







Bartın Üniversitesi Yerleşke Atıksularında Monod Kinetiğine Dayalı Biyolojik Arıtım Performansının İncelenmesi

Araştırma Makalesi
10.65520/erciyesfen.1779930

Künye:

Sayı: 42(1)
Yıl: 2026
Sayfa: 79-95

-  Niyazi Erdem Delikanlı^{a*}
-  Mustafa Çıkıkcı^b
-  Ali Can Acar^c
-  Altuğ Yaren^d
-  Duygu Dilek^e
-  Handan Uçun Özel^f

^a Dr. Öğr. Üyesi, Bartın Üniversitesi,
edelikanli@bartin.edu.tr

^b Çevre Mühendisi, Bartın
Üniversitesi,
mustafacikici74@outlook.com

^c Çevre Mühendisi, Bartın
Üniversitesi, canacar74@outlook.com

^d Çevre Mühendisi, Bartın
Üniversitesi,
altugyaren74@outlook.com

^e Çevre Mühendisi, Bartın
Üniversitesi,
duygudilek74@outlook.com

^f Prof.Dr., Bartın Üniversitesi,
handanucun@bartin.edu.tr

* Sorumlu Yazar

Geliş Tarihi: 08.09.2025

Kabul Tarihi: 05.01.2026

Atf:

Niyazi Erdem Delikanlı, Mustafa Çıkıkcı, Ali Can Acar, Altuğ Yaren, Duygu Dilek, Handan Uçun Özel (2026). Bartın Üniversitesi Yerleşke Atıksularında Monod Kinetiğine Dayalı Biyolojik Arıtım Performansının İncelenmesi. *Erciyes University Journal of Institute Of Science and Technology*, 42(1), 79-95. <https://doi.org/10.65520/erciyesfen.1779930>

Screened by



Except where otherwise noted, content in this article is licensed under a Creative Commons 4.0 International license. Icons by Font Awesome.

Öz

Bu çalışmada, Bartın Üniversitesi Kutlubey Yerleşkesi'ndeki 200 m³ gün⁻¹ kapasiteli biyolojik paket Atıksu Arıtma Tesisi (AAT) girişinden alınan evsel nitelikli atıksuların karakterizasyonu yapılmış ve söz konusu atıksuların biyolojik olarak arıtılabilirliği tam-karışımli kesikli biyoreaktör (BR) sistemiyle araştırılmıştır. Çalışmanın amacı, küçük ölçekli kampüs atıksularının aerobik koşullarda giderim performansını değerlendirmek ve biyolojik arıtma sürecine ait temel kinetik parametreleri ortaya koymaktır. Aşı kültürü olarak mevcut AAT'den alınan aktif çamur kullanılmış; reaktöre dört farklı giriş KOİ konsantrasyonunda (100, 150, 170, 200 mg L⁻¹) besleme yapılarak KOİ, MLSS, çözülmüş oksijen ve pH günlük izlenmiştir. KOİ giderim verimi %70-87 aralığında gerçekleşmiş ve mikrobiyal kinetiğin Monod modeline uyduğu belirlenmiştir. Elde edilen kinetik sabitler maksimum özgül büyüme hızı (μ_{max}) 0,159 sa⁻¹ ve yarı doygunluk sabiti (Ks) 65 mg L⁻¹ olup literatürdeki kampüs ölçekli değerlerle uyumludur. BR tasarımının, mevcut sürekli havalandırılmalı paket tesise göre özgül enerji tüketimini yaklaşık %69 azaltma potansiyeline sahip olduğu hesaplanmıştır. Hesaplanan kinetik parametreler ve enerji verimliliği analizi, Türkiye'deki küçük ölçekli (<200 m³ gün⁻¹) arıtma tesisleri için literatürdeki veri eksikliğini gidermekte ve mevcut konvansiyonel sistemlere göre ekonomik açıdan üstün, özgün bir işletme modeli ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Biyolojik arıtma, Monod kinetiği, kesikli biyoreaktör, aktif çamur, kampüs atıksuyu



Investigation of Biological Treatment Performance Based on Monod Kinetics in Bartın University Campus Wastewater

Abstract

In this study, the characterization of domestic wastewater collected from the inlet of the 200 m³ day⁻¹ capacity biological package wastewater treatment plant (WWTP) located at Bartın University's Kutlubey Campus was carried out, and its treatability using a completely mixed sequencing batch reactor (SBR) system was investigated. The primary aim was to evaluate the treatment performance of small-scale campus wastewater under aerobic conditions and to determine the fundamental kinetic parameters of the biological treatment process. Seed sludge was obtained from the existing WWTP, and the reactor was fed at four different influent COD concentrations (100, 150, 170, and 200 mg L⁻¹), while daily monitoring of COD, MLSS, dissolved oxygen, and pH was conducted. COD removal efficiencies ranged between 70-87 %, and the microbial kinetics were found to fit the Monod model. The estimated kinetic parameters were a maximum specific growth rate (μ_{max}) of 0.159 h⁻¹ and a half-saturation constant (Ks) of 65 mg L⁻¹, which are consistent with values reported for campus-scale systems in the literature. The proposed SBR

configuration was found to have the potential to reduce specific energy consumption by approximately 69 % compared to the existing continuously aerated package plant. The calculated kinetic parameters and energy efficiency analysis address the data gap in the literature for small-scale (<200 m³ day⁻¹) treatment plants in Türkiye and present an original operational model that is economically superior to existing conventional systems.

Keywords: Biological Treatment, Monod Kinetics, Batch Bioreactor, Activated Sludge, Campus Wastewater



1. Giriş

Atıksular, hem doğal su kaynaklarına hem de çevreye ciddi zararlar veren en önemli kirlilik kaynaklarından biridir. Artan nüfus, sanayileşme ve kentleşme, atıksu miktarını küresel ölçekte dramatik biçimde yükseltmekte; güvenli arıtım kapasitesindeki ilerleme ise bu artışın gerisinde kalmaktadır [1]. Türkiye’de yapılan güncel çalışmalar da nüfus yoğunluğu ve sanayi faaliyetlerinin atıksu bertarafını başlıca çevresel sorunlardan biri hâline getirdiğini göstermektedir [2]. Atıksular, evsel, endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanmakta ve bu suların kontrolsüz bir şekilde deşarj edilmesi, su ekosistemlerinde ciddi bozulmalara yol açmaktadır [3,4]. Bu nedenle, atıksuların uygun arıtma süreçlerinden geçirilerek deşarj edilmesi, çevre sağlığı açısından zorunlu hale gelmiştir.

Su kirliliğinin izlenmesinde ve deşarj standartlarına uygunluğun belirlenmesinde, organik kirlilik yükünü yansıtan Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) ve Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ) parametreleri temel göstergeler olarak kullanılmaktadır [5,6]. Evsel atıksuların gideriminde yaygın olarak tercih edilen biyolojik arıtma süreçleri, organik maddelerin mikroorganizmalarca giderilmesini esas alarak düşük işletme maliyeti ve çevre dostu bir yaklaşım sunmaktadır [7,8]. Bu teknolojiler arasında en yaygın olan aktif çamur prosesinde; askıda büyüyen mikroorganizmalar aerobik koşullarda organik bileşikleri oksitleyerek zararsız son ürünlere dönüştürmektedir [9,10].

Aktif çamur sistemi, genellikle büyük şehirlerde ve endüstriyel alanlarda tercih edilen bir biyolojik arıtma yöntemidir. Bu yöntemde, mikroorganizmaların yardımıyla organik kirleticiler parçalanır ve biyokimyasal süreçlerle zararsız bileşenlere dönüştürülür. Mikroorganizmaların aktif büyüme hızı, atıksu arıtma tesislerinin performansını belirleyen başlıca etmendir; büyüme metabolizma döngüleri, substrat (organik yük) düzeyiyle birlikte sıcaklık, pH ve çözülmüş oksijen gibi çevresel parametrelerdeki değişime duyarlıdır [11].

Biyolojik arıtım prosesleri aerobik ya da anaerobik koşullarda yürütülür. Aerobik sistemlerde mikroorganizmalar son elektron alıcısı olarak moleküler oksijeni kullanırken, anaerobik sistemlerde nitrat, sülfat veya karbonat gibi oksijensiz akseptörler devreye girer [12]. Hangi sürecin seçileceği, atıksuyun organik kirlilik yüküne ve enerji geri kazanım hedeflerine bağlıdır; özellikle aktif çamur tesislerinde oksijen transfer verimi ve flok içi mikroorganizma yaşlanma yenilenme döngüleri arıtma başarısını doğrudan belirler [13,14].

