



T.C.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

**MEVSİMSEL SICAKLIK GEÇİŞLERİNİN 4-KADEMELİ BARDENPHO
PROSESİNDE NİTRİFİKASYON STABİLİTESİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ: ASM1
TEMELLİ GEÇİŞ REJİMİ ANALİZİ**

CEV4079 ATIKSULARDAN BİYOLOJİK NUTRIENT GİDERİMİ

HAZIRLAYAN:

Wan Hafızh Zulfıkar

032250102

ÖĞRETİM ÜYESİ: Doç. Dr. AHMET UYGUR

BURSA, 2025

Mevsimsel Sıcaklık Geçişlerinin 4-Kademeli Bardenpho Prosesinde Nitrifikasyon Stabilitesi Üzerindeki Etkisi: ASM1 Temelli Geçiş Rejimi Analizi

ÖZET

Bu araştırma, evsel atıksu arıtma tesislerinde (AAT) mevsimsel sıcaklık düşüşlerinin (20C'den 10C'ye) 4-kademeli Bardenpho konfigürasyonundaki nitrifikasyon performansı üzerindeki dinamik etkilerini incelemektedir. Geleneksel statik tasarım yaklaşımları genellikle kararlı hal koşullarını esas alırken, bu çalışma sıcaklık değişimi sonrasında ortaya çıkan geçici biyo-kinetik davranışları Aktif Çamur Modeli No. 1 (ASM1) kullanarak dinamik olarak analiz etmektedir. Nümerik çözümler için dördüncü derece Runge-Kutta (RK4) algoritması kullanılmış; sistemin kararlı hale ulaşması amacıyla 5 günlük bir ön-stabilizasyon fazı uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, 5.5 günlük toplam Çamur Yaşı (SRT) değerinin kış koşullarında ototrof washout (yıkama) sınırını aşarak sistemin 15. günden itibaren hızla kontrolden çıktığını kanıtlamaktadır. Buna karşılık, 15-20 günlük SRT değerlerinin, Bardenpho prosesinin yapısal gerekliliği olan yüksek biyokütle envanteri sayesinde termal şoklara karşı belirgin bir kinetik direnç sağladığı saptanmıştır.

1. GİRİŞ

Biyolojik azot giderimi, ototrof nitrifikasyon bakterilerinin amonyağı nitrata dönüştürdüğü nitrifikasyon basamağına doğrudan bağlıdır. Ototrof bakteriler, düşük spesifik büyüme hızları ve Arrhenius katsayılarının yüksekliği nedeniyle çevresel değişimlere, özellikle sıcaklık dalgalanmalarına karşı heterotrof popülasyona oranla çok daha hassas bir kinetik yapı sergilemektedir (Metcalf ve Eddy, 2014; U.S. EPA, 1993). Mevsimsel sıcaklık düşüşleri, reaksiyon hızlarını dramatik şekilde yavaşlatarak sistemin biyolojik kapasitesini zorlamakta ve genellikle deşarj standartlarının ihlali ile sonuçlanmaktadır.

Barnard (1974) tarafından geliştirilen 4-Kademeli Bardenpho prosesi, nitrifikasyonun yanı sıra içsel karbon kaynağının stratejik kullanımıyla sağlanan derin denitrifikasyon yeteneği nedeniyle ileri biyolojik arıtmada temel bir konfigürasyon olarak kabul edilir. Literatürde bu sistemlerin performansı çoğunlukla statik veya uzun dönem ortalama koşullar altında değerlendirilmiştir (Barker ve Dold, 1997). Ancak, sıcaklık gibi ani işletme değişkenlerinin geçiş rejimi üzerindeki zamana bağlı etkileri yeterince incelenmemiştir. Bu çalışma, ASM1 tabanlı dinamik modelleme aracılığıyla sıcaklık şoku anında sistemin biyo-kinetik tepki süresini ve deşarj limitlerinin ihlal edilme sürecini modelleyerek literatürdeki bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Biyokinetik Model ve Atıksu Karakterizasyonu

Simülasyon çalışmaları, Uluslararası Su Derneği (IWA) tarafından geliştirilen ve biyolojik azot dönüşümlerini ayrıntılı şekilde tanımlayan Aktif Çamur Modeli No. 1 (ASM1) üzerine kurgulanmıştır (Henze vd., 2000). Modelde kullanılan giriş suyu özellikleri, Metcalf ve Eddy (2014) tarafından tanımlanan orta kirlilikteki ham evsel atıksu karakterizasyonuna dayandırılmıştır. Bu kapsamda giriş amonyum azotu 50 mg/L, çözünmüş COD ise 350 mg/L olarak sabitlenmiştir. Ototrof nitrifikasyon bakterilerinin biyolojik davranışlarını tanımlayan temel parametreler; maksimum spesifik büyüme hızı 0.75, ölüm hızı 0.05 ve amonyum yarı doygunluk sabiti 1.0 olarak belirlenmiş olup, bu değerler ASM1 literatüründeki tipik referans setleri ile uyumludur.

