

Tam Ölçekli Bir İleri Biyolojik Evsel Atıksu Arıtma Tesisinin Matematiksel Modellemesi

Hazal GÜLHAN^{*1}, Mustafa Evren ERŞAHİN¹, Recep Kaan DERELİ¹,
Hale ÖZGÜN¹, Faik Dinçer ERKAN², Özgür ÖZDEMİR², İzzet ÖZTÜRK¹

¹*İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Kampüsü, İstanbul*

²*Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi, Malatya*

Geliş tarihi: 12.02.2018

Kabul tarihi: 25.12.2018

Öz

Atıksu arıtma prosesleri üzerine yürütülen araştırmalarda; atıksu arıtma tesisi tasarımı, farklı çevresel ve işletme şartları altında sistem performansının tahmini, proses iyileştirmesi ve kontrolü gibi birçok farklı amaç için modelleme yaklaşımı kullanılabilir. Bu çalışmanın amacı, nütrient giderimi yapan tam ölçekli bir evsel atıksu arıtma tesisinin matematiksel olarak modellenmesidir. Bu kapsamda, International Water Association (IWA) Aktif Çamur Modeli No 2d (ASM2d) ve General Purpose Simulator (GPS-X) Sürüm 6.5 simülasyonu kullanılmıştır. İncelenen atıksu arıtma tesisine ait işletme şartlarının ve atıksu karakterizasyonunun arıtma performansına etkilerinin belirlenmesi amacıyla farklı senaryolar incelenmiştir. Modelleme çalışması sonucunda giriş azot yükü ve içsel geri devir (IR) oranının çıkış toplam azot (TN) konsantrasyonu üzerindeki etkileri karşılaştırılmış, mevcut durumdaki azot yükünü gidermek üzere 4,4 IR oranı ile çalıştırılan tesisin, 2,5 IR oranı ile çalıştırıldığında da 10 mg/L'nin altında TN deşarj konsantrasyonunu sağlayabileceği görülmüştür. Bununla birlikte, atıksu azot yükü ile denitrifikasyon prosesi hacminin, deşarj TN konsantrasyonuna etkisi karşılaştırılmış ve incelenen atıksu arıtma tesisinde enerji tasarrufu sağlayacak işletme koşulları tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atıksu arıtma tesisi, Denitrifikasyon, Evsel atıksu, Matematiksel modelleme, Nitrifikasyon

Mathematical Modelling of a Full Scale Advanced Biological Municipal Wastewater Treatment Plant

Abstract

Modelling can be applied for several purposes such as wastewater treatment plant design, estimation of system performance under different environmental and operational conditions, process enhancement and control in the studies related with wastewater treatment processes. The objective of this study is to apply a mathematical model to a full-scale municipal wastewater treatment plant. Within this concept, by using International Water Association (IWA) Activated Carbon Model No 2d (ASM2d) and General Purpose Simulator (GPS-X) version 6.5 simulation software, various scenarios were investigated in order to

¹ Sorumlu yazar (Corresponding author): Hazal GÜLHAN, gulhan@itu.edu.tr

determine the effect of operational conditions and wastewater characterization on treatment performance. As a result of modeling studies, the effect of influent nitrogen load and internal recycle (IR) ratio on effluent total nitrogen (TN) concentration were comparatively evaluated and it was concluded that effluent TN concentration below 10 mg/L could still be achieved if IR ratio of the system decreased from 4 to 2.5. In addition to that, the effect of wastewater nitrogen load and denitrification process volume on effluent TN concentration were comparatively evaluated and operational conditions, that provided energy savings, were determined in the investigated wastewater treatment plant.

Keywords: Wastewater treatment plant, Denitrification, Municipal wastewater, Mathematical modeling, Nitrification

1. GİRİŞ

Evsel atıksu kaynaklı kirlilik; doğrudan insan sağlığını etkilemesi ve alıcı ortam ile içme suyu kaynakları için büyük risk oluşturması sebebiyle oldukça önemlidir [1]. Birçok ülkede evsel atıksular, düşük kuvvetli ve hizmet edilen nüfusa bağlı olarak yüksek debide oluşmaktadır [2]. Mevcut durumda, evsel atıksu arıtma tesislerinde enerji kullanımı dünyadaki elektrik enerjisi kullanımının yaklaşık %3'üne denk gelmektedir [3]. Bu açıdan değerlendirildiğinde; son yıllarda evsel atıksu arıtımında yüksek enerji tüketimi olan konvansiyonel sistemler yerine enerji açısından verimli ve kaynak geri kazanımına elverişli sistemler tercih edilmeye başlanmıştır [1].

Biyolojik atıksu arıtma tesisleri fiziksel, kimyasal ve biyolojik proseslerin bir arada uyumlu bir şekilde çalıştığı mühendislik sistemleridir. Atıksu arıtımında oldukça yaygın kullanılan biyolojik prosesler birçok mikroorganizma grubunun faaliyetleri sonucu gerçekleşmekte olup, oldukça karmaşık süreçler içermektedir. Çevre bilimleri ve mühendisliğinde matematiksel modelleme bu süreçlerin daha iyi anlaşılmasını sağlayan önemli bir araçtır. Atıksu arıtma tesislerinde yer alan fiziksel, kimyasal ve biyolojik prosesler için bugüne kadar birçok matematiksel model geliştirilmiştir. Atıksu arıtma prosesleri üzerine yürütülen araştırmalarda aktif çamur modelleri yaygın olarak kullanılmakta olup, bu modeller arasında en çok kullanılanları International Water Association (IWA) çalışma grupları tarafından geliştirilen Aktif Çamur Modeli (ASM) No. 1, 2d ve 3'tür [4]. Bu modeller günümüzde standart modeller olarak kabul edilmekte olup, General Purpose Simulator (GPS-X), Aquasim, Biowin, West, Matlab/