Türkiye, su kaynakları açısından görece zengin bir hidrojeolojik mozaik üzerinde bulunsa da, hızlı nüfus artışı ve sanayileşme baskısı yüzey ve yeraltı sularında yoğun kirlilik oluşturmaktadır; Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı’nın 2022 değerlendirmesi, 33 ilde su kirliliğini “birinci öncelikli çevre sorunu” olarak kaydetmiştir [15]. Bu baskıyı azaltmak amacıyla büyükşehirlerde ve sanayi yoğun bölgelerde biyolojik ve ileri biyolojik atıksu arıtma tesisleri yaygın biçimde devreye alınmıştır: TÜİK’in 2022 atıksu istatistiklerine göre arıtılan atıksuyun %25,2’si biyolojik, %52,7’si ise ileri (biyolojik fazları da içeren) arıtmadan geçmiştir; 2022’de atıksu arıtma tesisleriyle hizmet verilen belediye nüfusu, toplam belediye nüfusunun %77,7’sine ulaşmıştır [16,17]. Bartın Üniversitesi gibi eğitim kurumları, kendi atıksu arıtma tesislerini işletmekte ve bu tesislerde biyolojik arıtma yöntemlerini kullanmaktadır. Biyolojik arıtma süreçlerinin etkinliği, özellikle KOİ, BOİ, pH ve askıda katı madde (AKM) gibi parametrelerle ölçülmekte ve bu veriler doğrultusunda tesislerin performansı değerlendirilmektedir.

Kesikli biyoreaktörler (BR), küçük ayak izi, esnek işletme ve düşük enerji-kimyasal gereksinimi sayesinde evsel ve endüstriyel atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır. İşletme parametrelerinin—özellikle çamur yaşı, havalandırma süresi ve çevrim tasarımı—optimizasyonu,

modifiye BR sistemlerinde evsel atıksularda %95'e varan KOİ giderimine olanak tanır [18]. Yüksek organik yüklü endüstriyel atıksularda, ön basamak olarak uygulanan yukarı akışlı anaerobik çamur örtüsü (UASB) reaktörleri %80-85 düzeyinde KOİ uzaklaştırma başarısı göstermektedir [19]. Besin maddesi kontrolü için geliştirilen tek kademeli BR konfigürasyonları, uygun çevrim stratejileri altında toplam azotu \approx %90, toplam fosforu \approx %80 oranında gidererek kapsamlı nutrient arıtımı sağlayabilir [20]. Türkiye'de belediyelere yönelik paket tip BR tesisleri standart çözüm hâline gelmiş olup, Van ili tesislerinde raporlanan KOİ giderimi %80-83, BOİ giderimi %86-92 aralığındadır [21]. Bu veriler, aktif çamur tabanlı kesikli sistemlerin, uygun işletme optimizasyonlarıyla organik madde ve besin elementlerini birlikte uzaklaştırarak çevresel sürdürülebilirliğe önemli katkı sunduğunu göstermektedir [22].

Kocaeli Üniversitesi Umuttepe Yerleşkesi'nde yürütülen deneysel NF destekli aktif çamur çalışması, $3\ 000\ m^3\ gün^{-1}$ kapasiteli kampüs tesisinin ikincil çıkış suyunda KOİ giderimini %88'e yükselterek yeniden kullanım potansiyelini ortaya koymuştur [23]. Benzer şekilde Muş Alparslan Üniversitesi'nde geliştirilen iki bölmeli mikrobiyal yakıt hücresi, kampüs kanalizasyonundan alınan ham atıksuda hem KOİ giderimini (%36,8) hem de 96,8 mV'a ulaşan elektrik üretimini aynı reaktörde gerçekleştirme olanağı sunarak enerji artı arıtma yaklaşımlarına yerli bir örnek getirmiştir [24]. Kayseri ilindeki üniversite kent bütünleşik modelinde, paket tip BR ve klasik aktif çamur ünitelerinin ilk yatırım + işletme maliyetleri ayrıntılı olarak karşılaştırılmış; BR konfigürasyonunun eşdeğer KOİ/BOİ giderimini %17 daha düşük yıllık işletme masraflarıyla sağladığı rapor edilmiştir [25]. Öte yandan Van ilinde yapılan çalışmada, yerel AAT'lerin işletme sorunlarını (çamur yaşı dalgalanması, havalandırma enerji kayıpları vb.) saptayarak uzun havalandırma aktif çamur prosesinin mevsimsel performansını %75-80 KOİ giderimi bandında stabilize etmiştir [26].

Literatürde büyük ölçekli kentsel atıksu arıtma tesislerinin tasarımı ve modellenmesi üzerine çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, Türkiye'de debisi $200\ m^3\ gün^{-1}$ 'in altında kalan küçük ölçekli ve yerinde arıtma sistemleri için deneysel olarak belirlenmiş kinetik katsayılar (μ_{max} , K_s) konusunda belirgin bir araştırma boşluğu bulunmaktadır. Bu veri eksikliği, özellikle kampüs benzeri küçük yerleşkelerdeki tesislerin tasarımında literatürden alınan genel kabullerin kullanılmasına ve buna bağlı olarak enerji-işletme verimsizliklerine yol açmaktadır. Bu boşluğu doldurmayı hedefleyen bu çalışma; (i) Bartın Üniversitesi yerleşke atıksuları örneğinde küçük ölçekli sistemler için Monod kinetik parametrelerini deneysel olarak belirleyerek literatüre özgün bir veri seti sunmakta, (ii) mevcut paket arıtma tesisi ile önerilen BR sistemini gerçek işletme verileri üzerinden karşılaştırarak %69 oranında enerji tasarrufu sağlayan ekonomik bir model ortaya koymakta ve (iii) benzer kapasiteye sahip 300'den fazla kamu tesisi için ölçeklenebilir bir işletme stratejisi geliştirmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Atıksu Karakterizasyonu

Deneysel çalışma süresince kullanılan atıksular, Bartın Üniversitesi Atıksu Arıtma Tesisi (BARÜ-AAT) girişindeki atıksulardan temin edilmiştir. Atıksu numuneleri, tesislerden haftalık olarak alınmıştır. Numuneler, steril kaplar içinde $4^{\circ}C$ 'de saklanmış ve 24 saat içinde laboratuvarında analiz edilmiştir [28]. Atıksu karakterizasyonu için KOİ, BOİ, AKM, toplam azot (TN), yağ ve gres miktarları, alkalinite, pH ve bulanıklık parametreleri analiz edilmiştir. Tüm analizler uluslararası standartlara uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Kampüs atıksularının karakterizasyonu Tablo 1'de verilmiştir.

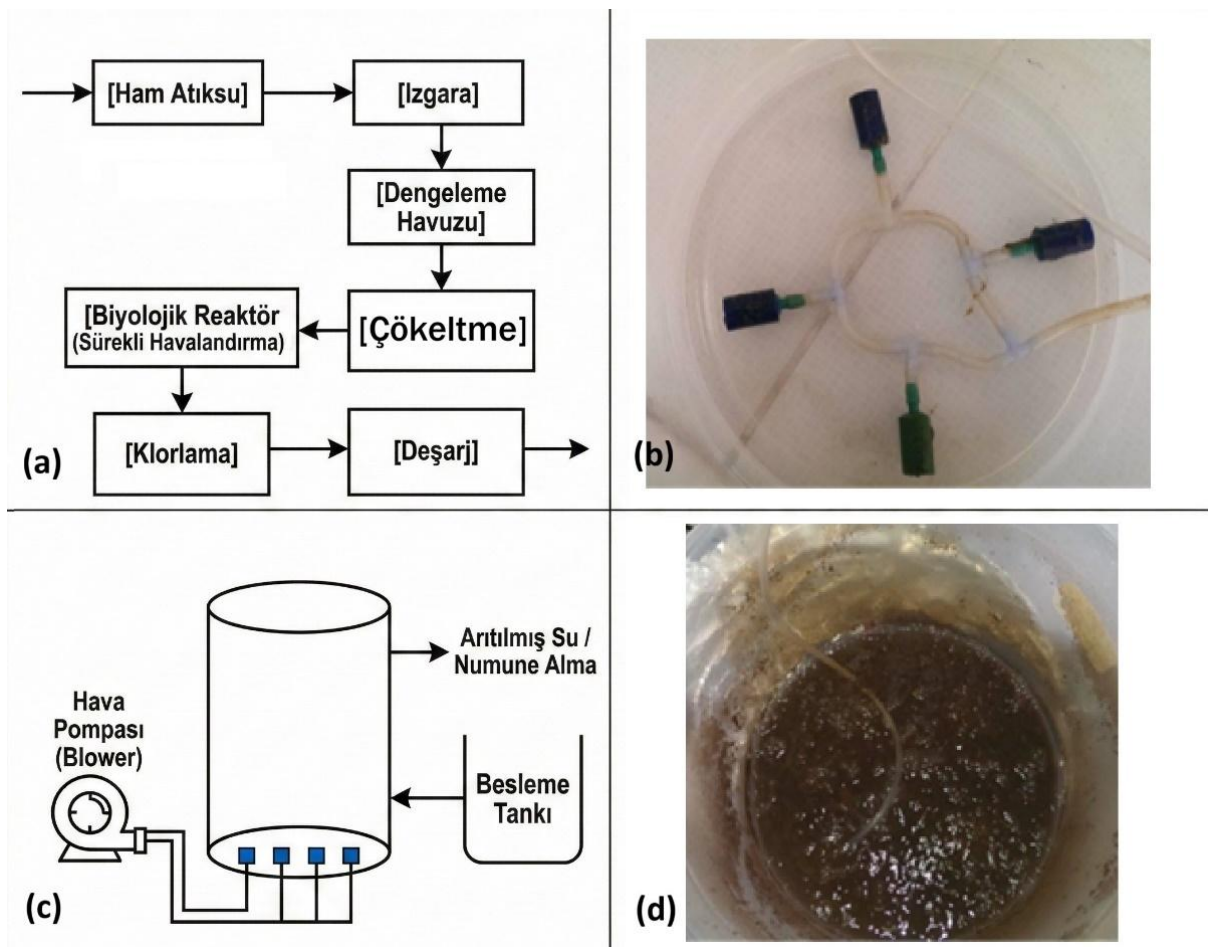
Tablo 1. Atıksu Karakterizasyonu

Parametreler	Bartın Üniversitesi Yerleşke Atıksuyu
Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) (mg L^{-1})	305
Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOİ ₅) (mg L^{-1})	152
Askıda Katı Madde (AKM) (mg L^{-1})	1820
Toplam Kjeldahl Azotu (TKN) (mg L^{-1})	9
Yağ Gres (mg L^{-1})	74
Alkalinite (mg L^{-1})	18
Bulanıklık (NTU)	132
pH	8,1

