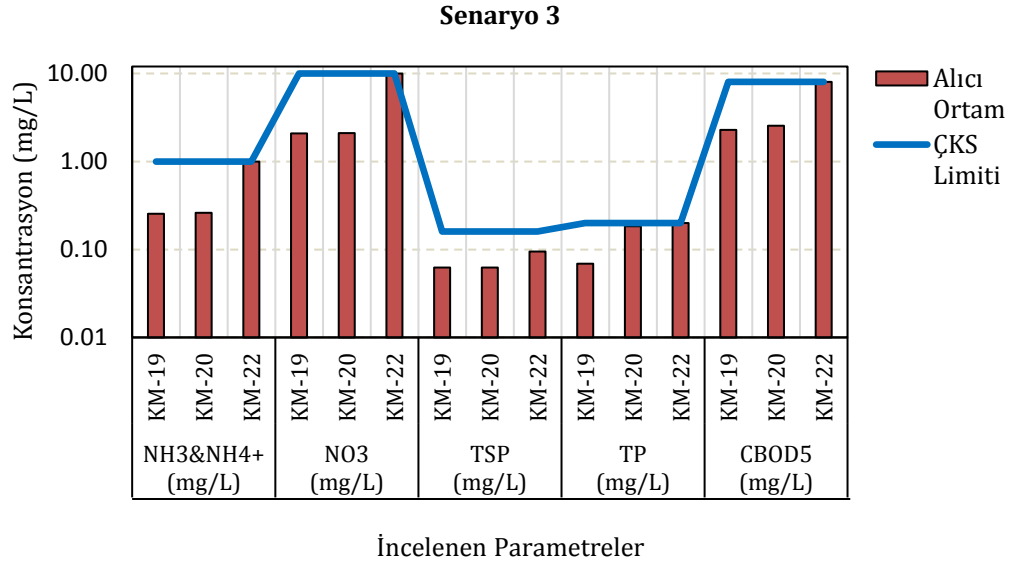


Şekil 5.2: Senaryo 1 için izleme noktalarında gözlenen kirletici konsantrasyonları

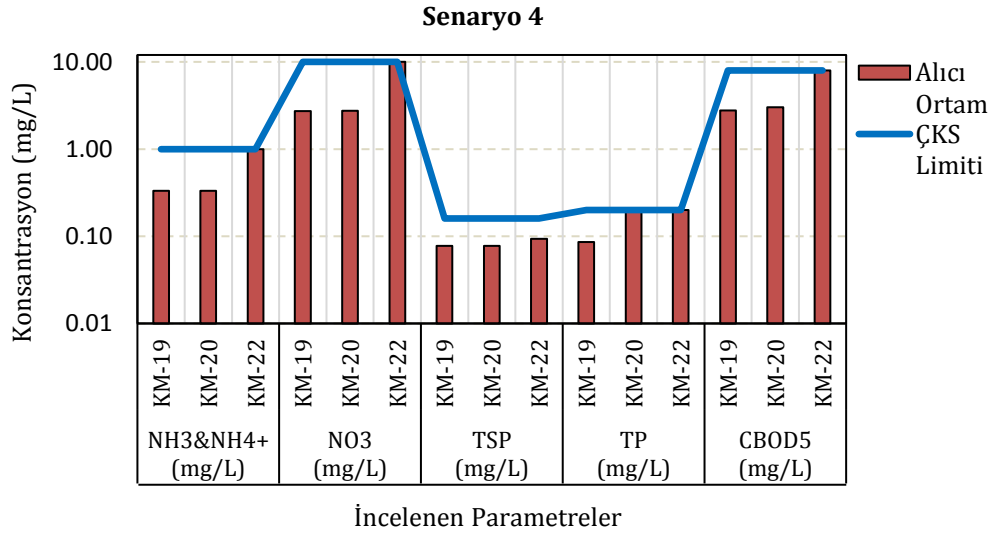
Şekil 5.2'den görüleceği gibi geliştirilen simülasyon-optimizasyon modeli ile elde edilen deşarj yüklerinin alıcı ortamda incelenen bütün parametreler için ÇKS limitlerini aşmayarak istenen iyi su durumuna ulaşıldığı görülmektedir. Grafik detaylı bir şekilde yorumlanacak olursa, Senaryo 1'de kaynaklara eşit yük tahsis edilmesi durumu dikkate alındığı için, KM-19 ve KM-20 gibi membada bulunan gözlem istasyonlarında kirletici konsantrasyonlarının düşük olduğu mansapta bulunan KM-22 istasyonunda ise bütün noktasal kaynakların etkisi gözlemlendiği için NH₃&NH₄, NO₃, TP VE CBOD₅ parametre konsantrasyonlarının ÇKS limit değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu sonuçlar modelin iyi su durumuna ulaşırken kaynaklara maksimum deşarj yapabilme imkanı sağladığını göstermektedir. Ancak alıcı ortamda TSP parametresi konsantrasyonunun KM-19, KM-20 ve KM-22 istasyonlarının tümünde ÇKS limit değerlerinin altında kaldığı görülmektedir. Bunun nedeni TP ve TSP parametrelerinin deşarj edilen Toplam Çözünbilir Fosfor maddesinden oluşması ve bu maddenin alıcı ortamda daha çok TP parametresine dönüşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durumda TSP parametresinin ÇKS sınırlarına ulaşmasını sağlayan deşarj yükleri TP'nin ÇKS limitlerini aşmasına neden olacağı için model alıcı ortamda TSP konsantrasyonu ÇKS limitlerinden daha az olacak şekilde yük dağıtımını yapmaktadır. Senaryo 1'de verilen kaynaklara adil yük dağıtımını için elde edilen konsantrasyonlar ile ÇKS limitleri arasındaki ilişki bu şekilde gözlenirken Senaryo 2-4 için de benzer bir sonuç elde edilmiş ve KM-22 nolu izleme noktasında ÇKS değerine eşit konsantrasyon değerleri elde edilmiştir. Şekil 5.3-5.5'de ise Senaryo 2-4 kapsamında elde edilen konsantrasyonlar ile ÇKS limiti arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 5.3: Senaryo 2 için izleme noktalarında gözlenen kirletici konsantrasyonları

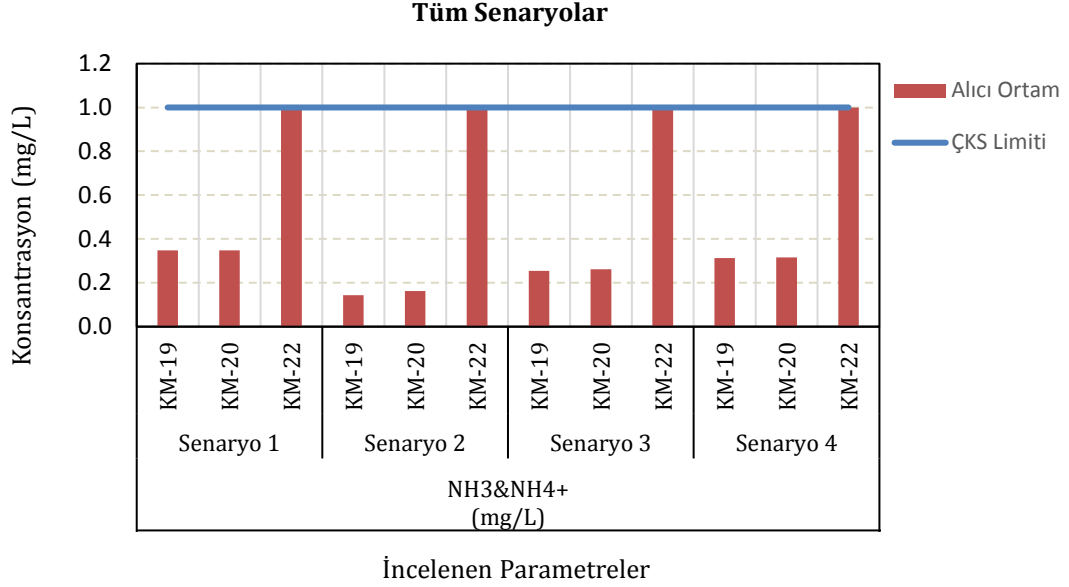


Şekil 5.4: Senaryo 3 için izleme noktalarında gözlenen kirletici konsantrasyonları



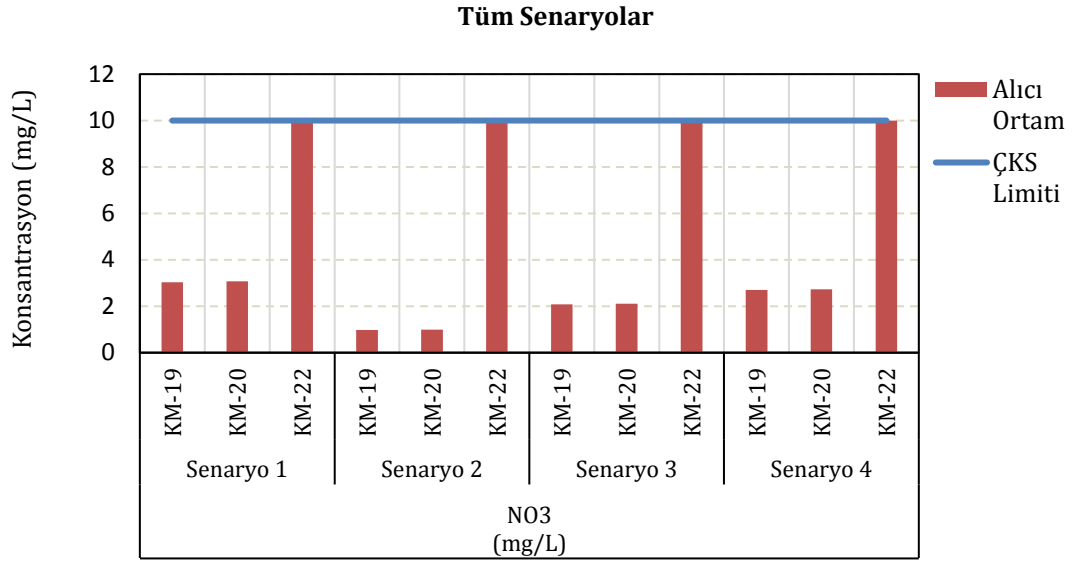
Şekil 5.5: Senaryo 4 için izleme noktalarında gözlenen kirletici konsantrasyonları

Şekil 5.3-5.5'dan görüleceği gibi model Senaryo 2-4 içinde alıcı ortamda incelenen parametreler için ÇKS limitlerini sağlamaktadır. Mansapta tüm kaynaklardan gelen kirletici etkisinin gözlendiği KM-22 izleme noktasında incelenen parametreler için ÇKS üst limitine ulaşılırken KM-19 ile KM-20'de kaynakların konumuna ve yük tahsis katsayısı değerine bağlı olarak konsantrasyonlar değişmektedir. Bu değişim tüm parametreler için Şekil 5.6-5.10 arasında görülmektedir.



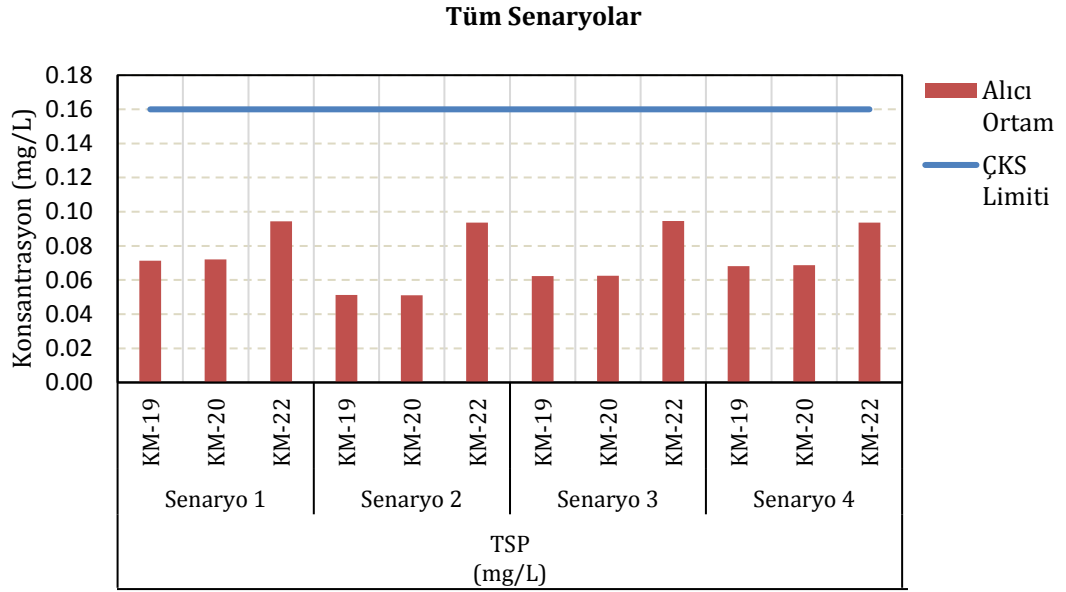
Şekil 5.6: Tüm senaryolar için izleme noktalarında gözlenen $\text{NH}_3\&\text{NH}_4$ konsantrasyonları

Şekil 5.6'dan görüleceği gibi tüm senaryolar için $\text{NH}_3\&\text{NH}_4$ parametresinin alıcı ortamda ÇKS limitlerini aşmadığı görülmektedir. Elde edilen bu sonuç daha kapsamlı değerlendirildiğinde farklı senaryolarda KM-19 ve KM-20 nolu izleme noktalarında gözlenen kirletici konsantrasyonlarının değiştiği görülmektedir. Bu durum ilgili izleme noktasındaki kirletici etkisi ölçülen noktasal kaynağın yük tahsis katsayısına bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Örnek olarak Senaryo 2'de ND_1 için $\omega_1 = 1$ olarak alınırken diğer kaynaklarda $\omega_2 = 2$; $\omega_3 = 3$; $\omega_4 = 4$; $\omega_5 = 5$ olarak alınması, diğer tüm senaryolar ile karşılaştırıldığında ND_1 'e daha az deşarj yükü tahsis edildiğinden ND_1 'in etkisinin gözlemlendiği KM-19 gözlem istasyonunda daha az kirletici konsantrasyonunun oluşmasına neden olmaktadır. Benzer şekilde Senaryo 3 ve Senaryo 4'de yük tahsis katsayısının değişimine bağlı olarak KM-19 ve KM-20'de hesaplanan kirletici konsantrasyonları değişmekte fakat tüm kaynaklardan gerçekleşen deşarjın gözlemlendiği KM-22 istasyonunda bütün senaryolar için ÇKS limitlerine ulaşılmaktadır. Benzer durum izleme noktalarında takip edilen diğer parametreler için de gözlenmiş olup (Şekil 5.7-5.10) kullanılan yük tahsis katsayılarına bağlı olarak KM-19 ve KM-20 noktalarında farklı kirletici konsantrasyonlarının elde edilmesi sonucunu ortaya çıkarmaktadır.



