

## Evsel Atıksulardan Azot ve Fosforun Biyolojik Giderilme Yöntemleri

Çağatay COŞKUN, Serap PULATSÜ, Tolga COŞKUN

Ankara üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Su Ürünleri Mühendisliği Bölümü, 06110 Dışkapı Ankara  
([cagatay2506@hotmail.com](mailto:cagatay2506@hotmail.com), [spulatsu@agri.ankara.edu.tr](mailto:spulatsu@agri.ankara.edu.tr), [tolga.coskun@yahoo.com.tr](mailto:tolga.coskun@yahoo.com.tr))

### Özet

Atıksu deşarjlarıyla kirletilmiş yüzeysel suların kalitesi giderek düşmekte ve bu durum suların kullanım amacını oldukça sınırlandırmaktadır. Bu nedenle atıksuyun, uygun arıtma prosesi seçilerek arıtıldıktan sonra alıcı ortama verilmesi önem taşımaktadır. Atıksulardaki azot ve fosfor başta olmak üzere besin elementlerinin artışı, alıcı ortamlarda ötrofikasyona sebep olmakta ve sucul ekosistemi olumsuz yönde etkilemektedir. Günümüzde bu sorunu gidermek için atıksulardan besin elementi gideriminde çeşitli prosesler kullanılmaktadır. Bu derleme çalışmasında evsel atıksularda bulunan azot ve fosfor gibi besin elementlerinin giderimi için kullanılan biyolojik arıtım yöntemleri, giderim performanslarını ifade eden parametreler bağlamında kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Söz konusu değerlendirmelerin, atıksulardan azot ve fosfor giderimine ilişkin sistemlerin tercihinde yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

### Giriş

Dünya nüfusunda meydana gelen hızlı artış, endüstriyel ve tarımsal faaliyetler gibi etkenler suya olan gereksinimi artırmakta, mevcut su kaynaklarının kullanılmasında ve oluşacak olan kirlenmeye karşı alınacak tedbirler konusunda daha dikkatli olunmasını gerektirmektedir. Atıksuların içerdiği zararlı maddeler, alıcı ortamdaki çözünmüş oksijen miktarını azaltarak ekolojik dengeyi olumsuz etkilemekte, kirletilmiş yüzeysel suların kalitesi giderek düşmektedir. Zira deşarjlarla gelen kirlilik yükü alıcı ortamın özümleme kapasitesinin üzerine çıkmasına sebep olmakta, bu durum ise atıksuların arıtımını şehirler için vazgeçilmez bir uygulama haline getirmektedir. Ayrıca atıksularda bulunan azot ve fosfor bileşikleri alıcı ortamlarda alg patlamalarına, oksijen kaybına, balık ölümlerine, biyolojik çeşitliliğin azalmasına yol açmakta, hayvan ve insan sağlığı açısından da olumsuz etki yaratmaktadır.

Bu bağlamda, kirlilik etkenlerinin önlenmesi ve su kaynakları kalitesinin izlenmesi önem taşımakta; atıksu deşarjlarında fiziko-kimyasal (sıcaklık, pH, çözünmüş oksijen, iletkenlik, azot ve fosfor) parametrelerin sınır değerler içinde olup olmadığının belirlenmesi gerekmektedir.

Evsel nitelikli atıksuların, alıcı ortamlara deşarj edilmeden önce biyolojik arıtımında kullanılan prosesler genellikle aerobik oksidasyon, nitrifikasyon, denitrifikasyon ve fosfor (anaerobik ortamı takiben bir anoksik ve/veya bir aerobik ortam) giderimi adımlarından oluşmaktadır [1].

Bu çalışmada, evsel atıksulardaki azot ve fosfor gibi besin elementlerinin giderilmesine ilişkin araştırmalar dikkate alınmış, bu çalışmalarda kullanılan biyolojik arıtım proseslerinin giderim performansları, parametreler bazında kantitatif olarak sunulmuş; sistemleri avantaj ve dezavantajları bakımından karşılaştırılmıştır. Konuya ilişkin değerlendirmelerin, atıksulardan azot ve fosfor giderimine yönelik kurulacak sistemlerin tercihinde yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

### 1. ATIKSULARDA AZOT

Azotun yeryüzünde atmosfer ve canlılar olmak üzere iki büyük rezervi bulunmakta; azot gazı atmosferin %78'ini teşkil ettiği halde kimyasal olarak kolay tepkime vermemektedir. Azot su ortamında ise doğal yollarla azot fiksasyonu, nitrat amonifikasyonu ve atmosferik boşalım mekanizmaları (yağmur, kar, şimşek gibi) ile olmakta, insan faaliyetlerinin sonucu olarak da su ortamları azot yoğunluğu bakımından zenginleşmektedir. Enerji santralleri, endüstriyel tesisler, tarımsal faaliyetler, evsel atıksular, çöp sızıntı suları gibi pek çok faktör su ortamlarındaki azot

yoğunluğunu etkilemektedir. Ayrıca fosil yakıtların yakılması sonucunda atmosfere verilen NO<sub>x</sub>'ler yağış, kar gibi atmosferik boşalmalar ile suya taşınabilmektedir. Buna ek olarak, endüstriyel tesislerde yaygın kullanım alanları, koton iplik üretimi için nitroselüloz, gliserin üretimi için nitrogliserin, TNT üretimi için toluen, metal son işleme tesislerinde nitrik asit kullanımı ve metal kaldırmadır. Buna benzer birçok tesisden gelen sular inorganik azot yoğunluğu bakımından zengindir [2].