2.2. Deneysel Yaklaşım

Deneysel çalışmalar, tam karışımli BR kullanılarak gerçekleştirilmiştir. BR sistemleri, düşük işletme maliyetleri ve yüksek verimlilik oranları ile önerilmektedir [27]. Bu çalışmada aşı kültürü olarak Bartın Üniversitesi mevcut atıksu arıtma tesisi havalandırma havuzundan alınan aktif çamur kullanılmıştır. Tam karışımli klasik aktif çamur reaktörünü simüle etmek için reaktörün tabanına 4 adet hava difüzörü (silindirik tip ince gözenekli seramik hava difüzörleri) monte edilmiş ve blower ile çözünmüş oksijen miktarı 2 mg/ L 'nin altına düşmeyecek şekilde havalandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Havalandırma ile reaktöre hem çözünmüş oksijen hem de tam karışım işlemi gerçekleştirilmiştir. 20 Litre hacme sahip reaktörde 5 L atıksu-çamur karışımı olacak şekilde deneylere başlanmış ve biyoreaktör sıcaklığı yaklaşık $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de sabit tutulmuştur. Mikrobiyal kültürün adaptasyonu aşamasında karbon kaynağı olarak arıtma tesislerine gelen atıksular kullanılmış ve aşı kültürünün aklımasyonu sağlanmıştır. Adaptasyon süreci sonunda kesikli biyokinetik katsayıların elde edilmesi amacıyla, kampüs atıksuları belirli giriş konsantrasyonlarında (100 mg L^{-1} - 200 mg L^{-1}) karışım kültürüne beslenmiştir.

Reaktöre günlük olarak besleme yapılmış ve mikroorganizmaların arıtım performansı izlenmiştir. Her bir deneyde, reaktörün çıkış suyu günlük olarak analiz edilmiş ve arıtma verimini takip edebilmek amacıyla KOİ, MLSS, TKN, pH, çözünmüş oksijen ve sıcaklık değerleri sürekli olarak ölçülmüş ve analiz edilmiştir. Biyoreaktöre beslenen atıksu içerisindeki AKM çöktürülerek reaktöre beslendiğinden reaktör içerisinde tespit edilen AKM mikrobiyal kütle (MLSS) olarak kabul edilmiştir. Aynı zamanda sudaki alkalinite de ölçülmüştür. Tam karışımli BR'de çamur yaşı 10 gün olarak sabit tutulmuştur. Aynı zamanda aktif çamur örnekleri mikroskop altında incelenerek mikrobiyal kültür ve çeşitlilik belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 1'de deneylerde kullanılan biyoreaktörün havalandırma difüzör yapısı ve biyolojik aktivite sırasındaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1. (a) Bartın Üniversitesi Mevcut Atıksu Arıtma Tesisi akım şeması, (b) Reaktör tabanına yerleştirilen difüzör yapısı, (c) Laboratuvar ölçekli Kesikli Biyoreaktör (BR) deney düzeneğinin şematik görünümü ve (d) Aktif havalandırma fazında biyoreaktörün görünümü.

Çalışma kapsamında KOİ, BOİ₅, AKM/MLSS, TKN ve alkalinite parametrelerinin analizi, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [28] protokollerinde belirtilen standart yöntemlere uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre; KOİ kapalı reflüks (kolorimetrik) yöntemiyle, BOİ₅ Winkler yöntemiyle, AKM ve MLSS gravimetrik yöntemle (kurutma ve tartım), TKN makro-Kjeldahl yöntemiyle ve alkalinite ise titrimetrik yöntemle tayin edilmiştir. İşletme koşullarının takibi amacıyla pH ölçümleri Mettler Toledo SG8 pH metre ile, çözülmüş oksijen (ÇO) ölçümleri ise HQ40d Hach cihazı ile reaktör içinde anlık olarak yapılmıştır. pH değerleri, 7,5-8,5 aralığında tutulmuştur. Çözülmüş oksijen düzeyi reaktör içinde >2 mg L⁻¹ konsantrasyonunda tutulmuştur. Sıcaklık deneyler boyunca sıcaklık yaklaşık 20°C'de sabit tutulmuştur. Her bir giriş konsantrasyonu (S₀) için deneyler kesikli reaktörde yürütülmüştür. Kinetik verilerin güvenilirliğini sağlamak amacıyla, reaksiyon süresi boyunca (0, 30, 60, 120, 180, 240. dakikalarda) çoklu zaman ölçümleri alınmış ve her bir numune analiz edilerek kinetik eğrinin tutarlılığı izlenmiştir.

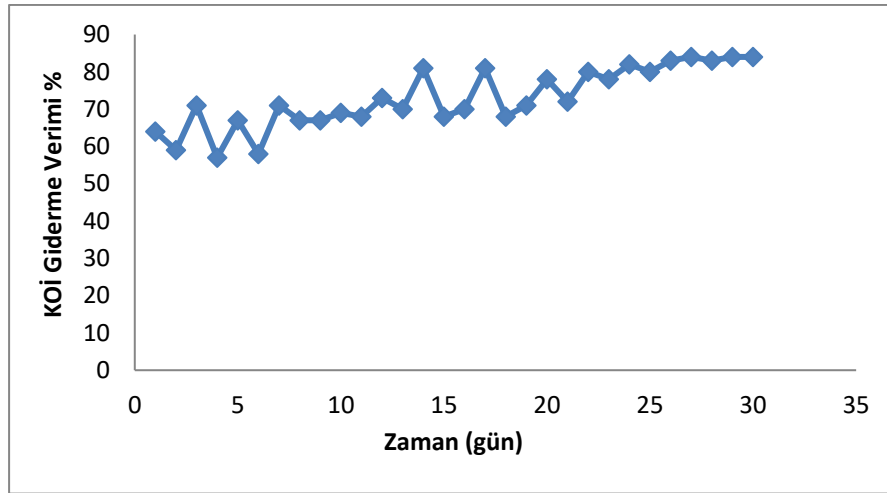
3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, Bartın Üniversitesi Atıksu Arıtma Tesisi (BARÜ-AAT) atıksularının biyolojik arıtılabilirliği incelenmiş ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir. Bulgular, bilimsel olarak derinlemesine analiz edilmiş, biyolojik mekanizmalarla ilişkilendirilmiş ve literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

3.1. Mikrobiyal Aklımasyon

Çalışmada kullanılan BR 30 gün boyunca aynı giriş konsantrasyonu ile işletilmiştir. Alıştırma süreci için günlük atıksu besleme koşullarında elde edilen KOİ olarak karbon giderim verimi Şekil 2’de gösterilmektedir. Şekil 2’den görüldüğü gibi başlangıçta arıtım veriminin %57-71 arasında sürekli değiştiği 8-15 günlük süreçte verimin az artış ile ilerlediği görülmektedir. 15. günden sonra verim %68-82 arasında değişmiştir. 25. günden sonra verimdeki %82-84 arasında çok az değişimle sistemin kararlı hale ulaştığı görülmektedir.