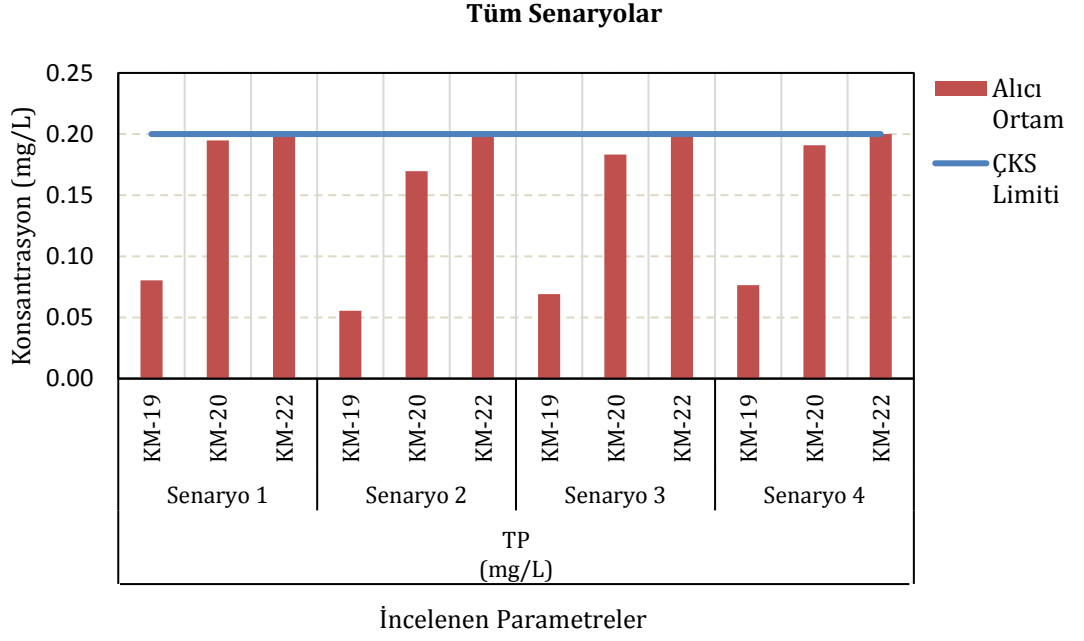
İncelenen Parametreler

Şekil 5.7: Tüm senaryolar için izleme noktalarında gözlenen NO₃ konsantrasyonları

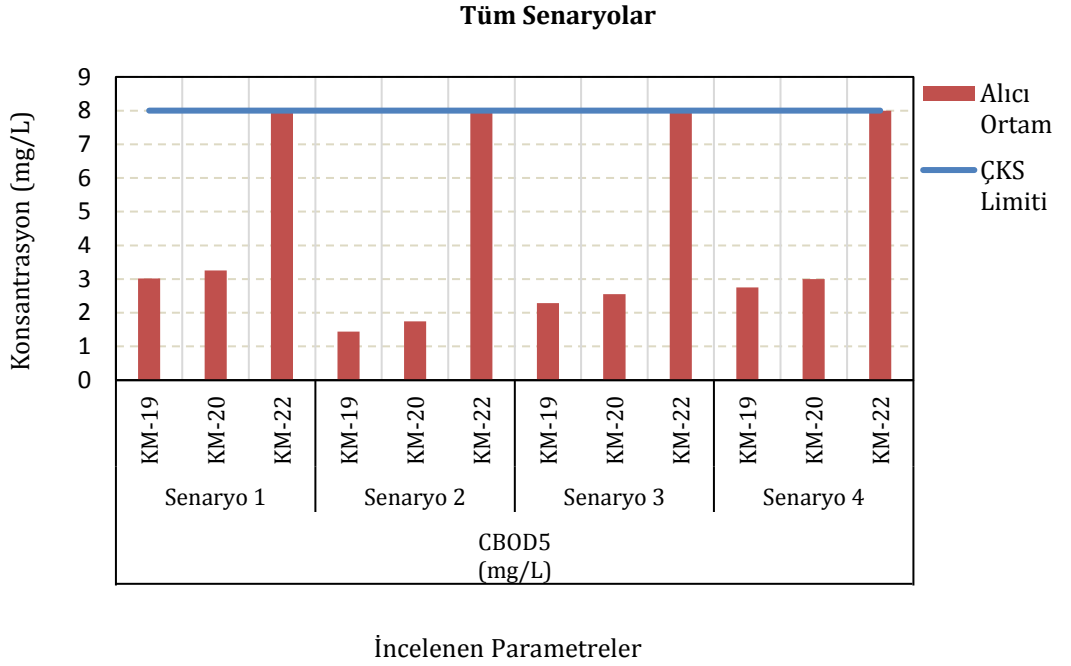


İncelenen Parametreler

Şekil 5.8: Tüm senaryolar için izleme noktalarında gözlenen TSP konsantrasyonları



Şekil 5.9: Tüm senaryolar için izleme noktalarında gözlenen TP konsantrasyonları



Şekil 5.10: Tüm senaryolar için izleme noktalarında gözlenen CBOD₅ konsantrasyonları

6. DUYARLILIK ANALİZİ

Duyarlılık analizi genel olarak model kurulumunda değişken olarak alınan parametrelerin çözüm üzerindeki etkisini belirlemek için yapılmaktadır. Bu bölümde geliştirilen simülasyon-optimizasyon modelinin kurulumu aşamasında kullanılan parametrelerin çözüm üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu analiz 3 farklı durum için yapılmış olup her bir durum için elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

6.1 Optimizasyon Modelinde Yer Alan Parametreler için Duyarlılık Analizi

Çalışma kapsamında geliştirilen optimizasyon modeli hakkında bilgi Bölüm 3’de detaylı olarak verilmiştir. Denklem (3.1)’de verilen formülasyon içerisinde bulunan B , C_j^{\max} ve β_i parametre değerlerinin optimizasyon modeli kurulum aşamasında tespit edilmesi gerekmektedir. Bu parametreler amaç fonksiyonuna ceza fonksiyonlarının entegre edilmesi aşamasında kullanılan büyüklüklerdir. Bu kapsamda belirlenmesi gereken bu üç parametre için 64 farklı kombinasyon oluşturulmuş ve yük tahsis katsayılarının Senaryo 4’de verilen değerler olarak alınması durumu için model analiz edilmiştir. Bu üç parametre için oluşturulan kombinasyonlar Ek E’de verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında oluşturulan bu parametre setlerinin çözüm üzerindeki etkisini belirlemek ve Bölüm 5’de yapılan çözümlerde (Esas Çözüm) dikkate alınan parametreler ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırmak için ilk olarak Ayvaz ve Elçi (2013) tarafından önerilen Merkez Uzaklığı (Centroid Distance- CD) ölçütü kullanılmıştır. CD genel olarak model içerisinde değişken durumdaki parametrelerin farklı değerleri için çözümde meydana gelen değişimin koordinatlar üzerinden belirlendiği bir yaklaşımdır. CD ölçütü Ayvaz ve Kentel (2014) ile Gökçe (2014) tarafından su dağıtım şebekelerine ait optimizasyon problemlerinin çözümünde de kullanılmıştır. CD ölçütü matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Gökçe 2014):

CP_j^* , j nolu kirletici için esas çözümde belirlenen deşarj yüklerine ait ağırlık merkezini; CP_j^k , j nolu kirletici için k numaralı veri seti kullanılarak yapılan çözüm sonucu elde edilen deşarj yüklerine ait ağırlık merkezini ($j = 1, 2, 3, \dots, n_c$; $k = 1, 2, 3, \dots, 64$); \tilde{x}_j^* ve \tilde{y}_j^* , j nolu kirletici için esas çözüm sonucu belirlenmiş deşarj yükü ağırlık merkezi koordinatlarını; \tilde{x}_j^k ve \tilde{y}_j^k ise j nolu kirletici için k numaralı veri kullanılarak yapılan çözüm sonucu belirlenen deşarj yükü ağırlık merkezi koordinatlarını; \tilde{x}_i ve \tilde{y}_i ise i numaralı noktasal kirletici kaynağın koordinatlarını ($i = 1, 2, 3, \dots, n_d$) göstermek üzere j nolu kirletici için modellenen akarsu sistemi üzerindeki deşarj yükü ağırlık merkezi koordinatları aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$\tilde{x}_j^k = \frac{\sum_{i=1}^{n_d} (q_{i,j} \cdot \tilde{x}_i)}{\sum_{i=1}^{n_d} q_{i,j}} \quad (6.1)$$

$$\tilde{y}_j^k = \frac{\sum_{i=1}^{n_d} (q_{i,j} \cdot \tilde{y}_i)}{\sum_{i=1}^{n_d} q_{i,j}} \quad (6.2)$$

$$\kappa = \begin{cases} * & \text{Esas Çözüm için belirlenen deşarj yükü koordinatları} \\ k & k \text{ numaralı veri seti için belirlenmiş deşarj yükü koordinatları} \end{cases} \quad (6.3)$$

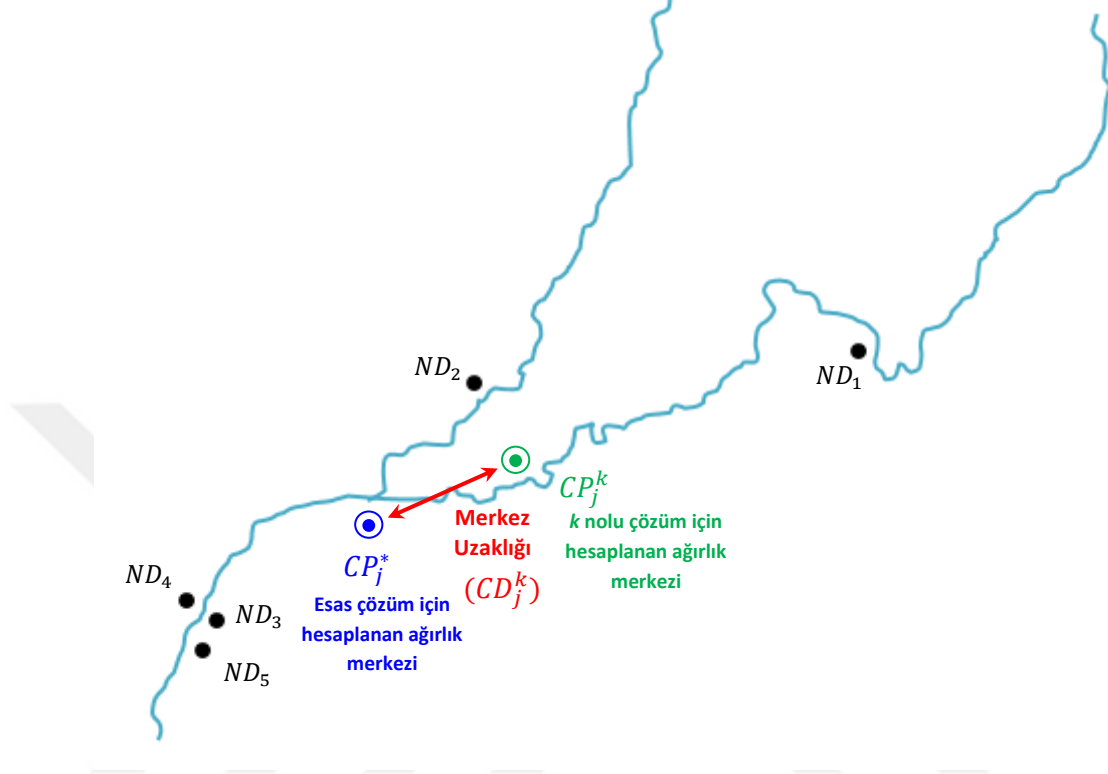
Denklem (6.1) ve (6.2)'den görüleceği gibi j nolu kirletici için yapılan her bir çözüme ait deşarj yükü ağırlık merkezleri, noktasal kaynak koordinatlarının deşarj edilen kirlilik yüklerine göre ağırlıklı ortalaması alınarak belirlenmektedir. Bu aşamadan sonra j nolu kirletici için k nolu veri setinin kullanılması durumunda belirlenen ağırlık merkezinin esas çözüme yakınlığı matematiksel olarak merkez uzaklığı (CD_j^k) ölçütü kullanılarak aşağıdaki gibi belirlenebilmektedir (Ayvaz ve Elçi 2013):

$$CD_j^k = \left\{ (\tilde{x}_j^k - \tilde{x}_j^*)^2 + (\tilde{y}_j^k - \tilde{y}_j^*)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6.4)$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, n_c ; k = 1, 2, 3, \dots, 64$$

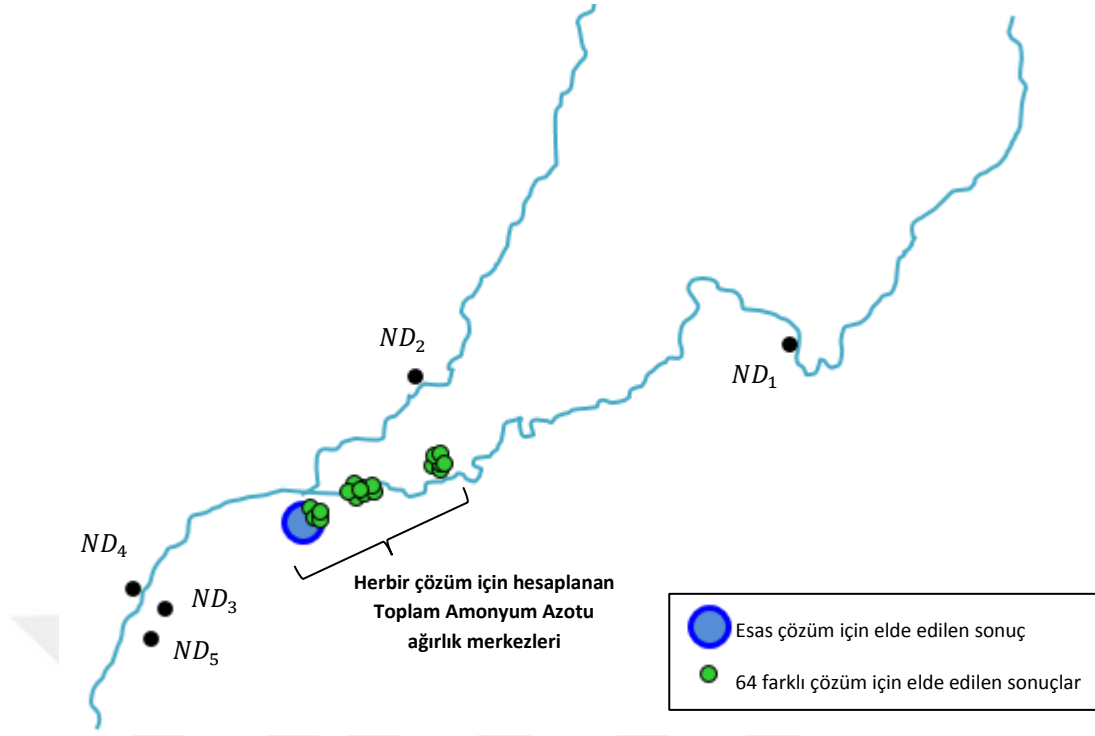
Denklem (6.4)'de verilen matematiksel eşitlik kapsamında hesaplanan CD_j^k değerinin 0 olması j nolu kirletici için k nolu veri setinin kullanılması durumunda belirlenen ağırlık merkezinin esas çözüm için belirlenen ağırlık merkezi ile aynı olduğu anlamına gelmektedir. Bu kapsamda duyarlılık analizi ile yapılan çözümler için elde edilen CD_j^k

değeri ne kadar küçük ise çözüm o kadar tutarlı, ne kadar büyük ise çözüm esas çözümden o kadar uzak anlamı ortaya çıkmaktadır. Bu sürecin çalışma sahası için nasıl işleyeceğine dair kavramsal model Şekil 6.1’de verilmiştir.

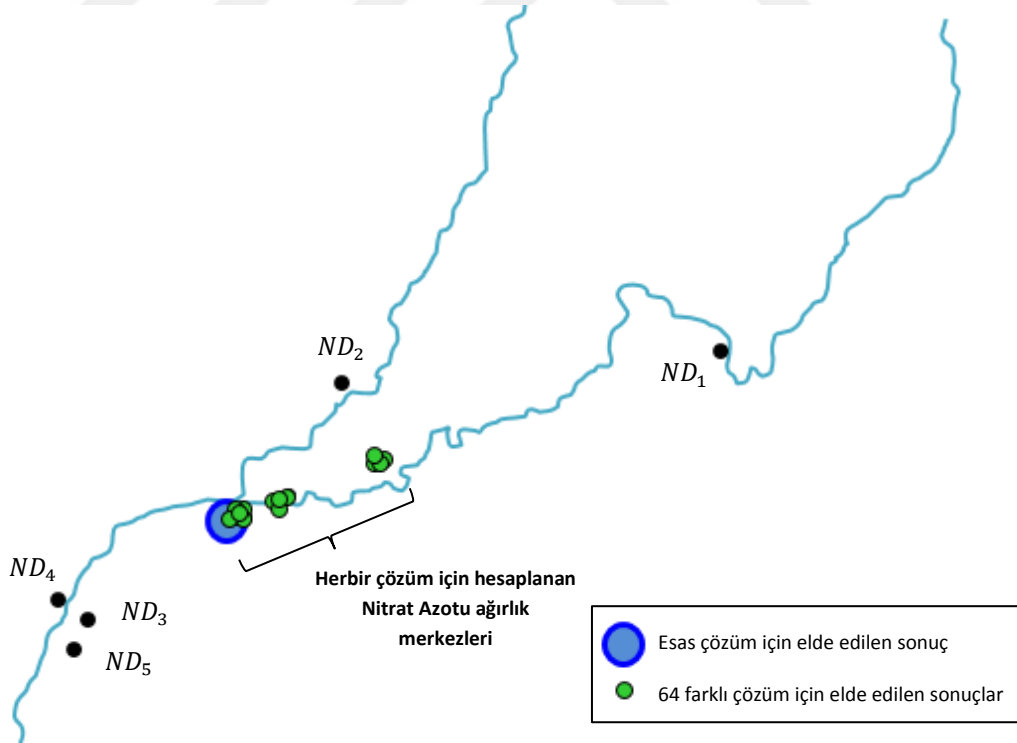


Şekil 6.1: Tanımlanan CD_j^k ölçütünün hesabına ilişkin kavramsal model.