Simulink gibi birçok ticari veya açık kaynak simülasyon yazılımında uygulanmış durumdadır. Aktif çamur modelleri atıksu arıtma tesisi tasarımı, farklı çevresel ve işletme şartları altında sistem performansının tahmini, proses iyileştirmesi ve kontrolü gibi birçok farklı amaç için kullanılabilir. Bu şekilde bilimsel araştırmalar ve laboratuvar çalışmalarında elde edilen bilginin atıksu arıtma sistemlerine transferi kolaylaşmakta, laboratuvar çalışmalarında zaman ve maliyet optimizasyonu yapılabilir ve arıtma tesislerinin farklı dinamik koşullar altındaki performansı sistem riske atılmadan test edilebilmektedir.

Nütrient giderimi yapan atıksu arıtma tesisleri için nitrifikasyon prosesinin modellenmesi ile ilgili gerçekleştirilen ilk çalışmalardan biri 1964 yılında yapılmıştır. Yapılan bu çalışma ile kütle dengesi ve kinetik ilişkiler gibi kavramlar literatüre kazandırılmıştır [5]. Dold ve arkadaşları [6] aktif çamur proseslerinde organik maddenin parçalanması, nitrifikasyon, denitrifikasyon ve oksijen tüketimi süreçlerinin dinamik davranışlarının modellenmesi konusunda çalışmalar gerçekleştirmiştir. Substratın kolay ayrışabilir ve yavaş ayrışabilir olarak iki temel bileşene ayrılması, evsel atıksu arıtma tesislerinin modellenmesi konusunda önemli bir adım olmuştur [6,7]. Günümüzde ise evsel atıksu arıtma tesislerinin modellenmesi, birçok farklı amaç için kullanılmaktadır. Örneğin; Seggelke ve arkadaşları [8], evsel atıksu arıtma tesisinin modellenmesi kapsamına aşırı yağış koşullarının etkisini incelemiştir. Dinamik modelleme çalışmalarında yaşam döngüsü değerlendirmesi entegrasyonu ile evsel atıksuların nütrient geri kazanım potansiyeli tahmin edilebilmektedir [9]. Evsel atıksu arıtma

tesislerinde enerji verimliliğini sağlamak amacıyla tesis bazlı modelleme yaklaşımı ile aktif çamur prosesinin optimizasyonunun yapılması mümkündür [10].

Bu çalışmanın amacı, nütrient giderimi yapan tam ölçekli bir evsel atıksu arıtma tesisinin matematiksel olarak modellenmesidir. Bu kapsamda, modelleme bazlı yaklaşım ile incelenen atıksu arıtma tesisine ait atıksu ve deşarj karakterizasyonu istatistiksel olarak incelenmiştir. Model kalibrasyonu ve doğrulaması çalışmaları gerçekleştirilmiş ve doğrulanan model parametreleri kullanılarak farklı senaryolar için atıksu arıtma tesisinin performansı ortaya konmuştur.

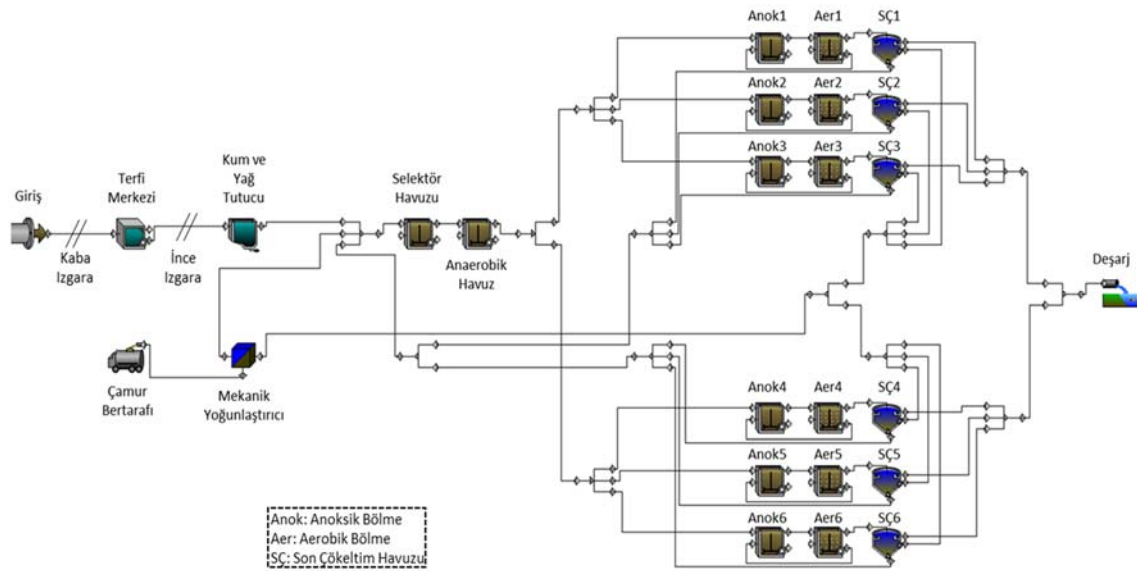
2. MATERYAL VE METOT

2.1. İncelenen Atıksu Arıtma Tesisi

İncelenen ileri biyolojik atıksu arıtma tesisi (İBAAT) üç kademeli olarak tasarlanmış olup, 2004 yılında devreye giren ilk kademesi 720.000 eşdeğer nüfus kapasitelidir [11]. Tesisin tasarımında kullanılan atıksu kirlilik yükleri ve tesise ait akım şeması sırasıyla Çizelge 1 ve Şekil 1'de verilmektedir. Tesis, biyolojik besi maddesi (azot ve fosfor) giderimi sağlayacak şekilde klasik A²O konfigürasyonuna sahiptir. Tesis mevcut durumda evsel atıksuları Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği Tablo 21.4'e uygun olacak şekilde arıtılarak deşarj etmektedir [12].