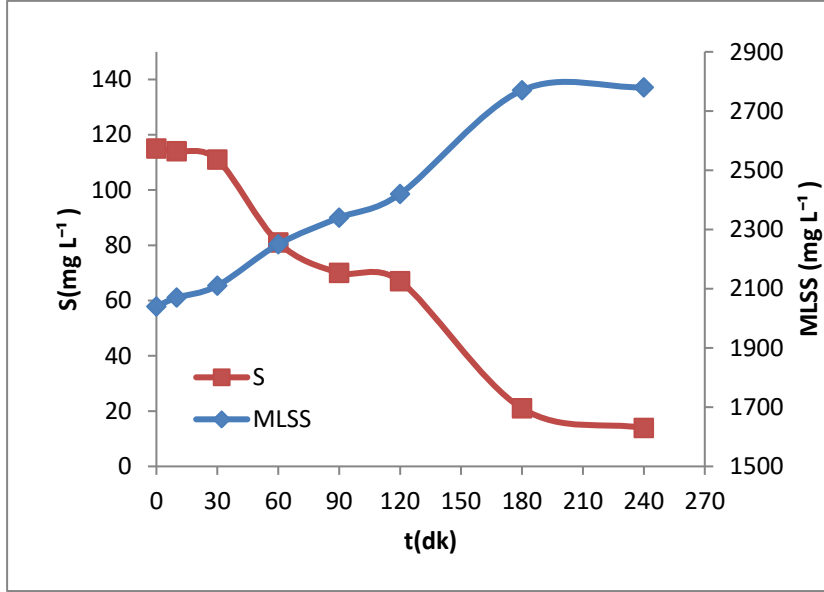
Literatür, kesikli/sekanslı biyoreaktörlerde (BR / SBR) KOİ gideriminin “alıştırma” evresi boyunca dalgalanıp 3–4 hafta içinde kararlı düzeye oturduğunu göstermektedir. Carrasquero Ferrer ve ark., gıda endüstrisi atıksuyunda KOİ uzaklaştırmasının ilk 5 günde %52,8’den 16–20 gün aralığında %77,8’e tırmandığını ve 20. günden sonra değerlerin > %75’te sabitlendiğini bildirmiştir [29]. Ghazani ve ark., evsel nitelikli atıksu beslenen hibrit SBR’de \approx 12–15 gün sonra kararlı biyokütle oluştuğunu ve KOİ gideriminin %91’e yükselerek plato yaptığını raporlamıştır [30]. Türkiye örneğinde, Van Edremit ve Gevaş AAT’leri klasik aktif çamur prosesinde ortalama %80–83 KOİ giderimiyle tam ölçekli referans sunar [26]. Bir başka laboratuvar çalışmasında silindirik BR’nin giderim verimi ilk fazda %83 iken ikinci iki haftada %93’e, 60. günde ise %97’ye erişmiştir [31].



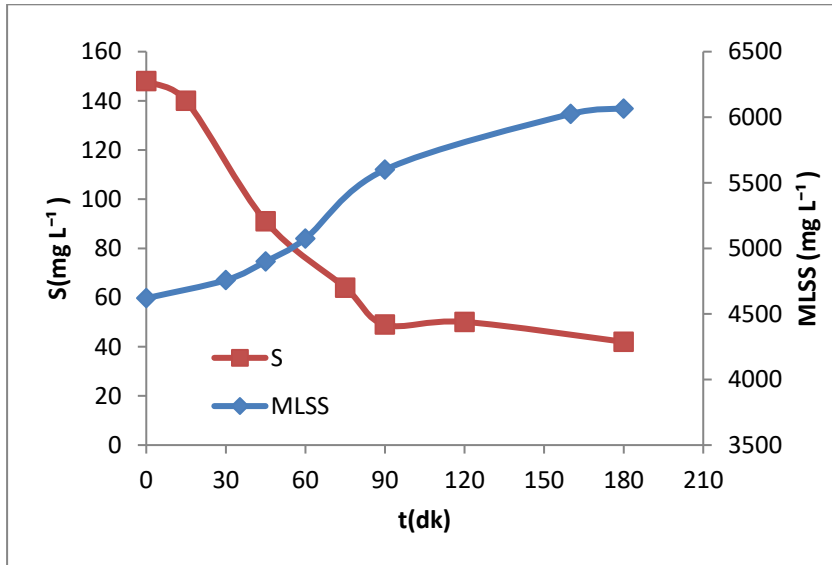
Şekil 2. Karışım kültürü adaptasyon sürecinde KOİ giderim verimi

3.2. Değişen konsantrasyonlarla besleme ve KOİ - MLSS İlişkisi

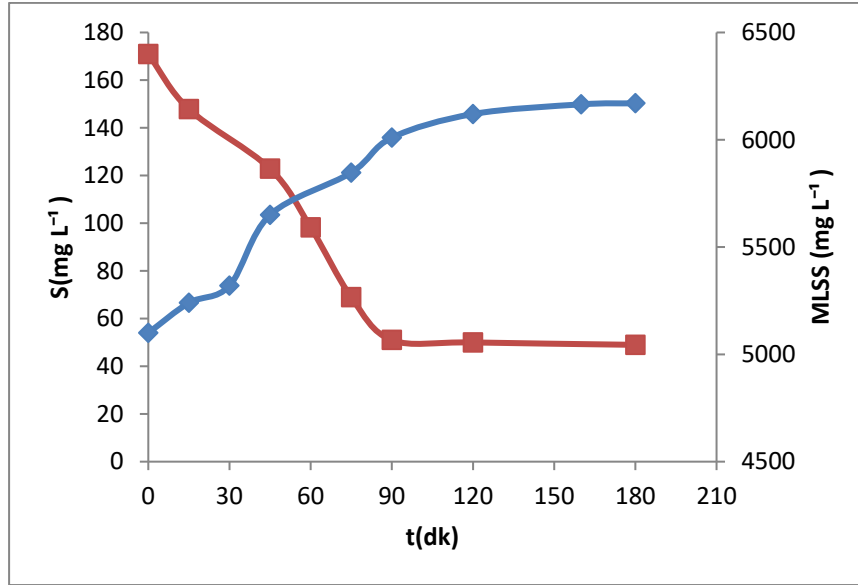
Evsel atıksuların arıtılmasında çıkış KOİ konsantrasyonları sistem performansı için önemli bir parametredir. Bu çalışmada KOİ konsantrasyonları sürekli olarak izlenmiştir. 100 ve 200 mg L⁻¹ arasında değişen giriş yüküne sahip (S₀) atıksular biyoreaktöre beslenmiş ve farklı konsantrasyonlarda yüklemelere karşı biyolojik arıtım verimliliği anlaşılmasına çalışılmıştır. Bu yüklemeler için KOİ olarak çıkış S (mg KOİ L⁻¹) değerleri ve MLSS (mg L⁻¹) değerleri için elde edilen deneysel veriler Şekil 3, 4, 5 ve 6 olarak sırasıyla aşağıda sunulmuştur.



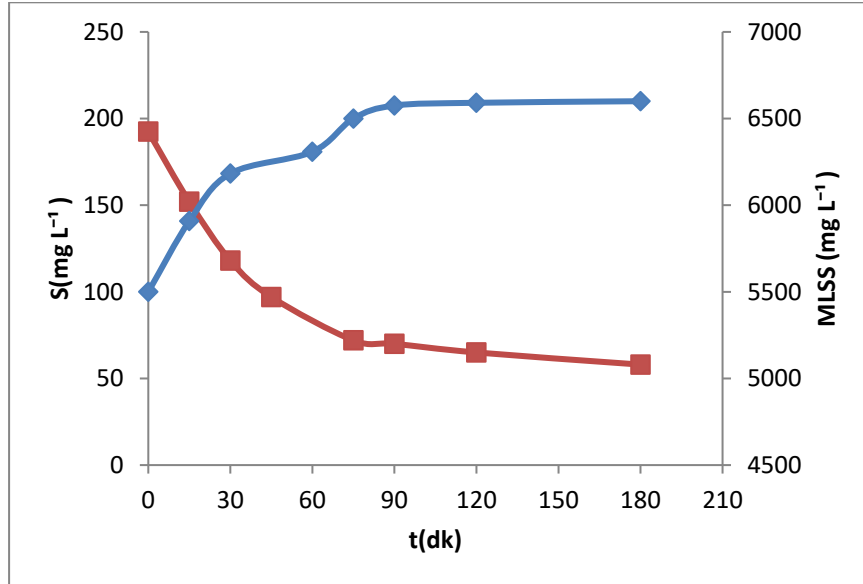
Şekil 3. So = 100 mg L⁻¹ için KOİ ve MLSS değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 4. So = 150 mg L⁻¹ için KOİ ve MLSS değerlerinin zamanla değişimi



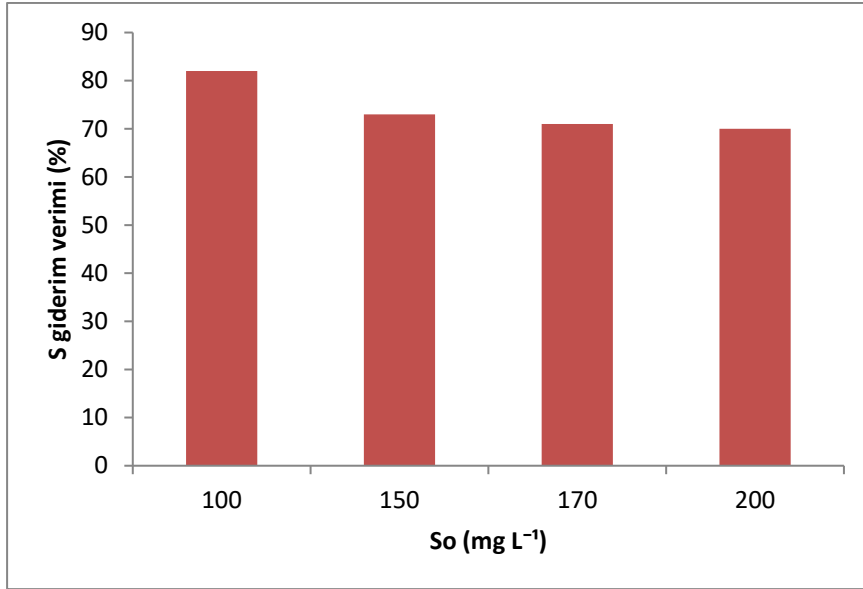
Şekil 5. $S_o = 170 \text{ mg L}^{-1}$ için KOİ ve MLSS değerlerinin zamanla değişimi



