

Aerobik Ardışık Kesikli Reaktörde Nitrifikasyon İnhibisyonunun Reaktör Performansı ve Çıkış Suyu Kalitesi Üzerine Etkisi

Hüseyin YAZICI*¹, İrem USLU²

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Aksu Mehmet Süreyya Demiraslan Meslek Yüksekokulu, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, 32510, Isparta, Türkiye

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 16.01.2020, Kabul / Accepted: 05.05.2020, Online Yayınlanma / Published Online: 20.08.2020)

Anahtar Kelimeler

Ardışık kesikli reaktör,
Aktif çamur,
Nitrifikasyon,
İnhibisyon,
Çıkış suyu kalitesi

Özet: Bu çalışmada aerobik ortam şartında işletilen laboratuvar ölçekli bir ardışık kesikli reaktörde (AKR) uygulanan nitrifikasyon inhibisyonunun reaktör performansına ve çıkış suyu kalitesine etkisi incelenmiştir. Başlangıç kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) konsantrasyonunun reaktör işletiminin 42. gününe kadar 250 mg/L ve sonrasında 500 mg/L olarak ayarlandığı sentetik atıksuyun beslendiği reaktörde 52 gün boyunca reaktörden çamur çekilmeden ve reaktördeki pH ayarlanmadan işletme yapılmıştır. Reaktör işletiminde ilk 42 günlük periyodun sonunda KOİ giderim verimi %93 ve çamur hacim indeksi (ÇHİ) değeri 35,0 mL/g olarak hesaplanmıştır. Başlangıç KOİ konsantrasyonunun 500 mg/L değerine artırılması ile birlikte reaktörde döngü sonlarında ölçülen pH değerlerinde ani bir düşüş yaşanmıştır. Bunun sonucunda arıtma veriminin ve reaktör performansının azalması nedeni ile reaktör işletimi 52. günde sonlandırılmıştır. Çıkış suyunun amonyum (NH₄⁺), nitrit (NO₂⁻) ve nitrat (NO₃⁻) konsantrasyonlarına ait sonuçlar AKR sisteminin çıkış sularından nütrient geri kazanım potansiyelini artırmak üzere nitrifikasyon inhibisyonunun alternatif bir yaklaşım olarak potansiyelinin bulunduğunu ortaya koymuştur.

The Effect of Nitrification Inhibition on Reactor Performance and Effluent Quality in an Aerobic Sequencing Batch Reactor

Keywords

Sequencing batch reactor,
Activated sludge,
Nitrification,
Inhibition,
Effluent quality

Abstract: In this study, the effect of the nitrification inhibition applied in a lab-scale aerobic sequencing batch reactor (SBR) on the reactor performance and effluent quality was investigated. Reactor operation was carried out during 52 days without wasting any reactor sludge and adjusting pH in the reactor, where a synthetic wastewater solution with an initial chemical oxygen demand (COD) concentration of 250 mg/L until the 42nd day of reactor operation and then adjusted to 500 mg/L was fed. According to the results, COD removal efficiency and sludge volume index (SVI) value was calculated as 93% and 35.0 mL/g, respectively, at the end of the day 42nd of the reactor operation. As the initial COD concentration was increased to 500 mg/L, there was a sudden drop in pH values measured at the end of each cycle in the reactor. As a result of this, the reactor operation was terminated on the day 52nd due to the decrease in the treatment efficiency and the reactor performance. The obtained results of ammonium (NH₄⁺), nitrite (NO₂⁻) and nitrate (NO₃⁻) concentration in the effluent of the SBR system showed that nitrification inhibition had a potential as an alternative approach to increase the potential of nutrient recovery.

*İlgili yazar: huseyinyazici@isparta.edu.tr

1. Giriş

Atık akımlarında mevcut bulunan nütrientler ağırlıklı olarak karbon (C), azot (N) ve fosfor (P) bileşikleridir. Her üçü de çeşitli yaşam formlarının temel dayanağı olmaları bakımından önemlidir. N ve P hücredeki DNA'nın, aminoasitlerin ve klorofillerin önemli bileşenleridir. P ökaryotik hücrelerde adenozin trifosfat (ATP) formunda bulunarak hücrelerin enerji sirkülasyonu üzerinde önemli rol oynar [1]. N ise küresel N döngüsü yoluyla bitki gelişiminde ve besin kaynağı sağlanmasında önemli roller oynayarak canlılar için gerekli olan besinin sağlanması işinde rol oynar [2].

Birçok atıksu yüksek miktarda nütrientleri içermektedir ve bu nütrientler sucul ortamda yaşayan mikroorganizmaların gelişimini ve aynı zamanda suların çözünmüş oksijen ihtiyacını da artırmaktadır. Atıksuların doğru arıtma yöntemleri uygulanmadan deşarj edildiğı alıcı ortamlarda zamanla septik şartlar meydana gelirken atıksuların içerisinde bulunan çözünmüş ya da askıda organik maddelerin parçalanması sonucunda da kötü koku oluşmaktadır. [3].

Nütrientlerin yüzeysel sulara deşarjı ile oluşan tehlikelere karşı artan toplumsal farkındalık N ve P'nin atıksulardan gideriminin sağlanması veya iyileştirilmesi için yerel yönetimler üzerinde baskı oluşturmaktadır. Nütrient giderimi konusunda řu anki amaç nütrientlerin giderimini en hafif sosyal ve çevresel etkiye sebep olacak şekilde en düşük maliyetle tamamlamaktır. Bu üç alanda (sosyal, çevresel ve ekonomik etki) meydana gelecek olumsuz durumları hafifletmek, yerel yönetimlere atıksu arıtımında sürdürülebilirlik yaklaşımı sergilemeyi sağlar. Son 20 yılda tüm dünyada araştırmacılar ve uygulayıcılar konvansiyonel prosesler üzerinde birçok iyileştirme yapmıştır ve mevcut arıtma seviyesinin üstüne çıkan ve düşük işletme maliyeti potansiyeli olan birçok yeni teknoloji geliştirmiştir. Bu prosesler enerji ihtiyacını önemli düzeyde azaltan N giderimini ve atıksudan enerji üretimini sağlayan proseslerin yanı sıra suyun ve nütrientlerin geri kazanımını ve tekrar kullanımını sağlayan prosesleri içermektedir [4].

Kanada'daki atıksu arıtma tesislerinin arıtma seviyesinin oldukça çeşitli olduğu ve her bölge için farklı nütrient deşarj mevzuatlarına ve değışken seviyelerde alıcı su ortamı hassasiyetine sebep olduğu tespit edilmiştir [4]. Amerika Birleşik Devletleri'ndeki tesislerin birçoğunun ise yalnızca organik madde giderimi yaptığı ve N ve P gibi nütrientlerin giderimi hususundaki artan baskıların optimizasyon ve kontrol teşkil eden karmaşık prosesler gerektirdiğı belirtilmiştir [5]. Anlaşıldığı üzere nütrientlerin sosyal, çevresel ve ekonomik anlamda en hafif etkilere sebep olacak şekilde atıksulardan giderimini sağlayabilecek teknolojiler bulunmasına rağmen arıtma tesisleri açısından deşarj

standartlarının farklılık göstermesinin en önemli nedenlerinin başında yasal mevzuatların bağılayıcılık durumu gelmektedir.

Evsel atıksuların arıtılması ile ilgili olarak ülkemizdeki durum ise Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından yayımlanan Belediye Atıksu Göstergelerinde belirtilen rakamlar ile açıklanabilir [6]. Buna göre geçmiş 20 yılda ülkemizde hem arıtma tesislerinde arıtılan atıksu miktarının hem de ileri arıtma sistemlerinde arıtılan atıksu miktarının arttığı görülmüştür. Bu gelişmelerle birlikte geçmiş 20 yıldan bu yana hiç arıtılmadan alıcı ortama deşarj edilen veya arıtılan atıksuların ileri arıtma tesisleri haricindeki tesislerden alıcı ortama deşarj edilen miktarlarından dolayı özellikle N ve P kaynaklı kirliliğin alıcı ortamlarda meydana getirdiğı ekolojik problemler de ayrıca göz önüne alınabilir.

Ülkemizde evsel nitelikli atıksuların arıtılması ile ilgili deşarj standartlarının yer aldığı mevzuatlar [7-10] incelendiğinde ise arıtma tesislerinden yapılacak deşarjelerde alıcı ortamın ötrofikasyon yönünden hassas olup olmadığı değerlendirilmekle birlikte hassas olmayan alanlar kapsamına giren alıcı ortamlara yapılacak deşarjlar için arıtma tesislerinin N ve P giderimi açısından herhangi bir standarda tabi olmadığı anlaşılmaktadır. Hassas alanlara deşarj yapan tesisler için ise N ve P giderimi açısından kısıtlayıcı hükümlerin bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu kapsamda mevcut tesis tasarımları ile N ve P giderimi açısından deşarj standartlarını sağlamakla meşgul olan tesislerde çıkış suyunun bu parametreler açısından nasıl daha kaliteli hale getirilmesi gerektiğı hususu ön plana çıkmaktadır.