Sularda azot giderilmesi için uygulanan yöntemler; biyolojik tasfiye (nitrifikasyon ve denitrifikasyon birimleri ile), damlatmalı filtreler ile tasfiye, kum filtreler kullanılarak süzme, yeraltı suyunun suni olarak beslenmesi ve kuyularla çekilmesi, kırılma noktası klorlaması, yüksek pH'da kesif olarak havalandırma, iyon değiştirilmedir. Bu yöntemlerde atıksuyun içerdiği amonyum iyonları, azot bakterileri yardımıyla nitrifikasyon kademesinde önce nitrite ve sonra nitrata dönüştürülmekte, daha sonra denitrifikasyon kademesinde anoksik şartlar altında azot gazı hâlinde sudan uzaklaştırılmaktadır [3].

## 2. ATIKSULARDA FOSFOR

Fosfor, biyolojik açıdan (hayvansal organizmaların kabuk, kemik ve dişleri gibi) önemli rolleri olan pek çok molekül ve membranın önemli bir elementidir. Ayrıca gaz halinde atmosferde bulunmayıp, karada bileşik şeklinde bulunur. Değişik nedenlerden dolayı kayaların aşınması sonucunda çok az miktarda fosfor, fosfat halinde toprağa geçer ve bitkilere ulaşmaktadır [4].

Fosfat sularda eser miktarda rastlanan bir anyon olmakla birlikte biyolojik faaliyetlerin düşük olduğu zamanlarda yüksek yoğunluklarda rastlanan bir anyondur. Fosfatın varlığı alglerin alışımlışın dışında fazla çoğalmasına neden olurken, biyolojik faaliyetlerin kısmen artmasıyla sonuçlanan bir dizi etkileşime yol açar. Fosfor bileşikleri, organizmalar için temel bileşiklerden olup; insan, hayvan atıkları ve gıda endüstrisi gibi biyolojik madde işleyen endüstrilerin atıksuları, fosfor bileşikleri için ana kaynaktır. Buna ek olarak, evsel ve endüstriyel deterjanlarda ürünün etkinliğini artırmak için sıklıkla fosfat içerirler. Ayrıca alıcı ortamları için fosforun temel kaynakları arasında fosfat ve fosforik asit üreten özellikle gübre ve metal kullanan endüstri atıksuları yer alır [5].

Atıksularda bulunan fosfor bileşikleri temelde; ortofosfat, polifosfat ve organik fosfor bileşikleri olmak üzere üç çeşittir. Fosfor bazlı bileşikler gidermek için kimyasal yolla fosfat çöktürülmesi ve biyolojik yolla fosfor giderilmesi metotlar ayrı ayrı veya birlikte kullanılmaktadır. Atıksudaki fosforun klasik (biyolojik arıtma) yöntemler ile istenilen limitlere düşürülmesi mümkün olmadığı durumlarda kimyasal fosfor giderim yöntemlerinin uygulanmasına gerek duyulmaktadır. Kimyasal arıtmada kullanılan kimyasal maddeler, yüksek pH değerinde fosfor, fosfat tuzları hâlinde çöktürülmektedir. Biyolojik metotlarda ise fosfor arıtımı, biyolojik arıtma sırasında fosfatın mikroorganizmalarca alınması ile sağlanmaktadır [6].

## 3. ATIKSULARDA AZOT ve FOSFORUN BİRLİKTE GİDERİLMESİ

Azot ve fosfor giderimi için geliştirilmiş birçok biyolojik proses bulunmaktadır ve bu proseslerin çoğu modifiye edilen havalı, havasız ve anoksik bölümleri bulunan biyolojik sistemlerdir. Bu proseslerin bazıları temelde fosfor giderimi için geliştirilmiş olup, daha sonra azot ve fosforun birlikte arıtılabileceği sistemlere dönüştürülmüştür. Azot ve fosforun birlikte arıtıldığı yaygın kullanılan prosesler:

- A<sup>2</sup>/O (Anaerobik-Anoksik-Oksik) prosesi,
- Beş basamaklı Bardenpho prosesi,
- UCT (Capetown Üniversitesi tipi aktif çamur sistemi) prosesi,
- VIP (Virginia Tesisi tipi aktif çamur sistemi) prosesi,
- AKR (Ardışık Kesikli Reaktör) prosesi ([7]; [8]).
- Nutrient gideriminde alternatif biyolojik proseslerdir ([9]; [10]; [11]).

Biyolojik azot ve fosfor giderimi için tasarlanan aktif çamur sistemi seçimi atıksu karakterizasyonuna ve çevresel koşullara bağlıdır. Özellikle endüstriyel atıksu oranı yüksek kentsel atıksularda ayrışabilen organik madde miktarı, türleri ve ayrışma hızlarının yanında azot ve fosfor parametreleri de farklılık gösterebileceğinden, biyolojik azot-fosfor giderimi açısından prosesin uygunluğunun tasarım öncesi detaylı olarak araştırılması gerekmektedir. Tasarıma öncelikle nitrifikasyon prosesinden başlanmalı ve sistemin olumsuz çevresel koşullar altında verimli çalışması için gerekli önlemler alınmalıdır. İkinci adımda ise denitrifikasyon prosesi için gerekli hacimler belirlenmeli ve son olarak biyolojik fosfor giderimi için gerekli tasarım kriterleri oluşturularak tank hacimleri hesaplanmalıdır [12]. Biyolojik nutrient giderim proses fazları ve işlevleri tablo 1'de özetlenmiştir ([13]; [14]).

Tablo 1: Biyolojik nütrient giderim proses fazlarının özeti ([13]; [14]).