Şekil 6. $S_o = 200 \text{ mg L}^{-1}$ için KOİ ve MLSS değerlerinin zamanla değişimi

Başlangıç substrat miktarı 100 mg L^{-1} olarak besleme koşullarında t_0 anında okunan KOİ değeri 115 mg L^{-1} olarak analiz edilmiş olup 4 saat sonunda çıkış KOİ değeri 14 mg L^{-1} olarak analiz edilmiştir. 115 mg L^{-1} başlangıç besleme değeri için hesaplanan KOİ giderim verimi 180. dakikada %81 ve 240. dakika da %88 olarak elde edilmiştir. Diğer başlangıç S_o değerleri içinde çıkış KOİ değerleri zamanla azalmış ve mikrobiyal kütle artış göstermiştir. Şekil 7' de giriş S_o değerlerine karşı 180. dakikada ulaşılan giderim verimleri gösterilmiştir. $S_o = 150 \text{ mg L}^{-1}$ için t_0 anında okunan KOİ değeri 148 mg L^{-1} 'dir. 180 dakika sonra elde edilen çıkış KOİ değeri 41 mg L^{-1} olarak ölçülmüştür. 150 mg L^{-1} başlangıç besleme değeri için hesaplanan KOİ giderim verimi %72'dir. Substrat miktarı 170 mg L^{-1} için t_0 anında okunan KOİ değeri 171 mg L^{-1} 'dir. 180 dakika sonunda kayıt edilen çıkış değeri 49 mg L^{-1} 'dir. Bu besleme değeri için hesaplanan KOİ giderim verimi %71'dir. Son denenen konsantrasyon 200 mg L^{-1} olup bu besleme değeri için 180. dakika çıkış konsantrasyonu 58 mg L^{-1} ve KOİ giderim verimi %70 olarak hesaplanmıştır. Her geçen dakika, reaktör içinde bulunan mikroorganizmalar atıksudaki organik maddeleri mikrobiyal aktivite için kullanmış ve bunun sonucunda çıkış KOİ değerleri düşmüştür.

Şekil 3-6'da görülen "KOİ azalma → MLSS artma" eğilimleri, reaktördeki biyokütlenin (aktif çamur) büyüme substrat ilişkisini yansıtır: organik madde (KOİ) tükendikçe mikroorganizma yoğunluğu yükselir ve her iki parametre birkaç çevrim sonra birlikte plato yapar. Benzer bir ters yönlü korelasyon ve 24-30 gün içinde kararlı denge, evsel atıksu beslenen laboratuvar ölçekli BR çalışmalarında da gözlenmiştir [32]. Yüksek tuzlu besin işleme atıksularını işleyen bir aktif çamur reaktöründe MLSS'nin $1.0 \rightarrow 4,2 \text{ g L}^{-1}$ yükselmesiyle birlikte KOİ'nin düzenli azaldığı rapor edilmiştir [33].



Şekil 7. 180 dakika sonunda giriş substrat konsantrasyonlarına ($S_o \text{ mg L}^{-1}$) karşı ulaşılan substrat giderim verimi (%) değerleri

Giriş substrat değerinin 100 mg L^{-1} olarak besleme yapıldığı denemede ilk anda biyoreaktör içerisindeki mikrobiyal kütle (MLSS mg L^{-1}) 2040 mg L^{-1} iken 180 dakika sonunda bu değer 2770 mg L^{-1} değerine ve 240 dakika sonunda ise 2870 mg L^{-1} değerine ulaşmıştır. Substrat konsantrasyonunun $150, 170$ ve 200 mg L^{-1} olarak beslendiği deneylerde de başlangıç mikrobiyal kütle değerlerinin substrat giderimine bağlı olarak artış gösterdiği, substratın ortamda azalması ile mikrobiyal büyümenin de azaldığı deney sonuçlarından elde edilmiştir. Tüm giriş konsantrasyonları için mikrobiyal aktivitenin elde edildiği görülmektedir. Tüm deneylerde mikroorganizmalar için besin kaynağı olan kirletici organik maddeler (substrat) azalırken mikrobiyal kütle belli bir süreye kadar hızla artış göstermekte ve substratın azalışına bağlı olarak mikrobiyal artışın sabit kaldığı veya çok az değişimle aktiviteye devam ettiği görülmektedir. Elde edilen bu veriler mikrobiyal büyüme kinetiğinin elde edilmesinde kullanılmıştır.

3.3. Mevcut Arıtma Tesisi

Bartın Üniversitesi Kutlubey Yerleşkesi'nde $41^{\circ} 33' 20'' \text{ K}$, $32^{\circ} 17' 57'' \text{ D}$ koordinatlarında konumlanan biyolojik paket atıksu arıtma tesisi (BARÜ-AAT) üniversite kanalizasyon şebekesinden gelen evsel nitelikli atıksuları arıtmak üzere tasarlanmıştır. Tesis; eşdeğer nüfusu (EN) <2000 olan yerleşkeler için T.C. ÇŞİDB'nin 21.1 sektör kodu gereksinimlerini karşılayacak şekilde, $200 \text{ m}^3 \text{ g}^{-1}$ tasarım kapasitesine sahiptir ve yılda $\approx 73.000 \text{ m}^3$ atıksu arıtmaktadır. Kurulu toplam motor gücü 12 kW olup; $2 \times 5,5 \text{ kW}$ roots blower (ince kabarcık havalandırma), $0,75 \text{ kW}$ çamur terfi pompası ve $0,25 \text{ kW}$ servis ekipmanını içermektedir. Proses "uzun havalandırılmalı aktif çamur" prensibine dayalıdır; böylece karbon oksidasyonu ile birlikte kısmi nitrifikasyon gerçekleşir. Deşarj hattında yıllık 1200 kg klor ($\approx 16 \text{ g m}^{-3} \text{ NaOCl}$) kullanılmakta ve son klor kalıntısı $<0,2 \text{ mg L}^{-1}$ 'de tutulmaktadır. Arıtma verimliliği %79 olarak beyan edilmektedir.

Kurulu güç 12 kW ve blowerların 24 saat gün⁻¹ işletimi göz önüne alındığında özgül enerji tüketimi 1,44 kWh m⁻³'tür. Bu nedenlerle çalışmada önerilen BR konsepti, sağladığı yüksek enerji tasarrufu ve çevrim süresinin PLC ile esnek ayarlanabilmesi sayesinde kampüs ölçeğinde sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirilmiştir.

Aşağıdaki mevcut arıtma tesisi çıkış suyu analizlerini içeren tablo, 2022-12-12 → 2025-04-08 arasında akredite laboratuvarca raporlanan 15 çıkış numunesinin tamamı dâhil edilerek hesaplanmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Mevcut arıtma tesisi çıkış suyu analiz sonuçları ortalaması

Parametre	Min	Medyan	Ortalama ± SS	90. yüzdellik	SKKY sınırı
AKM (mg L ⁻¹)	9,0	9,99	18,5 ± 15,8	46,1	60
BOI ₅ (mg L ⁻¹)	3,9	8,0	11,0 ± 11,5	19,2	50
KOI (mg L ⁻¹)	9,9	30,0	34,0 ± 37,1	61,2	160
pH (-)	7,35	7,70	7,81 ± 0,43	8,40	6-9

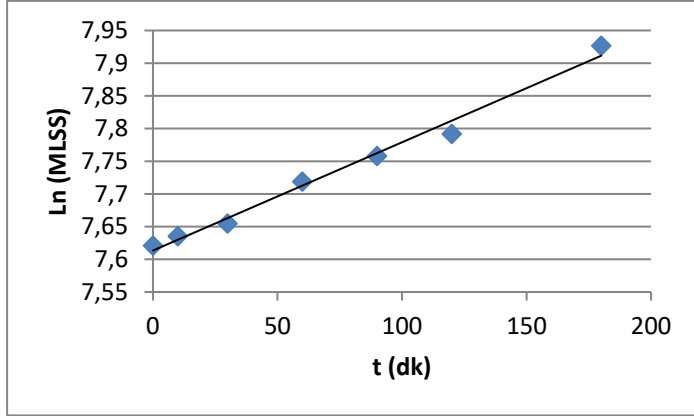
2022-2025 dönemi çıkış suyu verileri (n = 15) incelendiğinde, KOİ konsantrasyonlarının 9,9–152 mg L⁻¹ aralığında değiştiği, ölçümlerin %90'ının ≤ 61 mg L⁻¹ düzeyinde kaldığı belirlenmiştir (Tablo 2). En yüksek pik değer (152 mg L⁻¹) dâhil edildiğinde dahi deşarj kalite standardı olan SKKY Tablo 19 sınırının (160 mg L⁻¹) altında kalınmıştır. Prosesin çoğu zaman yüksek performansla işletildiği görülmektedir. Öte yandan KOİ'deki yüksek standart sapma (SD ≈ 37 mg L⁻¹), özellikle debi ve organik yükteki mevsimsel dalgalanmalara ya da periyodik bakım/arıza kaynaklı piklere işaret etmektedir. Bu değişkenlik, kesikli işletim döngüleri esnek olan BR sistemlerinin kampüs ölçeğinde potansiyel avantajını destekleyen ek bir bulgu niteliğindedir.