Çizelge 1. İncelenen İBAAT tasarım debisi ve tasarıma özgü atıksu kirlilik yükleri

Parametre	Birim	2010 (1. Kademe)	2020 (2. Kademe)	2030 (3. Kademe)
Pik kuru hava debisi	m ³ /gün	201,600	268,800	336,000
Pik yağışlı hava debisi	m ³ /gün	432,000	576,000	720,000
Askıda katı madde (AKM) yükü	kg/gün	37,800	67,200	84,000
Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) yükü	kg/gün	64,800	115,200	114,000
Biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ ₅) yükü	kg/gün	32,400	57,600	72,000
Toplam azot (TN) yükü	kg/gün	5,940	10,560	13,200
Toplam fosfor (TP) yükü	kg/gün	972	1,728	2,160



Şekil 1. İncelenen İBAAT'nin model bazlı proses akım şeması

Tesiste atıksu, kaba ızgaraya iki ayrı kolektör ile ulaşmakta olup terfi merkezi ile ince ızgaraya pompalanmaktadır. İnce ızgaradan geçen atıksu kum ve yağ tutucuya iletilmekte ve akabinde 536 m³ hacimli selektör havuzuna ulaşmaktadır. Selektör havuzunda geri devir çamuru ile birleşen atıksu, fosfor salımının gerçekleştiği 18.610 m³ hacmindeki anaerobik havuza geçmektedir. Ardından atıksu akımı paralel kollara ayrılmakta ve her biri 28.328 m³ hacminde 6 adet havalandırma havuzuna dağıtılmaktadır. Havalandırma havuzlarında aerobik bölgeden anoksik bölgeye içsel geri devir (IR) yapılmakta olup, IR oranı 4,4'tür. Anoksik bölgenin toplam havalandırma havuzu hacmine oranı (V_d/V) 0,2'dir. Akım havalandırma havuzlarının ardından her biri 2.380 m² yüzey alanına sahip olan 6 adet son çökeltim tankına ulaşmakta ve burada çamur ile arıtılmış su birinden ayrılmaktadır. Arıtılmış su baraj gölüne deşarj edilmektedir. Son çökeltim tanklarında çöken aktif çamur, çamur geri devir havuzuna aktarılmakta ve buradan selektör havuzuna çamur geri devri yapılmaktadır. Fazla çamur ise mekanik belt susuzlaştırıcıda susuzlaştırıldıktan sonra bertaraf edilmektedir.

2.2. Modelleme Çalışması

Çalışmada Hydromantis Firması tarafından geliştirilen GPS-X Sürüm 6.5 simülasyon yazılımı kullanılmıştır [13]. GPS-X yazılımı biyolojik atıksu arıtma tesislerinin matematiksel modellenmesi amacıyla en sık olarak kullanılan ASM1, ASM2d, ASM3, Mantis2 ile Mantis3 modellerini ön tanımlı olarak içermektedir. Yazılımdaki çeşitli model kütüphaneleriyle oluşturulan proses akım şemaları üzerinden, tesislerin performansı kararlı durum ve dinamik koşullar için simüle edilebilmektedir.

İncelenen İBAAT, IWA Aktif Çamur Modeli No 2d (ASM2d) ile modellenmiştir [4]. ASM2d modeli atıksularda biyolojik azot fosfor giderimi sağlayan aktif çamur proseslerinin matematiksel olarak modellenmesi amacıyla geliştirilmiştir. Model 19 adet durum değişkeni ve 21 adet biyolojik/kimyasal proses içeren oldukça karmaşık bir yapıdadır [4]. ASM2d modeli büyük ölçekli evsel atıksu arıtma tesislerinin modellenmesinde yaygın bir şekilde

kullanılmış olup, sistem performanslarının tahmininde başarılı sonuçlar elde edilmiştir [14-16].

2.3. Veri Analizi

Tesis işletmesi tarafından bir yıl boyunca izlenen giriş atıksu ve deşarj suyu karakterizasyonlarına ait parametreler öncelikle istatistiksel açıdan analiz edilmiş olup, veri setine aykırı olan değerler değerlendirme dışı tutulmuştur. İncelenen tesisin proses akım şeması GPS-X yazılımında oluşturulmuştur. İlk iki ayda sistemin işletiminde bazı değişiklikler yapıldığından, bu döneme ait veriler incelemeye dahil edilmemiş, çalışma 10 aylık veri (0-305 gün aralığı) üzerinden gerçekleştirilmiştir. Model parametre setindeki parametreler veri setinin ilk 180 günlük kısmı ile kalibre edilmiştir. Model doğrulama aşamasında ise kalibre edilen model 181-305 günleri arasındaki veri seti ile test edilmiş ve sonuçların uyumluluğu incelenmiştir.

Tesisin çamur yaşı ortalama 21 gün olarak tasarlanmıştır. Tesisin son çökeltim havuzları 0-147 gün aralığında 6 adet, 148-233 gün aralığında 5 adet, 234-263 gün aralığında 4 adet ve 264-305 gün aralığında 5 adet çalıştırılarak işletilmiştir. İşletmeye bağlı değişen son çökeltim tanklarının toplam yüzey alanı Çizelge 2'de verilmektedir.