Faz	Proses	Biyokimyasal Dönüşüm	İşlev
Anaerobik	P giderimi	Fosfor biriktiren organizmaların (PAO) uçucu yağ asitlerini biriktirmesi Heterotrofik bakteriler tarafından biyolojik bozunur organik maddenin fermantasyonu Fosfor açığa çıkarılması	Fosfor biriktiren organizmaların ayrılması
Anoksik	N giderimi	Denitrifikasyon Alkalinite üretim	NO <sub>3</sub> -N'unun N <sub>2</sub> 'ye çevrimi Denitrifikasyon bakterilerinin ayrılması
Aerobik	N ve P giderimi	Nitrifikasyon Depolanmış ve harici substratın PAO'lar tarafından tüketimi Harici substratın heterotrofik bakteriler tarafından tüketimi P alımı (yükseltgenmesi) Alkalinite tüketimi	NH <sub>4</sub> -N'unun NO <sub>3</sub> -N'a çevrimi Gaz çıkarımıyla N giderimi Polifosfat oluşumu

## 4. BİYOLOJİK AZOT ve FOSFOR GİDERİM PROSESLERİNE İLİŞKİN ÇALIŞMALAR

### 4.1. A<sup>2</sup>/O Prosesi

A<sup>2</sup>/O (havasız (anaerobik)-anoksik-oksik) Prosesi, denitrifikasyon gerçekleşmesi için anoksik bölüm içermektedir. A<sup>2</sup>/O Prosesi, Phoredox (anaerobik/aerobik-A/O) prosesinin modifiye edilmiş halidir [8]. Anoksik bölümün bekleme süresi yaklaşık olarak bir saattir ve bu bölümde çözünmüş oksijen düşüktür; ancak nitrit ve nitrat formundaki kimyasal bağlı oksijen havalı bölümden geri devirle sisteme verilmektedir. Çıkışta filtrasyon işlemi yapılmadan, fosfor yoğunluğu 2 mg L<sup>-1</sup>'den daha az olabilmektedir. Çıkış suyuna uygulanan filtrasyon işlemi ile fosfor yoğunluğu 1.5 mg L<sup>-1</sup>'nin altına düşürülebilmektedir ([7];[15]).

Mines [16] tarafından A<sup>2</sup>/O Prosesiyle yapılan çalışmada arıtım çıkış suyundaki parametreler; 5 mg L<sup>-1</sup> BOİ<sub>5</sub>, 5 mg L<sup>-1</sup> AKM ve 3 mg L<sup>-1</sup> TN olarak bulunmuştur.

Peng ve ark. [17], A<sup>2</sup>/O Prosesiyle yaptıkları çalışmada %92.3 KOİ, %95.5 P, %96 NH<sub>4</sub>- ve %79.5 TN giderim verimi elde etmişlerdir.

Xu ve ark. [18] göre ise atıksu arıtımında kullanılan A<sup>2</sup>/O Prosesiyle; NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N için %93, TN için %70 ve PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P için %87 giderim performansı sağlandığını bildirmişlerdir.

### 4.2. Beş Basamaklı Bardenpho Prosesi

Beş Basamaklı Bardenpho Prosesi, sadece azot giderimi sağlayan Dört Basamaklı Bardenpho Prosesinin ek olarak fosfor giderimi yapması için modifiye edilmiş şeklidir. Sisteme fosfor giderimi gerçekleştirmek için havasız bölge (beşinci aşama) sonradan eklenmiştir. Sistemde havalı, havasız ve anoksik bölümler fosfor, azot ve karbon giderimini sağlarlar. Buna ek olarak, ikinci anoksik bölümde, havalı bölümde oluşan nitrat elektron alıcı, içsel organik karbonu ise elektron verici olarak kullanılıp, ilave denitrifikasyonun gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Son havalı bölüm, kalıntı azot gazını çözeltiden uzaklaştırmak ve son çöktürücüde fosfor açığa çıkmasını en aza indirmek için yapılandırılmıştır ([15]; [19]). Bu sistemde son çöktürme havuzu yerine membran biyoreaktör (MBR) sistemleri kullanılıp, biyolojik azot ve fosfor giderimi sağlanabilmektedir [12].

Lee ve ark. [20] yaptıkları çalışmada, atıksuların arıtımında kademeli beslemeli 5 kademeli biyolojik nütrient (azot ve fosfor) giderimi için sıcaklığın 15 °C'nin altına düşüğü kış ayları hariç azot ve fosfor giderim verimlerini sırasıyla %79 ve %87'nin üzerinde olduğunubelirlemiştir.

Balçık [21] ise atıksu arıtımda kullanılan Modifiye Beş Kademeli Bardenpho Prosesi için; sırasıyla ortalama AKM (%94), KOİ (%88), NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N (%99.2), TKN (%91.6), TN (%88), PO<sub>4</sub>-P (%87.2) ve TP (%87.6) giderim verimi tespit etmiştir.

Uysal ve Üstünyıldız [22] evsel atıksuların arıtımında azot ve fosfor gideriminde; KOİ, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N ve PO<sub>4</sub> için en yüksek giderim verimlerini sırasıyla %98.6, %95, %83.3, %90, %70.6 olarak saptamışlardır.