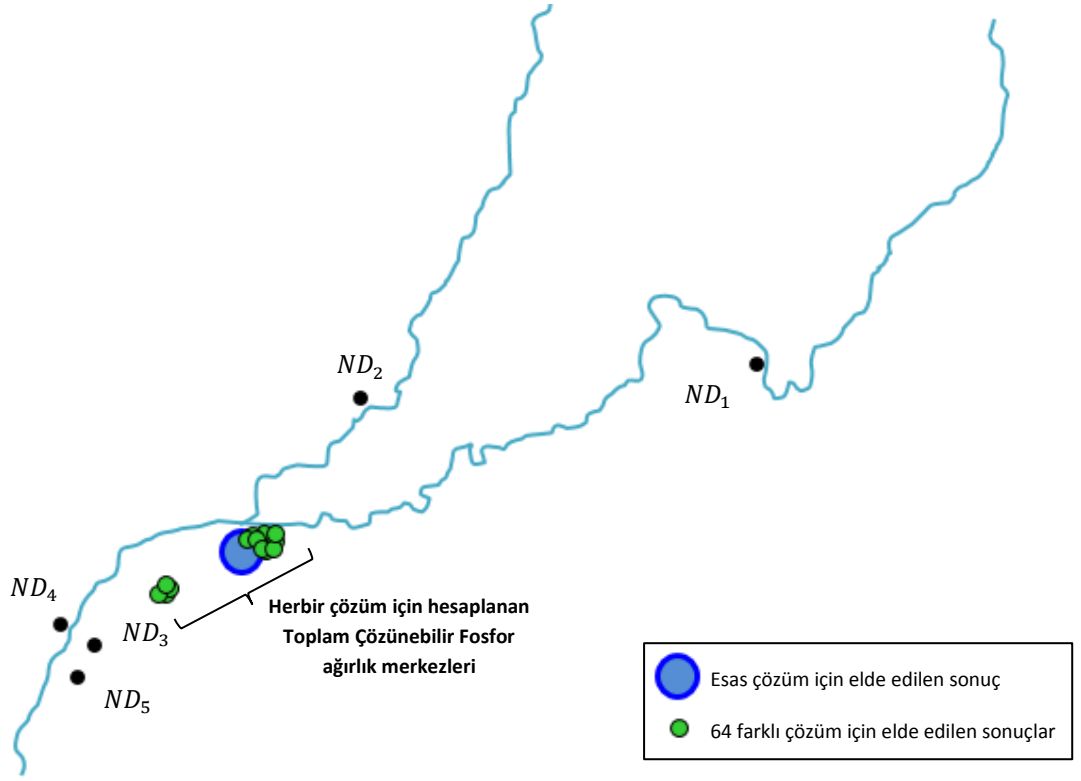
Bu tanımlamaların ardından Bölüm 5’de yapılan Esas Çözüm ve Ek E’de verilen 64 farklı parametre kombinasyonu için Denklem (6.1) ve (6.2) kullanılarak deşarj yükü ağırlık merkezleri ve Denklem (6.4) kullanılarak merkez uzaklıkları hesaplanmıştır. Bu kapsamda noktasal kaynaklardan alıcı su ortamına verilen her bir kirletici madde için belirlenen deşarj yükü ağırlık merkezleri Şekil 6.2-6.5’de karşılaştırılmıştır.



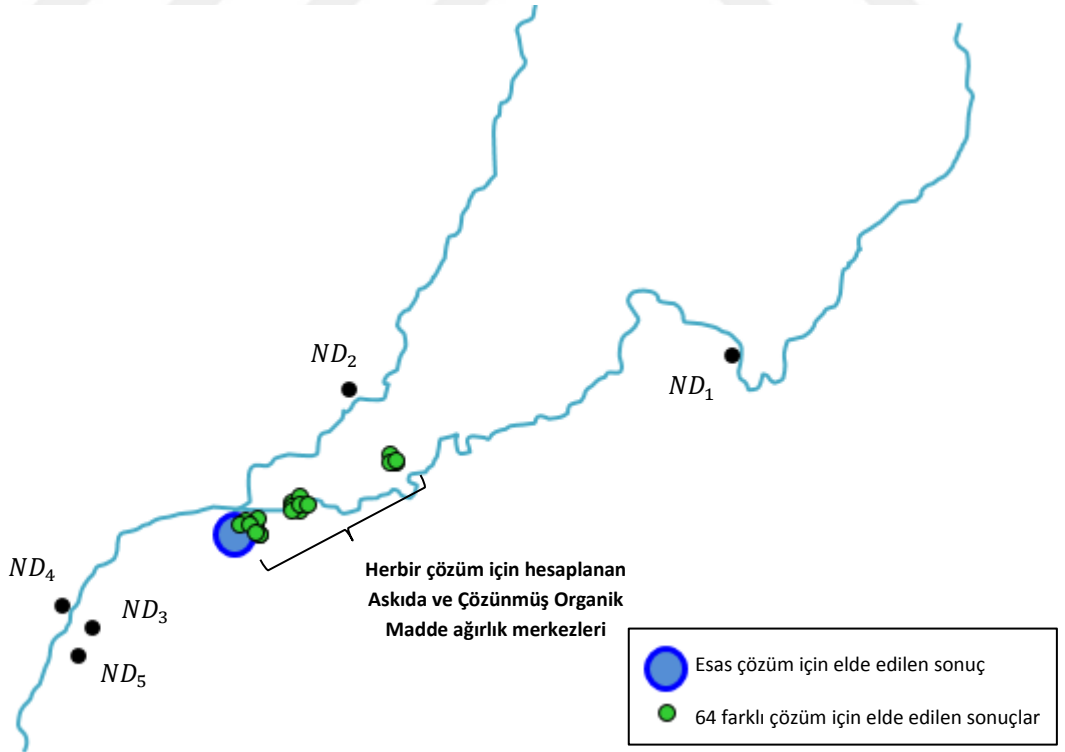
Şekil 6.2: 64 parametre seti sonucunda elde edilen Toplam Amonyum Azotu için ağırlık merkezleri



Şekil 6.3: 64 parametre seti sonucunda için elde edilen Nitrat Azotu için ağırlık merkezleri

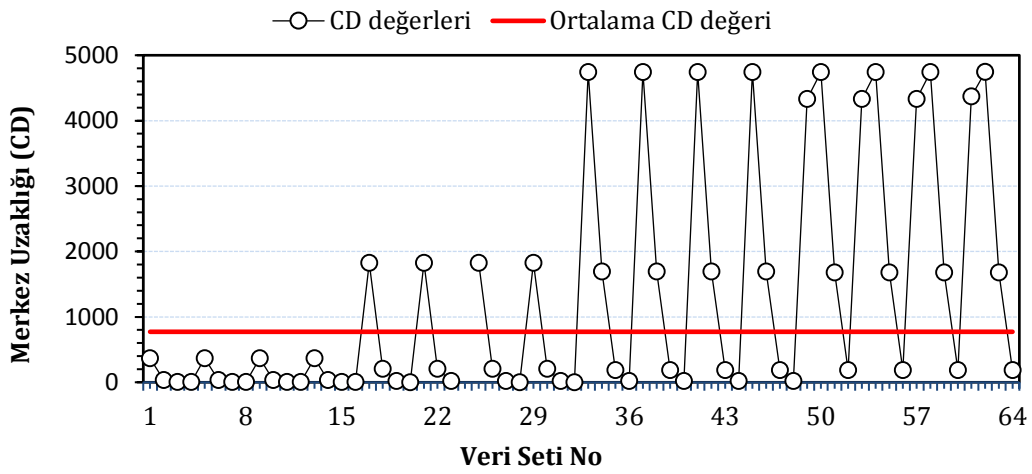


Şekil 6.4: 64 parametre seti sonucunda elde edilen Toplam Çözünbilir Fosfor için ağırlık merkezleri

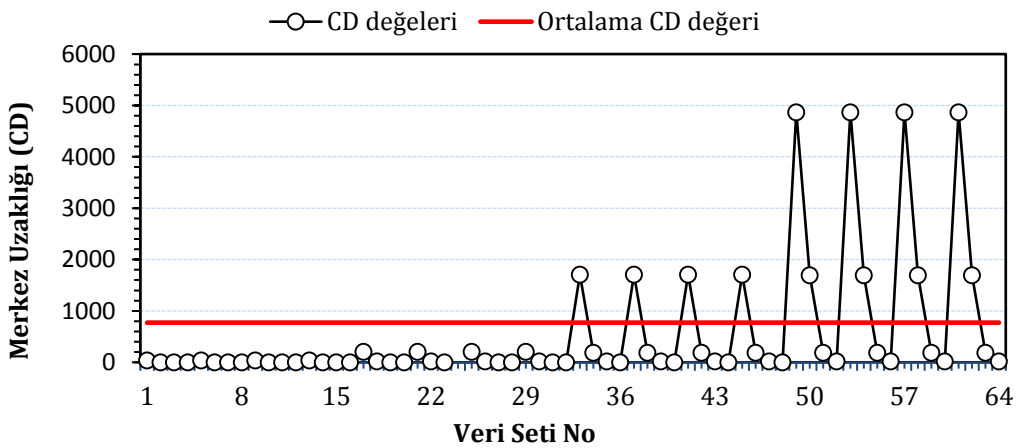


Şekil 6.5: 64 parametre seti sonucunda elde edilen Askıda ve Çözünmüş Organik Madde için ağırlık merkezleri

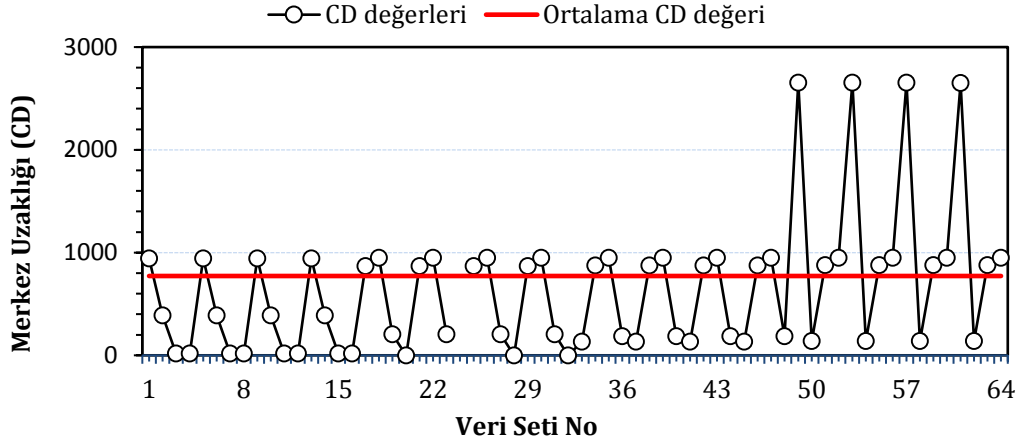
Şekil 6.2-6.5'den görüleceği gibi yapılan 64 farklı çözüm için elde edilen deşarj yükü ağırlık merkezlerinin bazıları esas çözüm için elde edilen ağırlık merkezine oldukça yakın bazıları ise nispeten uzak olarak konumlanmıştır. Elde edilen bu sonuç optimizasyon modelinin üretilen 64 veri setinde yer alan parametrelerden bazılarına karşı duyarlı olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçların hangi veri setine ve dolayısı ile hangi parametreye karşı daha fazla duyarlı olup olmadığını belirlemek amacıyla her bir çıktı parametresi için CD_j^k değeri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.6 ile 6.9 arasında verilmiştir.



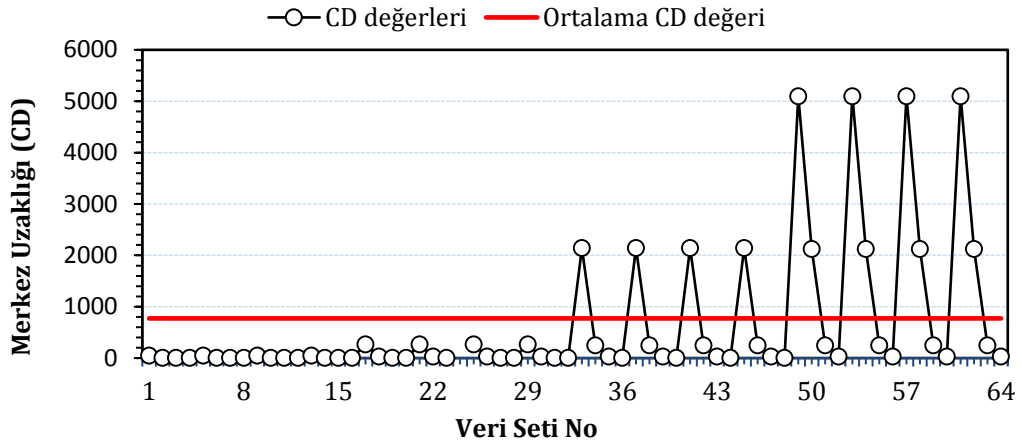
Şekil 6.6: 64 parametre seti ile Toplam Amonyum Azotu için hesaplanan CD_j^k değerlerinin değişimi



Şekil 6.7: 64 parametre seti ile Nitrat Azotu için hesaplanan CD_j^k değerlerinin değişimi



Şekil 6.8: 64 parametre seti ile Toplam Çözünbilir Fosfor için hesaplanan CD_j^k değerlerinin değişimi



Şekil 6.9: 64 parametre seti ile Askıda ve Çözünmüş Organik Madde için hesaplanan CD_j^k değerlerinin değişimi

Şekil 6.6-6.9'dan görüleceği gibi hesaplanan CD_j^k değerleri Toplam Amonyum Azotu için 0.0018 m ile 4743.11 m; Nitrat Azotu için 0.0001 m ile 4868.89 m; Toplam Çözünbilir Fosfor için 0.0108 m ile 2652.42 m; Askıda ve Çözünmüş Organik Madde miktarı için ise 0.0008 m ile 5092.84 m arasında değişmektedir. Elde edilen bu sonuçlardan Toplam Amonyum Azotu dikkate alındığında (Şekil 6.6) 16'nı veri setine kadar elde edilen CD_j^k değerlerinin oldukça düşük olduğu, bu noktadan sonra ise sistematik olarak 17, 21, 25 ve 29 nolu veri setleri için özellikle ilk 15 veri setine göre daha yüksek mertebede CD_j^k değerlerinin elde edilmiş olduğu dikkat çekmektedir.

Aynı mertebede CD_j^k değerleri benzer şekilde sistematik olarak 33, 37, 41 ve 45 nolu veri setleri ile 50, 54, 58 ve 62 nolu veri setleri için de elde edilmiştir. Bu veri setleri kapsamlı olarak incelendiğinde yukarıda verilen dörtlü grupların her birinde B ve β_i değerlerinin eşit olduğu görülmektedir. Diğer bir husus ise bu veri setlerinin her biri için B/β_i oranının sabit ve 10,000'e eşit olduğu görülmüştür. Şekil 6.6'da verilen sonuçlardan yüksek olan değerler incelendiğinde ise sistematik olarak 33, 37, 41 ve 45 nolu veri setleri ile 50, 54, 58 ve 62 nolu veri setleri için benzer CD_j^k değerleri elde edildiği görülmektedir. Bu çözümlere detaylı olarak incelendiğinde yine verilen dörtlü grupların her birinde B ve β_i değerlerinin eşit olduğu ve aynı B/β_i oranına (100,000) sahip olduğu görülmektedir. Son olarak CD_j^k değerleri yüksek olan 49, 53, 57 ve 61 nolu veri setleri için de benzer sonuç elde edilmiş olup sabit B ve β_i ile aynı B/β_i oranlarının (1,000,000) elde edilmiş olduğu dikkat çekmektedir. Bu kapsamda model sonuçları incelendiğinde B/β_i oranlarının 10, 100 ve 1,000 olduğu parametre setleri için yapılan çözümler için hesaplanan CD_j^k değerlerinin 0 ile 367.50 m arasında değişim gösterdiği görülmektedir. Bu değişim aralığı havza ölçeğinde bir modelleme sahası dikkate alındığında oldukça düşük olup değişimin elde edilmesinin temel nedeninin C_j^{\max} değerlerinin değişmesi olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkarak duyarlılık analizi kapsamında incelenen parametrelerden C_j^{\max} 'ın değişiminin edilen sonuçlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı ve B/β_i oranlarının 1,000'den büyük değerler alınması durumunda elde edilen sonuçların esas çözümden uzaklaşacağı sonucuna varılmıştır. Benzer sonuçlar modellenen diğer parametreler için Şekil 6.7-6.9 kapsamında elde edilen çıktılarda da aynı şekilde gözlenmiştir.

Elde edilen bu sonuçlar doğrultusunda, B/β_i değerinin yüksek olmasının 2 numaralı penaltı fonksiyonunun amaç fonksiyonunda önemini arttırdığı ve kaynaklardan deşarj edilen yükün maksimum olması daha önemli hale gelirken kaynaklara deşarj yükü dağılımının belirlenmesini sağlayan yük tahsis katsayısının önemini azalttığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar deşarj edilen kirletici parametre bazında incelendiğinde Toplam Çözünebilir Fosfor'un daha düşük B/β_i oranları için CD_j^k değerinin ortalama değerden yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum ise Toplam Çözünebilir Fosfor'un alıcı ortamda TSP ve TP parametre konsantrasyonunu etkilemesi ve bu kirletici parametrelerin ÇKS limitlerinin oldukça düşük olmasından dolayı deşarj yüklerinin de bu doğrultuda düşük değerler alarak 2 numaralı penaltı

fonksiyonunun aldığı değerin diğer parametrelerde aldığı değere göre daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle daha düşük B/β_i oranlarında bile 2 numaralı penaltı fonksiyonunun amaç fonksiyonunda önemi artarken kaynaklarda yük dağılımının belirlendiği 1 numaralı penaltı fonksiyonu önemini yitirmekte ve uygun çözüme ulaşamamaktadır. Benzer şekilde Toplam Amonyum Azotu alıcı ortamda NH_3 & NH_4 kirletici konsantrasyonunu etkilediği ve bu parametrenin ÇKS limit değeri düşük olduğundan küçük B/β_i değerleri için CD_j^k değerinin yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca bu iki parametrenin alıcı ortamda birden fazla kirletici konsantrasyonunu etkilemesi yük dağılımı yapılırken iki kirletici içinde ÇKS limitlerinin sağlanması gerektiğini göstermekte olup bu durumda bu iki parametre için yük dağılımının yapılmasını sağlayan 1 numaralı penaltı fonksiyonunun amaç fonksiyonu içerisinde öneminin artırılması gerektiği görülmektedir.