Tüm dünya genelinde su kalitesi mevzuatları alıcı su ortamlarındaki ötrofikasyon problemlerinin üstesinden gelmek üzere nütrient giderimi ile ilgili standartları artırmıştır [11]. Nütrientlerin çevreye deşarjını kısıtlamak üzere artan yasal baskılar hem çıkış suyu deşarjları hem de arıtma çamurlarının arazi uygulamaları açısından izin verilebilir limitlerin daha da sıkılaşmasına yol açmıştır. Bu durum nihayetinde özellikle kısıtlı P kaynaklarının korunması gerektiğı hususundaki ihtiyaç için farkındalık artışı ile birlikte birçok ülkenin nütrient geri kazanımı konusuna karşı ilgisinde artışa sebep olmuştur [12]. Nüfus artışı, azalan doğal kaynaklar ve iklim değışikliğı konuları atıksu arıtımı endüstrisinde bir paradigma değışimine gitmeyi gerektirmiştir. Bu gereksinimler özellikle arıtma tesisi çamurlarının yalnızca bertaraf edilmesi gereken bir atık olarak değıl, önemli bir kaynak olarak düşünülmesini sağlamaktadır. Nütrient geri kazanımı řu an kaynakların geri kazanımı açısından düşük maliyetli ve çevre açısından sürdürülebilir stratejilerden biri olarak araştırılmaktadır [13].

Bu çalışmaya konu olan ilgili literatürün incelenmesi sonucunda nütrient geri kazanımı çalışmaları açısından temel yaklaşımın ağırlıklı olarak nütrient

gideriminin yapıldığı tesislerde çamurdan (biyokütleden) geri kazanım ya da arıtılmamış atıksulardan kaynağında geri kazanım şeklinde olduğu ve çalışmaların ağırlıklı olarak yalnızca P geri kazanımı üzerine yoğunlaştığı gözlenmiştir. Ancak nütrient gideriminin yapılmadığı karbon giderimi üzerine odaklanmış proseslerin çıkış sularından nütrient geri kazanımını temsil edecek çalışmaların yok denecek kadar az sayıda olduğu gözlenmiştir. Bu tespitlerden hareketle çalışmada nütrient gideriminin yapılmadığı bir evsel atıksu arıtma tesisinin çıkış sularından P ile birlikte N geri kazanım potansiyeli laboratuvar ölçekli ardışık kesikli reaktör (AKR) sisteminde araştırılmıştır. Öte yandan çıkış sularında amonyum (NH_4^+) konsantrasyonunda artış sağlanması amacı ile karbon giderimi sürecinde gerçekteşen nitrikasyonun inhibe edilmesinin çıkış sularından nütrient geri kazanımı potansiyeline olan etkisi literatürde yapılan çalışmalarda araştırılmamıştır. Bu yaklaşım, gerçekteşirilen çalışmanın özgünlüğünü oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında aerobik ortam şartında doldur-boşalt şeklinde işletilen laboratuvar ölçekli bir AKR'de nitrikasyon inhibisyonunun reaktör performansı ve çıkış suyu kalitesi üzerine etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada reaktör işletimi aşamaları, sentetik atıksu ile beslenen ve aerobik şartlar altında işletilen bir AKR'de nitrikasyon inhibisyonu uygulanmasının reaktör performansı ve çıkış suyu kalitesi üzerine etkisini incelemek üzere farklı işletme stratejilerini kapsamaktadır. Bu stratejiler, hızlı çökebilen ve arıtma performansı yüksek olan bir aktif çamur elde etmek üzere on beş günlük alıştırma aşaması boyunca beş günlük aşamalar halinde uygulanmıştır. Reaktör işletimi, ilk 15 günü alıştırma aşaması olmak üzere toplam 52 gün yürütölmüştür. Reaktör işletiminin ilk 44 gününde sentetik atıksudaki başlangıç KOİ konsantrasyonu 250 mg/L ve 44. günden itibaren 500 mg/L olarak ayarlanmıştır. Çalışma süresince reaktörde uygulanan işletme stratejilerinin, ÇHİ değerinin ve çıkış suyunun askıda katı madde (AKM) ve KOİ konsantrasyonunun oldukça düşük olmasına sebep olacağı tahmin edildiğinden biyokütlenin mümkün olduğu kadar reaktörde alıkonması (yüksek çamur yaşı (SRT) şartlarında işletim) hedeflenmiştir. Bu nedenle tüm işletme süresi boyunca döngü sonlarında reaktörden çamur atılmadan işletme yapılmıştır. Ayrıca döngü başlarında karışık sıvıda başlangıç pH değerini ayarlanmamıştır.

2.1. Reaktör işletimi

Reaktör işletiminde kullanılan aşı çamuru Antalya Lara İleri Atıksu Arıtma Tesisi'nin havalandırma havuzundan temin edilmiştir. Tüm deneysel çalışmalar boyunca 5,0 L çalışma hacmine sahip aerobik modda işletilen bir AKR kullanılmıştır.

Reaktörün 15 günlük alıştırma aşamasında ve sonrasındaki işletme aşamasında döngü süreleri, sentetik atıksu hacmi ve hesaplanan hidrolik bekleme süreleri (HRT) Çizelge 1'de görölmektedir. Alıştırma aşaması boyunca ve sonrasındaki işletme aşaması boyunca günde 12 saatlik bir döngü uzun döngü olarak sabit şekilde uygulanmıştır. Alıştırma aşamasının altıncı gününden itibaren diğer 12 saatlik döngü ise beş gün boyunca günde 6 saatlik iki döngü halinde ve on birinci günden itibaren beş gün boyunca günde 4 saatlik üç döngü halinde kısa döngü olarak uygulanmıştır. Reaktöre sentetik atıksu beslemesi alıştırma aşamasının ilk 5 gününde 2,5 L/döngü ve 6. günden itibaren tüm işletme aşamaları boyunca 3 L/döngü hacminde yapılmıştır. Alıştırma aşaması boyunca kademeli olarak hem döngü sürelerinin kısaltılması ile hem de sentetik atıksu hacminin artırılması ile HRT kısaltılarak aktif çamurun çökme performansının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Her bir döngüyü oluşturan aşamalar Çizelge 1'de görölmektedir. Tüm reaktör işletimi boyunca doldurma işlemi, havalandırma işleminin ilk 10 dakikası boyunca havalandırma başlatıldığı anda reaktörde karıştırma yapılmadan yürütölmüştür. Alıştırma aşamasında aktif çamurun çöktürölmüşü işlemi 1. günde 19 dk. olmak üzere ilk 10 gün boyunca birer dakikalık azalmalarla 10. gün sonunda 10 dk. olacak şekilde yürütölmüştür. Devam eden günlerde çöktürme süresi reaktör işletimi sonlandırılana kadar 10 dk. olarak uygulanmıştır. Havalandırma işlemi ise alıştırma aşamasında çöktürme süresinin ilk 5 günde birer dakika kısaltılmasına bağlı olarak 691-695 dk., 6-10 günlük aşamada 12 saatlik döngülerde 696-700 dk ve 6 saatlik döngülerde 336-340 dk ve sonraki tüm işletme aşaması boyunca reaktör işletimi sonlandırılana kadar 12 saatlik döngülerde 700 dk. ve 4 saatlik döngülerde 220 dk olacak şekilde uygulanmıştır. Döngü sonlarında çıkış suyu olarak reaktörden boşaltılan hacmin yerine her döngünün başlangıcında taze sentetik atıksu reaktöre eklenmiştir. Sentetik atıksuyun ve arıtılan çıkış suyunun doldurma-boşaltma işlemleri için bir adet çift yönlü olarak (saat yönünde ve saat yönünün tersine) ve bir adet tek yönlü çalışan peristaltik pompa kullanılmıştır. Aerobik aşamalar boyunca karıştırma işlemi, reaktörün tabanından bir manyetik karıştırıcı vasıtası ile 900 devir/dk sabit hızda yürütölmüştür. Aerobik aşamalar boyunca havalandırma işlemi, reaktörün taban çevresini dolaşan çubuk şekilli esneyebilir bir akvaryum difüzörü yardımıyla yapılmıştır. Hava kaynağı olarak hava debisinin ayarlanmasına imkan sağlayan akvaryum havalandırıcısı kullanılmıştır. Reaktöre sağlanan havanın debisi, reaktördeki karışık sıvıda ölçölen çözönmüş oksijen konsantrasyonu ≥ 5 mg/L seviyesinde olacak şekilde en az 1 L/dk debide hava sağlanarak bir hava debimetresi aracılığı ile kontrol edilmiştir. Hava debisinin 1 L/dk değerinin altına düştüğü durumlarda veya reaktörün cam yüzeyinde biyofilm gelişmesi durumlarında haftalık olarak difüzör ve iç aksam temizliği yapılmıştır.