### 4.3. Capetown Üniversitesi Tipi (UCT) Proses

#### 4.3.1 Standart UCT prosesi

Capetown Üniversitesi tarafından geliştirilen bu proses, iki durum ile A<sup>2</sup>/O Prosesinden farklılık göstermektedir. Aktif çamur dönüşü havalı bölümden anoksik bölüme olurken, iç döngü ise anoksik bölümden havasız bölümedir. Bunun nedeni aktif çamurun anoksik bölüme geri döndürülmesi ile nitratın anaerobik bölüme girmesinin engellenmesidir. Bu da anaerobik bölümde fosforun daha iyi açığa çıkmasına yol açmaktadır. İç döngü ise havasız bölümde organik kullanım artışı sağlamaktadır. Anoksik bölümdeki karışım, içeriği büyük ölçüde çözünmüş BOİ ve az miktarda nitrat içermektedir. Anoksik karışımın geri dönüşü, havasız bölümde fermentasyon hızı için optimum şartları oluşturmaktadır ([11]; [19]).

#### 4.3.2 Modifiye UCT prosesi

Modifiye UCT Prosesinde ardışık iki farklı anoksik faz bulunmaktadır. İlk anoksik fazda geri devirden gelen düşük yoğunluklu nitrat denitrifikasyona uğrayarak buradan alınan yüksek organik karbon içerikli su, anaerobik faza geri devrettirilmektedir. İkinci anoksik faza aerobik fazdan nitrat geri devri yapılarak bu yolla prosteki nitrat giderimi büyük oranda gerçekleştirilmektedir ([7]; [14]).

UCT ve Modifiye UCT Proseslerine bir alternatif olarak Güney Afrika (Johannesburg)'da geliştirilen bir diğer proses de Johannesburg Prosesi'dir. Bu süreçte, zayıf karakterli atıksulardan biyolojik fosfor giderimini yükseltmek amacıyla anaerobik bölgeye düşük nitrat geri devri yaptırılmaktadır ([23]; [24]).

Vaiopoulou ve ark. [25], Modifiye UCT Prosesini kullandıkları çalışma sonucunda; toplam KOİ olarak organik madde için yaklaşık %88, BOİ<sub>5</sub>: %92, NH<sub>3</sub>-N: %93-99, TKN: %87-97 ve TN için ise %70 giderim verimi elde etmişlerdir.

Vaiopoulou ve Aivasidis [26] tarafından yürütülen ve Modifiye UCT Prosesi'nin bir çalışmada; %89 KOİ, %95 BOİ, %90 TKN, %73 TN, %67 TP giderimi elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Atıksularda Modifiye UCT'nin kullanıldığı bir başka çalışmada ise, KOİ için 459 mg L<sup>-1</sup>, BOİ<sub>5</sub> için 293 mg L<sup>-1</sup>, TKN için 50.6 mg L<sup>-1</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N için 29.1 mg L<sup>-1</sup> ve PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P içinse 3.63 mg L<sup>-1</sup> değerleri elde edilmiştir [27].

### 4.4. Virginia Tipi (VIP) Proses

Virginia Tipi (VIP) Prosesi, A<sup>2</sup>/O ve UCT Proseslerine geri devir sistemleri hariç uygulandığı sistem çıkışında benzerlikler göstermektedir. Sistem aktif çamur geri dönüşü, havalı bölüm geri dönüşü ile birlikte anoksik bölüme verilirken, anoksik bölümün karışımı havasız bölüme doğru geri beslenmektedir. Yapılan denemelere dayanarak, atıksudaki organik maddenin bir kısmı havasız mekanizma tarafından sabit hale getirmesi prosesin oksijen ihtiyacının azalmasına katkı sağlamaktadır ([7]; [15]).

### 4.5. Ardışık Kesikli Reaktör (AKR) Prosesi

Ardışık Kesikli Reaktör (AKR) Prosesi, karbon oksidasyonu, azot ve fosfor giderimi için kullanılmaktadır. Genellikle küçük ve orta debili tesislerde uygulanan proses temelde karbon ve azot giderimi içinde kullanılmakla beraber, sisteme anaerobik tank ilavesiyle fosfor giderimi için de işlevseldir. AKR esas olarak, atıksu ve çamurun karıştığı doldurma fazı, anaerobik reaksiyonların gerçekleştiği anaerobik faz, aerobik faz, nitrit ve nitratın azot gazına dönüşümünün sağlandığı anoksik faz, aktif çamur havuzundaki askıda katıların çöktürüldüğü çöktürme fazı ve süpernatantın deşarj edildiği boşaltma fazı olmak üzere altı fazdan oluşmaktadır ([7]; [21]).

Atıksularda Ardışık Kesikli Reaktör Prosesinin kullanımına yönelik bir çalışma sonucunda, NH<sub>3</sub>-N için %97.1, TN: %97.3, TP: %75.2 ile KOİ içinse %89.9 giderim verimi elde edilmiştir [28].

Bernardes ve Klapwijk [29] tarafından yürütülen bir araştırmada, 0.35 ve 1.3 m<sup>3</sup> hacimli 2 adet AKR kullanılmış ve çıkış suyunda fosfat konsantrasyonunun 1 mgP L<sup>-1</sup>'den, azot konsantrasyonunun ise 12 mg N L<sup>-1</sup>'den düşük olduğu bildirilmiştir.

Zuniga ve Martinez [30] Ardışık Kesikli Reaktör Prosesi'ni kullandıkları çalışmalarında; KOİ için %89±1, TP: %75±15 ve NH<sub>4</sub>-N içinse %87±10 giderim değeri elde ettiklerini bildirmişlerdir.

Lee ve ark. [31] tarafından atıksuların arıtımına ilişkin olarak kullandıkları AKR sisteminde; giderim verimini TOK: %92, TN: %88 ve TP: %100 olarak saptamışlardır.

Kargı ve Uygur [32] AKR Prosesini uyguladıkları bir araştırmada en yüksek KOİ/N/P oranı 100/2/0.54 iken, KOİ, NH<sub>4</sub>-N ve PO<sub>4</sub>-P için giderim verimlerini sırasıyla; %95, %94 ve %99 olarak tespit etmişlerdir.