Tesiste atıksu debisi her gün; KOİ, AKM, pH ve sıcaklık parametreleri haftada 5 gün; BOİ₅ parametresi haftada 3 gün; TN, amonyum azotu (NH₄-N), nitrit azotu (NO₂-N) ve TP parametreleri ise haftada 1 gün ölçülmüştür. İncelenen İBAAT'ye ait giriş atıksuyunun ve çıkış suyunun karakterizasyonları sırasıyla Çizelge 3 ve Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 2. İşletmeye bağlı değişen son çökeltim tanklarının toplam yüzey alanı

Zaman aralığı (gün)	Son çökeltim tanklarının toplam yüzey alanı (m ²)
0-147	14255
148-233	11879
234-263	9503
264-305	11879

Tesisin atıksu karakterizasyon parametreleri ve tanımlanmıştır. Kullanılan model ile uyumlu giriş dönensel olarak değişen son çöktürme tank sayısı atıksu karakterizasyonu Çizelge 5'te verilmiştir. ile ilgili bilgiler dinamik girdi olarak modele

Çizelge 3. 0-305 gün arasındaki işletme dönemi için giriş atıksu karakterizasyonu

Parametre	Birim	Ortalama	Standart sapma	Medyan	Minimum	Maksimum	Veri adedi
Debi	m ³ /gün	122.216	22.789	122.000	60.000	165.000	194
KOİ	mg/L	384	111	370	177	935	186
BOİ	mg/L	164	45	161	45	258	84
BOİ/KOİ	-	0,43	0,11	0,43	0,13	0,64	80
AKM	mg/L	197	68	188	93	572	186
Uçucu Askıda Katı Madde (UAKM)	mg/L	171	45	164	83	378	179
UAKM/AKM	-	0,90	0,06	0,91	0,63	0,99	178
TN	mg/L	46,8	19,2	62,2	21,2	76,5	45
NH ₄ -N	mg/L	28,9	9,3	33,0	12,6	44,7	35
NH ₄ -N/TN	-	0,62	0,03	0,62	0,44	0,78	186
TP	mg/L	5,1	0,7	5,1	3,2	6,5	39
pH	-	7,7	0,2	7,8	7,1	8,0	191
Sıcaklık	°C	19	5	18	9	27	195

Çizelge 4. 0-305 gün arasındaki işletme dönemi için çıkış suyu karakterizasyonu

Parametre	Birim	Ortalama	Standart sapma	Medyan	Minimum	Maksimum	Veri adedi
KOİ	mg/L	32	16	29	11	112	178
BOİ	mg/L	9	5	9	1	23	92
AKM	mg/L	14	14	9	2	84	177
UAKM	mg/L	10	11	6	1	63	177
TN	mg/L	7,9	2,0	7,5	4,8	13,1	38
NH ₄ -N	mg/L	0,4	0,5	0,2	0,1	2,2	35
NO ₂ -N	mg/L	0,2	0,3	0,1	0,0	1,2	35
Nitrat Azotu (NO ₃ -N)	mg/L	6,3	1,5	6,1	4,0	10,2	32
TP	mg/L	2,5	0,8	2,4	1,2	4,7	59

Çizelge 5. ASM2d modeli ile uyumlu giriş atıksu karakterizasyonu

Gösterim	Açıklama	Oran (%)
skoi/tkoi	Çözünmüş KOİ/KOİ	37
xkoi/tkoi	Partiküler KOİ/KOİ	63
si/tkoi	Çözünmüş inert KOİ/KOİ	5
ss/tkoi	Biyolojik olarak ayrışabilen çözünmüş KOİ/KOİ	32
xi/tkoi	Partiküler inert KOİ/KOİ	16
xs/tkoi	Biyolojik ayrışabilen partiküler KOİ/KOİ	48
tboi/tkoi	BOİ ₅ /KOİ	52
uakm/akm	UAKM/AKM	92
stkn/tn	Çözünmüş toplam Kjeldahl azotu (TKN)/TKN	63
stp/tp	Çözünmüş fosfor/TP	68

2.4. Senaryo Analizi

Model kalibrasyon ve doğrulama çalışmalarını takiben işletme şartları ve atıksu karakterizasyonunun tesis performansı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla farklı senaryo çalışmaları yapılmıştır. İncelenen senaryolar aşağıda açıklanmıştır:

- **Senaryo 1: Atıksu azot yükü ile IR oranının deşarj TN konsantrasyonu üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması:**

Senaryo 1’de, tesise gelen atıksu azot yükünün %20, %40 ve %60 oranında artmasının ve pompaların IR oranı 1, 2, 3 ve 4,4 olacak şekilde çalıştırılmasının deşarj TN konsantrasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmadaki amaç, artan azot yükünü karşılayabilecek optimum IR oranının 16 farklı simülasyon sonucundan yararlanılarak tespit edilmesidir.

- **Senaryo 2: Atıksu azot yükü ile V_d/V oranının deşarj TN konsantrasyonu üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması:**

Senaryo 2’de, tesise gelen atıksu azot yükünün %20, %40 ve %60 oranında artmasının ve biyolojik havuzlardaki havalandırıcılar ayarlanarak aerobik ve anoksik bölge hacimlerinin değiştirilmesiyle elde edilen V_d/V oranının 0,2, 0,3, 0,4 ve 0,5 olarak değişmesinin deşarj TN konsantrasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmadaki amaç, artan azot yükünü karşılayabilecek optimum V_d/V oranının 16 farklı simülasyon sonucundan yararlanılarak tespit edilmesidir.