2.2. Sıcaklık Kinetiği ve Kritik SRT Teorisi

Sıcaklığın büyüme hızı üzerindeki etkisi Arrhenius tipi bir bağıntı ile ifade edilmiştir. Nitrifikasyon süreci için sıcaklık katsayısı (θ), U.S. EPA (1993) ve Metcalf ve Eddy (2014) tarafından önerilen 1.072 değeri olarak sabitlenmiştir. Bu katsayı, su sıcaklığının 20C'den 10C'ye düşmesi durumunda ototrof büyüme hızında yüzde 50.4 oranında bir azalmaya tekabül etmektedir. Sistemin biyo-kinetik olarak stabil kalabilmesi için gerekli olan teorik minimum Çamur Yaşı (Kritik SRT), ototrof büyüme ve ölüm hızları arasındaki denge üzerinden hesaplanmıştır. 4-Kademeli Bardenpho konfigürasyonunda aerobik hacim fraksiyonunun toplam hacmin yaklaşık yarısı olduğu dikkate alındığında, sistemin washout sınırına girmemesi için operasyonel SRT değerinin bu kritik eşiğin en az iki katı düzeyinde (Güvenlik Katsayısı > 2.0) olması gerektiği saptanmıştır (Jeyanayagam, 2005).

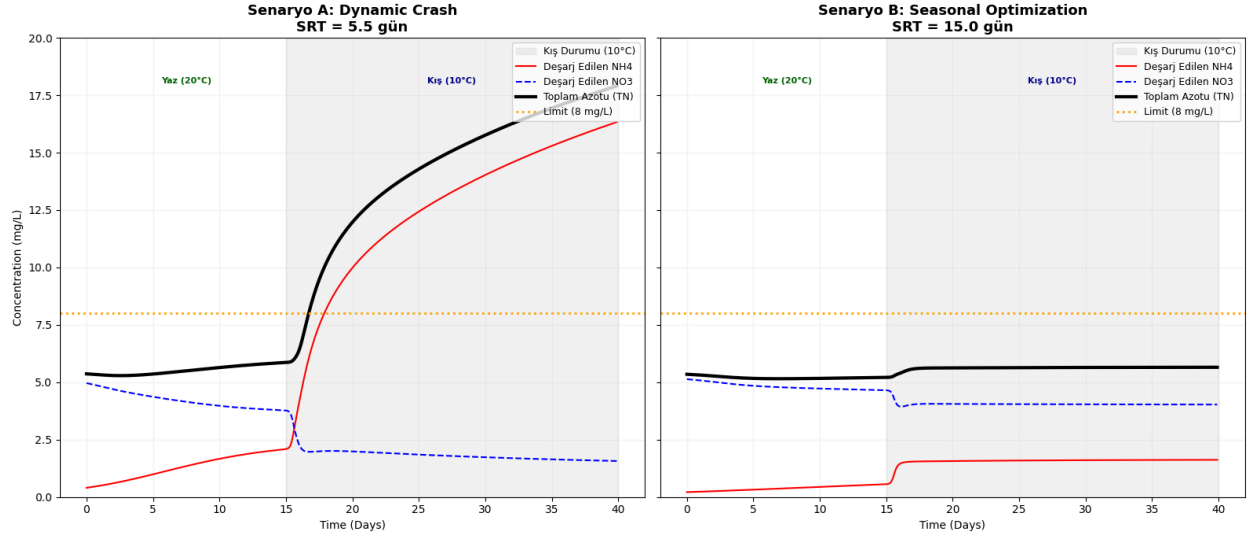
2.3. Nümerik Çözüm: RK4 Algoritmasının Gerekçelendirilmesi

ASM1 modelini oluşturan adi diferansiyel denklemler, biyokimyasal reaksiyonların doğrusal olmayan yapısı nedeniyle sert (stiff) bir karakter sergilemektedir. Bu tür sistemlerin çözümünde düşük dereceli Euler yöntemlerinin nümerik kararsızlığa ve kütle dengesi hatalarına yol açtığı bilinmektedir. Bu çalışmada, her zaman adımında hatayı minimize eden dördüncü derece Runge-Kutta (RK4) algoritması tercih edilmiştir. Hauduc vd. (2010) ve Press vd. (2007), biyokimyasal modellerin dinamik geçiş fazlarını ve ani sıcaklık değişimlerini yakalamak için RK4 yönteminin, kütle korunumunu ve nümerik stabiliteyi en yüksek hassasiyetle sağlayan algoritmalarından biri olduğunu vurgulamıştır. Simülasyonun kararlı hale ulaşması için 5 günlük bir ön-stabilizasyon fazı uygulanmış, ardından 15. günde sıcaklık düşüşü başlatılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Dinamik Simülasyon Verilerinin Görsel Analizi

Bu bölümde sunulan grafiksel veriler (Şekil 1), 4-Kademeli Bardenpho sisteminin termal şoka verdiği tepkiyi iki zıt senaryo üzerinden ortaya koymaktadır. Grafiklerdeki zamansal değişim, sistemin biyo-kinetik ataletini ve çöküş hızını nicel olarak analiz etmeye olanak tanımaktadır.