Atıksuların arıtımında AKR'nin kullanıldığı bir başka çalışmada, KOİ, NH<sub>4</sub>-N ve PO<sub>4</sub>-P için giderim verimleri sırasıyla %75, %44 ve %44 olarak belirlenmiştir [33].

Uygur ve ark. [34] tarafından Ardışık Kesikli Reaktör Prosesi'nin uygulandığı bir diğer çalışmada, tespit edilen en yüksek organik karbon, azot (NH<sub>4</sub> ve NO<sub>3</sub>-N) ve fosfat (PO<sub>4</sub>-P) giderme verimleri sırasıyla; %96, %87, %81 ve %90 olarak belirtilmiştir.

Atıksu arıtımı için AKR Prosesiyle yürütülen bir araştırmada ise, azot (NO<sub>3</sub>-N: %97) ve fosfor (P: %77) giderimi elde edilmiştir [35].

Uğurlu ve Akın [36] tarafından bildirildiğine göre, AKR sisteminin kesikli akışlı reaktör için NO<sub>3</sub>-N: %98, PO<sub>4</sub>-P: %80 ve genel olarak KOİ giderimi %97'dir.

Hu ve ark. [37] askıda büyüyen AKR sistemini kullandıkları bir çalışmada; TN: %93.8, TP: %98.2, BOİ: %99.6 ve AKM: %98.52 ve Hibrid AKR sistemi için ise TN: %94.7, TP: %97.8, BOİ: %99.3 ve AKM için %98.8 giderim verimi tespit etmişlerdir.

AKR sisteminin yürütüldüğü bir başka çalışmada da giderim verimleri; KOİ: %91, TKN: %78, NH<sub>3</sub>-N: %85, TP: %87 ve PO<sub>4</sub>-P için %83 şeklindedir [1].

Tsuneda ve ark. [38] atıksu arıtımında AKR'nin kullanıldığı system için ortalama TN ve TP giderim verimlerini sırasıyla %83 ve %92 olarak tespit etmişlerdir.

AKR Prosesi'nin kullanıldığı bir başka araştırmada ise, KOİ, TN ve TP giderim verimleri ortalama olarak sırasıyla; %89, %76 ve %95 şeklinde saptanmıştır [39].

Wang ve ark. [40] tarafından yürütülen bir çalışmada, AKR sistemiyle optimum KOİ/P (19.9), KOİ/TN (9.9) oranlarında %94 TP ve %91 TN giderimi elde edilmiştir.

Topaloğlu ve ark. [11] atıksu arıtımı için Ardışık Kesikli Reaktör Prosesi'ni kullandıkları çalışmalarında, TN için giderim verimini %93–%95 ve TP giderim verimini %33–%39 arasında belirlemişlerdir.

#### 4.6. Azot ve Fosfor Gideriminde Alternatif Biyolojik Prosesler

Günümüzde atıksulardan nutrient gideriminde birçok yöntem kullanılmaktadır. Ancak kullanılan bu yöntemlerin işletme, bakım ve enerji tüketimi gibi birçok maliyeti bulunmaktadır. Bu nedenler atıksulardan nutrientlerin giderilmesinde alternatif bir arıtma yöntemi olarak doğal arıtma proseslerinin uygulanmaya başlanmasını sağlamıştır. Bu proses, diğer arıtma yöntemlerine kıyasla daha az işgücü, işletim kolaylığı ve düşük enerji tüketimiyle alternatif bir arıtma yöntemi sunmaktadır. Bu yöntemde genel olarak doğal ortamlarda yetişen sucul bitkiler ve mikroalgler kullanılmaktadır. Ülkemizde de yaygın olarak kullanılan sucul bitkilerin bazıları; *Lemna gibba* L., *Lemna minor* L., *Wolffia arrhiza*, *Spirodela pollyrriza* gibi bitkiler ve *Chlorella vulgaris*, *C. pyrenoidosa* ve *Scenedesmus intermedius* gibi mikroalglerdir ([9]; [11]).

Redd ve De Busk [41] sucul makrofitlerin nutrient giderme potansiyeli üzerine yaptıkları çalışmada, N için %16–75 ve P için %12–73 oranında giderim tespit etmişlerdir. Körner ve ark. [42], su mercimeği tarafından azot alımının başlangıçtaki azot girişinin %42'sini oluşturduğunu ve nitrifikasyon-denitrifikasyonla, buharlaşma ve çökeltmeyle azot gideriminin ise yalnızca %16 olduğunu belirlemişlerdir. Araştırmacılar, su mercimeği ile kaplı doğal arıtmada da su mercimeğinin olmadığı kontrol ortamına göre belirgin olarak daha hızlı fosfor giderimi olduğunu bildirmişlerdir.

Özengin [10] tarafından yürütülen çalışmada; *L. minor* (L.) ile evsel ve endüstriyel atıksulardan azot ve fosfor giderim verimleri; KOİ için evsel atıksuda %83.67 ve endüstriyel atıksuda %74.55 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca atıksulardan azot ve fosfor giderimleri; TN için evsel atıksuda %86.49 ve endüstriyel atıksuda %83.69; TP için evsel atıksuda %71.72 ve endüstriyel atıksuda %85.4; ortofosfat (OP) için evsel atıksuda %83.26 ve endüstriyel atıksuda

%94.99 olarak hesaplanmıştır. Martinez Cruz ve ark. [43] ise *L. gibba* (L.) ile yaptıkları araştırmada, maksimum giderim verimini; PO<sub>4</sub>-P için %50 ve NO<sub>2</sub>-N için %90.23 olarak bildirmişlerdir.