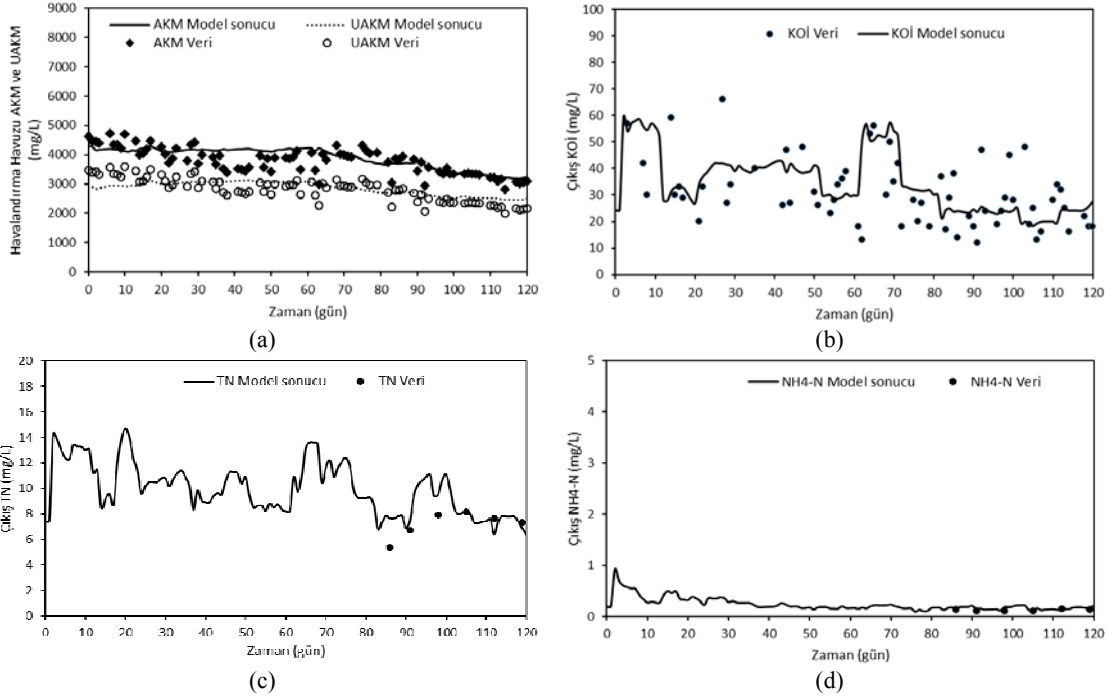
Çizelge 6. Kalibre edilen kinetik katsayılar

Kinetik Katsayı	Birim	Ön Tanımlı Değer	Kalibrasyon sonucu elde edilen değer
Ototrofik bakteri çoğalma hızı	1/gün	1,0	1,5
Ototrofik bakteri ölüm hızı	1/gün	0,15	0,1
Heterotrof bakterinin anoksik şartlarda çoğalma hızını yavaşlatma faktörü	-	0,8	0,6
Nitrat için yarı doyumluk katsayısı	mg N/L	0,5	0,9

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Kalibrasyon Sonuçları

ASM2d modeli oldukça karmaşık bir model olup, bir aktif çamur prosesinde gerçekleşen biyokimyasal reaksiyonlar birçok stokiometrik ve kinetik parametre ile ifade edilmektedir. Model parametrelerinin kalibrasyonu iterasyon temelli bir işlemdir. Model sonuçları üzerinde en çok etkisi olan parametrelerin belirlenmesi ve özellikle bu parametrelerin kalibre edilmesi gerekmektedir. Örneğin; Boontian [17] ASM2d modeli ile gerçekleştirdiği duyarlılık analizi çalışmasında heterotrofik ve ototrofik mikroorganizmalar için en önemli parametrelerin çoğalma ve ölüm hızları olduğunu belirlemiştir. Uygun parametrelerin seçimi ile minimum sayıda parametre kullanılarak model sonuçlarının gerçek ölçümler ile uyumu artırılabilir. Bu çalışmada da simülasyon sonuçları üzerinde en çok etki eden minimum sayıda kinetik parametre, havalandırma havuzundaki UAKM ve AKM konsantrasyonu model çıktılarına gerçek verilerle örtüştürmek üzere kalibre edilmiştir (Çizelge 6). Kinetik parametreler dışında çamur çökme özellikleri (Çamur hacim indeksi (SVI) ve çökme verimi parametresi) dinamik olarak kalibre edilmiştir. Havalandırma havuzundaki UAKM ve AKM konsantrasyonlarına ait model verileri gerçek verilerle örtüştürüldükten sonra tesisin çıkış suyunda ölçülen KO_2 , TN ve NH_4-N parametreleri ile uyumu Şekil 2’de verilmektedir. Kalibrasyon sonrasında tesisin çamur yaşı hesaplanmış ve 39-94 gün aralığında (ortalama 60 gün) değiştiği görülmüştür. Tesisin, tasarım çamur yaşından (21 gün) oldukça yüksek bir aralıkta işletildiği sonucuna varılmıştır.



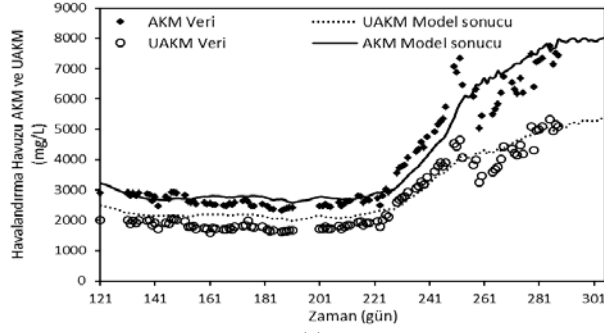
Şekil 2. Kalibrasyon aşamasında elde edilen simülasyon sonuçları ve tesis çıkış suyundaki (a) AKM ve UAKM, (b) KOİ, (c) TN ve (d) NH₄-N konsantrasyonları