Çizelge 1. Reaktör işletiminde döngü süreleri ve HRT değerleri

	Aıştırma Aşaması			Aıştırma Aşaması Sonrası
	0-5 gün	6-10 gün	11-15 gün	
Döngü süresi (saat)/gün	12+12	12+6+6	12+4+4+4	12+4+4+4
Döngü aşamaları (süre, dk.)				
Havalandırma	691-695	696-700 / 336-340	700 / 220	700 / 220
Çöktürme	19-15	14-10	10	10
Boşaltma	10	10	10	10
Sentetik atıksu hacmi (L/döngü)	2,5	3	3	3
HRT (saat)	24	20 ^a	20 ^a	20 ^a
		10 ^b	6,66 ^c	6,66 ^c
Ortalama HRT (saat)	24	15	13,33	13,33

^a: 6. günden itibaren 12 saatlik döngülere karşılık gelen HRT;

^b: 6-10. günlerde 6 saatlik döngülere karşılık gelen HRT;

^c: 11. günden itibaren 4 saatlik döngülere karşılık gelen HRT

Karışık sıvıdaki çözünmüş oksijen konsantrasyonu reaktör temizliğinden önce ve sonra Milwaukee MW600 marka oksijen metre yardımıyla ölçülmüştür. Tüm reaktör işletiminde pH ölçümleri Milwaukee Mi150 model pH metre ile yapılmıştır. Başlangıç KOİ konsantrasyonunun 500 ve 750 mg/L olduğu deneysel aşamadaki çalışmalar boyunca reaktöre sentetik atıksu beslemesi yapıldıktan sonra her döngü başında karışık sıvıda ölçülen pH değerinin <7,0 olarak ölçüldüğü her durumda 1 N NaOH çözeltisi ile pH ayarlaması yapılarak pH değerinin 7,0-7,3 aralığında olması sağlanmıştır. Reaktördeki sıcaklık kontrol edilmemiştir fakat aktüel sıcaklık her döngü başında ve sonunda pH ölçümleri ile birlikte izlenmiştir.

2.2. Sentetik atıksu

Her döngüde doldurma aşamasının başlangıcı ile birlikte reaktöre eklenen sentetik atıksuyun bileşimi Çizelge 2'de verilmektedir. Sentetik atıksuyun bileşimini oluşturan bileşiklerin bir kısmının konsantrasyonu tüm deneysel çalışmalar boyunca sabit olarak ayarlanmıştır. Diğer bileşiklerin konsantrasyonu ise çalışmanın amacına veya sentetik atıksu çözeltisi hazırlamadaki yaklaşıma göre değişkenlik göstermiştir.

Sentetik atıksu, bileşimleri birbirinden farklı olan farklı hacimlerdeki A ve B çözeltileri halinde dört döngülük stok çözeltiler halinde hazırlanmıştır. Her döngü başında 0,75 L A çözeltisi, 2 L B çözeltisi ve 0,25 L NH₄Cl çözeltisi nihai çözeltiyi oluşturmak üzere sırası ile reaktöre beslenmiştir. Aıştırma aşamasının ilk 5 gününde toplam sentetik atıksu hacmi 2,5 L olduğundan A, B ve NH₄Cl çözeltileri 3 L'lik toplam hacim içerisindeki hacimlerine oranlanarak hazırlanmıştır. B çözeltisi 4 mL/L hacimde iz element çözeltisi içermiştir. İz element çözeltisi A ve B çözeltilerinden ayrı 1 L'lik stok bir çözelti halinde hazırlanıp stok B çözeltisinin hazırlanmasından sonra B çözeltisine ilave edilmiştir. İz elementi oluşturan bileşiklerin miktarları Lu vd. [14] tarafından belirtildiği şekilde ayarlanmıştır. Nitrikasyon inhibisyonunun sağlandığı çalışmalarda

sentetik atıksuya dahil edilen alitiyüre (ATU, C₄H₈N₂S) 8 mg/L [15] konsantrasyonunda B çözeltisine dahil edilmiştir.

Çizelge 2. Stok sentetik atıksu çözeltisinin bileşimi

NH₄Cl Çözeltisi (0,25 L/döngü)
NH ₄ Cl (Azot kaynağı)*
A Çözeltisi (0,75 L/döngü)
C ₆ H ₁₂ O ₆ .H ₂ O (Karbon kaynağı)*
KH ₂ PO ₄ (Fosfor kaynağı)*
B Çözeltisi (2 L/döngü)
MgSO ₄ .7H ₂ O (Magnezyum kaynağı)*
CaCl ₂ .2H ₂ O (Kalsiyum kaynağı)*
ATU: 8 mg/L (Nitrikasyon inhibisyonu durumunda)
KCl (Potasyum kaynağı): 40 mg/L
İz elementler (mg/L)
CuSO ₄ .5H ₂ O: 30
FeCl ₃ .6H ₂ O: 1500
ZnSO ₄ .7H ₂ O: 120
KI: 180
H ₃ BO ₃ : 150
MnCl ₂ .2H ₂ O: 120
Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O: 60
CoCl ₂ .6H ₂ O: 150
EDTA: 10.000

*: Miktarları değişken olan bileşikler

Konsantrasyonları değişken olan bileşiklerin miktarları belirlenirken üç husus göz önüne alınmıştır:

- Reaktörün farklı organik yükleme hızı (OYH) şartlarında işletilecek olmasından dolayı sentetik atıksudaki başlangıç KOİ konsantrasyonunun değişkenlik göstermesi,
- Başlangıç KOİ konsantrasyonunun değişmesinden dolayı C/N/P oranına dayalı olarak başlangıç N ve P konsantrasyonlarının değişmesi,
- Sentetik atıksu kompozisyonunda göz önüne alınması gereken tek değerlikli (NH⁴⁺ ve K⁺) ve iki değerlikli (magnezyum (Mg²⁺) ve kalsiyum (Ca²⁺)) katyonlardan ileri gelen toplam tek değerlikli iyon (ΣM) konsantrasyonu (meq/L) ve toplam iki değerlikli iyon (ΣD) konsantrasyonu (meq/L) arasındaki konsantrasyon dengesi ve Mg²⁺ ve Ca²⁺ iyonlarının kendi arasındaki konsantrasyon dengesi.

Çizelge 3. Sentetik atıksu bileşiminde miktarları değişken olan bileşiklerin miktarları

Bileşik					OYH	$\Sigma M^{(*)}:\Sigma D$
$C_6H_{12}O_6.H_2O$	NH_4Cl	KH_2PO_4	$MgSO_4.7H_2O$	$CaCl_2.2H_2O$		
258 mg/L (KOİ: 250 mg/L) (C: 93 mg/L)	35,5 mg/L (N: 9,3 mg/L) (NH_4^+ : 12,0 mg/L) (NH_4^+ : 0,66 meq/L)	20,4 mg/L (P: 4,65 mg/L) (PO_4^{3-} : 14,3 mg/L) (K^+ : 0,150 meq/L)	55,4 mg/L (Mg^{2+} : 0,45 meq/L)	33,0 mg/L (Ca^{2+} : 0,45 meq/L)	0,25 ^(a) 0,45 ^(b) 0,6 ^(c)	1,35:0,9

(a): Alistırma aşamasının 1-5. günlerindeki OYH (kg KOİ/m³.gün) değeri; (b): Alistırma aşamasının 6-10. günlerindeki OYH değeri; (c): Alistırma aşamasının 11-15. günlerindeki OYH değeri.

(*) : Sentetik atıksudaki 40 mg/L KCl bileşiğinden ileri gelen K⁺ konsantrasyonu 0,536 meq/L olarak hesaplanmaktadır.

Sentetik atıksu bileşimi belirlenirken tüm deneysel çalışmalar boyunca C/N/P konsantrasyonları 100/10/5 oranında, $\Sigma M/\Sigma D=1,5$ oranında ve Mg^{2+}/Ca^{2+} iyonlarının oranı 1:1 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Buna göre çalışmanın farklı aşamalarında miktarları değişkenlik gösteren bileşiklerin miktarları hesaplanarak Çizelge 3'te sunulmuştur.

2.3. Örnekleme ve analiz prosedürleri

Tüm analizler hem alıştırma aşamasında hem de sonrasında devam eden işletme aşamasında iki günde bir kez yapılmıştır. Analizlerin yapıldığı günlerde hem 12 saatlik uzun döngülerin hem de 4 ve 6 saatlik kısa döngülerin sonunda örnekleme yapılarak analizler yapılmıştır. Örnekler herhangi bir döngünün sonunda toplam örnek hacmi 25 mL olacak şekilde reaktör tam karışım halindeyken alınmıştır. Analizler, ilgili analiz prosedürünün gerektirdiği şekilde karışık sıvı örneklerinden direkt olarak veya karışık sıvının filtrelenmesi ile elde edilen filtrat örnekleri üzerinden yürütülmüştür. Çamur hacim indeksi (ÇHİ) analizlerinde örneklemenin yapıldığı döngünün sonunda reaktör tam karışım halindeyken 1 L karışık sıvı örneği alınmıştır. Imhoff hunisinde çöktürme işlemi tamamlandıktan sonra çöken çamurun üst kısmında kalan sıvı kısım drene edilmiştir ve kalan çamur yeni döngü başlamadan önce reaktöre tekrar dahil edilmiştir. Böylelikle ÇHİ analizi için yapılan örneklemeden ileri gelecek olası biyokütle kaybı önlenmiştir. Örnekler alındıktan hemen sonra bekletilmeden ilgili analiz prosedürü doğrultusunda analizlere tabi tutulmuştur. Karışık sıvı örneklerinde karışık sıvı askıda madde (MLSS), karışık sıvı uçucu askıda katı madde (MLVSS) ve ÇHİ analizleri, filtrat örneklerinde ise KOİ, NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} ve PO_4^{3-} analizleri yapılmıştır.