Lau ve ark., [44] tarafından *C. vulgaris* kullanarak yürütülen çalışmada; azot giderim hızı 5.44 mg L<sup>-1</sup> gün, Tam ve Wong [45] ise *C. pyrenoidosa* ile yaptıkları çalışmada ise azot giderim hızını 3.4 mg L<sup>-1</sup> gün olarak tespit etmişlerdir.

Evsel atıksuların biyolojik arıtımı için *Scenedesmus intermedius*'un kullanıldığı bir araştırmada, 83 mg N L<sup>-1</sup> gün gibi yüksek giderim hızı elde edilmiştir [46].

Ruiz ve ark. [47] yaptıkları çalışmalarda *C. vulgaris*'in azot ve fosforun azaltılmasında yüksek bir potansiyele sahip olduğunu belirtmişlerdir. Aslan [9] *C. vulgaris* ile 7250 lux ışık şiddetinde azot için %93.9 ve fosfor için %55.91 giderim verimi elde etmiştir.

Shelknanloymilan [4] tarafından yürütülen bir başka çalışmada ise, *C. vulgaris* ile toplam azot (NO<sub>3</sub>-N) konsantrasyonu 28.2 mg L<sup>-1</sup>'den 22.4 mg L<sup>-1</sup>'ye düşürülerek %37'lik bir giderim tespit edilmiştir. Aynı çalışmada (PO<sub>4</sub>-P) konsantrasyonu, 1.821 mg L<sup>-1</sup> için yaklaşık %62'lik harcama etkinliğiyle 0.739 mg L<sup>-1</sup>'ye kadar düşmüştür. Ayrıca araştırma kapsamında klorofil *a* konsantrasyonunun artış göstererek ve 3.1 mg L<sup>-1</sup>'den 12.06 mg L<sup>-1</sup>'ye kadar yükseldiği bildirilmiştir.

## 5. PROSESLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Yukarıdaki bilgiler ışığında evsel atıksulardan nütrient gideriminde kullanılan sistemlerin avantaj ve dezavantajları aşağıda özetlenmiştir ([7]; [10]; [21]):

- A<sup>2</sup>/O Prosesinin sağladığı avantajlar; işletiminin daha kolay olması, enerji korunumun sağlanması, nütrient gideriminde nitrifikasyon için gerekli alkaliniteyi sağlaması ve üretilen çamurun iyi çökme özelliğine sahip olmasıdır. Azot gideriminin geri devir oranına bağlı olması ve yapılan geri devrin nitrat içermesinden dolayı fosfor giderme oranına etki etmesi ise sistemin dezavantajlarıdır.

- UCT Prosesine ilişkin avantajlar; azot gideriminin iyi olması, üretilen çamurun A<sup>2</sup>/O prosesindeki gibi iyi çökme özelliğine sahip olması, sistemdeki nitratın azalması ve fosfor giderim verimini azaltmaması aksine artırmasıdır. Karmaşık işletme yapısına sahip olması ve ek geri devir sistemlerine ihtiyaç duyması ise prosesin dezavantajlarıdır.

- VIP Prosesinin sağlamış olduğu avantajlar, UCT Prosesine benzer bir şekilde sistemdeki nitratın azalması fosfor giderim verimini azaltmaması aksine artırması, UCT'ye kıyasla daha düşük BOİ/P gereksinim duyması ile üretilen çamurun UCT ve A<sup>2</sup>/O Proseslerindeki gibi iyi çökme özelliğine sahip olması şeklinde sıralanabilir. Bu prosesin UCT Prosesindeki gibi karmaşık yapısı, fazladan işletim ekipmanına ve ek geri devir sistemine gereksinimi olması dezavantajlarıdır.

- Bardenpho (Beş Kademeli) Prosesiyle; filtre işlemine gerek duymadan sistem çıkışında 3-5 mg L<sup>-1</sup> toplam azot değerine ulaşabilmekte ve proses sistemden elde edilen çamur VIP, UCT, A<sup>2</sup>/O Prosesleri gibi iyi çökme özelliğine sahip olması gibi avantajlar sağlamaktadır. Ancak daha düşük fosfor giderim verimi ve büyük tank hacimleri ihtiyacı bu prosesin dezavantajlarını oluşturmaktadır.

- AKR Prosesi, az tasarım verisinin yeterli olması, azot ve fosforun birlikte giderimindeki esnekliği ve kullanım kolaylığı gibi avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte düşük debili arıtım sistemleri için kullanılması, fazladan üniteye ihtiyaç duyulması ve çıkış suyu kalitesinde değişiklikler gözlenmesi prosesin dezavantajlarını oluşturmaktadır. Proses ile yapılan çalışmalar incelendiğinde azot ve fosfor giderimi oranlarının sırasıyla; %90–95 ve %77–100 arasında değiştiği bildirilmiştir.

- Mikroalg - sucul makrofitlerin kullanıldığı alternatif biyolojik prosesin avantajları ise yukarıda belirtilen yöntemlerde olduğu gibi işletme, bakım ve enerji tüketim maliyetlerinin bulunmaması, nütrient gideriminde iyi bir potansiyele sahip olmalarıdır.