3.2. Modelin Doğrulaması

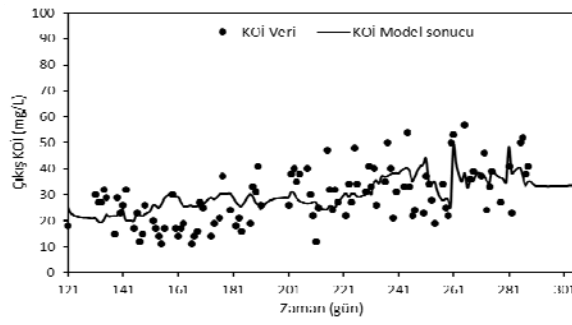
Model doğrulama aşamasında kalibre edilen parametreler, 121-305 günleri aralığında tesisten elde edilen veriler için test edilmiştir. Havalandırma havuzundaki UAKM ve AKM ile tesis çıkış suyunda ölçülen KOİ, TN ve NH₄-N konsantrasyonları ile doğrulama aşamasında elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 3'te verilmektedir. Kalibre edilen modelin performansını belirlemek üzere; havalandırma havuzu UAKM ve AKM konsantrasyonları için simülasyon (model) sonuçları ile ölçüm sonuçlarının uyumu; mutlak rölatif hatalar ortalaması kullanılarak değerlendirilmiştir. Model sonuçları ile ölçülmüş verilerin arasındaki mutlak rölatif hataların ortalaması %10'dan daha düşük ise, model yüksek doğrulukta; %10- %30 aralığında ise, orta doğrulukta; %30'dan fazla ise model sonuçlarının sistemin genel niteliğini ortaya koyduğu takdirde kalitatif olduğu kabul edilmiştir [18]. Havalandırma havuzundaki UAKM ve AKM konsantrasyonları için model ve ölçüm sonuçları

arasındaki mutlak rölatif hatalar ortalaması kalibrasyon adımında %10, doğrulama adımında ise %12'dir. Bu sonuçlara göre, söz konusu parametreler için modelin kalibrasyon adımında yüksek doğrulukta ve doğrulama adımında ise orta doğrulukta olduğu tespit edilmiştir. Çıkış suyu KOİ konsantrasyonu için ise mutlak rölatif hatalar ortalaması kalibrasyon adımı için %35, doğrulama aşaması için %50'dir. Çıkış suyundaki KOİ konsantrasyonu ölçüm verilerin oldukça dağınık olmasına rağmen, model sonuçlarının veri eğilimine uyumlu olduğu ve sistemin genel davranışını temsil ettiği düşünülmektedir. Çıkış suyunda TN parametresi için ise kalibrasyon ve doğrulama adımında mutlak rölatif hatalar ortalaması veri azlığı nedeniyle anlamlı sonuç vermemektedir. Ancak doğrulama adımında model sonuçlarının veri eğilimine uyumlu olduğu görülmektedir. Tesiste özellikle yılın sonuna doğru sıcaklıkların düşmesi ile birlikte çıkış suyunda NH₄-N ve TN konsantrasyonlarında artışlar gözlenmiştir. Model bu dinamik değişimleri başarılı bir şekilde simüle edebilmiştir.

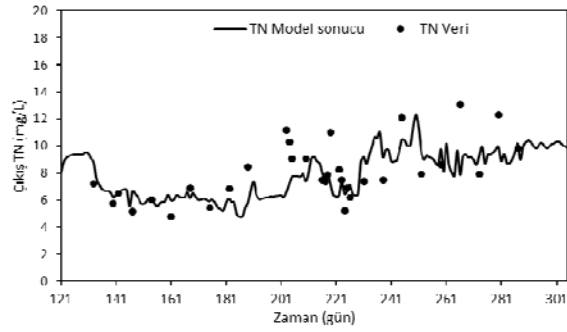
Tam Ölçekli Bir İleri Biyolojik Evsel Atıksu Arıtma Tesisinin Matematiksel Modellemesi



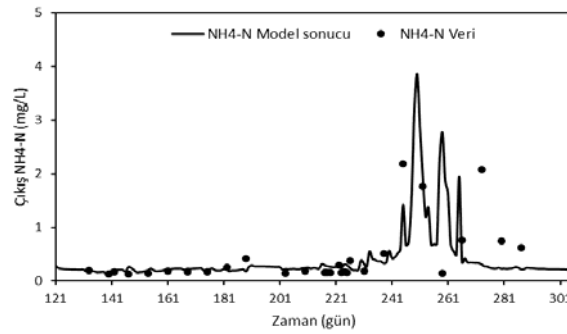
(a)



(b)



(c)



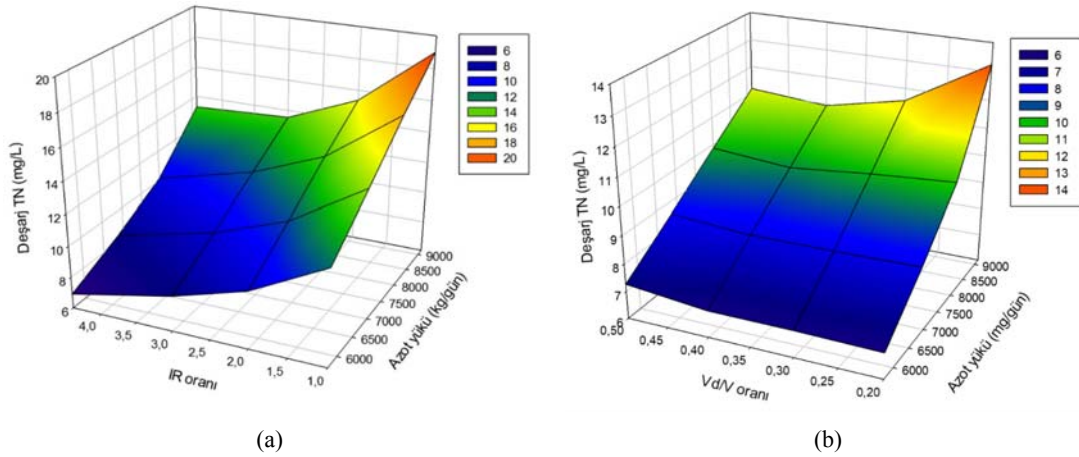
(d)