Hesaplanan CD_j^k değerleri parametreler için tek tek incelendiğinde maksimum CD_j^k değerinin Askıda ve Çözünmüş Organik Madde, minimum değer ise Toplam Çözünebilir Fosfor parametresi için elde edildiği görülmektedir. Bu durum benzer şekilde deşarj edilen maddelerin alıcı ortamda etkilediği kirleticinin ÇKS limitine bağlı olarak değişmekte ve yüksek ÇKS limitleri için deşarj yüklerinin alabileceği değer artacağından ağırlık merkezleri arasındaki mesafe büyümektedir. Elde edilen bu sonuçlar ile model kurulumunda kullanılan değişken parametre değerlerinin incelenen kirletici parametreye bağlı olarak çözüm üzerine etki ettiği görülmektedir.

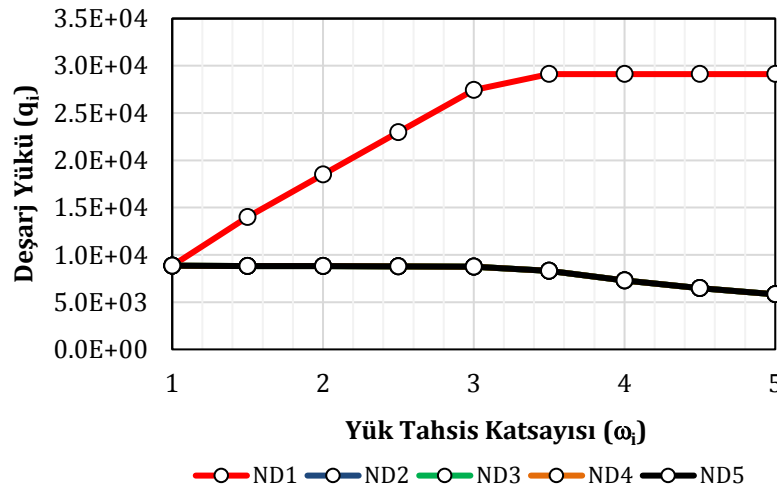
6.2 Yük Tahsis Katsayısının Farklı Değerleri İçin Duyarlılık Analizi

Bu bölümde noktasal kaynaklardaki yük dağılımının belirlenmesinde kullanılan yük tahsis katsayısının model sonuçları üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Bölüm 5’de elde edilen analiz sonuçlarına göre yük tahsis katsayısı ile deşarj yükleri doğru orantılı olarak değişim göstermektedir. Ancak bu katsayının bütün değerleri için benzer şekilde bir ilişki sağlanıp sağlanmadığının belirlenmesi gerekmektedir. Bu durumun değerlendirilmesi ve yük tahsis katsayısının alabileceği değer aralığının belirlenmesi için 9 farklı veri seti oluşturularak ilgili analiz gerçekleştirilmiştir.

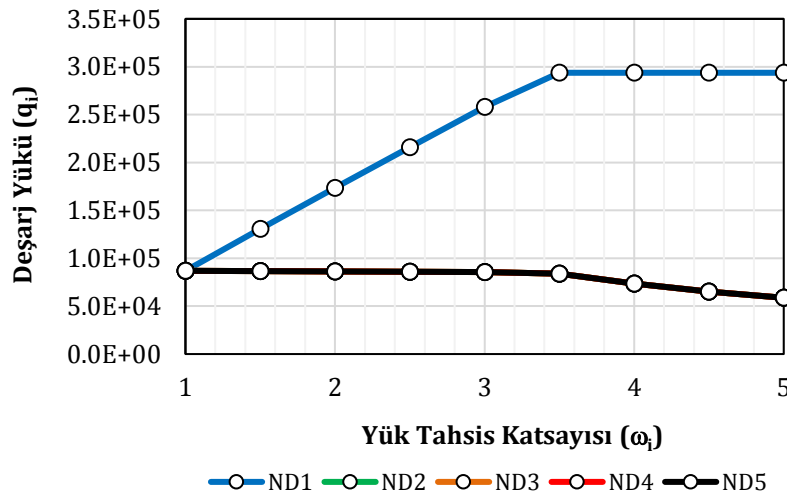
Bu kapsamda üretilen veri setleri Tablo 6.1’de, bu değerler kullanılarak yapılan çözümler sonucu belirlenen deşarj yükleri ise her bir girdi parametresi için Şekil 6.10-6.13’te verilmiştir.

Tablo 6.1: Yük tahsis katsayısı aralığının belirlenmesi için kullanılan veri seti

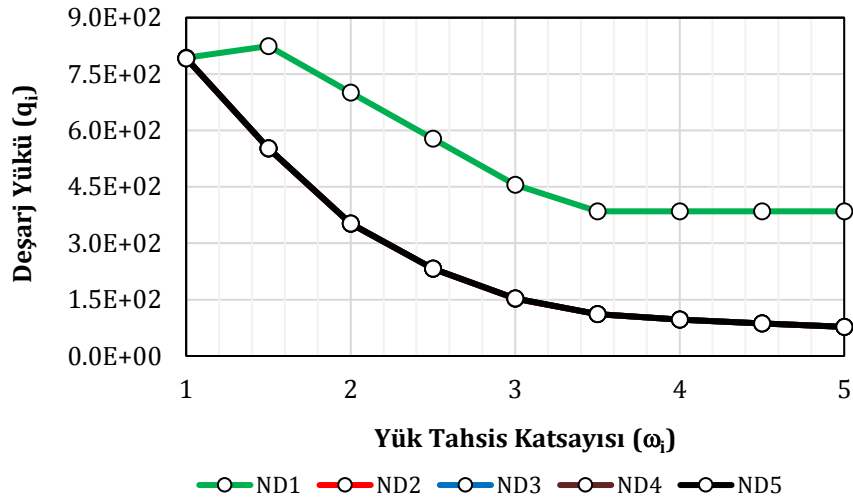
Veri Seti	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ω_1	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
$\omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \omega_5$	1	1	1	1	1	1	1	1	1



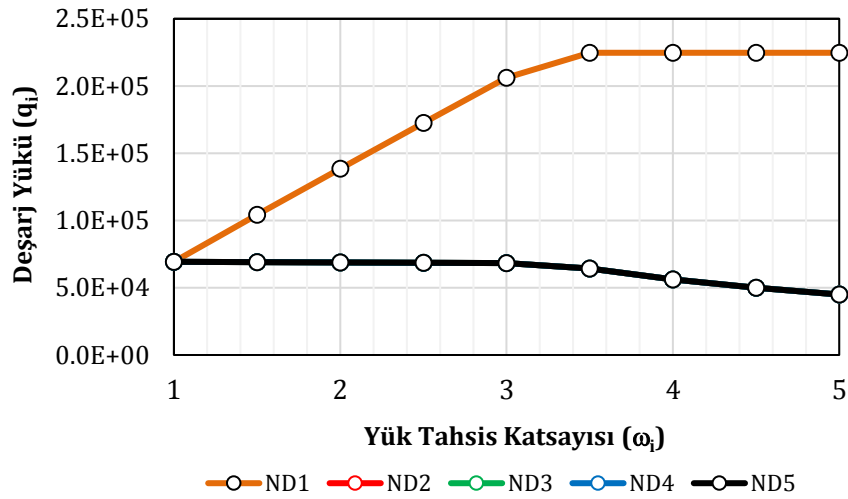
Şekil 6.10: Farklı yük tahsis katsayısı değerleri için Toplam Amonyum Azotu deşarj yükü



Şekil 6.11: Farklı yük tahsis katsayısı değerleri için Nitrat Azotu deşarj yükü



Şekil 6.12: Farklı yük tahsis katsayısı değerleri için Toplam Çözünbilir Fosfor deşarj yükü



Şekil 6.13: Farklı yük tahsis katsayısı değerleri için Askıda ve Çözünmüş Organik Madde deşarj yükü

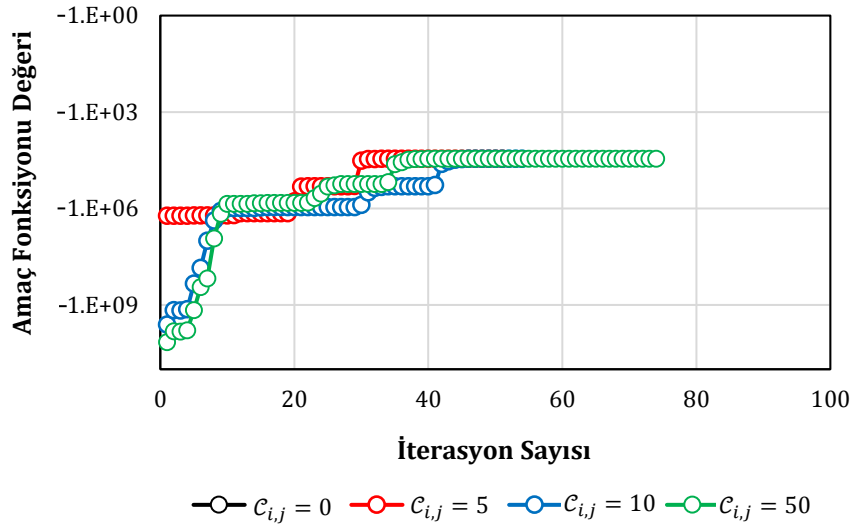
Şekil 6.10-6.13'den görüleceği gibi genel olarak yük tahsis katsayısının 1 ile 3.5 arasındaki değerleri için ND_1 'den deşarj edilen yük ω_1 ile doğrusal olarak artmaktadır. Ancak ω_1 değerinin 3.5'den büyük olması durumunda ND_1 'den deşarj edilen yük sabit kalmakta ve model tarafından diğer kaynaklara atanan yükler azaltılmaktadır. Bu durumun nedeni, ÇKS limit değerinin optimizasyon modeli kapsamında kısıt olarak tanımlanması ve alıcı ortamda ilgili parametre için maksimum deşarj yüküne ulaşıldıktan sonra modelin ilgili katsayıyı yakalamak için diğer kaynaklara daha az yük dağıtımını yapmasıdır.

Şekil 6.12’de ise Toplam Çözünebilir Fosfor’un diğer parametrelerden farklı bir davranış gösterdiği görülmektedir. Bu davranış Toplam Çözünebilir Fosfor’un alıcı ortamda TSP ve TP parametrelerini etkilemesi ve TP parametresinin KM-20’de gözlenen doğal arka plan konsantrasyonunun ÇKS üst sınırına oldukça yakın olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumda model ilgili veri setinde kullanılan yük tahsis katsayıları için 1 numaralı noktasal kaynağa daha fazla deşarj imkanı sağlamaya çalışmakta ancak 1 numaralı noktasal kirletici kaynağın etkisi KM-20’de görüleceği ve ÇKS üst sınırına düşük deşarj yüklerinde ulaşacağı için bu kaynağa daha fazla deşarj imkanı sağlanamamaktadır. Ancak diğer kaynakların etkisinin gözlemlendiği KM-22 izleme noktasında TP parametresinin doğal arka plan konsantrasyonu daha düşük olduğu için bu kaynaklara daha fazla deşarj yükü sağlanabilmektedir. Sonuç olarak model ilgili kaynak ile diğer noktasal kaynaklar arasındaki deşarj oranını yük tahsis katsayısına bağlı olarak sağlamak için diğer noktasal kirletici kaynakların deşarj yükünü azaltmaktadır. Bu durumda ÇKS limit değeri aşılmayacak şekilde 1 numaralı kaynağa daha fazla deşarj yükü tahsis edilmiş olmakta ancak diğer noktasal kaynaklarda deşarj edilebilecek maksimum yük değerine ilgili parametre için ulaşamamaktadır.

Genel durum değerlendirildiğinde, yük tahsis katsayısının uygulama sahasına bağlı olarak değiştiği görülmekte ve alabileceği değerler incelenen parametreye bağlı olarak farklı aralıklarda olabileceği görülmektedir. Ancak pratikte kirletici parametre bazında yük dağıtımını yapılamayacağı için kaynaklarda genel olarak yük tahsis katsayısının tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında tüm kaynaklara deşarj yükü sağlamak için ω değerinin uygulama sahası için 1 ile 3.5 arasında alınması önerilmektedir. Bu aralığın başka bir uygulama sahasında alıcı ortamın mevcut kalitesine ya da noktasal kaynakların kirletici etkisine bağlı olarak değişebileceği düşünülmektedir.

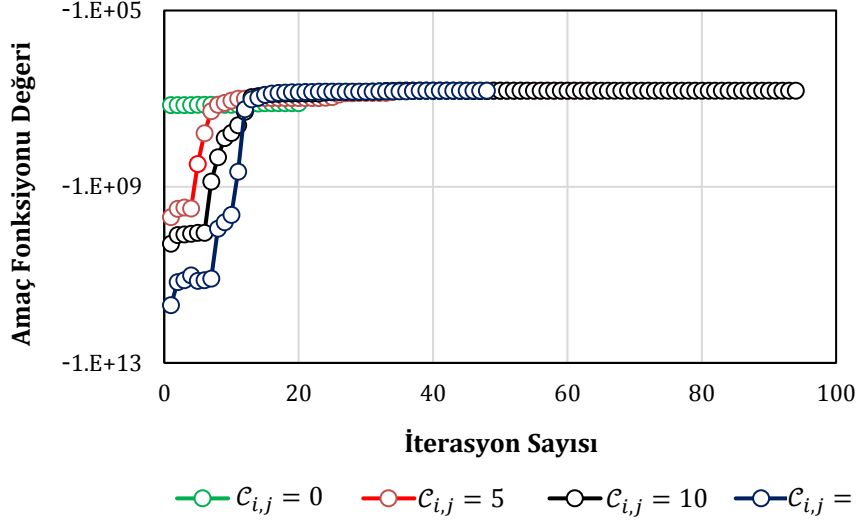
6.3 Farklı Başlangıç Değerleri İçin Model Performansının Test Edilmesi

Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi geliştirilen yaklaşım kapsamında ilgili optimizasyon probleminin çözümü deterministik tabanlı GRG optimizasyon tekniği kullanılarak yapılmıştır. GRG genel olarak iteratif arama prensibine dayalı bir optimizasyon tekniği olup elde edilen sonuçların duyarlılığı konveks olmayan çözüm uzayları için başlangıç çözümüne bağlı olmaktadır. Bu kapsamda GRG'nin geliştirilen model üzerindeki performansının değerlendirilebilmesi amacıyla ilgili problem kirlitici konsantrasyon değerleri bakımında 4 farklı başlangıç değeri ($C_{i,j} = 0$; $C_{i,j} = 5$; $C_{i,j} = 10$; $C_{i,j} = 50$, $i = 1, 2, 3, \dots, n_d, j = 1, 2, 3, \dots, n_c$) için çözülmüştür. Yapılan bu çözümlere ait yakınsama grafikleri Şekil 6.14-6.17'de verilmiştir.