AKM-MLSS analizleri APHA 2540D yöntemine [16] göre yapılmıştır. Bu prosedürde filtre kağıdı olarak Millipore AP40 ve kurutma işlemi için Nüve FN500 etüv kullanılmıştır. Filtre kağıtlarının daralarının belirlenmesi, kurutma ve yakma işlemleri sonrasında ağırlıkların belirlenmesi işlemleri Radwag AS220/C12 hassas terazide gerçekleştirilmiştir. MLVSS analizleri APHA 2540E yöntemine [16] göre yapılmıştır. Yakma işlemleri Protherm PLF 110/6 kül fırınında yürütülmüştür. ÇHİ analizleri APHA 2710D yöntemine göre yapılmıştır [16]. Çöken çamur hacmini belirlemek üzere Imhoff hunisi kullanılarak çökebilir katıların volümetrik testi (2540F)

uygulanmıştır. Bu metoda göre ham numune Imhoff hunisinin 1 L ölçü çizgisine kadar doldurulduktan sonra 1 saat süre ile çöktürme uygulanmıştır ve süre sonunda çöken çamur hacmi mL cinsinden huniden okunarak kaydedilmiştir. KOİ ölçümleri APHA 5220D yönteminde [16] belirtildiği şekilde kapalı reflüks kolorimetrik yöntemine göre spektrofotometrede (WTW, SpektroFlex 6100 VIS) 600 nm ve 420 nm dalga boylarında referans çözeltilere karşı absorbans okuması yapılarak oluşturulan kalibrasyon eğrileri üzerinden yürütülmüştür. KOİ konsantrasyonunun 90 mg/L değerinden büyük olduğu tahmin edilen örnekler için 600 nm ve KOİ konsantrasyonunun 90 mg/L değerinden küçük olduğu tahmin edilen örnekler için 420 nm dalga boylarında okuma yapılmıştır. Örnek tüpü içerisine reaktifler ve örnek eklendikten sonra oluşan karışım 2 saat süre ile 150 °C'de termoreaktörde (WTW, CR2200) ısıtılmıştır. Süre sonunda tüpler oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra spektrofotometrede absorbans değerleri okunmuştur. Elde edilen okuma sonuçları, 600 nm ve 420 nm dalga boyları için önceden oluşturulmuş kalibrasyon grafiklerine göre değerlendirilerek örneğin KOİ konsantrasyonu tespit edilmiştir. PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , Ca^{2+} ve Mg^{2+} konsantrasyonları spektrofotometrede (WTW SpectroFlex 6100) Merck test kitleri kullanılarak kolorimetrik olarak belirlenmiştir. Bu amaçla kullanılan test kitleri ve ölçüm aralıkları Çizelge 4'te verilmektedir:

Çizelge 4. Kolorimetrik analizler

Parametre	Prosedür	Ölçüm Aralığı (mg/L)
Amonyum (NH_4^+)	Merck 114752	0,01-3
Fosfat (PO_4^{3-})	Merck 114842	0,5-30
Nitrat (NO_3^-)	Merck 109713	0,10-25
Nitrit (NO_2^-)	Merck 114776	0,002-1
Kalsiyum (Ca^{2+})	Merck 114815	5-160
Magnezyum (Mg^{2+})	Merck 100815	5-75

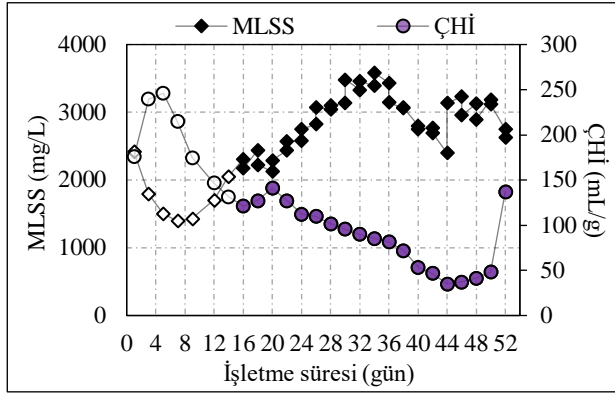
3. Bulgular

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların sunulduğu Şekil 1-7'deki grafik eğrilerinde beyaz dolgu ile gösterilen sonuçlar ilk 15 günlük alıştırma aşamasına aittir.

3.1. Reaktör performansı

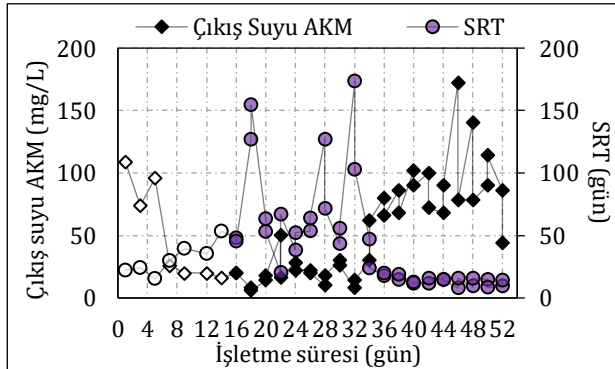
Reaktör performansı esas olarak aktif çamurun MLSS konsantrasyonundaki değişim, çamurun çökme performansı ve KOİ giderim verimi esas alınarak

değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre alıştırma aşamasının ilk 5 gününde ÇHİ 175 mL/g değerinden 246 mL/g değerine artmıştır. MLSS konsantrasyonu ise çamurun çökme performansında meydana gelen azalma nedeniyle başlangıç değeri olan 2420 mg/L'den 1396 mg/L'ye düşmüştür (Şekil 1). Yaşanan biyokütle kaybı aynı zamanda çıkış suyunun AKM konsantrasyonunun nispeten yüksek olması (75-110 mg/L aralığında) ile doğrulanabilmektedir (Şekil 2). Alıştırma aşamasının kalan 10 günlük aşamasında ise MLSS konsantrasyonu ve çamur çökme performansı kademeli olarak artış göstermiştir. Bu aşamanın sonunda (14. günde) MLSS konsantrasyonu 2056 mg/L değerine yükselmiştir ve ÇHİ değeri 131 mL/g değerine azalmıştır. Bu durum nihai olarak çıkış suyunun AKM konsantrasyonunun azalmasına (14. günde 16 mg/L) sebep olarak oldukça berrak bir çıkış suyu elde edilmesi ile sonuçlanmıştır.



Şekil 1. Reaktörün MLSS ve ÇHİ profilleri.

Alıştırma aşamasından sonraki işletme sürecine ait sonuçlar değerlendirildiğinde ise reaktör işletiminin 36. gününe kadar MLSS konsantrasyonunda kademeli olarak artış (3148 mg/L) ve sonrasında 44. güne kadar azalma (2400 mg/L) meydana geldiği görülmektedir (Şekil 1). Bu aşamada ÇHİ değeri 44. güne kadar kademeli olarak azalma (44. günde 35 mL/g) göstermesine rağmen 36-44. günler arasında çıkış suyunun AKM konsantrasyonunda artış (66-102 mg/L aralığında, ortalama 81,5 mg/L) meydana gelmiştir ve dolayısıyla MLSS konsantrasyonu bu aşamada azalmıştır.



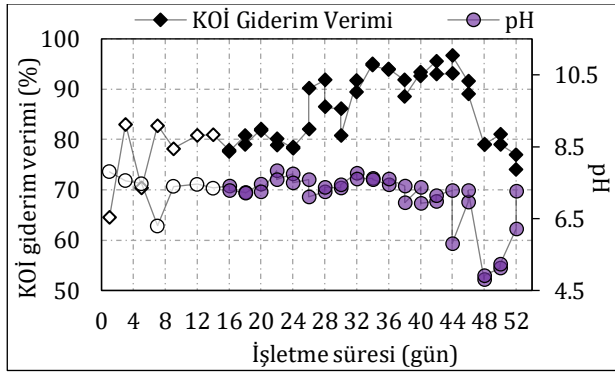
Şekil 2. Reaktörün çıkış suyu AKM ve SRT profili.

Başlangıç KOİ konsantrasyonunun artması ile birlikte MLSS konsantrasyonunda 48. güne kadar bir artış meydana gelmiş fakat bu süreçten sonra reaktördeki işletme şartlarının bozulması nedeni ile 52. günde reaktör işletimi sonlandırılmıştır. 52 günlük tüm işletme süresi boyunca döngü başlarında karışık sıvının pH değerinin ayarlanmadan işletme yapılması sebebi ile döngü sonu pH değerleri başlangıç KOİ konsantrasyonunun artırılması ile birlikte önemli ölçüde azalmıştır. Başlangıç KOİ konsantrasyonunun artırıldığı aşamaya kadar tüm işletme süresince (44. güne kadar) döngü sonlarında ölçülen pH değerleri 6,93-7,83 aralığında değişim gösterirken KOİ konsantrasyonunun artırılmasından sonraki aşamada döngü sonlarında kaydedilen pH değerleri 4,8-6,0 aralığında değişim göstermiştir (Şekil 3). Karışık sıvı örneklerinin mikroskop altında incelenmesi sonucunda pH değerinde yaşanan bu ani düşüş ile birlikte filamentli mikroorganizmaların popülasyonunda artış meydana geldiği görülmüştür. Öte yandan çamurun rengi açık sarı renkten orijinal rengi olan koyu kahverengiye değişmiştir.