## 6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Atıksuların içeriğindeki besin elementleri ve ağır metaller ile toksik maddeler ortamdaki çözünmüş oksijen miktarını azaltarak su kütesinin dengesini bozabilmektedir. Ayrıca evsel deşarjlar sonucu yüzey sularının kalitesi giderek düşmekte ve bu durum suların kullanım amacını olumsuz etkilemektedir. Evsel atıksulardan azot ve fosforun biyolojik giderim yöntemleri yukarıda verilen çalışmalar ışığında ve dikkate alınan parametreler bazında kantitatif olarak değerlendirildiğinde:

- Anaerobik-Anoksik-Oksik ( $A^2/O$ ) Prosesi ile yapılan çalışmalarda azot ve fosfor giderim oranları sırasıyla; %70 ve %87 arasında değişmiştir,
  - Capetown Üniversitesi Tipi Aktif Çamur Sistemi (UCT) Prosesi'nin kullanıldığı çalışmalarda giderim verim performansları azot için %70–93 ve fosfor için %80–92 arasında değişim göstermiştir,
  - Bardenpho (Beş Kademeli) Prosesi'ni esas alan çalışmalarda prosesin giderim verimleri, azot için %79–95 ve fosfor için %70.6–91 arasında değişmiştir,
  - Ardışık Kesikli Reaktör (AKR) Prosesi ile yapılan çalışmalarda azot ve fosfor giderimi oranlarının sırasıyla; %90–95 ve %77–100 arasındadır,
  - Mikroalg - sucul makrofitlerin kullanıldığı alternatif biyolojik proses yönteminde ise azot ve fosfor giderimi sırasıyla; %16–94 ve %12–72 arasında değişim göstermiştir.
- Sonuç olarak evsel atıksulardan biyolojik olarak azot ve fosfor giderim prosesleri, performansları bakımından karşılaştırıldığında;
- Azot gideriminde ilk sırada Bardenpho (5 Kademeli) Prosesi yer almakta, bunu AKR ve UCT Proseslerinin izlediği görülmektedir.
  - Fosfor gideriminde UCT prosesi birinci sırayı almakta, bunu Bardenpho (5 Kademeli) ve AKR Prosesleri izlemektedir.
  - Sucul bitkilerin ve mikro alglerin kullanıldığı doğal arıtma yöntemi ise çevre dostu bir yaklaşım olarak ön plana çıkmaktadır.

## REFERANSLAR

- [1] Manav N. (2006). Ardışık kesikli reaktör ile evsel atıksulardan azot ve fosfor giderimi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s.
- [2] Ortatepe O. (2013). Evsel nitelikli atıksuların aerobik ve anaerobik şartlar altında, azot ve fosfor giderim verimlerinin karşılaştırılması. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 99s.
- [3] Eroğlu V. (2008). Su Tasfiyesi. Beşinci Basım, Ankara, Türkiye. 441s.
- [4] Shelknanloymilan L. (2013). Atık sulardan azot ve fosforun *Chlorella vulgaris* Beijernick yardımıyla deneysel olarak uzaklaştırılması. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 73s.
- [5] Başer K. (2006). Sazlı Dere'nin azot ve fosfor kirliliğinin izlenmesi ve etkisinin irdelenmesi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 76s.
- [6] Özgür N. (1996). Ardışık kesikli reaktörlerde biyolojik aşırı fosfor giderimi üzerine oksitlenmiş azotun etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 168s.
- [7] Metcalf, Eddy Inc. (2003). Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse, 4th Edition, Tata McGraw Hill Publishing Co. Ltd., New York, USA. 1771p.
- [8] Manav Demir N. (2012). İleri biyolojik arıtma proseslerinde nütrient giderimi ve mikroorganizma türlerinin incelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 127s.

[9] Aslan Ş. (2005). Nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater using algal photobioreactor system. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 127 s.

[10] Özen N. (2005). Evsel ve endüstriyel atıksularından Lemna sp. (su mercimeği) ile azot ve fosfor gideriminin araştırılması. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 70 sayfa.

[11] Topal M, Karagözoğlu B, Öbek E, & Topal, EIA. (2011). Bazı su mercimeklerinin nutrient gideriminde kullanımı. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2(2): 12-28.

[12] Koyuncu İ, Öztürk İ, Aydın AF, Alp K, Arıkan O A, İnel Gİ, Altınbaş M. (2012). Atıksu Arıtma Tesisleri Tasarım Rehberi. <http://suyonetimi.ormansu.gov.tr/Libraries/su/aattasar%C4%B1mrehberi.sflb.ashx> (Erişim tarihi: 01.03.2018).

[13] Grady CPL, Daigger GT, Lim HC. (1999). Biological Wastewater Treatment, Marcel Dekker. Second Edition, New York, USA. 1076p.

[14] Yıldırım A. (2012). Evsel atıksulardan modifiye beş kademeli bardenpho prosesiyle nutrient giderimi ve bulanık mantık yönteminin uygulanması. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 92s.

[15] Samsunlu, A. (2006). Atıksuların Arıtılması. Üçüncü Basım, İstanbul, Türkiye. 647s.

[16] Mines RO. (1996). Assessment of AWT systems in Tampa bay area. Journal of Environmental Engineering, 122: 605-611.

[17] Peng Y, Wang X, Li B. (2006). Anoxic biological phosphorus uptake and the Effect of excessive aeration on biological phosphorus removal in the A2O process. Desalination, 189:155–164.

[18] Xu X, Liu G, Zhu L. (2011). Enhanced denitrifying phosphorous removal in Novel anaerobic/aerobic/anoxic (AOA) process with the diversion of internal carbon source. Bioresource Technology, 102: 10340-10345.

[19] Öztürk İ, Timur H, Koşkan U. (2005). Atıksu Arıtımının Esasları. <http://web.deu.edu.tr/atıksu/ana58/arityon.html> (Erişim tarihi: 01.03.2018).