Çalışmanın deneysel aşaması, kinetik katsayıların standardizasyonu amacıyla laboratuvar ortamında sabit sıcaklıkta (≈20°C) ve kontrollü debide yürütülmüştür. Ancak gerçek ölçekli işletmede, Tablo 2'deki KOİ ve AKM verilerinde gözlenen yüksek standart sapmalar (Sırasıyla ±37,1 ve ±15,8 mg L⁻¹), kampüs atıksularının mevsimsel sıcaklık değişimlerine ve akademik takvime bağlı debi dalgalanmalarına (öğrenci yoğunluğu vb.) maruz kaldığını göstermektedir. Önerilen BR sistemi, laboratuvar ölçeğinde ideal koşullarda test edilmiş olsa da, tam ölçekli uygulamada bu mevsimsel yük değişimlerini karşılayabilecek esnek döngü sürelerine (PLC kontrollü) sahip olacaktır.

3.4. Mikrobiyal Kinetik

BR ile kampüs atıksularının biyolojik arıtımından elde edilen deneysel veriler, bu arıtım modelinin Monod kinetik modeline uyum sağlandığını göstermektedir. Monod kinetik modeli, mikroorganizmaların büyüme hızını ve substrat (besin maddesi) konsantrasyonu ile olan ilişkisini açıklayan bir kinetik modeldir. Bu model, biyolojik süreçlerde mikroorganizmaların substrat tüketimi ile büyüme oranını tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [34].

Bu çalışmada BR'de gerçekleştirilen deneyler sonucunda, elde edilen her bir deney verisi kullanılarak Monod kinetiğine ait kinetik sabitler; maksimum büyüme hızı (μ_{max}) ve yarı doyumluk sabiti (K_s) değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Substrat konsantrasyonlarının değişimi ve MLSS değerleri üzerindeki etkisi gözlemlenmiş ve Monod kinetik modeli kullanılarak parametreler hesaplanmıştır. Bu hesaplama için her bir deney serisinden özgül büyüme hızları elde edilmiştir. Örneğin So 100 mg L⁻¹ için özgül büyüme hızı μ değerinin elde edilişi Şekil 8 de gösterilmiştir.



Şekil 8. So 100 mg L^{-1} için özgül büyüme hızı μ değerinin elde edilişi

Deneysel özgül büyüme hızlarının (μ) Monod eşitliğinin Lineweaver–Burk lineerleştirilmesi ($1/\mu - 1/S$) ile regresyonu sonucunda maksimum özgül büyüme hızı $\mu_{\max} = 0,159 \text{ sa}^{-1}$ ($\approx 3,8 \text{ gün}^{-1}$), yarı doygunluk sabiti $K_s = 65 \text{ mg L}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Bu katsayılar, evsel nitelikli atıksular için literatürde bildirilen $\mu_{\max} \approx 0,10 - 0,25 \text{ sa}^{-1}$ ve $K_s \approx 30 - 100 \text{ mg L}^{-1}$ aralıklarıyla uyumludur; örneğin Türkiye Atıksu Arıtma Tesisleri Tasarım Rehberi’nde [27] atıksu arıtma tasarımı için önerilen ortalama değerler $\mu_{\max} = 0,20 \text{ sa}^{-1}$, $K_s = 60 \text{ mg L}^{-1}$ ’dir. Benzer şekilde, Moore tarafından özetlenen tipik aktif çamur biyokinetik aralıkları $\mu_{\max} = 2-10 \text{ gün}^{-1}$ ($0,083-0,417 \text{ sa}^{-1}$) ve $K_s = 25-100 \text{ mg L}^{-1}$ olarak verilmiştir [35]. Samsunlu da Türkçe kaynaklarda belediye atıksularına yönelik $\mu_{\max} \approx 0,15 \text{ sa}^{-1}$, $K_s \approx 50-70 \text{ mg L}^{-1}$ değerlerinin tasarım için güvenli kabul edildiğini bildirmektedir [36].

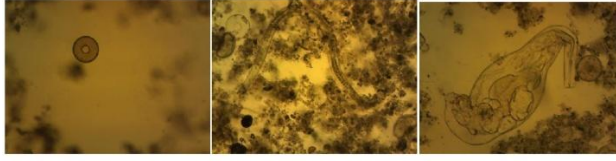
Bartın Üniversitesi Yerleşke atıksularının biyolojik arıtım deneyi sırasında elde edilen μ_{\max} ve K_s değerleri bu aralıkların ortasında yer aldığından, reaktördeki mikroorganizmaların organik substratı beklenen hızda tükettiklerini ve optimum koşullarda çalıştıklarını göstermektedir. Yüksek KOİ giderim yüzdeleriyle birlikte gözlenen stabil pH, Monod kinetiğine uygun çalışmanın ve proses verimliliğinin pratik bir teyididir. Sonuç olarak, Monod modelinin kullanılması, BR’de substrat tüketimini ve biyokütle büyümesini doğru öngörerek tesis tasarım ve optimizasyon çalışmalarına güvenilir bir temel sağlamaktadır [35].

Tablo 3. Çalışmanın farklı arıtma türleriyle karşılaştırılması

Çalışma	Atıksu türü	Reaktör tipi	KOİ giderimi (%)	μ_{\max} (sa^{-1})	K_s (mg L^{-1})	Kaynak
Bu çalışma	Kampüs (evsel)	Tam-karışımli BR	70–87	0,159	65	—
C.-Ferrer ve ark.	Sebze konserve atıksuyu	SBR	74–78	0,18	70	[29]
Jagaba ve ark., 2024	Yüksek-güç evsel	Granüler SBR	80–95	0,12	59	[18]
Ansari, 2022	Mezbaha atıksuyu	Silindirik SBR	90–97	0,17	60	[31]
Samsunlu, 2006	Belediye (karışık)	Konv. aktif çamur	75–90	0,15	50–70	[36]
Koyuncu ve ark., 2013	Belediye (karışık)	Konv. aktif çamur	80–85	0,20	60	[27]

Tablo 3’te görüldüğü üzere, kampüs çıkış sularında elde edilen %70–87 KOİ giderimi; SBR tabanlı endüstriyel [29] ve granüler-SBR [18] sistemlerinde bildirilen aralıklarla aynı büyüklük mertebesinde ve konvansiyonel aktif çamur tasarım rehberlerindeki %75–90 bandını yakalamaktadır. Mikrobiyal kinetik açısından, bu çalışmada hesaplanan $\mu_{\max} = 0,159 \text{ sa}^{-1}$ ve $K_s = 65 \text{ mg L}^{-1}$ değerleri, hem Samsunlu’nun ($0,15 \text{ sa}^{-1}$; $50-70 \text{ mg L}^{-1}$) hem de Koyuncu vd.’nin ($0,20 \text{ sa}^{-1}$; 60 mg L^{-1}) belediye tasarım aralıklarının tam ortasında yer almakta; böylece kampüs ölçeğinde kuramsal tasarım parametrelerinin deneysel olarak doğrulandığını göstermektedir.

Bu çalışmada aynı zamanda biyoreaktör içindeki mikroorganizma kültürü de incelenmiştir. Bu amaçla alınan aktif çamur örneklerinde, Olympus marka mikroskop yardımıyla düzenli olarak gözlem yapılmıştır. Biyoreaktör içinde bulunan mikroorganizmaların çeşitleri literatür bilgisi ile belirlenmeye çalışılmıştır. Bu gözlemler sonucunda, elde edilen mikroorganizmaların görselleri Şekil 9’da sunulmuştur.



a. *Arcella* b. *Nematod* c. *Rotifer*



d. *Vorticella* e. *Suctorina* f. *Opercularia*

Şekil 9. BR'de aktif çamur örneklerinin mikroskopik görüntüleri

Bu mikroorganizmalar, atıksudaki organik maddelerin biyolojik ayrışmasında önemli bir rol oynamaktadır. Biyolojik Arıtma tesislerinin tüm arıtım performansı mikrobiyal kütle tarafından temsil edilmekte ve tüm planlama ve tasarımın mikrobiyal kinetiğe bağlı olarak yürütülmesi, yüksek performansın anahtarı niteliğindedir.