Reaktörde meydana gelen değişimler neticesinde çamurun çökme performansı azalmıştır. Bu aşamada ÇHİ değerinin 35 mL/g değerinden 136 mL/g değerine kademeli olarak artması (Şekil 1) sonucunda çamurun çökme performansında meydana gelen azalma birlikte çıkış suyunun boşaltılması esnasında yaşanan biyokütle kaybından dolayı MLSS konsantrasyonunda kademeli olarak azalma (52. günde 2628 mg/L) (Şekil 1) ve çıkış suyu AKM konsantrasyonunda kademeli olarak artış (ortalama 99 mg/L, Çizelge 5) meydana gelmiştir (Şekil 2). Reaktördeki işletme şartlarının bozulması neticesinde KOİ giderim verimi de 44-52. günler arasında %97 değerinden kademeli olarak %74 değerine azalmıştır (Şekil 3). Reaktör işletimi sonlandırılmadan önce 50-52. günler arasında döngü sonlarında 150 mL çamur çekilmesine ve döngü başlarında karışık sıvının pH değeri 7,0-7,3 olacak şekilde ayarlanmasına rağmen reaktör şartları iyileştirilememiştir.

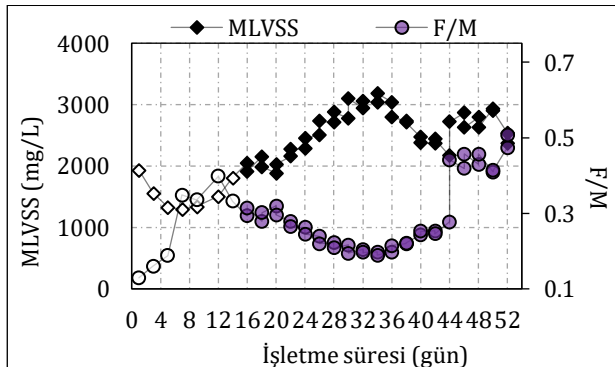
Reaktördeki SRT değeri reaktörden çamur atılmadığı için karışık sıvının MLSS konsantrasyonuna ve çıkış suyunun AKM konsantrasyonuna bağlı olarak değişim göstermiştir. İlk 15 günlük alıştırma aşamasında MLSS ve çıkış suyunun AKM konsantrasyonu çamurun çökme performansındaki değişime bağlı olarak dalgalanma yaptığından dolayı SRT değeri önce azalan ve daha sonra artan bir değişim göstermiştir (Şekil 2). Bu aşama için hesaplanan SRT değerleri 15-53 gün aralığındadır ve ortalama olarak 31,5 gün olarak hesaplanmıştır. Alıştırma aşamasından sonraki süreçte karışık sıvının MLSS konsantrasyonunun kademeli olarak arttığı ve çıkış suyunun AKM konsantrasyonunun nispeten daha düşük olduğu 16-36. günler arasında SRT değerleri 20-173 gün aralığında değişim göstermiş ve ortalama olarak 71,6 gün olarak hesaplanmıştır. Bu aşamada SRT değerlerinin nispeten yüksek olması,

daha önce bahsedildiği gibi flok yapısında sonradan meydana gelen bozulmanın sebebi olduğu düşüncesini desteklemektedir. 36-42. günler arasında flok yapısının bozulması ile birlikte çıkış suyunun AKM konsantrasyonundaki artışa ve MLSS konsantrasyonundaki azalmaya bağlı olarak SRT değerleri 11,4-19,8 gün aralığında değişim göstermiş ve ortalama olarak 15,2 gün olarak hesaplanmıştır. Başlangıç KOİ konsantrasyonunun artırıldığı 44-52. günler arasında MLSS konsantrasyonu nispeten artmış olmasına rağmen çamur çökme performansının azalmasından dolayı çıkış suyu AKM konsantrasyonunun artmasına bağlı olarak SRT değerleri bu aşamada 7,8-15,4 gün aralığında değişim göstermiştir ve ortalama olarak 12,2 gün olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. Reaktörün KOİ giderim verimi ve döngü sonunda ölçülen pH değerleri.

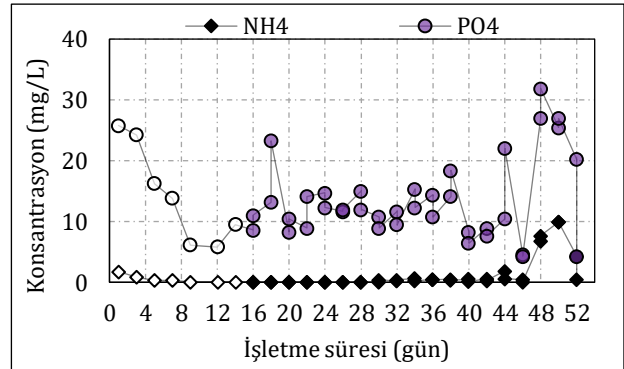
Reaktörün MLVSS konsantrasyonu ve F/M oranı değişimleri Şekil 4'te görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre MLVSS konsantrasyonundaki değişim karışık sıvının MLSS konsantrasyonunun değişimine orantılı olarak değişim göstermiştir. 52 günlük tüm işletme süresi boyunca MLVSS/MLSS oranı (veri gösterilmemiştir) ortalama olarak %89 olarak hesaplanmıştır. F/M oranı ise alıştırma aşamasında OYH değerindeki kademeli artışa ve MLSS konsantrasyonundaki değişime bağlı olarak dalgalanma göstermiştir. Hesaplanan ortalama F/M oranları alıştırma aşamasında beşer günlük aşamalar için sırası ile 0,16, 0,35 ve 0,36 kg KOİ/kg MLVSS.gün olarak elde edilmiştir. Alıştırma aşamasından sonraki aşamada ortalama F/M değerleri ise OYH değerinin artırıldığı 44. güne kadar 0,24 kg KOİ/kg MLVSS.gün ve işletmenin sonraki aşaması için ise 0,44 kg KOİ/kg MLVSS.gün olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. Reaktörün MLVSS ve F/M profili.

3.2. Çıkış suyunun NH_4^+ ve PO_4^{3-} profili

Nitrifikasyonun inhibe edilmesi amacıyla tüm işletme süresi boyunca sentetik atıksuya inhibitör dahil edilerek besleme yapılan reaktörün çıkış suyunun NH_4^+ ve PO_4^{3-} konsantrasyonu ölçümlerinden elde edilen sonuçlar Şekil 5'te görülmektedir. Çıkış suyunun PO_4^{3-} profili incelendiğinde alıştırma aşaması boyunca konsantrasyonların dalgalanma gösterdiği tespit edilmiştir. Alıştırma aşamasından sonra ise konsantrasyonlar 6,4-23,3 mg/L aralığında değişim göstermiştir ve ortalama olarak 11,8 mg/L (Çizelge 5) olarak hesaplanmıştır. Başlangıç PO_4^{3-} konsantrasyonunun 14,3 mg/L olduğu göz önüne alındığında bu aşama boyunca reaktörde düşük verimde PO_4^{3-} giderimi gerçekleştiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu durum aerobik modda işletilen bir reaktör için beklenen bir durumdur. OYH artışının sağlandığı aşamadan sonra başlangıç PO_4^{3-} konsantrasyonunun artması (28,6 mg/L) ile birlikte çıkış suyunun PO_4^{3-} konsantrasyonları da artış göstermiştir. Reaktör işletiminin son aşamasında konsantrasyonlar ortalama 18,5 mg/L (Çizelge 5) olarak hesaplanmıştır.

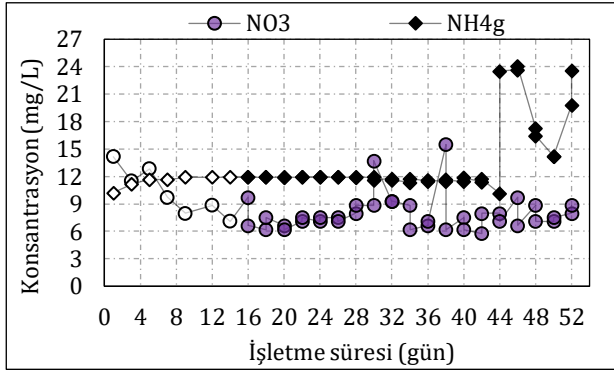


Şekil 5. Reaktörün çıkış suyunun NH_4^+ ve PO_4^{3-} konsantrasyonu.

Çıkış suyunun NH_4^+ konsantrasyonu ölçümlerinden ve giderilen NH_4^+ konsantrasyonunun hesaplanmasından elde edilen sonuçlara (Şekil 5 ve 6) göre OYH değerinin artırıldığı 44. güne kadar yapılan işletme süresi boyunca çıkış suyunun NH_4^+ konsantrasyonları 0,05-1,86 mg/L aralığında değişim göstermiştir ve ortalama olarak 0,31 mg/L (Çizelge 5) hesaplanmıştır. OYH artışı ile birlikte başlangıç NH_4^+ konsantrasyonunun artışına bağlı olarak çıkış suyunun NH_4^+ konsantrasyonu ve giderilen NH_4^+ konsantrasyonu artış göstermiştir ve 44-52. günler arasındaki aşama için ortalama konsantrasyon 4,46 mg/L değerine yükselmiştir (Çizelge 5).