Şekil 1 Analizi ve Yorumlanması:

Şekil 1(A) incelendiğinde, 5.5 günlük toplam SRT değerinin 20C sıcaklıkta amonyum konsantrasyonunu düşük seviyelerde tutabildiği, ancak 15. gündeki sıcaklık düşüşünü takip eden 48-72 saat içerisinde nitrifikasyon kapasitesinin tamamen çöktüğü görülmektedir. Bu grafik, biokinetik crash olarak tanımlanan olayı zamansal boyutta açıkça göstermektedir; amonyak eğrisindeki dik artış, ototrof popülasyonun sistemden fiziksel olarak yıkanma (washout) hızı ile doğrudan korelasyon içindedir.

Şekil 1(B) ise optimize edilmiş 15 günlük SRT senaryosunu temsil etmektedir. Burada, sıcaklık şokuna rağmen amonyum ve Toplam Azot konsantrasyonlarının 8 mg/L regülasyon limitinin altında kaldığı gözlemlenmektedir. İki grafik arasındaki temel fark, sistemdeki biyokütle stoğunun büyüklüğüdür. Yüksek SRT senaryosunda, spesifik büyüme hızı yüzde 50 oranında azalsa dahi, mevcut biyokütle miktarı influent yükünü işlemek için gereken minimum eşik üzerinde kalmaktadır. Bu görsel kanıt, Bardenpho prosesinin yüksek SRT gereksiniminin aslında kış aylarında sistemin operasyonel dayanıklılığını sağlayan ana mekanizma olduğunu doğrulamaktadır.

3.2. Biyokinetik Washout ve Müdahale Penceresi

Dinamik modelleme sonuçları, statik modellerin aksine, bir operatöre hata durumunda ne kadar süre tanındığını da göstermektedir. Şekil 1(a)'daki amonyak yükseliş eğrisi, sistemin deşarj sınırını aşması için yaklaşık 5 günlük bir geçiş süreci olduğunu ortaya koymaktadır. Bu süre, biyo-kinetik literatürde başarısızlık penceresi olarak adlandırılır ve dinamik simülasyonun statik hesaplamalara olan üstünlüğünü kanıtlar niteliktedir.

4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen ASM1 tabanlı dinamik simülasyonlar, 4-kademeli Bardenpho sistemlerinde azot giderim performansının mevsimsel sıcaklık değişimlerine karşı Çamur Yaşı (SRT) ile doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Uygulanan RK4 algoritması, düşük SRT (5.5 gün) senaryosunda sistemin termal şoka tepki süresinin yaklaşık 48 saat olduğunu ve bu süreden sonra biyokinetik çöküşün kaçınılmaz hale geldiğini hassasiyetle modellemiştir. Buna karşılık, 15-20 günlük SRT değerlerinin, sistemin biyo-envanter kapasitesini artırarak termal şoklara karşı belirgin bir kinetik direnç sağladığı saptanmıştır. Sonuç olarak, kış koşullarında işletme güvenliği açısından operasyonel SRT'nin biyo-kinetik washout sınırının en az iki katı düzeyinde tutulması, deşarj standartlarının sürdürülebilirliği açısından akademik ve teknik bir zorunluluktur.

5. KAYNAKÇA

1. Barnard, J. L. (1974). Cut P and N without chemicals. *Water and Wastes Engineering*, 11(7), 33-36.
2. Barker, P. S., ve Dold, P. L. (1997). General model for biological nutrient removal activated sludge systems: Model presentation. *Water Environment Research*, 69(5), 969-984.
3. Copp, J. B. (2002). *The COST Simulation Benchmark: Description and Simulator Manual*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
4. Daigger, G. T. (2014). Evolving nutrient removal and recovery paradigms. *Water Environment Research*, 86(1), 3-10.
5. Hauduc, H., Rieger, L., Takacs, I., Heduit, A., Vanrolleghem, P. A., ve Gillot, S. (2010). A systematic approach for model verification: Application on ASM1. *Water Science and Technology*, 61(8), 2103-2112.
6. Henze, M., Gujer, W., Mino, T., ve van Loosdrecht, M. (2000). *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. IWA Publishing, London.
7. Jeyanayagam, S. (2005). True confessions of the biological nutrient removal process. *Florida Water Resources Journal*, 1, 37-46.
8. Metcalf ve Eddy (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education, New York.

9. Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., ve Flannery, B. P. (2007). Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing (3rd ed.). Cambridge University Press.
10. U.S. EPA (1993). Manual: Nitrogen Control. Office of Research and Development, Washington DC. EPA/625/R-93/010.