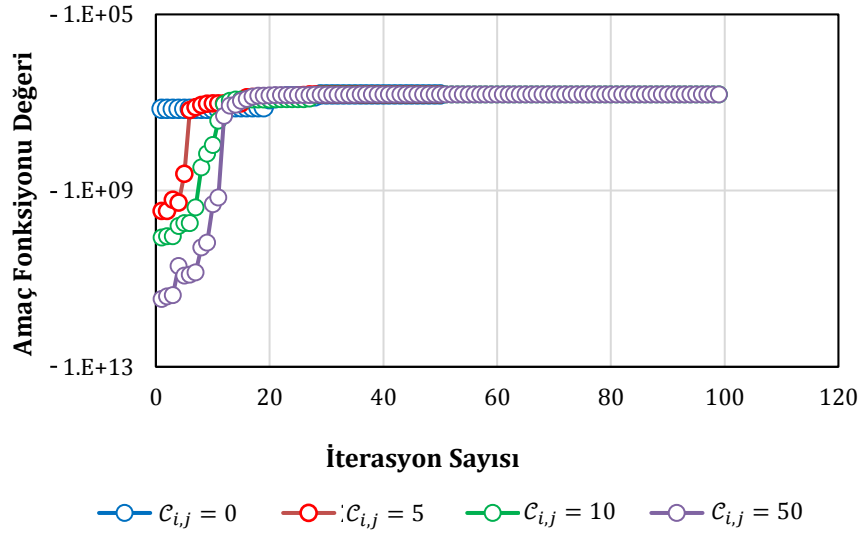


Şekil 6.14: Farklı başlangıç çözümleri için elde edilen yakınsama grafiği (Senaryo 1)

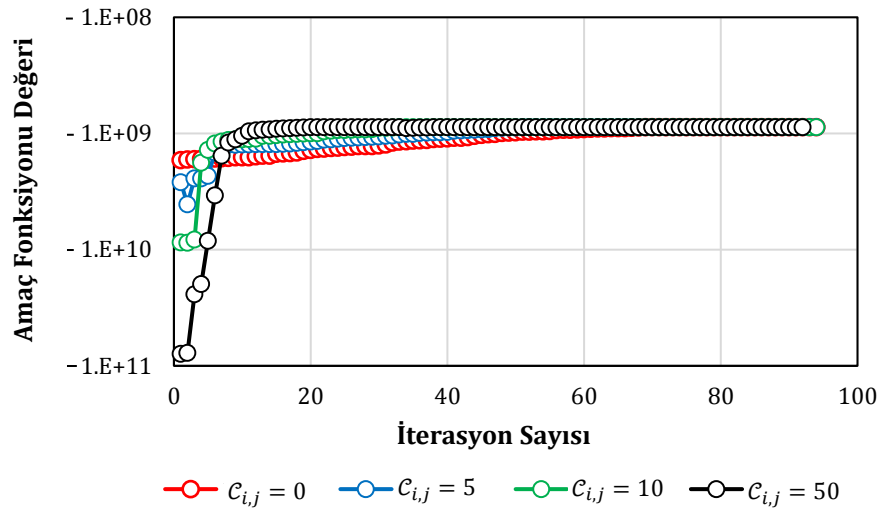
Şekil 6.14'den görüleceği gibi Senaryo 1'de verilen yük tahsis katsayıları için model farklı başlangıç konsantrasyonları kullanılarak çalıştırıldığında 4 çözüm için de yaklaşık olarak aynı amaç fonksiyonu değerine yakınsamaktadır. Benzer şekilde Senaryo 2-4 için de 4 farklı başlangıç çözümü için amaç fonksiyonu grafiği Şekil 6.15-6.17'de verilmiştir.



Şekil 6.15: Farklı başlangıç çözümleri için elde edilen yakınsama grafiği (Senaryo 2)



Şekil 6.16: Farklı başlangıç çözümleri için elde edilen yakınsama grafiği (Senaryo 3)



Şekil 6.17: Farklı başlangıç çözümleri için elde edilen yakınsama grafiği (Senaryo 4)

Şekil 6.14-6.17'den görüleceği gibi farklı başlangıç konsantrasyonları kullanılarak yapılan 4 çözüm yaklaşık olarak aynı amaç fonksiyonu değerine yakınsamaktadır. Elde edilen bu çözümler için optimizasyon modeli tarafından belirlenen amaç fonksiyonu ve toplam yük değerlerine ait istatistiksel özet Tablo 6.2'de verilmiştir.

Tablo 6.2: Farklı başlangıç çözümleri için model sonuçlarının istatistiksel değerlendirmesi

		Ortalama	Minimum	Maksimum	Standart Sapma	Değişim Katsayısı
Senaryo 1	Toplam Deşarj Yüğü	829097.55	829097.44	829097.62	0.0713	8.60E-08
	Amaç Fonksiyonu	-34609.41	-34609.42	-34609.41	0.0041	-1.19E-07
Senaryo 2	Toplam Deşarj Yüğü	712380.90	712380.89	712380.91	0.0072	1.02E-08
	Amaç Fonksiyonu	-6639266.55	-6639266.55	-6639266.55	0.0005	-8.25E-11
Senaryo 3	Toplam Deşarj Yüğü	775620.95	775620.88	775620.99	0.0437	5.63E-08
	Amaç Fonksiyonu	-6513427.32	-6513427.33	-6513427.32	0.0018	-2.72E-10
Senaryo 4	Toplam Deşarj Yüğü	808857.75	808857.19	808857.97	0.3233	4.00E-07
	Amaç Fonksiyonu	-8030696.21	-8030696.34	-8030696.16	0.0765	-9.52E-09

Tablo 6.2'den görüleceği gibi geliştirilen simülasyon-optimizasyon modeli ile farklı başlangıç çözümleri elde edilen sonuçlar birbirine son derece yakındır. Bu durum elde edilen son derece küçük değişim katsayısı değerlerinden de açık olarak görülmektedir. Elde edilen bu sonuç geliştirilen yaklaşım kapsamında optimizasyon modelinin başlangıç çözümünden bağımsız olduğunu ve her durumda global optimum çözüme ulaşabildiği sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, noktasal kirletici kaynaklardan deşarj edilen kirletici yüklerinin alıcı su ortamındaki ÇKS limit değerleri sağlanacak şekilde belirlenebildiği entegre bir simülasyon-optimizasyon modeli geliştirilmiş ve Küçük Menderes Nehri üzerinde test edilmiştir. Bu bağlamda ilk olarak simülasyon modelinin kurulum aşamasında, arazi çalışmaları yapılarak alıcı ortamdan numune alma işlemleri gerçekleştirilmiş ve akarsu ile ilgili karakteristikler belirlenmiştir. Bu aşamadan sonra elde edilen veriler ile AQUATOX su kalitesi modeli kurulmuştur. AQUATOX modeli kullanılarak noktasal kaynaklardan deşarj edilen maddelerin alıcı ortamda neden olduğu kirletici konsantrasyonları zamana bağlı olarak elde edilmiştir.

İkinci aşamada ise sahada bulunan noktasal kaynaklara deşarj yüklerinin tahsis edildiği matematiksel formülasyon geliştirilmiş ve gradyan tabanlı GRG optimizasyon modeli içerisine entegre edilmiştir. Geliştirilen optimizasyon modeli ile deşarj yüklerinin maksimize edilmesi sağlanırken alıcı ortamda incelenen parametrelerin ÇKS limitlerini sağlayıp sağlamadığının kontrolü için vekil bir su kalitesi modeli oluşturulmuş ve optimizasyon modeli ile bütünleşik çalışması sağlanmıştır. Oluşturulan bu vekil simülasyon modeli AQUATOX su kalitesi modeline ait girdi-çıkı ilişkilerinin doğrusal süperpozisyon prensibine dayanan kompozit tepki katsayıları ile ifade edilmesine dayanmaktadır. Her bir kaynaktan deşarj edilen parametrenin alıcı ortamda etkilediği kirletici konsantrasyonu arasındaki ilişki kompozit tepki katsayıları ile elde edilmiş ve bütün katsayılar bir konsantrasyon tepki matrisi içerisinde saklanmıştır. Oluşturulan bu konsantrasyon tepki matrisi sayesinde optimizasyon modelinin her bir çözüm adımında belirlenen deşarj konsantrasyonları için alıcı ortamda ÇKS değerlerinin aşılmış aşılmadığının kontrolü matematiksel olarak gerçekleştirilmiş olmaktadır.

Elde edilen bu entegre simülasyon-optimizasyon modeli Küçük Menderes Nehri Bayındır kolunda bulunan Ilıca deresi ve Uladı çayı üzerindeki 5 adet noktasal kaynak için çalıştırılmış aynı zamanda çalışma sahası üzerinde 3 adet izleme noktası seçilerek kirletici konsantrasyonlarının ÇKS limit değerleri kontrol edilmiştir. Bu hususta dikkat edilmesi gereken nokta ise ÇKS limit değerlerini sağlayan deşarj yüklerinin model tarafından maksimize edilip edilmediği olup bu durum model içerisinde tanımlanan ceza fonksiyonları ile sağlanmıştır. Diğer taraftan model içerisinde her bir kaynak için tanımlanan yük tahsis katsayıları kullanılarak deşarj yüklerinin eşit ya da kullanıcı tarafından belirlenen oranlarda dağıtılması mümkün olmaktadır. Bu durumun kontrolü için noktasal kaynaklarda yük tahsis katsayısı değerleri için 4 farklı senaryo oluşturularak model performansı değerlendirilmiş ve ilgili kaynaklar için istenen yük dağılım oranının elde edilebildiği görülmüştür.

Genel olarak model performansının değerlendirilebilmesi için 3 farklı duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak optimizasyon modeli içerisinde kullanılan parametre değerleri için farklı kombinasyonlar oluşturulmuş ve model analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde bu parametrelerden bazılarının model sonuçları üzerinde etkisi olduğu görülmüştür. Daha sonra kaynaklara atanan yük tahsis katsayısının alabileceği değer aralığının belirlenebildiği bir analiz yapılmıştır. Son olarak geliştirilen modelinin optimizasyon aşamasında kullanılan GRG optimizasyon tekniğinin farklı başlangıç çözümleri için performansı test edilmiştir. Model 4 farklı başlangıç çözümü için analiz edildiğinde her çözüm için aynı sonuçların elde edildiği görülmüştür.

Yapılan tüm bu çalışmalar ile Küçük Menderes Havzası için alıcı su ortamı baz alınarak noktasal kirletici kaynaklarda deşarj limitleri belirlenebilmiştir. Yapılan bu tez kapsamında SÇD ve ABD'de deşarj standartları geliştirmek için uygulanan yaklaşımlar bir arada sentezlenerek entegre havza yönetimine dikkat çeken modelleme esaslı bir yöntem ortaya koyulmuştur. Oluşturulan bu matematiksel model kullanılarak ilgili uygulama sahası için sürdürülebilir su yönetimi kapsamında hızlı ve sağlıklı kararlar verilmesi mümkün olabilecektir.

7.2 Öneriler

Dünyada mevcut doğrudan kullanılabilir su kaynakları gün geçtikçe azalmakta ve var olan kaynaklar üzerindeki çevresel baskı giderek artmaktadır. Bu durum insanları yeni kaynak arayışlarına ve mevcut kaynakların daha verimli bir şekilde kullanılması için yeni yöntemler geliştirmesine yönlendirmektedir. Özellikle ülkemizde yerüstü suların içme suyu, üretim vb. alanlarda kullanılabilir olması bu açıdan büyük bir çözüm olacaktır. Ancak çoğu akarsu, nehir, göl vb. gibi yerüstü suların kirlilik derecesi bu kaynağı oluşturmak için yeterli standartları sağlamamaktadır. Bu noktada alıcı su ortamında istenen kalitenin elde edilmesi ve YSKY’de belirtilen koşulları sağlayarak kullanılabilir durumda olması için noktasal ve yüzeysel kirletici kaynaklardan gerçekleşen deşarj limitlerinin belirlenmesi gereklidir.

Yapılan bu çalışmada noktasal kirletici kaynakların alıcı ortam kalitesi göz önünde bulundurularak deşarj standartları belirlenmiş olup Küçük Menderes Nehri’nin Bayındır kolu üzerinde uygulanarak istenilen ÇKS limitleri için deşarj standartları geliştirilmiştir. Geliştirilen bu entegre simülasyon-optimizasyon modeli sadece Küçük Menderes Nehri için geliştirilmiş olmayıp başka akarsu havzaları için de uygulanabilecektir. Bunun yanı sıra alıcı ortamda kaliteyi arttırmak amacı ile yayılı kaynaklardan gelen kirletici etkisini azaltma çalışmaları gerçekleştirilebilir.

Son olarak, geliştirilen simülasyon-optimizasyon modelinin simülasyon aşamasında kullanılan vekil simülasyon modeli girdi-çıkı ilişkisi kurulan veri setleri için kara kutu modelleri kullanılarak (YSA, SVM) geliştirilebilir. Aynı zamanda çalışma kapsamında kullanılan gradyan tabanlı GRG optimizasyon tekniği yerine başka optimizasyon yöntemleri de kullanılarak çözüme ulaşılabilir.

8. KAYNAKLAR

Ayvaz, M. T., "A hybrid simulation-optimization approach for solving the areal groundwater pollution source identification problems", *Journal of Hydrology*, 538, 161–176, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.008>. (2016).

Ayvaz, M. T. and Elçi, A., "A groundwater management tool for solving the pumping cost minimization problem for the Tahtali watershed (Izmir-Turkey) using hybrid HS-Solver optimization algorithm", *Journal of Hydrology*, 478, 63-76, (2013).

Ayvaz, M. T. and Kentel. E., "Identification of the best booster station network for a water distribution system", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141.5, (2014).

Burn, D. H. and Yulianti, J. S., "Waste-load allocation using genetic algorithms", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127.2 121-129, (2001).

Cho, J. H., Ki, S. S., Sung, R. H., "A river water quality management model for optimising regional wastewater treatment using a genetic algorithm", *Journal of Environmental Management*, 73.3, 229-242, (2004).

Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council of 12 August 2013 Amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as Regards Priority Substances in the Field of Water Policy.

Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 on Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy.

Gorelick, S. M., Barbara, E., Irwin, R., "Identifying sources of groundwater pollution: An optimization approach", *Water Resources Research*, 19.3, 779-790, (1983).

Gökçe, Ş., "Su Dağıtım Şebeklerinde Ek Klorlama Planlarının Simülasyon Optimizasyon Modelleri Kullanılarak Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Denizli, (2014).

Güvensel, T., “Ömerli Baraj Gölü Su Kalitesinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çevre Bilimleri Anabilim Dalı, İstanbul, (2006).

Joshi, M. C. and Mougalya, K. M., *Optimization Theory and Practice*, New Delhi: Narosa Publishing House, 283-294, (2004).

Lasdon, L. S., Waren, A. D., “Large scale nonlinear programming”. *Computers & Chemical Engineering*, 7(5), 595-604, (1983).

Mahar, P. S. and Datta, B., "Identification of pollution sources in transient groundwater systems", *Water Resources Management*, 14.3, 209-227, (2000).

Özbayrak, E. and Bakan, G., “Determining of Total Maximum Daily Load on Abdal River Basin of the Mid-Black Sea”, *Ekoloji*, 21(85), 80–88, <https://doi.org/10.5053/ekoloji.2012.859>, (2013).

Ölmez, G., “Yerüstü Su Kaynaklarında Su Kalitesinin İyileştirilmesi için Çevresel Hedeflerin Belirlenmesi”, Uzmanlık Tezi, *Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü*, Ankara, (2014).

Park, R. A., Clough, J. S., AQUATOX (Release 3.1 plus) Modeling Environmental Fate and Ecological Effects in Aquatic Ecosystems, Volume 2: Technical Documentation, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington D.C., (2014).

Rao, S. S., *Engineering Optimization Theory and Practice*, New Jersey: Fourth Edition, 412-422, (2009).

Rao, S. S., “A Computationally Efficient Technique for Source Identification Problems in Three-Dimensional Aquifer Systems Using Neural Networks and Simulated Annealing”, *Environmental Forensics*, 7.3, 233-240, (2006).

Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Numune Alma ve Analiz Metodları Tebliği, Sayı : 27372, (2009).

Sciortino, A., Thomas, C. H., William, W., "Inverse modeling for locating dense nonaqueous pools in groundwater under steady flow conditions", *Water Resources Research*, 36.7, 1723-1735, (2000).

Su, Y., Li, K., Liang, S., Lu, S., et al., "Improved simulation–optimization approach for identifying critical and developable pollution source regions and critical migration processes for pollutant load allocation", *Science of The Total Environment*, 646, 1336-1348, (2019).

Srekanth, J. and Datta, B., "Multi-objective management of saltwater intrusion in coastal aquifers using genetic programming and modular neural network based surrogate models", *Journal of Hydrology*, 393(3-4), 245-256, (2010).

T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Nilüfer Çayı Alt Havzası Su Kalitesi Eylem Planı, Ankara, (2013).

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Küçük Menderes Havzası Kirlilik Önleme Eylem Planı, Ankara, (2016).

T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Küçük Menderes Havzası Koruma Eylem Planı :Nilüfer Çayı Alt Havzası Su Kalitesi Eylem Planı, Ankara, (2013).

T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, <https://osbbs.sanayi.gov.tr/>, 15 Nisan 2019.

Toplu, M. S., "Genel İndirgenmiş Gradyan Metodu İle Eniyileme Çözücüsü Geliştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Türk Hava Kurumu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine ve Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, (2017).

TÜBİTAK MAM., "Havza Koruma Eylem Planlarının Hazırlanması Projesi- Küçük Menderes Havzası Proje Nihai Raporu", 1–519, (2010).

US EPA, Environmental Modeling Community of Practice AQUATOX, <https://www.epa.gov/ceam/aquatox>, 3 Mayıs 2019.

US EPA, Impaired Waters and Total Maximum Daily Loads, <http://water.epa.gov/lawsregs/lawguidance/cwa/tmdl/index.cfm>), 15 Nisan 2019.

Yandamuri, S. R., Srinivasan, K., Bhallamudi, S. M., "Multiobjective optimal waste load allocation models for rivers using nondominated sorting genetic algorithm-II", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132.3, 133-143, (2006).

YSKY, Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği, Tarım ve Orman Bakanlığı. T.C. Resmi Gazete, 28483, 30 Kasım 2012.