Reaktörde inhibisyon uygulanmasının etkisi ayrıca çıkış suyunun NO_2^- ve NO_3^- konsantrasyonlarının ölçülmesi ile değerlendirilmiştir. Tüm işletme süresi boyunca NO_2^- konsantrasyonları ortalama olarak 0,098 mg/L olarak hesaplanmıştır (veri gösterilmemiştir). NO_3^- konsantrasyonları ise OYH artışı ile NH_4^+ konsantrasyonunun artmasından

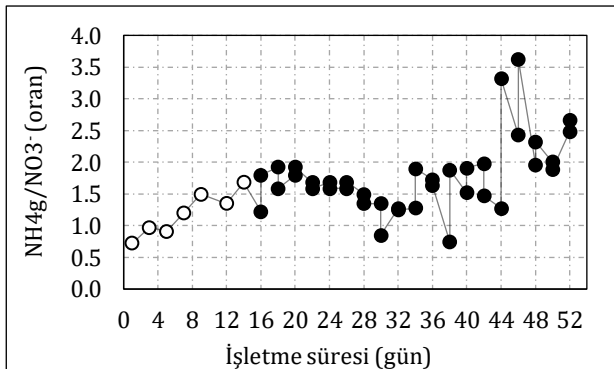
bağımsız olarak tüm işletme süresi boyunca çok fazla değişim göstermemiştir (Şekil 6) ve ortalama olarak 44. güne kadar 8,41 mg/L ve 44-52. günler arasındaki aşama için 7,87 mg/L olarak hesaplanmıştır (Çizelge 5).



Şekil 6. Reaktörde giderilen NH₄⁺ (NH_{4g}) konsantrasyonu ve çıkış suyunun NO₃⁻ konsantrasyonu.

İnhibisyonun çıkış suyunundaki NO₃⁻ konsantrasyonunun değişimine etkisi ayrıca reaktörde giderilen NH₄⁺ konsantrasyonunun çıkış suyunundaki NO₃⁻ konsantrasyonuna oranı ile değerlendirilmiştir (Şekil 7). Başlangıç NH₄⁺ konsantrasyonunun artırıldığı 44. güne kadar yapılan işletme boyunca ortalama oran 1,36 olarak hesaplanırken 44-52. günler arasında reaktörde giderilen NH₄⁺ konsantrasyonunun artmasına ve çıkış suyunundaki NO₃⁻ konsantrasyonunun inhibisyon etkisi nedeni ile artmamasına bağlı olarak ortalama oran 2,51 değerine yükselmiştir (Çizelge 5).

Tüm işletme süresi üç temel aşamaya (alıştırma aşaması 0-15 gün, başlangıç KOİ konsantrasyonunun artışından önceki aşama 16-43 gün ve başlangıç KOİ konsantrasyonunun artırıldığı aşama 44-52 gün) bölünerek deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ayrıca ortalama değerlere göre Çizelge 5'te özetlenmektedir.



Şekil 7. Giderilen NH₄⁺ (NH_{4g}) konsantrasyonunun çıkış suyunundaki NO₃⁻ konsantrasyonuna oranı.

4. Tartışma ve Sonuç

4.1. Reaktör performansı

Reaktör işletiminin ilk 5 gününde MLSS konsantrasyonunda meydana gelen azalma; (i)

çamurun çökme performansının azalması sebebiyle çamurun bir kısmının çöktürme aşamasının sonunda çıkış suyunun boşaltıldığı noktanın altına inememesi, ve (ii) flok yapısına henüz dahil olamamış veya floka zayıf halde bağlı halde olan küçük boyutlu partiküllerin çökmekte zorlanmasından dolayı çıkış suyunun disperse halde bulunması sebebiyle çıkış suyunun boşaltılması esnasında yaşanan biyokütle kaybından ileri gelmiştir.

36-44. günler arasında çamurun çökme performansı hala artıyor olmasına rağmen çıkış suyunun AKM konsantrasyonunun artması (Şekil 2), bu süreçte flok yapısında meydana gelen bir değişimin (muhtemelen granüler flok yapısından tekrar floküler flok yapısına değişim) disperse haldeki partiküllerin miktarında artışa sebep olması ile ilişkilendirilmiştir. Konvansiyonel biyolojik arıtma sistemlerine kıyasla daha uzun SRT değerlerine sahip olan şartlarda işletilen membran biyoreaktör (MBR) sistemlerinin yüksek biyokütle konsantrasyonu nedeni ile arıtma veriminde daha fazla artışa imkan sağladığı ve bu avantajından dolayı bazı MBR sistemlerinin sonsuz SRT şartında işletilebildiği belirtmiştir [17]. Sonsuz SRT şartında 4 ay boyunca işletilen membran AKR sisteminde farklı işletme değişkenlerinin çöp deponi sahası sızıntı sularının arıtılması üzerine etkileri araştırılmıştır [18]. Elde edilen sonuçlar başlangıç değeri 7000 mg/L olan MLSS konsantrasyonunun 15300 mg/L değerine ulaştığını fakat KOİ giderim veriminin tüm çalışma periyodu boyunca %40-60 aralığında elde edilebildiğini ortaya koymuştur. Reaktörün daha yüksek KOİ giderim verimi elde etmede bariz şekilde yetersiz kalması sızıntı suyunun mevcut bulunan hümik ve fulvik asit gibi bazı bileşiklerin zor parçalanabilirliğinin yanı sıra çamur yaşının yüksek olması ile ilişkilendirilmiştir. Sonuç olarak mikrobiyal topluluğun aktivitesinin kontrol edilmesi için uygun miktarda çamurun reaktörden atılarak uygun bir SRT değerinde işletim yapılması gerektiği önerilmiştir. Mevcut çalışmada flok yapısında meydana gelen değişimin, döngü sonlarında reaktörden çamur çekilmediği için oldukça yüksek SRT şartında işletim yapılmasından ötürü granüler haldeki çamurun deflokülasyonundan ileri geldiği düşünölmüştür. Bu nedenle flok yapısının yeniden granüler hale gelmesi ve olası biyokütle kayıplarının önlenmesi amacıyla reaktör işletiminin 44. gününden itibaren sentetik atıksudaki başlangıç KOİ konsantrasyonu 250 mg/L değerinden 500 mg/L değerine artırılmıştır.

Reaktör işletiminde 44-52. günler arasında işletme şartlarının bozulmasına sebep olan ani pH düşüşünün, iki durumun çift etkisi nedeni ile ileri geldiği düşünölmüştür:

i. Başlangıç KOİ konsantrasyonunun artması sonucunda aerobik reaksiyonun son ürünü olan CO₂ konsantrasyonunun, başlangıç KOİ konsantrasyonunun 250 mg/L olduğu şartlara göre daha fazla artması,

Çizelge 5. Reaktör işletiminin farklı aşamalarında elde edilen ortalama değerler

Aşama (Gün)	Ortalama değerler						
	MLSS (mg/L)	AKM (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	NH _{4g} (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NH _{4g} /NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻ (mg/L)
0-15	1758	51	0,49	11,5	10,3	1,18	14,5
16-43	2843	40	0,27	11,7	7,95	1,54	11,8
44-52	3003	99	4,46	19,6	7,87	2,51	18,5

ii. Reaktörün 250 mg/L başlangıç KOİ konsantrasyonu şartlarında sahip olduğu alkalinitenin, CO₂ konsantrasyonunun daha fazla artması yeteri kadar tamponlama kapasitesine sahip olmaması.

Elde edilen sonuçlar (Şekil 1-3) özet olarak değerlendirildiğinde reaktördeki işletme şartlarının bozulmasına yol açan pH düşüşünün meydana geldiği 44. güne kadar uygulanan işletme şartlarının yüksek KOİ giderme ve yüksek çökme performansına sahip olan çamurun uzun bekleme süreleri boyunca alıkonmasına imkan sağladığı tespit edilmiştir. Fakat reaktördeki pH değişiminin prosesi yöneten baskın mikroorganizma gruplarını değiştirerek 44. günden itibaren reaktör performansının bozulmasına yol açan önemli bir faktör olduğu söylenebilir. Bu nedenle reaktör işletiminde hem reaktörden belirli hacimde çamur atılmasının hem de döngü başlarında pH ayarlaması yapılmasının gerektiği olduğu sonucuna varılmıştır.