3.5. Enerji Tüketimi Analizi

Tesislerin enerji verimliliğinin karşılaştırılmasında Özgül Enerji Tüketimi (ÖET, kWh m⁻³) parametresi (Eşitlik 1) kullanılmıştır. Mevcut paket arıtma tesisinde, 12 kW kurulu güce sahip blower sistemi (2 × 5,5 kW + yedekler ve pompalar) biyolojik havuzda çözünmüş oksijeni sağlamak için 24 saat kesintisiz çalıştırılmaktadır. Buna göre mevcut durumun enerji tüketimi Eşitlik 2 ile hesaplanmıştır:

$$\text{ÖET} = \frac{\text{Toplam Güç (kW)} \times \text{Çalışma Süresi sa } g^{-1}}{\text{Debi m}^3 g^{-1}} \quad (1)$$

$$\text{ÖET}_{\text{mevcut}} = \frac{12 \text{ (kW)} \times 24 \text{ sa } g^{-1}}{200 \text{ m}^3 g^{-1}} = 1,44 \text{ kW m}^{-3} \quad (2)$$

Önerilen Kesikli Biyoreaktör (BR) sisteminde ise havalandırma sadece aktif reaksiyon fazında devreye girmektedir. Bu çalışmada elde edilen kinetik veriler ($\mu_{\text{max}} = 0,159 \text{ sa}^{-1}$) organik madde gideriminin hızlı gerçekleştiğini göstermektedir. Laboratuvar çalışmalarında belirlenen kinetik verilere ve tipik BR döngüsüne (Doldurma-Reaksiyon-Çökeltme-Boşaltma) göre günde 3 döngü (her döngü 8 saat) ve her döngüde 2,5 saatlik aktif havalandırma fazı öngörülmüştür. Blowerların sadece bu fazda çalıştığı kabulüyle günlük toplam havalandırma süresi 7,5 (günde 3 döngü × 2,5 saat havalandırma) olarak hesaplanmıştır. Aynı kurulu güç (12 kW) kullanıldığı varsayımıyla BR sistemi için öngörülen tüketim Eşitlik 3'te verilmiştir:

$$\text{ÖET}_{\text{BR}} = \frac{12 \text{ (kW)} \times 7,5 \text{ sa } g^{-1}}{200 \text{ m}^3 g^{-1}} = 0,45 \text{ kW m}^{-3} \quad (3)$$

Yapılan hesaplama, kesikli işletim stratejisinin mevcut sürekli sisteme kıyasla yaklaşık %69 oranında enerji tasarrufu potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Elde edilen bu tasarruf oranı ve düşürülebilecek enerji maliyeti, Santos ve ark. tarafından atıksu arıtma tesislerinde alternatif teknolojilerin ekonomik değerlendirmesi üzerine yapılan çalışmada raporlanan verilerle de uyumludur [37].

4. Sonuç

Bu çalışma, Bartın Üniversitesi Yerleşke atıksularının BR sistemiyle biyolojik arıtılabilirliğinin belirlenmesi ve arıtma sürecine ait mikrobiyal kinetik parametrelerin tespiti amacıyla gerçekleştirilmiştir. BR'de gerçekleştirilen deneysel veriler, KOİ giderim veriminin %70 ila %87 arasında değiştiğini göstermektedir. Elde edilen bulgular, arıtım sürecinin Monod kinetik modeli ile uyumlu olduğunu ve reaktördeki mikroorganizmaların organik madde tüketimini literatürde kabul edilen hızlarda gerçekleştirdiğini göstermiştir. Hesaplanan kinetik parametreler, maksimum özgül büyüme hızı ($\mu_{max} = 0,159 \text{ sa}^{-1}$) ve yarı doygunluk sabiti ($K_s = 65 \text{ mg L}^{-1}$), hem ulusal hem de uluslararası literatürde yer alan değer aralıkları ile yüksek düzeyde uyumludur. Sonuçlar, yerleşke atıksularının BR ile %70'in üzerinde KOİ giderim verimi ile arıtım yapabileceğini ve mikrobiyal aktivitenin Monod kinetik modeliyle uyumlu olduğunu bu doğrultuda planlama ve tasarımla daha yüksek giderim sağlanabileceğini ortaya koymaktadır. Biyolojik arıtma tesislerinin tasarımında kinetik modelin ve ona ait kinetik katsayıların elde edilmesi oldukça önemlidir, nitekim tüm arıtım performansını temsil eden mikrobiyal kütle doğrultusunda planla yapılması, yüksek performansın anahtarı niteliğindedir.

Bu çalışma kapsamında önerilen BR sisteminin, kampüsün mevcut biyolojik paket arıtma tesisine göre çeşitli avantajları bulunmaktadır. Bunların başında enerji verimliliği gelmektedir; mevcut sistemde sürekli havalandırma sebebiyle birim enerji tüketimi $1,44 \text{ kWh m}^{-3}$ iken, BR'nin dögüsel ve kontrollü işletimiyle bu değer yaklaşık %69 oranında azalarak $0,45 \text{ kWh m}^{-3}$ seviyesine inebilmektedir. İşletim döngülerinin esnekliği sayesinde BR, mevsimsel debi ve organik yük değişimlerine karşı daha dayanıklıdır ve daha yüksek giderim verimlerini (KOİ ve BOİ₅ için sırasıyla yaklaşık %88 ve %92) sağlayabilmektedir.

Ancak BR sisteminin bazı dezavantajları da göz ardı edilmemelidir. Bunların en önemlisi, BR'nin işletilmesi için daha hassas bir kontrol sistemi ve uzman operatör gerektirmesidir. Ayrıca, sistemin devreye alınması aşamasında biyokütlenin adaptasyonu için daha uzun bir süre gerekebilir ve dögüsel işletim nedeniyle eşitlenmiş bir giriş akımı sağlamak için daha büyük hacimli dengeleme tanklarına ihtiyaç duyulabilir.

Bu çalışmanın önemi, kampüs ölçeğindeki küçük yerleşkelerde ortaya çıkan dalgalı hidrolik ve organik yüklerin giderilmesi için yüksek performanslı ve ekonomik bir alternatif çözüm önermesidir. Özellikle enerji maliyetlerinde tüketiminde elde edilen kayda değer azalma, bu çalışma ile sunulan BR'nin sürdürülebilir kampüs yönetim politikalarına önemli bir katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, elde edilen deneysel veriler, yerleşke kaynaklı atıksuların biyolojik olarak yüksek verimle arıtılabileceğini göstermekte; mikroorganizmaların büyüme dinamiklerinin anlaşılması ve modelleme çalışmalarına entegre edilmesiyle, daha etkili, verimli ve sürdürülebilir atıksu arıtma sistemlerinin tasarımına katkı sunmaktadır.



Hakem: Dış, Bağımsız.

Teşekkür:

Yazarlar, bu çalışma sırasındaki desteklerinden dolayı Bartın Üniversitesi'ne teşekkür ederler.

Beyanname:

1. Özgünlük Beyanı:

Bu çalışma özgündür.

2. Yazar Katkıları:

Fikir: HUÖ; **Kavramsallaştırma:** NED,HUÖ; **Literatür Taraması:** NED,MÇ,ACA,AY,DDÇ; **Veri Toplama:** NED,MÇ,ACA,AY,DDÇ; **Veri İşleme:** MÇ,ACA,AY,DDÇ; **Analiz:** NED,HUÖ,MÇ,ACA,AY,DDÇ; **Yazma – orijinal taslak:** NED; **Yazma – inceleme ve düzenleme:** NED.

3. Etik Kurul İzni:

Etik Kurul İzni gerekmemektedir.

4. Finansman/Destek:

Bu çalışma, herhangi bir finansman ya da destek almamıştır.

5. Çıkar Çatışması:

Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

6. Üretken Yapay Zeka Beyanı:

Çalışmanın hiçbir safhasında yapay zeka araçlarından faydalanılmamıştır.

7. Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları:



KAYNAKÇA

- [1] United Nations, WHO, UN-Habitat. 2024. Progress on the proportion of domestic and industrial wastewater flows safely treated. UN-Water Global Analysis and Assessment of Sanitation and Drinking-Water (GLAAS), Geneva, 124s.
- [2] Tekoğul, H. 2024. Lemna minor'un Belediye Atıksuyu Arıtımındaki Performansı. Memba Kastamonu Üniversitesi Su Ürünleri Fakültesi Dergisi, 10, 59-67.
- [3] Ghimisi, L. 2024. Research on Industrial Wastewater Treatment. Journal of Research in Science and Society (JRISS), 6, 126-133. <https://doi.org/10.33727/JRISS.2024.2.14>.
- [4] Madjar, R. M., Scăețeanu, G. V., Sandu, M. A. 2024. Nutrient Water Pollution from Unsustainable Patterns of Agricultural Systems, Effects and Measures of Integrated Farming. Water, 16(21), 1-19. <https://doi.org/10.3390/w16213146>.
- [5] Gaspar, E., Irimia, O., Stanciu, M., Barsan, N., Mosnegutu, E. 2025. Strategies for a Sustainable Economy: Optimizing Processes for BOD, COD and TSS Removal from Wastewater. Water, 17(3), 1-16. <https://doi.org/10.3390/w17030318>.
- [6] Inbar, O., Shahar, M., Avisar, D. 2024. Predictive modeling of BOD throughout wastewater treatment: a generalizable machine learning approach for improved effluent quality. Environmental Science: Water Research & Technology, 10, 2577-2588. <https://doi.org/10.1039/d4ew00111g>.
- [7] Abonyi, M. N., Obi, C. C., Nwabanne, J. T., Aniagor, C. O. 2024. Emerging and ecofriendly biological methods for agricultural wastewater treatment. Environmental Systems Research, 13(1), 1-15. <https://doi.org/10.1186/s40068-024-00373-4>.
- [8] Sathya, R., Arasu, M. V., Al-Dhabi, N. A., Vijayaraghavan, P., Ilavenil, S., Rejiniemon, T. S. 2023. Towards sustainable wastewater treatment by biological methods – A challenges and

- advantages of recent technologies. *Urban Climate*, 47, 101378. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101378>.
- [9] Sravan, J. S., Matsakas, L., Sarkar, O. 2024. Advances in Biological Wastewater Treatment Processes: Focus on Low-Carbon Energy and Resource Recovery in Biorefinery Context. *Bioengineering*, 11(3), 1-24. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11030281>.
- [10] Popovici, D. R., Gheorghe, C. G., Duşescu-Vasile, C. M. 2024. Assessment of the Active Sludge Microorganisms Population During Wastewater Treatment in a Micro-Pilot Plant. *Bioengineering*, 11(12), 1-20. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11121306>.
- [11] Yin, Q., He, K., Collins, G., De Vrieze, J., Wu, G. 2024. Microbial strategies driving low concentration substrate degradation for sustainable remediation solutions. *NPJ Clean Water*, 7(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41545-024-00348-z>.
- [12] Zheng, L., Wang, X., Ren, M., Yuan, D., Tan, Q., Xing, Y. 2022. Comparing with oxygen, nitrate simplifies microbial community assembly and improves function as an electron acceptor in wastewater treatment. *Environmental Pollution*, 314, 120243. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120243>.
- [13] Aimale-Troy, A., Guwy, A., Massanet-Nicolau, J. 2024. Effect of dissolved oxygen concentration on activated sludge bacterial community and oxygen uptake rate in a SBR using co-produced oxygen from a PEM hydrogen electrolyser. *Journal of Water Process Engineering*, 59, 105045. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105045>.
- [14] Kizhisseri, M. I., Sakr, M., Maraqa, M., Mohamed, M. M. 2025. A comparative bench scale study of oxygen transfer dynamics using micro-nano bubbles and conventional aeration in water treatment systems. *Heliyon*, 11(1), e41687. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41687>.
- [15] Yıldız, D. 2024. Bakanlık Raporu: 33 ilimizde su kirliliği birinci öncelikli sorun. Su Politikaları Derneği. <https://supolitikalariderneği.org/2024/04/19/bakanlik-raporu-33-ilimizde-su-kirliligi-birinci-oncelikli-sorun/> (Erişim Tarihi: 01.12.2025).
- [16] TÜİK. 2023. Su ve Atıksu İstatistikleri, 2022. Türkiye İstatistik Kurumu Haber Bülteni, Sayı: 49607, Ankara. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Su-ve-Atıksu-Istatistikleri-2022-49607> (Erişim Tarihi: 01.12.2025).
- [17] TC ÇŞİDB. 2023. Atıksu Arıtma Tesisi ile Hizmet Verilen Belediyeler. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/atıksu-arıtma-tesisi-ile-hizmet-verilen-belediyeler-i-85746> (Erişim Tarihi: 01.12.2025).
- [18] Jagaba, A. H., Lawal, D. U., Yassin, M. A., Abdulazeez, I., Mu'azu, N. D., Birniwa, A. H. 2024. Aerobic granular sludge sequencing batch reactor for high strength domestic wastewater treatment: Assessing kinetic models and microbial community dynamics. *Desalination and Water Treatment*, 319, 100550. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100550>.
- [19] Smetana, G., Grosser, A. 2024. The Application of an Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor in the Treatment of Brewery and Dairy Wastewater: A Critical Review. *Energies*, 17(6), 1-25. <https://doi.org/10.3390/en17061504>.
- [20] Derco, J., Žgajnar Gotvajn, A., Gul'ašová, P., Kassai, A., Šoltýsová, N. 2024. Nutrient Removal and Recovery from Municipal Wastewater. *Processes*, 12(5), 1-18. <https://doi.org/10.3390/pr12050894>.
- [21] Okumuş, Y. E., Yönten, V., Özgüven, A. 2023. Van İli Eysel Atıksu Arıtma Tesislerindeki Atıksu Karakteristiğinin ve Çıkış Suyu Kalitesinin Değerlendirilmesi: Edremit ve Gevaş Örneği. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(3), 482-494.

- <https://doi.org/10.53433/yyufbed.1182302>.
- [22] Akyürek, A., Ağdağ, O. N. 2024. Comparison of constructed wetlands and package type sequencing batch biological treatment plants in rural areas in terms of efficiency and cost in a full-scale example. *Ecological Engineering*, 201, 107190. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107190>.
- [23] Doğan, E. C., Narıcı, A. O., Yaşar, A., Topkaya, E., Arslan, A., Veli, S. 2023. Kentsel Atıksu Arıtma Tesisi İkinci Arıtma Çıkış Suyundan Nanofiltrasyon Prosesi İle Su Geri Kazanımı. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 9(3), 355-374. <https://doi.org/10.28979/jarnas.1170160>.
- [24] Soydan, M., Akçay, G. H. 2025. Mikrobiyal Yakıt Hücresi Reaktöründe Kampüs Atıksuyunun Arıtımı ve Elektrik Üretimi Potansiyelinin İncelenmesi. *International Journal of Science and Technology*, 2(1), 1-4. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15278177>.
- [25] Dalgali, H., Oğuz, M. 2022. Biyolojik Atıksu Arıtma Teknolojilerinin Maliyet Analizi-Kayseri İli Örneği. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 7(3), 152-160. <https://doi.org/10.46578/humder.1148706>
- [26] Durak, A., Özgüven, A., Demir Yetiş, A. 2021. Van İli Atıksu Arıtma Tesisleri İşletme Sorunları ve Çözüm Önerileri. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(4), 1448-1463. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.960183>.
- [27] Koyuncu, İ., Öztürk, İ., Aydın, A. F., Alp, K., Arıkan, O. A., İnsel, G. H. 2013. Atıksu Arıtma Tesisleri Tasarım Rehberi. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Yayınları, Ankara, 870s.
- [28] APHA, AWWA, WEF. 2023. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 24th ed. APHA Press, Washington DC, 1496s.
- [29] Carrasquero-Ferrer, S., Pino-Rodríguez, J., Díaz-Montiel, A. 2025. Sequencing Batch Reactor: A Sustainable Wastewater Treatment Option for the Canned Vegetable Industry. *Sustainability*, 17(3), 1-28. <https://doi.org/10.3390/su17030818>.
- [30] Ghazani, M. T., Taghdisian, A. 2019. Performance evaluation of a hybrid sequencing batch reactor under saline and hyper saline conditions. *Journal of Biological Engineering*, 13(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s13036-019-0192-1>.
- [31] Ansari, A. 2022. Assessment of laboratory scale cylindrical sequencing batch reactor for the treatment of abattoir effluent. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00702-x>.
- [32] Ramadhani, R., Said, A. 2023. Assessment of Chemical Oxygen Demand Removal Efficiency and Microbial Dynamics during Aerobically Degradation of Wastewater in Activated Sludge. *Journal of Biology Education*, 6(2), 205-215. <https://doi.org/10.21043/jobev.v6i2.22833>.
- [33] Pham, T. T. H., Nguyen, T. M. H. 2020. A study to use activated sludge anaerobic combining aerobic for treatment of high salt seafood processing wastewater. *Current Chemistry Letters*, 9, 79-88. <https://doi.org/10.5267/j.ccl.2019.8.002>.
- [34] Monod, J. 1949. The Growth Of Bacterial Cultures. *Annual Review of Microbiology*, 3, 371-394. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.03.100149.002103>.
- [35] Moore, L. 2020. Introduction to Activated Sludge Biokinetics. Fleming Training Center, Tennessee Department of Environment and Conservation, Murfreesboro, 40s.
- [36] Samsunlu, A. 2017. Atıksuların Arıtılması. 4. Baskı. Birsen Yayınevi, İstanbul, 647s.
- [37] Santos, E., Albuquerque, A., Lisboa, I., Murray, P., Ermis, H. 2022. Economic Assessment of Energy Consumption in Wastewater Treatment Plants: Applicability of Alternative Nature-Based

Technologies in Portugal. Water, 14(13), 2042.
<https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.3390/w14132042>.