Şekil 3. Modelin doğrulanması aşamasında elde edilen simülasyon sonuçları ve tesis çıkış suyundaki (a) AKM ve UAKM, (b) KOİ, (c) TN ve (d) NH₄-N konsantrasyonları

3.3. Senaryo Analizi

Doğrulan model ile tesis işletme şartları ve atıksu karakterizasyonunun çıkış suyu TN konsantrasyonuna etkisi farklı senaryolar için incelenmiştir. Tesis mevcut durumda SKKY Tablo 24.1'e tabi olup, TN ve TP parametreleri için bir deşarj sınırlaması bulunmamaktadır. Ancak, tesis bu parametreleri de yüksek giderme verimleri ile artılabilmektedir. Gelecekte, özellikle Kentsel

Atıksu Arıtımı Yönetmeliği (KAAY)'ne tabi olunması durumunda azot parametresi için bir sınırlama getirilebilecektir [19]. Dolayısıyla, tesisin optimum işletme şartlarının belirlenmesi gerekmektedir. Senaryo 1'de atıksu azot yükü ve IR'nin, deşarj TN konsantrasyonu üzerindeki etkileri, Senaryo 2'de ise atıksu azot yükü ve V_d/V oranının deşarj TN konsantrasyonu üzerindeki etkileri incelenmiş ve sonuçlar Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Çalışmada incelenen senaryolar: (a) Senaryo 1: Deşarj TN konsantrasyonuna etkileri bakımından atıksu azot yükü ve IR oranının karşılaştırılması, (b) Senaryo 2: Deşarj TN konsantrasyonuna etkileri bakımından atıksu azot yükü ve V_d/V oranı karşılaştırılması

Şekil 4 (a)'da artan atıksu azot yükü ile deşarj TN konsantrasyonunun arttığı görülmektedir. Atıksu azot yükünün 6.000 kg/gün olduğu mevcut durum için farklı IR oranlarının deşarj TN konsantrasyonu üzerindeki etkisi incelendiğinde; en düşük deşarj TN konsantrasyonunun (6,9 mg N/L) IR oranı 4,4 iken gerçekleştiği, ancak IR oranı 2,5 olduğunda dahi KAAY'de 100.000 eşdeğer nüfusun üzerindeki tesisler için belirtilen 10 mg/L TN deşarj standardının sağlanabildiği (deşarj TN konsantrasyonu 8,8 mg N/L) görülmektedir. IR oranı 2,5 olduğunda, atıksu azot yükü 6.500 kg/gün'e kadar artış gösterse de tesisin TN standardını sağlayabileceği tahmin edilmektedir. Senaryo 1 incelendiğinde, tesis IR oranı 4,4 yerine 2,5 olacak şekilde çalıştırıldığında, deşarj standardı sağlanarak içsel geri devir pompalarının daha az çalıştırılmasına bağlı olarak enerji tasarrufu

sağlanabileceği sonucuna varılmaktadır. Ayrıca, tesiste otomasyon sistemi kullanılarak özellikle debi ve yükün azaldığı gece saatlerinde içsel geri devir debisinin azaltılması suretiyle enerji tasarrufu sağlanabileceği öngörülmektedir.

Senaryo 2'de, atıksu azot yükü ile V_d/V oranının, deşarj TN konsantrasyonu üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır (Şekil 4 (b)). Artan atıksu azot yükü ile deşarj TN konsantrasyonunun artacağı ancak artan V_d/V oranı ile TN standardının sağlanabileceği görülmektedir. Atıksu azot yükünün 6.000 kg/gün olduğu mevcut durum için farklı V_d/V oranlarının deşarj TN konsantrasyonu üzerindeki etkileri incelendiğinde; en düşük deşarj TN konsantrasyonunun (6,9 mg N/L) V_d/V oranı 0,2 olduğunda gerçekleştiği, ancak V_d/V oranı 0,5 olduğunda da deşarj standardının sağlanacağı

(deşarj TN konsantrasyonu 7,3 mg N/L) görülmektedir. V_d/V oranı 0,5 olduğunda, atıksu azot yükü 8.000 kg/gün'e kadar artış gösterse de tesisin TN standardını sağlayabileceği tahmin edilmektedir. Daha yüksek azot yüklerinde azalan nitrifikasyon hacmine bağlı olarak TN konsantrasyonunun standardın bir miktar üzerinde kalabileceği tahmin edilmektedir. Ancak atıksu azot yükünün 9.000 kg/gün civarlarında olduğu durumlarda sistem 0,4 V_d/V oranı ile KAAV limitlerini sağlayabilecektir. Senaryo 2 incelendiğinde, tesiste V_d/V oranı 0,2 yerine 0,5 olduğunda, havalandırma enerjisi ihtiyacının azalacağı ve ileride sıkılaşabilecekdeşarj standartlarının da sağlanabileceği sonucuna varılmaktadır.

4. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada, biyolojik nütrient giderimi sağlayan 720.000 eşdeğer nüfus kapasiteli bir atıksu arıtma tesisi ASM2d modeli kullanılarak kalibre edilmiş ve matematiksel olarak modellenmiştir. Tesis mevcut durumda tabi olduğu SKKY Tablo 24.1'e göre çıkış suyu kalitesi açısından azot standardına bağlı değildir. Ancak gelecekte KAAV'ye göre 10 mg/L TNdeşarj konsantrasyonu limitine tabi olma durumu söz konusudur. Bu nedenle tesiste giriş azot yükü, IR ve V_d/V oranlarının, çıkış suyundaki TN konsantrasyonu üzerindeki etkilerini belirlemek üzere iki farklı senaryo oluşturulmuş ve tesisindeşarj standardını sağlarken aynı zamanda minimum enerji tüketimini sağlayan en uygun işletme koşulları belirlenmiştir. Senaryo 1'de, giriş azot yükü ve IR oranının çıkış TN konsantrasyonu üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Buna göre, mevcut durumdaki azot yükünü gidermek üzere 4,4 IR oranı ile çalıştırılan tesisin, 2,5 IR oranı ile çalıştırıldığında dadeşarj hattında 10 mg/L'nin altında TN konsantrasyonu sağlayabileceği tespit edilmiştir. Bu durumda tesiste mevcut durumda daha düşük bir geri devir oranı ile enerji tasarrufu elde edilirken, tesis çıkışında istenendeşarj TN konsantrasyonu da sağlanabilmektedir. Senaryo 2'de ise atıksu azot yükü ile V_d/V oranının çıkış TN konsantrasyonu üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır. Senaryo 2 kapsamında, V_d/V oranının 0,2 yerine 0,5 olarak ayarlanarak tesisin işletilmesi halinde, çıkışta

10 mg/L TN konsantrasyonunun sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır. İncelenen tesis daha yüksek V_d/V oranı ile işletildiğinde, biyolojik havuzlardaki havalandırma ihtiyacı azalarak enerji tasarrufu elde edilmekte vedeşarj standartları da sağlanabilmektedir.

5. KAYNAKLAR

1. Kumar, M., Singh, R., 2017. Performance Evaluation of Semi Continuous Vertical Flow Constructed Wetlands (SC-VF-CWs) for Municipal Wastewater Treatment. *Bioresource Technology*, 232, 321-330.
2. Ozgun, H., 2015. Anaerobic Membrane Bioreactors for Cost-Effective Municipal Water Reuse. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi-Delft University of Technology, Türkiye-Hollanda.
3. Li, W.W., Yu, H.Q., Rittmann, B.E., 2015. Chemistry: Reuse water pollutants. *Nature*, 528, 29-31.
4. Henze, M., Gujer, W., Mino, T., van Loosdrecht, M.C.M., 2000. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. IWA Scientific and Technical Report No. 9. IWA Publishing. London, UK.
5. Gujer, W., 2006. Activated Sludge Modelling: Past, Present and Future. *Water Science and Technology*, 53(3), 111-119.
6. Dold, P.L., Ekama, G.A., Marais, G.V.R., 1980. A General Model for the Activated Sludge Process. *Prog. Wat. Tech.*, 12(6), 47-77.
7. Marais, G.V.R., Ekama, G.A., 1976. The Activated Sludge Process. Part 1 – Steady State Behaviour. *Water SA*, 2(4), 163.
8. Seggelke, K., Rosenwinkel, K.H., Vanrolleghem, P., Krebs, P., 2004. Integrated Operation of Sewer System and WWTP by Simulation-based Control of the WWTP Inflow. In Proceedings of 6. International Conference on Urban Drainage Modelling, Dresden, 15-17 September 2004, 307-315.
9. Bisinella de Faria, A.B., Sperandio, M., Ahmadi, A., Tiruta-Barna, L., 2015. Evaluation of New Alternatives in Wastewater Treatment Plants Based on Dynamic Modelling and Life Cycle Assessment (DM-LCA). *Water Research*, 84, 99-111.

10. Descoins, N., Deleris, S., Lestienne, R., Trouve, E., Marechal, F., 2012. Energy Efficiency in Waste Water Treatments Plants: Optimization of Activated Sludge Process Coupled with Anaerobic Digestion. *Energy*, 41(1), 153-164.
11. Özdemir, Ö., 2016. İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisinde Sürdürülebilir İşletme İçin Revizyon ve Enerji Verimliliği: Malatya Örneği. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 5, 9-20.
12. ÇŞB, 2004. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. Resmi Gazete Sayısı: 25687.
13. Hydromantis, 2017. Hydromantis Web Sitesi <http://www.hydromantis.com/GPS-X.html>
14. Hvala, N., Vrečko, D., Levstek, M., Bordon, C., 2017. The Use of Dynamic Mathematical Models for Improving the Designs of Upgraded Wastewater Treatment Plants. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* 5(1), 15-31.
15. Machado, V.C., Lafuente, J., Baeza, J.A., 2014. Activated Sludge Model 2d Calibration with Full-scale WWTP Data: Comparing Model Parameter Identifiability with Influent and Operational Uncertainty. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 37, 1271-1287.
16. Ferrer, J., Morenilla, J.J., Bouzas, A., Garcia-Usach, F., 2004. Calibration and Simulation of Two Large Wastewater Treatment Plants Operated for Nutrient Removal. *Water Science and Technology* 50(6), 87-94.
17. Boontian, N.A., 2012. Calibration Approach Towards Reducing ASM2d Parameter Subsets in Phosphorus Removal Processes. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 6, 805-811.
18. Batstone, D.J., Keller, J., 2003. Industrial Applications of the IWA Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1). *Water Science and Technology*, 47(12), 199-206.
19. ÇŞB, 2006. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği. Resmi Gazete Sayısı: 26047.