Farklı işletme koşullarının aktif çamurda aerobik granüllerin oluşumu üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmada [19] HRT değerinin 8 ve 6,75 saat olarak ayarlandığı AKR'de denemeler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 17 hafta boyunca yürütülen 8 saatlik HRT ile yapılan işletimin biyokütlelerin granüler hale gelmesini sağlamak açısından yetersiz (süre bakımından uzun) kaldığı, bu süreçte işletmenin granülasyonu teşvik edebilecek olan yüzeysel gaz hızının artırılması ile kombine edilmesi hallerinde dahi HRT değerinin çamurun stabil hale gelmesine yardımcı olmadığı bildirilmiştir. Bu problemin HRT'nin 6,75 saate düşürülmesi ile çözülmesi sonucunda işletmenin farklı işletme koşulları ile kombine edilmesi sonucunda granüler biyokütlelerin stabilitesinin arttığı tespit edilmiştir. HRT değeri 8 saat iken yapılan işletmenin ilk birkaç gününde oldukça fazla sayıda filamentli mikroorganizma ve fungiden ibaret olan stabil olmayan ve parçalara ayrılabilen granül gelişimi gözlemlenmiştir. Bu süreçte çökme performansı düşük olan çamur, biyokütle yıkanması sonucunda sistemden uzaklaşmıştır. HRT değerinin 6,75 saate düşürülmesi ile yeni bir granülasyon süreci başlamıştır ve devam eden işletme süreci boyunca filament içermeyen kararlı (yüksek çökme performansına sahip olması nedeniyle biyokütle yıkanması oluşmayan) granüller yeniden oluşmaya başlamıştır.

HRT değerinin aerobik granüler çamur oluşumuna etkisinin incelendiği bir başka çalışmada [20] ise 3 ve 12 saatlik HRT değerlerine sahip iki özdeş reaktörün

işletimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlarda 3 saatlik HRT şartında günlük 8 özdeş döngü ile işletilen reaktörde 16 döngülük işletme süresi sonunda ÇHİ değerinin 103 mL/g değerinden 45 mL/g değerine azaldığı tespit edilmiştir. Bu sonucun aksine 12 saatlik HRT şartında işletilen reaktörde ise 16 döngülük işletme sonunda çamurun çökme performansının kötüleştiği, devam eden işletme sürecinde meydana gelen biyokütle yıkanması sonucunda MLSS konsantrasyonunun azaldığı, küçük granüllerin bu süreçte oluşmaya başlaması ile çamurun çökme performansının ancak 22 gün sonunda iyileştiği tespit edilmiştir.

OYH'nin aerobik granüler çamur oluşumuna etkisinin incelendiği çalışmada [21] OYH değerleri 3, 6 ve 9 kg KOİ/m³.gün olacak şekilde başlangıç KOİ konsantrasyonları 1000 mg/L, 2000 mg/L ve 3000 mg/L olarak ayarlanan üç özdeş reaktörde deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre OYH'nin belirli bir seviyeye kadar artması durumunda çamurun granüler özelliklerinin ve dolayısıyla reaktör performansının iyileştiği sonucu ortaya konmuştur. Söz konusu çalışmada en iyi reaktör performansı OYH'nin 6 kg KOİ/m³.gün olduğu reaktörde elde edilirken yükün artırılması KOİ gideriminde dalgalanmaya ve MLSS konsantrasyonunda azalmaya sebep olmuştur.

Başka bir çalışmada [22] farklı işletme şartlarının aerobik granüler çamur oluşumuna etkisini incelemek amacıyla dört farklı AKR'de deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir reaktörde, diğer üçü eşit ve biri farklı değerde olmak üzere OYH, çamur çöktürme süresi, aerobik döngü süresi ve hava debisi değişken faktör olarak denenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yüksek çökme performansına sahip aerobik granüler çamurun, başlangıç çamur çöktürme süresinin 15 dk. olduğu ve bu sürenin 45 günlük işletme süresi boyunca kademeli olarak 1 dk'ya kadar azaldığı reaktörde elde edildiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak incelenen değişken faktörler arasında granüler çamur oluşumuna etki eden en önemli faktörün çöktürme süresi olduğu bildirilmiştir.

AKR'ler için ana tasarım kriterinin floküler haldeki aktif çamur floklarının sistemden yıkanması halinde bu tip bir çamura nazaran daha yoğun ve dolayısıyla çökme hızı daha yüksek olan granüler haldeki çamurun elde edilmesine dayandığı bildirilmiştir [19]. Bu nedenle floküler biyokütlenin sistemden yıkanarak granüler çamur oluşumunun sağlanması amacıyla reaktör işletiminin çökme aşamasında çamurun çöktürülmesi için ayrılan sürenin esas tasarım parametresi olduğu ve nispeten kısa çökme

süresinin nihayetinde kısa sürede çökebilecek olan biyokütle partikülleri için seçicilik sağlayacağı belirtilmiştir. Mevcut çalışmanın alıştırma aşaması için yukarıda bahsedilen literatür çalışmalarında tespit edilen bulgular dikkate alınarak belirlenmiş olan işletme stratejisi, reaktördeki işletme şartlarının bozulduğu aşamaya kadar tüm işletme süresi boyunca çamurun MLSS konsantrasyonunun artmasına rağmen çok kısa bir sürede (10 dk) çökmesi ve yüksek verimde KOİ giderimi sağlanması ile başarılı şekilde sonuçlanmıştır. Tüm deneysel çalışmalarda alıştırma aşamaları boyunca döngü sürelerinin kademeli olarak kısaltılması ile HRT değerinin azaltılmasının sağlanması ve her döngüde arıtılan sentetik atıksu hacminin artırılması ile hem HRT'nin azaltılması hem de OYH değerinin artırılmasının çift etkisi ile aktif çamurun çökme performansında tüm işletme süreleri boyunca iyileşme meydana gelmiştir. Öte yandan 15 günlük alıştırma aşaması boyunca çöktürme süresinin günlük olarak birer dakika kısaltılması da bu performansın artışına katkı sağlamıştır.

AKR sistemi kullanılarak yapılan benzer bir çalışmada [23] tüm işletme süresi boyunca MLVSS/MLSS oranı ortalama olarak %87-88 tespit edilmiştir. Normal (sağlıklı) yapıda olan bir aktif çamur flokunun %60-90 oranında MLVSS içerdiği belirtilmiştir [24]. Bu bakımdan MLVSS/MLSS oranı bir aktif çamur sisteminin işletilmesinde flokların organik madde içeriği bakımından durumunu ifade eden önemli bir kontrol parametresi olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada MLVSS/MLSS oranı için elde edilen sonuçlar, tüm işletme süresi boyunca aktif çamur floklarının organik madde içeriği bakımından normal yapıda olduğunu ortaya koymuştur.

OYH'nin aerobik granüler çamur oluşumuna etkisinin araştırıldığı çalışmada [25] dört adet AKR işletimi gerçekleştirmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre reaktör performanslarının nispeten kötü olduğu daha düşük OYH şartında (1 ve 2 kg KOİ/m³.gün) işletilen reaktörlerin F/M oranının, OYH'nin daha yüksek (4 ve 8 kg KOİ/m³.gün) olduğu diğer iki reaktörde elde edilen F/M oranlarına kıyasla daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Düşük performansla sahip olan reaktörlerde 52 günlük işletme süresi boyunca F/M oranları ortalama olarak 1,95 ve 2,94 kg KOİ/kg MLVSS.gün olarak hesaplanmıştır. Bu reaktörlerin arıtma performansı daha yüksek olan diğer reaktörlere kıyasla daha düşük MLVSS konsantrasyonuna sahip olduğu ve çamurun zayıf çökme özelliğine sahip olan biyokütlelerden ibaret olduğu belirtilmiştir. Performans bakımından daha yüksek arıtma verimine sahip reaktörde ise aerobik granüller ile 12. gün sonunda domine edilen biyokütleyle sahip reaktörün F/M oranının bu süre sonunda 1,35 kg KOİ/kg MLVSS.gün değerinden 0,33 kg KOİ/kg MLVSS.gün değerine azaldığı ve biyokütlelenin 12000 mg/L MLVSS konsantrasyonuna ulaşarak stabilize hale geldiği tespit edilmiştir. OYH

değerinin en yüksek olduğu arıtma performansı yüksek olan diğer reaktörde ise işletmenin 18. gününde granüler çamur oluşumu ile birlikte F/M oranının 4,43 kg KOİ/kg MLVSS.gün değerinden 1,33 kg KOİ/kg MLVSS.gün değerine azaldığı, fakat bu değer nihai olarak parçalara ayrılarak dağılarak reaktörden yıkanma ile uzaklaşacak olan genç biyokütelleri idare etme açısından yüksek olduğu açıklanmıştır. Sonuç olarak reaktör ortamındaki beslenme durumunun mikroorganizmaların kümelenmesini sağlamada önemli bir fizyolojik faktör olduğu ve yeterli düzeyde düşük F/M oranlarının stabil aerobik granüllerin elde edilmesinde temel gereksinim olduğu belirtilmiştir. Söz konusu çalışmada en yüksek performans ve arıtma verimine sahip olan reaktör için elde edilen F/M değerleri, mevcut çalışmada elde edilen F/M değerleri ile uyumlu olmuştur.

4.2. Çıkış suyu kalitesi

Çıkış suyunun NH₄⁺ konsantrasyonunun tespit edilmesi için elde edilen sonuçlar (Şekil 5) reaktörde nitrikasyon inhibisyonu sağlanmasına rağmen 44. güne kadar yapılan işletmede amonyumun yüksek verimde giderildiğini ve MLSS konsantrasyonunun işletme süresi boyunca nispi olarak artışı ile birlikte amonyumun mikroorganizmalar tarafından temel N kaynağı olarak kullanıldığını ortaya koymuştur.