[20] Lee SY, Kim HG, Park JB, Park YK. (2004). Denaturing gradient gel electrophoresis analysis of bacterial populations in 5-stage biological nutrient removal process with step feed system for wastewater treatment. The Journal of Microbiology, 42: 1-8.



[21] Balçık Ç. (2013). Evsel atıksularından nütrient gideriminde pilot ölçekli bardenpho ile kaskat proseslerinin karşılaştırılması. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 70s.

[22] Uysal Y, Üstünyıldız B. (2016). Beş kademeli modifiye bardenpho prosesi ile atıksulardan azot ve fosfor giderimi. Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences, 19(1): 46-53.

[23] Osborn DW, Nicholls HA. (1978). Optimisation of the activated sludge process for the biological removal of phosphorus. Progress in Water Technology, 10: 261-277.

[24] Akyol B. (2011). Performance analyses in bio-p process. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 113p.

[25] Vaiopoulou E, Melidis P, Aivasidis A. (2007). An activated sludge Treatment plant for integrated removal of carbon, nitrogen and phosphorus. Desalination, 211: 192-199.

[26] Vaiopoulou E, Aivasidis A. (2008). A modified UCT method for biological nutrient removal: configuration and performance. Chemosphere, 72: 1062– 1068.

[27] Monclus H, Sipma J, Ferrero G, Comas J, Rodriguez-Roda I. (2010). Optimization of biological nutrient removal in a pilot plant UCT-MBR treating municipal wastewater during start-up. Desalination, 250: 592-597.

[28] Fang HHP, Ling JWC. (1995). Removal of nitrogen and phosphorus in batch reactors with fibrous packing. Bioresource Technology, 53(2):141-145.

[29] Bernardes R S, Klapwijk A. (1996). Biological nutrient removal in a sequencing batch reactor treating domestic wastewater. Water Science and Technology, 33(3): 29-38.

[30] Zuniga MAG, Martinez GS. (1996). Biological phosphate and nitrogen removal in a biofilm sequencing batch reactor. Water Science and Technology, 34(1-2): 293-301.

[31] Lee DS, Jeon CO, Park JM. (2001). Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system. Water Research, 35(16): 3968-3976.

[32] Kargı F, Uygur A, (2003). Nutrient removal performance of a sequencing batch reactor as a function of the sludge age. Enzyme and Microbial Technology, 31: 842–847.

[33] Uygur A, Kargı F. (2004). Biological nutrient removal from pre treated landfill leachate in a sequencing batch reactor. Journal of Environmental Management, 71: 9–14.

[34] Uygur A, Kargı F, Başkaya H. (2004). Ardişik zamanlı kesikli biyoreaktörde biyolojik nütrient gideriminde hidrolik alıkonma süresinin optimizasyonu. Uludağ Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 9-1.

- [35] Akın BS, Uğurlu A. (2004). The Effect of an anoxic zone on biological phosphorus removal by a sequential batch reactor. *Bioresource Technology*, 94: 1–7.
- [36] Uğurlu A, Akın BS. (2004). The effect of an anoxic zone on biological phosphorus removal by a sequential batch reactor. *Bioresource Technology*, 94(1):1-7.
- [37] Hu JY, Ong SL, Ng WJ, Liu W. (2005). Use of a sequencing batch reactor for nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 131(5):734-744.
- [38] Tsuneda S, Ohno T, Soejima K, Hirata A. (2006). Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying phosphate-accumulating organisms in a sequencing batch reactor. *Biochemical Engineering Journal*, 27:191–196.
- [39] Kim D, Kim KY, Ryu HD, Min KK, Lee S. (2009). Long term operation of pilot-scale biological nutrient removal process in treating municipal wastewater. *Bioresource Technology*, 100: 3180-3184.
- [40] Wang Y, Peng Y, Stephenson T. (2009). Effect of influent nutrient ratios and hydraulic retention time (HRT) on simultaneous phosphorus and Nitrogen removal in a two-sludge sequencing batch reactor process. *Bioresource Technology*, 100:506–3512.
- [41] Redd KR, DeBusk WF. (1985). Nutrient removal potential of selected aquatic macrophytes, *Journal of Environmental Quality*, 14: 459-462.
- [42] Körner S, Lyatuu GB, Vermaat JE. (1998). The influence of *Lemna gibba* L. on the degradation of organic material in duckweed-covered domestic wastewater, *Water Research*, 32: 3092-3098.
- [43] Martinez Cruz P, Hernandez Martinez A, Soto Castor R, Esquivel Herrera A, Rangel Levairo J, 2006. Use of constructed wetlands for the treatment of water from an experimental channel at xochimilco. *Hidrobiologica*, 16: 211-219.
- [44] Lau PS, Tam NFY, Wong YS. (1998). Effect of carrageenan immobilization on the physiological activities of *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technol*, 63:115-121.
- [45] Tam NFY, Wong YS. (1994). Feasibility of using *Chlorella pyrenoidosa* in the removal of inorganic nutrients from primary settled sewage. In: Phang, et al., editors *Algal biotechnology in the Asia-Pacific region*. University of Malaya, 291- 299.
- [46] Jimenez-Perez MV, Sanchez-Castillo P, Romera O, Fernandez-Moreno D, PerezMartinez C. (2004). Growth and nutrient removal in free and immobilized planktonic green algae isolated from pig manure. *Enzyme and Microbial Technol*, 34: 392-398.



[47] Ruiz J, Álvarez P, Arbib Z, Garrido C, Barragán J, Perales JA. (2011). Effect of nitrogen and phosphorus concentration on their removal kinetic in treated urban wastewater by *Chlorella vulgaris*. *International Journal of Phytoremediation*, 13:9, 884-896.