Yüzeysel Sular ve Yer altı Sularının İzlenmesine Dair Yönetmelik, Tarım ve Orman Bakanlığı, T.C. Resmi Gazete, 28910, 11 Şubat 2014.





EKLER

9. EKLER

EK A Tepki Matrisinin Hesaplanması İçin Elde Edilen AQUATOX Modeli Sonuçları

Tablo A.1: Noktasal kaynaklardan 100 mg/L deşarj yapılması durumunda elde edilen konsantrasyon değerleri (mg/L)

		<i>ND₁</i>			<i>ND₂</i>			<i>ND₃</i>			<i>ND₄</i>			<i>ND₅</i>		
		KM-19	KM-20	KM-22	KM-19	KM-20	KM-22	KM-19	KM-20	KM-22	KM-19	KM-20	KM-22	KM-19	KM-20	KM-22
NH₃&NH₄	Toplam Amonyum Azotu	25.27	22.43	0.50	0.06	0.09	10.56	0.06	0.09	27.87	0.06	0.09	27.87	0.06	0.09	27.87
	Nitrat Azotu	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03
	Toplam Çözünabilir Fosfor	0.06	0.09	0.02	0.06	0.09	0.02	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03
	Ask. ve Çöz. Organik Madde	0.13	0.21	0.03	0.06	0.09	0.06	0.06	0.09	0.06	0.06	0.09	0.06	0.06	0.09	0.06
NO₃	Toplam Amonyum Azotu	1.40	4.26	0.18	0.15	0.16	1.74	0.15	0.16	0.58	0.15	0.16	0.58	0.15	0.16	0.58
	Nitrat Azotu	26.59	26.55	0.65	0.15	0.16	12.25	0.15	0.16	28.42	0.15	0.16	28.42	0.15	0.16	28.42
	Toplam Çözünabilir Fosfor	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01
	Ask. ve Çöz. Organik Madde	0.15	0.17	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01
TSP	Toplam Amonyum Azotu	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00
	Nitrat Azotu	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00
	Toplam Çözünabilir Fosfor	26.50	26.50	0.65	0.04	0.04	12.28	0.04	0.04	28.42	0.04	0.04	28.42	0.04	0.04	28.42
	Ask. ve Çöz. Organik Madde	0.06	0.07	0.00	0.04	0.04	0.01	0.04	0.04	0.01	0.04	0.04	0.01	0.04	0.04	0.01
TP	Toplam Amonyum Azotu	0.05	0.17	0.09	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08
	Nitrat Azotu	0.05	0.17	0.09	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08
	Toplam Çözünabilir Fosfor	26.50	26.61	0.73	0.05	0.16	12.36	0.05	0.16	28.50	0.05	0.16	28.50	0.05	0.16	28.50
	Ask. ve Çöz. Organik Madde	0.14	0.24	0.08	0.05	0.16	0.11	0.05	0.16	0.19	0.05	0.16	0.19	0.05	0.16	0.19
CBOD₅	Toplam Amonyum Azotu	0.81	1.17	0.33	0.81	1.15	0.31	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32
	Nitrat Azotu	0.81	1.17	0.33	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32
	Toplam Çözünabilir Fosfor	0.81	1.15	0.30	0.81	1.15	0.30	0.81	1.15	0.31	0.81	1.15	0.31	0.81	1.15	0.31
	Ask. ve Çöz. Organik Madde	26.38	25.50	0.89	0.81	1.15	11.71	0.81	1.15	28.24	0.81	1.15	28.24	0.81	1.15	28.24

EK B AQUATOX Modeli ile Elde Edilen Arka Plan Konsantrasyonları

Tablo B.1: AQUATOX modeli ile belirlenen arka plan konsantrasyonları (mg/L)

		<i>ND₁</i>			<i>ND₂</i>			<i>ND₃</i>			<i>ND₄</i>			<i>ND₅</i>		
		KM-19	KM-20	KM-22	KM-19	KM-20	KM-22	KM-19	KM-20	KM-22	KM-19	KM-20	KM-22	KM-19	KM-20	KM-22
NH₃&NH₄	Toplam Amonyum Azotu	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03
	Nitrat Azotu	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03
	Toplam Çözünebilir Fosfor	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03
	Ask. ve Çöz. Organik Madde	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03	0.06	0.09	0.03
NO₃	Toplam Amonyum Azotu	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01
	Nitrat Azotu	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01
	Toplam Çözünebilir Fosfor	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01
	Ask. ve Çöz. Organik Madde	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01	0.15	0.16	0.01
TSP	Toplam Amonyum Azotu	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00
	Nitrat Azotu	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00
	Toplam Çözünebilir Fosfor	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00
	Ask. ve Çöz. Organik Madde	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.00
TP	Toplam Amonyum Azotu	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08
	Nitrat Azotu	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08
	Toplam Çözünebilir Fosfor	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08
	Ask. ve Çöz. Organik Madde	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08	0.05	0.16	0.08
CBOD₅	Toplam Amonyum Azotu	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32
	Nitrat Azotu	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32
	Toplam Çözünebilir Fosfor	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32
	Ask. ve Çöz. Organik Madde	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32	0.81	1.15	0.32

EK C Uygulama Sahası İçin Elde Edilen Tepki Matrisi

Tablo C.1: Uygulama sahası için elde edilen tepki matrisi

		<i>ND₁</i>			<i>ND₂</i>			<i>ND₃</i>			<i>ND₄</i>			<i>ND₅</i>		
		KM-19	KM-20	KM-22	KM-19	KM-20	KM-22	KM-19	KM-20	KM-22	KM-19	KM-20	KM-22	KM-19	KM-20	KM-22
NH₃&NH₄	Toplam Amonyum Azotu	3E-05	3E-05	6E-07	0	0	2E-05	0	0	3E-05	0	0	3E-05	0	0	3E-05
	Nitrat Azotu	1E-13	5E-09	2E-09	0	0	2E-10	0	0	1E-11	0	0	1E-11	0	0	1E-11
	Toplam Çözünebilir Fosfor	1E-13	1E-11	1E-09	0	0	2E-09	0	0	2E-11	0	0	2E-11	0	0	2E-11
	Ask. ve Çöz. Organik Madde	8E-08	1E-07	2E-09	0	0	9E-08	0	0	4E-08	0	0	4E-08	0	0	4E-08
NO₃	Toplam Amonyum Azotu	2E-06	5E-06	2E-07	0	0	4E-06	0	0	6E-07	0	0	6E-07	0	0	6E-07
	Nitrat Azotu	3E-05	3E-05	8E-07	0	0	3E-05	0	0	3E-05	0	0	3E-05	0	0	3E-05
	Toplam Çözünebilir Fosfor	3E-15	2E-13	1E-10	0	0	2E-10	0	0	1E-11	0	0	1E-11	0	0	1E-11
	Ask. ve Çöz. Organik Madde	3E-09	2E-08	8E-10	0	0	1E-08	0	0	7E-10	0	0	7E-10	0	0	7E-10
TSP	Toplam Amonyum Azotu	2E-11	2E-10	3E-10	0	0	2E-10	0	0	6E-12	0	0	6E-12	0	0	6E-12
	Nitrat Azotu	2E-14	3E-10	3E-10	0	0	4E-11	0	0	9E-13	0	0	9E-13	0	0	9E-13
	Toplam Çözünebilir Fosfor	3E-05	3E-05	8E-07	0	0	3E-05	0	0	3E-05	0	0	3E-05	0	0	3E-05
	Ask. ve Çöz. Organik Madde	2E-08	4E-08	5E-10	0	0	2E-08	0	0	8E-09	0	0	8E-09	0	0	8E-09
TP	Toplam Amonyum Azotu	2E-11	1E-08	7E-09	0	0	7E-10	0	0	2E-11	0	0	2E-11	0	0	2E-11
	Nitrat Azotu	3E-14	1E-08	6E-09	0	0	3E-10	0	0	3E-11	0	0	3E-11	0	0	3E-11
	Toplam Çözünebilir Fosfor	3E-05	3E-05	8E-07	0	0	3E-05	0	0	3E-05	0	0	3E-05	0	0	3E-05
	Ask. ve Çöz. Organik Madde	1E-07	1E-07	1E-09	0	0	8E-08	0	0	1E-07	0	0	1E-07	0	0	1E-07
CBOD₅	Toplam Amonyum Azotu	1E-10	4E-08	2E-08	0	0	1E-08	0	0	2E-10	0	0	2E-10	0	0	2E-10
	Nitrat Azotu	2E-14	4E-08	2E-08	0	0	4E-09	0	0	6E-11	0	0	6E-11	0	0	6E-11
	Toplam Çözünebilir Fosfor	3E-14	9E-11	3E-08	0	0	5E-08	0	0	6E-09	0	0	6E-09	0	0	6E-09
	Ask. ve Çöz. Organik Madde	3E-05	3E-05	7E-07	0	0	3E-05	0	0	3E-05	0	0	3E-05	0	0	3E-05

EK D Farklı Deşarj Yükleri İçin Vekil Simülasyon Modeli ile AQUATOX Modeli Sonuçlarının Karşılaştırılması

Tablo D.1: Doğrulama çözümü 2 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları

Deşarj Konsantrasyonu (mg/L)	Noktasal Kaynaklar				
	ND_1	ND_2	ND_3	ND_4	ND_5
Toplam Amonyum Azotu	50	0	0	0	0
Nitrat Azotu	0	100	0	0	0
Toplam Çözünebilir Fosfor	0	0	25	0	0
Çöz. Organik Madde	0	0	0	75	0
Debi (L/g)	8000	4320	10000	10000	10000

Tablo D.2: Doğrulama çözümü 3 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları

Deşarj Konsantrasyonu (mg/L)	Noktasal Kaynaklar				
	ND_1	ND_2	ND_3	ND_4	ND_5
Toplam Amonyum Azotu	15	40	10	14	20
Nitrat Azotu	30	15	20	40	30
Toplam Çözünebilir Fosfor	35	50	35	20	10
Çöz. Organik Madde	5	5	5	5	5
Debi (L/g)	8000	4320	10000	10000	10000

Tablo D.3: Doğrulama çözümü 4 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları

Deşarj Konsantrasyonu (mg/L)	Noktasal Kaynaklar				
	ND_1	ND_2	ND_3	ND_4	ND_5
Toplam Amonyum Azotu	21	38	22	39	14
Nitrat Azotu	24	10	28	31	19
Toplam Çözünebilir Fosfor	50	34	37	21	34
Çöz. Organik Madde	28	13	40	41	40
Debi (L/g)	8000	4320	10000	10000	10000

Tablo D.4: Doğrulama çözümü 5 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları

Deşarj Konsantrasyonu (mg/L)	Noktasal Kaynaklar				
	ND_1	ND_2	ND_3	ND_4	ND_5
Toplam Amonyum Azotu	0	0	22	39	14
Nitrat Azotu	0	0	28	31	19
Toplam Çözünebilir Fosfor	0	0	37	21	34
Çöz. Organik Madde	0	0	40	41	40
Debi (L/g)	8000	4320	10000	10000	10000

Tablo D.5: Doğrulama çözümü 6 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları

Deşarj Konsantrasyonu (mg/L)	Noktasal Kaynaklar				
	ND_1	ND_2	ND_3	ND_4	ND_5
Toplam Amonyum Azotu	35	2	24	26	12
Nitrat Azotu	7	7	6	28	14
Toplam Çözünebilir Fosfor	5	21	4	25	23
Çöz. Organik Madde	14	26	30	9	16
Debi (L/g)	8000	4320	10000	10000	10000

Tablo D.6: Doğrulama çözümü 7 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları

Deşarj Konsantrasyonu (mg/L)	Noktasal Kaynaklar				
	ND_1	ND_2	ND_3	ND_4	ND_5
Toplam Amonyum Azotu	277	315	324	171	198
Nitrat Azotu	421	284	444	278	368
Toplam Çözünebilir Fosfor	302	447	157	424	391
Çöz. Organik Madde	263	447	373	445	213
Debi (L/g)	8000	4320	10000	10000	10000

Tablo D.7: Doğrulama çözümü 8 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları

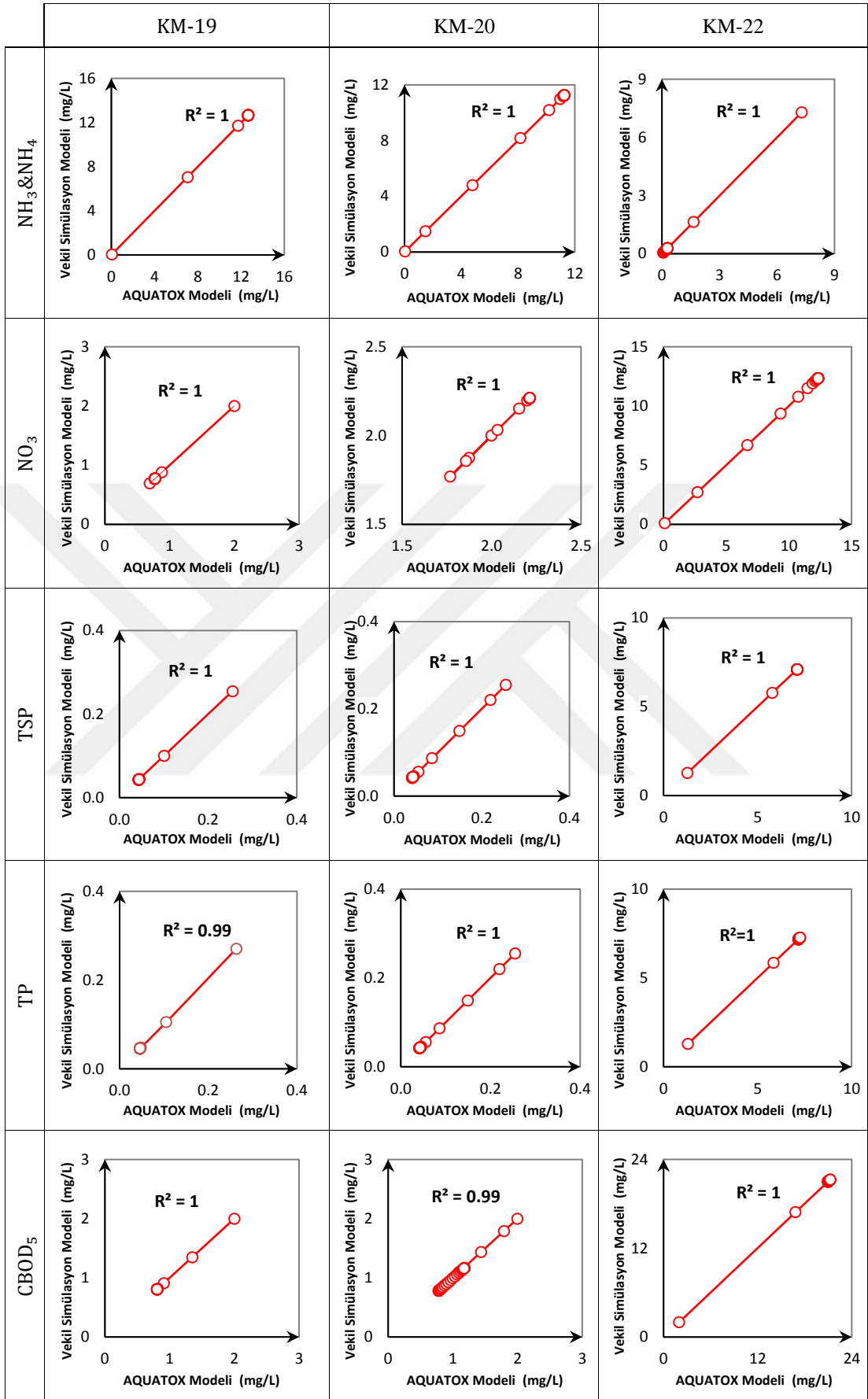
Deşarj Konsantrasyonu (mg/L)	Noktasal Kaynaklar				
	ND_1	ND_2	ND_3	ND_4	ND_5
Toplam Amonyum Azotu	344	375	195	170	239
Nitrat Azotu	482	402	218	473	255
Toplam Çözünebilir Fosfor	254	243	111	398	281
Çöz. Organik Madde	227	279	472	445	489
Debi (L/g)	8000	4320	10000	10000	10000

Tablo D.8: Doğrulama çözümü 9 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları

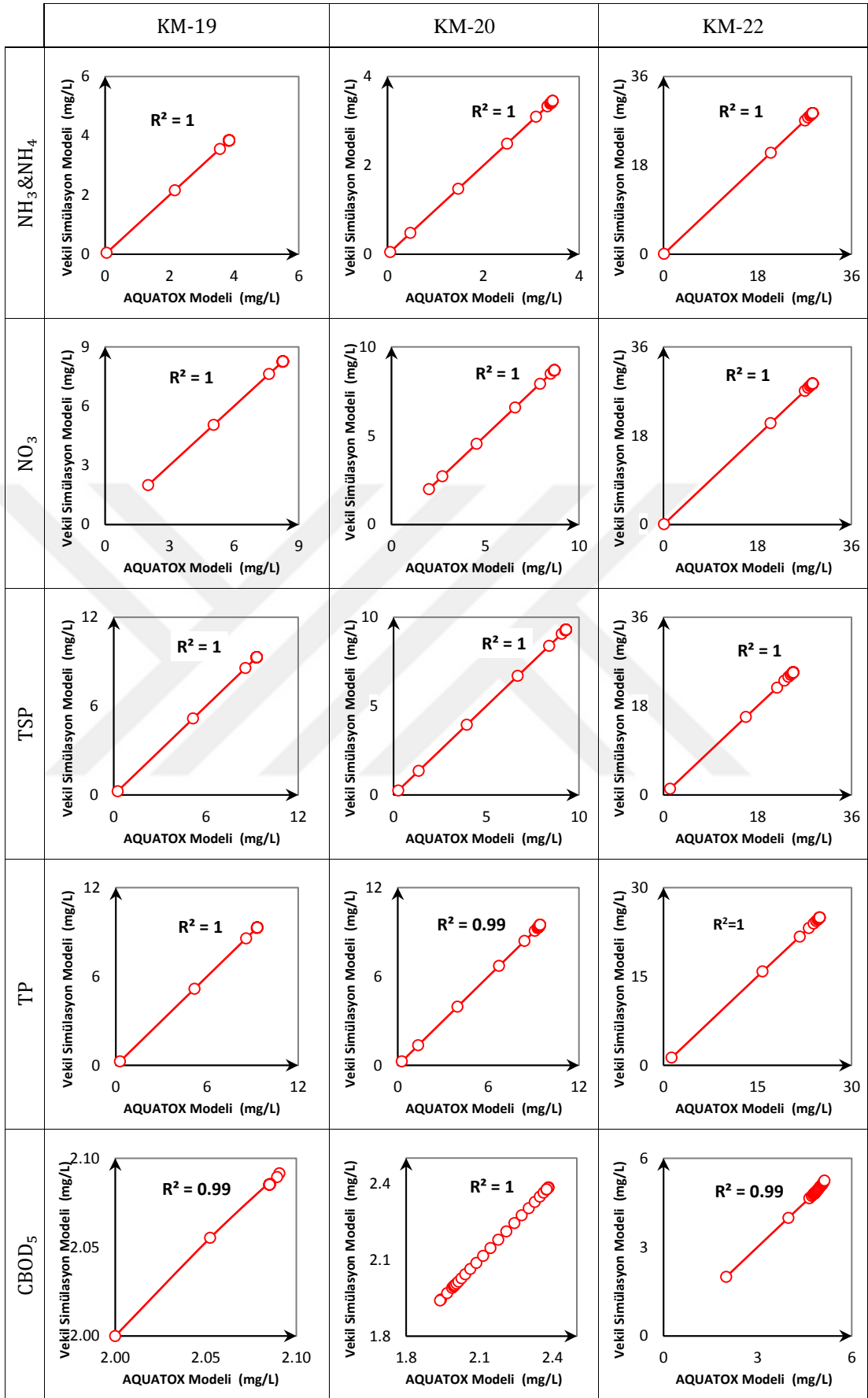
Deşarj Konsantrasyonu (mg/L)	Noktasal Kaynaklar				
	ND_1	ND_2	ND_3	ND_4	ND_5
Toplam Amonyum Azotu	344	375	0	170	239
Nitrat Azotu	482	402	218	473	255
Toplam Çözünebilir Fosfor	254	0	0	0	0
Çöz. Organik Madde	227	279	472	445	489
Debi (L/g)	8000	4320	10000	10000	10000

Tablo D.9: Doğrulama çözümü 10 için deşarj edilen parametre konsantrasyonları

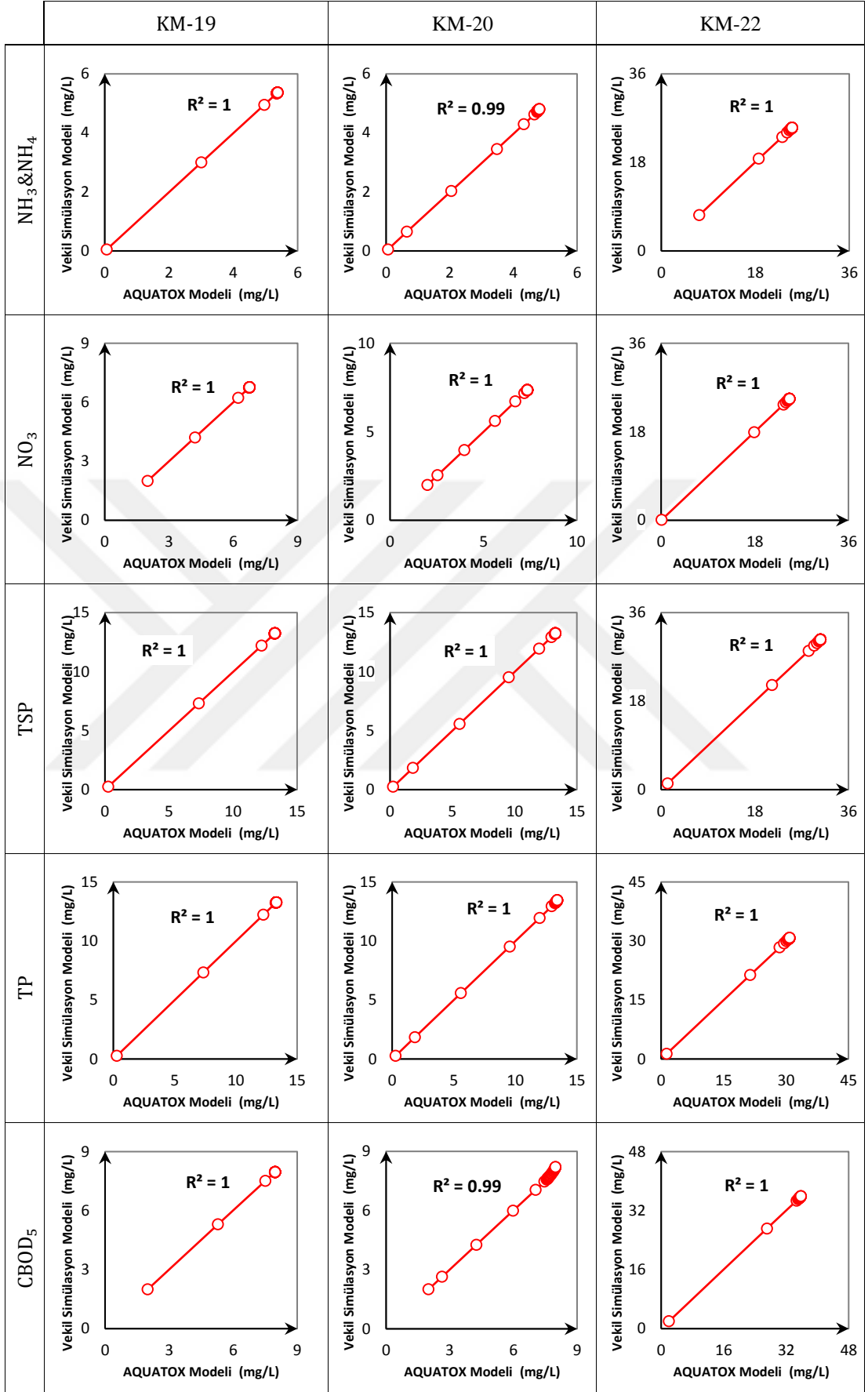
Deşarj Konsantrasyonu (mg/L)	Noktasal Kaynaklar				
	ND_1	ND_2	ND_3	ND_4	ND_5
Toplam Amonyum Azotu	0	100	0	500	200
Nitrat Azotu	0	250	100	120	0
Toplam Çözünebilir Fosfor	0	230	0	0	0
Çöz. Organik Madde	0	240	50	0	100
Debi (L/g)	8000	4320	10000	10000	10000



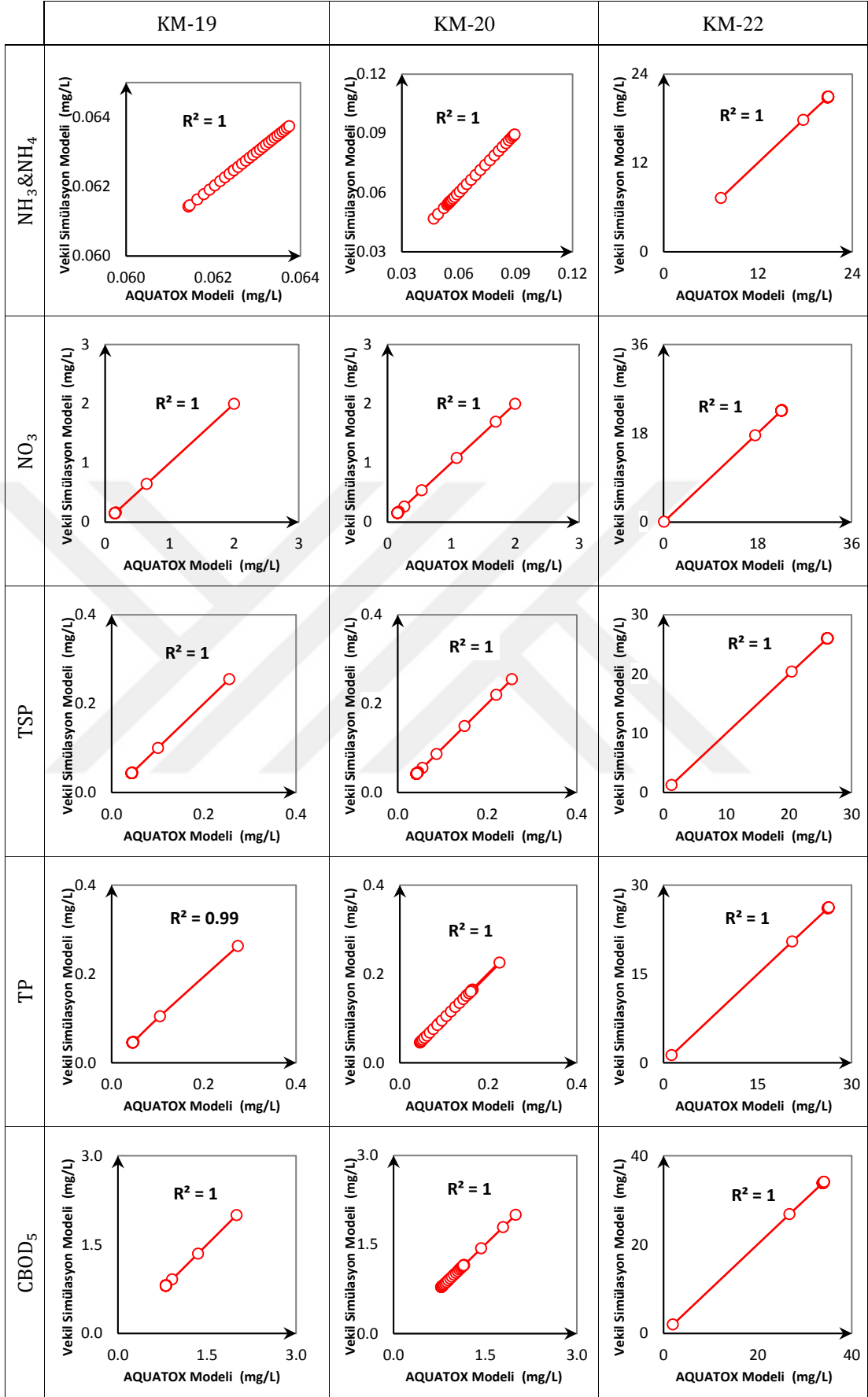
Şekil D.1: Doğrulama Çözümü 2: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması



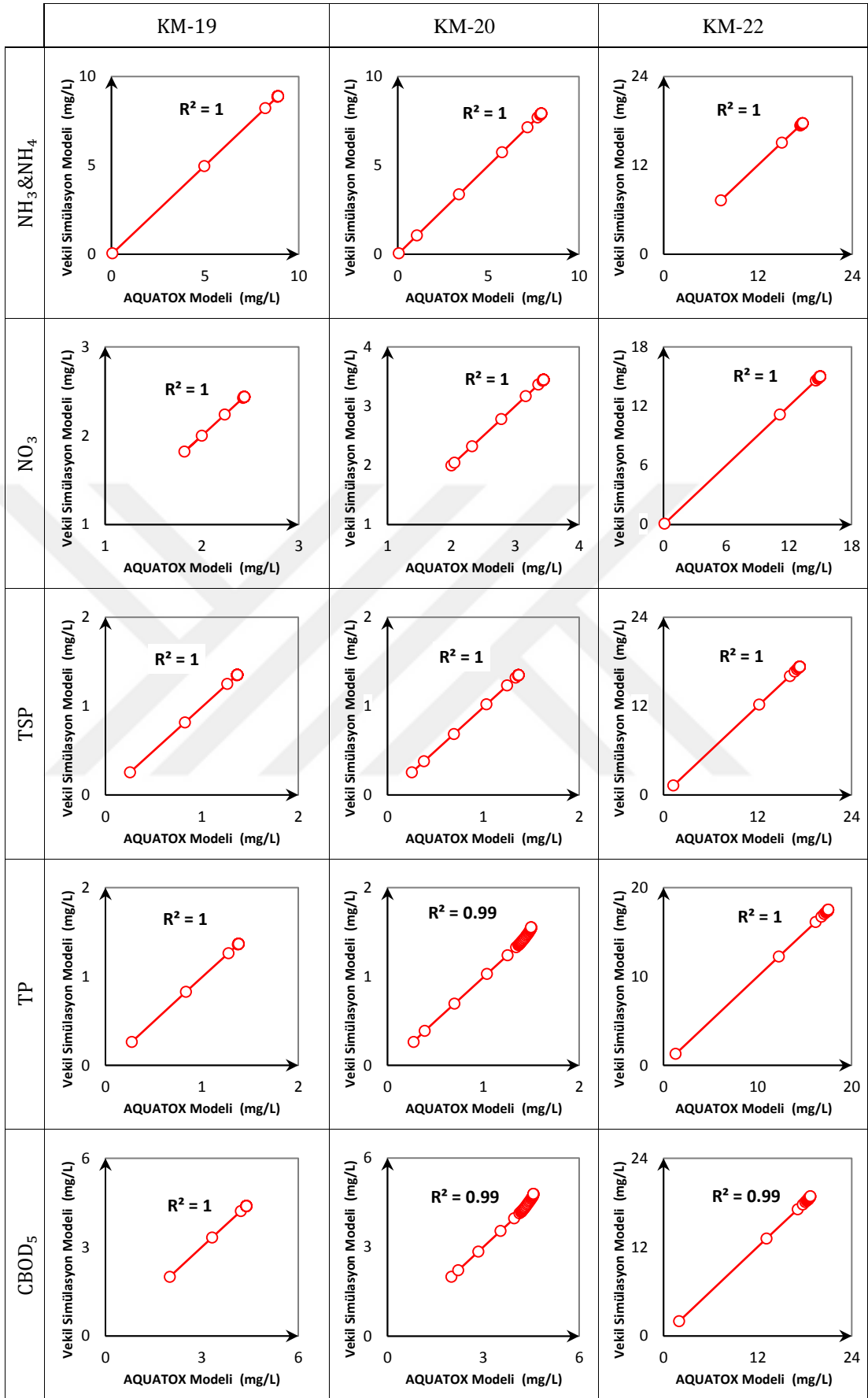
Şekil D.2: Doğrulama çözümü 3: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması



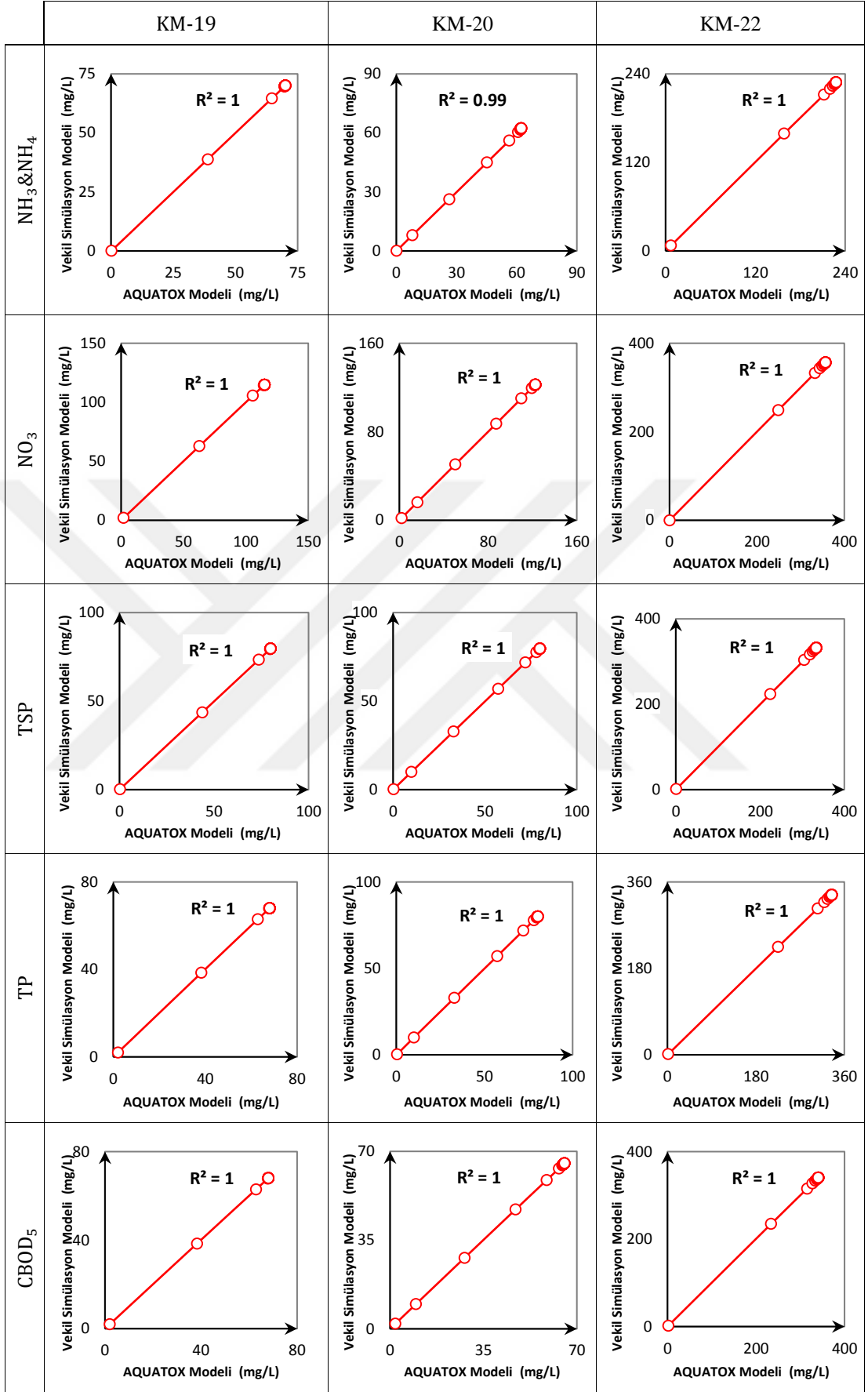
Şekil D.3: Doğrulama çözümü 4: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması



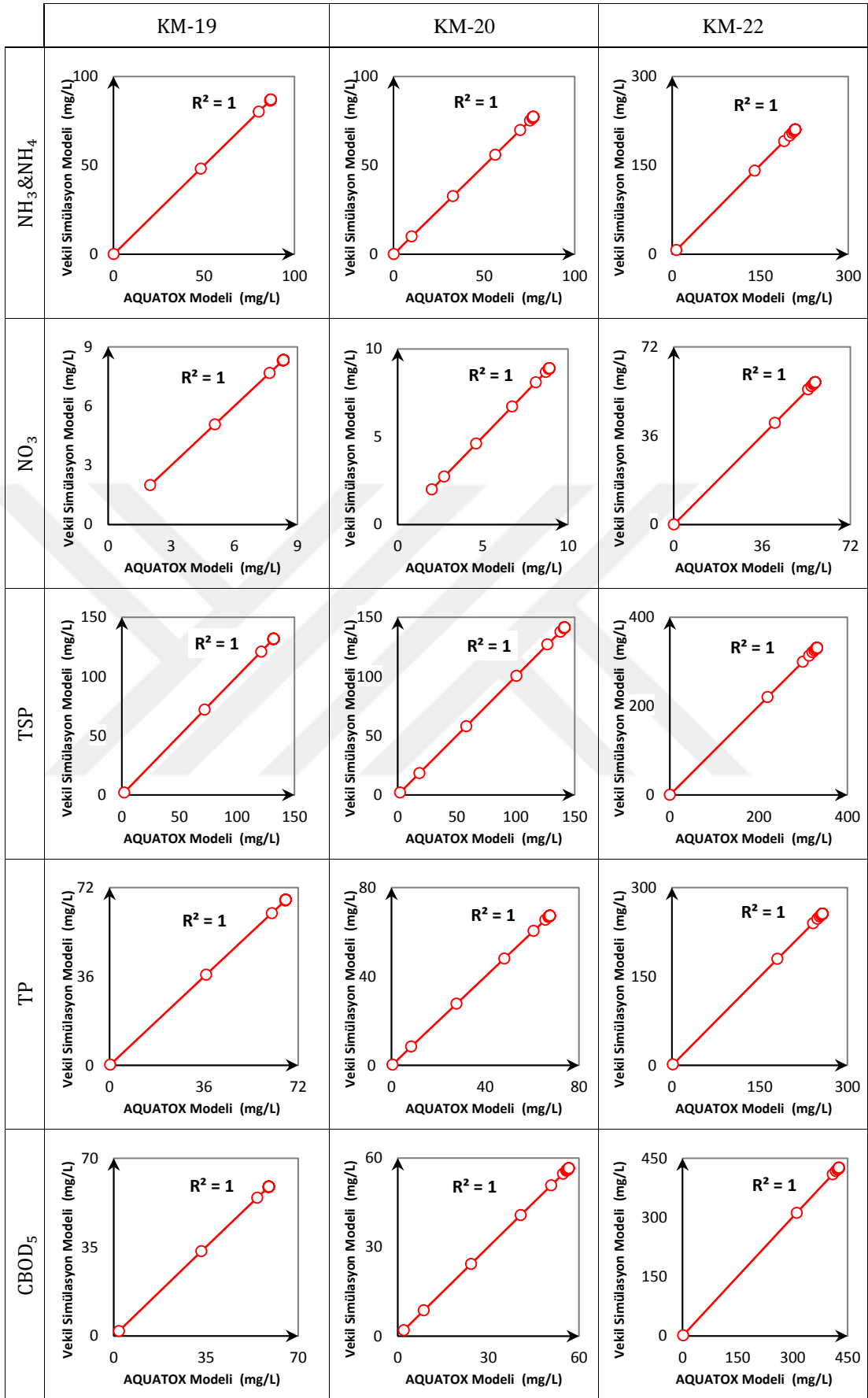
Şekil D.4: Doğrulama çözümü 5: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması



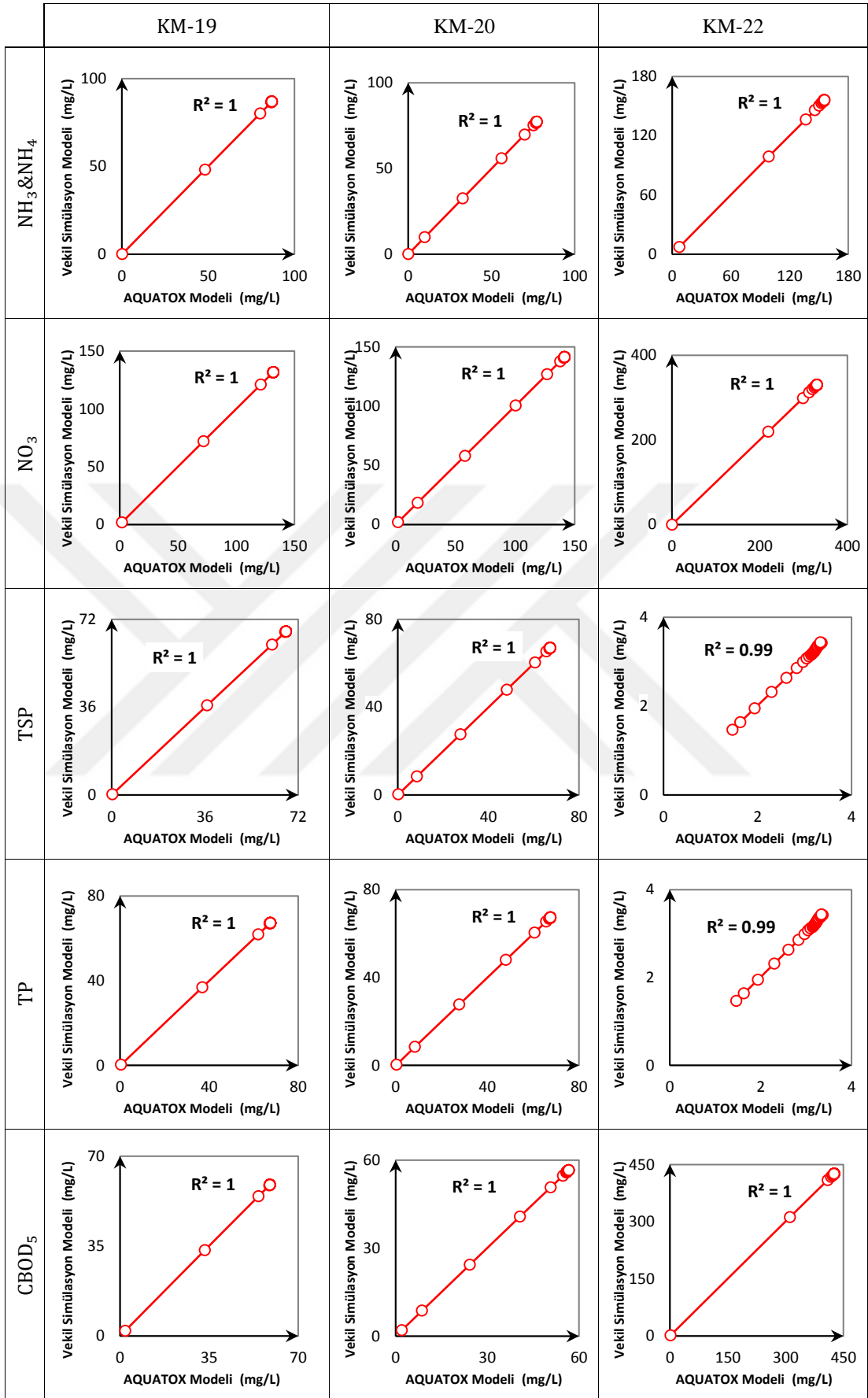
Şekil D.5: Doğrulama çözümü 6: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması



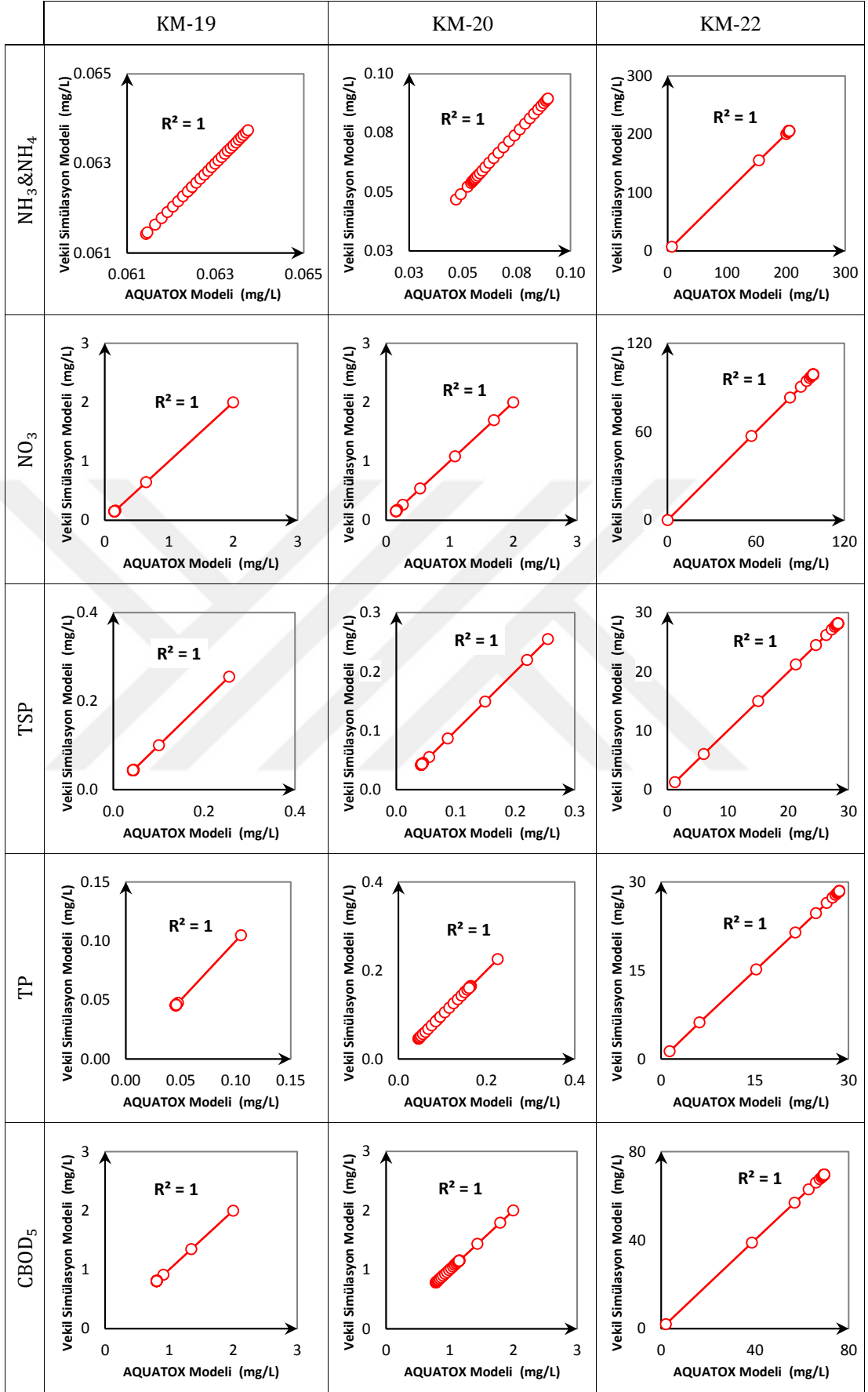
Şekil D.6: Doğrulama çözümü 7: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil D.7: Doğrulama çözümü 8: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil D.8: Doğrulama çözümü 9: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil D.9: Doğrulama çözümü 10: Vekil simülasyon modeli ile AQUATOX modeli sonuçlarının karşılaştırılması

EK E Duyarlılık Analizinde Kullanılan Parametre Kombinasyonları

Tablo E.1: Optimizasyon modelinde kullanılan parametrelerin duyarlılık analizi için oluşturulan kombinasyonlar

Senaryo	B	C_j^{\max}	β_i	Senaryo	B	C_j^{\max}	β_i
1	1	1	0.001	33	100	1	0.001
2	1	1	0.01	34	100	1	0.01
3	1	1	0.1	35	100	1	0.1
4	1	1	1	36	100	1	1
5	1	10	0.001	37	100	10	0.001
6	1	10	0.01	38	100	10	0.01
7	1	10	0.1	39	100	10	0.1
8	1	10	1	40	100	10	1
9	1	100	0.001	41	100	100	0.001
10	1	100	0.01	42	100	100	0.01
11	1	100	0.1	43	100	100	0.1
12	1	100	1	44	100	100	1
13	1	1000	0.001	45	100	1000	0.001
14	1	1000	0.01	46	100	1000	0.01
15	1	1000	0.1	47	100	1000	0.1
16	1	1000	1	48	100	1000	1
17	10	1	0.001	49	1000	1	0.001
18	10	1	0.01	50	1000	1	0.01
19	10	1	0.1	51	1000	1	0.1
20	10	1	1	52	1000	1	1
21	10	10	0.001	53	1000	10	0.001
22	10	10	0.01	54	1000	10	0.01
23	10	10	0.1	55	1000	10	0.1
24	10	10	1	56	1000	10	1
25	10	100	0.001	57	1000	100	0.001
26	10	100	0.01	58	1000	100	0.01
27	10	100	0.1	59	1000	100	0.1
28	10	100	1	60	1000	100	1
29	10	1000	0.001	61	1000	1000	0.001
30	10	1000	0.01	62	1000	1000	0.01
31	10	1000	0.1	63	1000	1000	0.1
32	10	1000	1	64	1000	1000	1

10. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Derya SADAK
Doğum Yeri ve Tarihi : Denizli 13/08/1995
Lisans Üniversite : Pamukkale Üniversitesi
Elektronik posta : deryasadak@sakarya.edu.tr
İletişim Adresi : Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

Yayın Listesi :

•Ayvaz. M. T., Sadak. D., Elçi. A., Ayaz. S., “Optimum allocation of the pollutant distributions based on a linked simulation-optimization approach: Application to the Kucuk Menderes River Basin, 11th World Congress on Water Resources and Environment (EWRA 2019) “Managing Water Resources for a Sustainable Future”, 25-29 June 2019, Madrid, Spain.

•Sadak. D., Gurarslan. G., Ayvaz. M.T., “Gradient Based Analysis of Water Distribution Networks”, 2th Int. Symposium on Water and Wastewater Management, 1029-1036, October 25-27, 2018, Denizli, Turkey.

•Sadak. D., Ayvaz. M.T., “Optimum Identification of the Artificial Neural Network Weights by using Heuristic Optimization Approaches: Application to Seepage Flow Prediction through Earth-Fill Motru Dam (Romania)”, 3rd International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE), April 24-27, 2018, Cesme, Izmir, Turkey.