Reaktör işletiminde 44-52. günler arasındaki ortalama NO₃⁻ konsantrasyonunun başlangıç NH₄⁺ konsantrasyonunun artırılmasından önceki aşama için hesaplanan ortalama NO₃⁻ konsantrasyonundan düşük elde edilmesi;

- i. 44. günden önceki aşamada reaktörde inhibisyon uygulanmasına rağmen nispeten düşük başlangıç NH₄⁺ konsantrasyonu ile reaktöre sağlanan amonyumun mikroorganizmalar tarafından temel N kaynağı olarak kullanılmasından ötürü inhibisyonun baskılandığını ve çıkış suyu NH₄⁺ konsantrasyonunun oldukça düşük seviyede elde edilmesine yol açtığını,
- ii. 44. günden itibaren başlangıç NH₄⁺ konsantrasyonu artmasına rağmen NO₃⁻ konsantrasyonunun artış göstermemesinin ve çıkış suyunda NH₄⁺ konsantrasyonunun artmasının inhibisyonun ileri geldiğini net şekilde ortaya koymuştur.

Atıksuların biyolojik arıtma sistemleri ile arıtılmasında mikroorganizma topluluğunu içeren aktif çamurun çökme performansı, hem organik maddeler bakımından arıtma performansını hem de arıtma çamurlarının bertarafı işlemlerinde çamurun yoğunlaştırma ve susuzlaştırma özelliklerini etkileyen önemli bir unsurdur. Çamurun çökme performansının yüksek olması ve mikroorganizmaların verimli şekilde çalışmalarının sağlanması ancak iyi derecede dizayn edilmiş ve kontrollü işletme şartları altında işletilen bir aktif çamur sisteminde mümkün olmaktadır. Doğası gereği

birçok farklı işletme parametresi ile ilgilenmeyi ve üst düzeyde işletme özeni sağlamayı gerektiren aktif çamur sistemleri üzerine araştırmalar yapılırken atıksu karakteristiklerinin iyi analiz edilmesi ve işletme parametrelerinin dikkatlice incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, çalışmanın amaçları doğrultusunda işletimi dizayn edilen AKR'nin işletiminde alıştırma aşaması süresince uygulanan işletme stratejileri, hem çok hızlı çökebilme özelliğine sahip olan hem de yüksek verimde KOİ giderme kabiliyetine sahip olan bir aktif çamurun kısa süreli bir alıştırma aşamasında nasıl elde edilebileceğini ortaya koymuştur.

Dünya genelinde özellikle yoğun şekilde yapılan tarımsal uygulamalarda kullanmak üzere yüksek miktarda tüketimi ve bu oranda üretimi yapılarak rezervleri tüketilen P ve gübre üretimi için yüksek enerji gerektiren N gibi kaynakların sürdürülebilir şekilde kullanımını sağlamak için son yıllarda yapılan çalışmalar arasında atıksu arıtma tesislerinde nütrient geri kazanımı konusu oldukça yoğun ilgi görmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre N ve P gideriminin yapılmadığı veya kısmen sağlandığı temel olarak karbon giderimi üzerine dizayn edilmiş klasik aktif çamur tesislerinin çıkış sularından nütrient geri kazanım potansiyelini artırmak üzere nitrikasyon inhibisyonunun alternatif bir yaklaşım olarak potansiyelinin bulunduğu tespit edilmiştir. Bu potansiyeli daha fazla artırmak üzere ileride yapılabilecek çalışmalarda reaktör işletiminin daha uzun süreli yapılması, farklı inhibitör maddeler ile çalışılarak nitrikasyon inhibisyonunun veriminin artırılması ve farklı substrat kaynaklarının ve işletim parametrelerinin değişiminin çıkış suyu kalitesi üzerine olan etkisinin araştırılması önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmayı FYL-2018-6718 numaralı proje ile destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] Tornroth-Horsefield, S., Neutze, R. 2008. Opening and Closing the Metabolite Gate. Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A, 105(50):19565-6.
- [2] Sengupta, S., Nawaz, T., Beaudry, J. 2015. Nitrogen and Phosphorus Recovery from Wastewater. Current Pollution Reports, 1, 155-166.
- [3] Manav, N. 2006. Ardışık kesikli reaktör ile evsel atıksulardan azot ve fosfor giderimi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s, İstanbul.
- [4] Oleszkiewicz, J., Kruk, D., Devlin, T., Lashkarizadeh, M., Yuan, Q. 2015. Options for

Improved Nutrient Removal and Recovery from Municipal Wastewater in the Canadian Context. <http://cwn-rce.ca/wp-content/uploads/2016/04/Oleszkiewicz-KI-Report-March-2015.pdf> (Erişim Tarihi: 18.10.2019).

- [5] Hamilton, R., Braun, B., Dare, R., Koopman, B., Svoronos, S. A. 2006. Control Issues and Challenges in Wastewater Treatment Plants. IEEE Control Systems Magazine, 26(4), 63-69.
- [6] Türkiye İstatistik Kurumu Belediye Atıksu İstatistikleri. <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=120&locale=tr> (Erişim Tarihi: 28.11.2019).
- [7] Anonim, 2004. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. Resmi Gazete, No: 25687.
- [8] Anonim, 2008. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği. Resmi Gazete, No: 26786.
- [9] Anonim, 2016. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılması Hakkında Yönetmelik. Resmi Gazete, No: 29589.
- [10] Anonim, 2006. Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği. Resmi Gazete, No: 26047.
- [11] Pastor, L., Marti, N., Bouzas, A., Seco, A. 2008. Sewage Sludge Management for Phosphorus Recovery as Struvite in EBPR Wastewater Treatment Plants. Bioresource Technology, 99, 4817-4824.
- [12] Howorth, C., Wirtel, S. 2015. Nutrient Recovery Delivers Economic and Environmental Sustainability, and Helps You Meet Effluent and Biosolids Nutrient Permits. https://cdn.ymaws.com/www.ncsafewater.org/resource/collection/DA8375FB-1514-4325-9CF6-0369B08C4385/WW_Mon_NOON_12.45_Howorth_PAPER.pdf (Erişim Tarihi: 04.11.2019).
- [13] Jeyanayagam, S., Hahn, T., Fergen, R., Boltz, J. 2012. Nutrient Recovery, an Emerging Component of a Sustainable Biosolids Management Program. Proceedings of the Water Environment Federation, 2012(2), 1078-1088.
- [14] Lu, H., Oehmen, A., Viridis, B., Keller, J., Yuan, Z. 2006. Obtaining Highly Enriched Cultures of Candidatus Accumulibacter Phosphates Through Alternating Carbon Sources. Water Research, 40, 3838-3848.
- [15] Tatari, K., Gülay A., Thamdrup, B., Albrechtsen, H. J., Smets, B. F. 2017. Challenges in Using Allylthiourea and Chlorate as Specific Nitrification Inhibitors. Chemosphere, 182, 301-305.
- [16] APHA (American Public Health Association), 1999. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th edition. American

- Public Health Association. Washington, DC, USA, 874s.
- [17] Jadhao, R. K., Dawanse, S. D. 2013. Effect of Hydraulic Retention Time and Sludge Retention Time on Membrane Bioreactor: Performance in Summer Season. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*, 2(2), 1-8.
- [18] Tsilogeorgis, J., Zouboulis, A., Samaras, P., Zamboulis, D. 2008. Application of a Membrane Sequencing Batch Reactor for Landfill Leachate Treatment. *Desalination*, 221(1-3), 483-493.
- [19] Beun, J.J., Hendriks, A., van Loosdrecht, M. C. M., Morgenroth, E., Wilderer, P. A., Heijnen, J. J. 1999. Aerobic Granulation in a Sequencing Batch Reactor. *Water Research*, 33(10), 2283-2290.
- [20] Wang, F., Yang, F. L., Zhang, X. W., Liu, Y. H., Zhang, H. M., Zhou, J. 2005. Effects of Cycle Time on Properties of Aerobic Granules in Sequencing Batch Airlift Reactors. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 21(8-9), 1379-1384.
- [21] Bindhu, B. K., Madhu, G. 2013. Influence of Organic Loading Rates on Aerobic Granulation Process for The Treatment of Wastewater. *Journal of Clean Energy Technologies*, 1(2), 84-87.
- [22] Gao, D., Liu, L., Wu, W. M. 2011. Comparison of Four Enhancement Strategies for Aerobic Granulation in Sequencing Batch Reactors. *Journal of Hazardous Materials*, 186(1), 320-327.
- [23] Hajiabadi, H., Moghaddam, M. R. A., Hashemi, S. H. 2009. Effect of Sludge Retention Time on Treating High Load Synthetic Wastewater Using Aerobic Sequencing Batch Reactors. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 6(4), 217-222.
- [24] Jenkins, D., Richard, M. G., Daigger, M. T. 2004. *Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking, Foaming, and Other Solid Separation Problems*. 3rd edition. CRC Press, Taylor and Francis Group. Florida, Amerika Birleşik Devletleri. 177s.
- [25] Tay, J. H., Pan, S., He, Y., Tay, S. T. L. 2004. Effect of Organic Loading Rate on Aerobic Granulation. I: Reactor Performance. *Journal of Environmental Engineering*, 130(10), 1094-1101.