

## DERLEME MAKALE

## Hibrit Biyofilm Aktif Çamur Sistemleri ile Kentsel Atıksulardan Organik Karbon, Azot ve Fosfor Giderimi: Yenilikçi Hibrit Biyofilm Reaktör Sistemi

Yazışma yazarı:

H. Güçlü İNSEL,  
inselhay@itu.edu.tr

## Referans:

Insel, G., Güven, D., Soylu, D., Özyıldız, G., Zengin-Balci, G. E. ve Çokgör, E. (2023) Hibrit Biyofilm Aktif Çamur Sistemleri İle Kentsel Atıksulardan Organik Karbon, Azot Ve Fosfor Giderimi: Yenilikçi Hibrit Biyofilm Reaktör Sistemi Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik, 24, (1) 47–54,

Makale Gönderimi : 25 OCAK 2023  
Online Kabul : 22 MAYIS 2023  
Online Basım : 31 MAYIS 2023

H. Güçlü İNSEL<sup>1</sup>, Didem GÜVEN<sup>2</sup>, Dilşad SOYLU<sup>3</sup>, Gökşin ÖZYILDIZ<sup>4</sup>, Gülsüm E. ZENGİN BALCI<sup>5</sup>, Emine ÇOKGÖR<sup>6</sup><sup>1</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0001-6597-2693<sup>2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Uygulamalı Biyopolimer ve Biyoplastik Üretim Teknolojileri Araştırma Merkezi, Maslak, İstanbul, Türkiye.<sup>3</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0001-9068-5346<sup>4</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0002-5417-0318<sup>5</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0003-1423-9234<sup>6</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0002-6475-9062<sup>6</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0002-4904-6056

## Özet

Hibrit biyofilm aktif çamur sistemleri, hem enerji verimliliği, hem biyolojik arıtma ünitelerinin kapasitesini artırarak alandan tasarruf sağlaması, hem de konvansiyonel aktif çamur sistemlerinin ve biyofilm proseslerinin kısıtlarını ortadan kaldırarak değişken çevre koşullarına dayanıklılığı nedeniyle giderek yaygın hale gelmektedir. Hibrit sistemler konvansiyonel sistemlere göre daha yüksek verimle biyolojik azot ve fosfor giderimini sağlayacak konfigürasyonlarda tasarlanabilmekte ve işletilebilmektedir. Bu çalışmanın ilk bölümünde konvansiyonel aktif çamur sistemlerinin geliştirilmesinde ve tasarımında kullanılan hibrit biyofilm sistemlerinin uygulama esasları değerlendirilmiştir. Özellikle dünyada yaygın olarak kullanılan Entegre Sabit-Film Aktif Çamur (Integrated Fixed-Film Activated Sludge: IFAS) sistemlerinin tipleri, uygulama şekilleri ve tasarım esasları ile ilgili bilgiler sunulmuştur. Çalışmada ayrıca, bu sistemlerin tasarımında kullanılan özgül yükleme hızları özetlenmiş ve reaktör tasarımına yönelik reaktör hidroliği, biyofilm destek malzemesi özellikleri ve kullanım şekli ile çözünmüş oksijen seviyesi gibi tasarım ve işletme özellikleri değerlendirilmiştir. Farklı kentsel atıksu arıtma tesislerinde uygulanan hibrit IFAS sistemlerinde kullanılan dolgu malzemesi ve konfigürasyona göre çıkış kaliteleri karşılaştırılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde ise hibrit konfigürasyon ve biyo-flokülasyon yoluyla organik madde giderimini ve nitrifikasyonu aynı anda iyileştirmeyi hedefleyen patentli “Yenilikçi Biyofilm Nitrifikasyon Kontakt Denitrifikasyon Prosesi”nin örnek uygulaması incelenmiştir. Patentli proses konvansiyonel sistemlerle karşılaştırılmış ve üstün yönleri ortaya konmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Hibrit prosesler, biyofilm, özgül yükleme hızı, nitrifikasyon, biyofilm kalınlığı, MBBR

## Removal Of Organic Carbon, Nitrogen and Phosphorus From Municipal Wastewaters With Hybrid Biofilm Type Activated Sludge Systems: An Innovative Hybrid Biofilm Reactor System

## Abstract

Hybrid biofilm activated sludge systems are becoming increasingly common due to their energy efficiency, saving space by increasing the capacity of biological treatment units, and resistance to variable environmental conditions by eliminating the disadvantages of conventional activated sludge systems and biofilm processes. Hybrid systems can be designed and operated in configurations that will provide biological nitrogen and phosphorus removal with higher efficiency than conventional systems. In the first part of this study, the application principles of hybrid biofilm systems used in the improvement and design of conventional activated sludge systems were evaluated. In particular, information on the types, application forms and design principles of Integrated Fixed-Film Activated Sludge (IFAS) systems, which are widely used in the world, are presented. In addition, the specific loading rates used in the design of these systems are summarized and the design and operating characteristics such as reactor hydraulics, biofilm support material properties and usage, and dissolved oxygen level for reactor design are evaluated. The effluent qualities were compared considering the biofilm materials used and the process configuration of the hybrid IFAS systems applied for different municipal wastewater treatment plants. In the second part of the study, the example application of the patented “Innovative Biofilm Nitrification Contact Denitrification Process”, which aims to improve organic matter removal and nitrification simultaneously through hybrid configuration and bio-flocculation, was examined. The patented process was compared with conventional systems and its advantages were revealed.

**Keywords:** Hybrid processes, specific loading rate, nitrification, biofilm thickness, MBBR

## 1. Giriş

Atıksu arıtma tesislerinin verimli bir şekilde işletilmesi, su kaynaklarının korunması ve arıtılan suyun geri kazanım potansiyelinin kullanılması açısından büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda, atıksu arıtma deşarj standartları konusunda daha kısıtlayıcı mevzuatlar getirildiğinden, mevcut proseslerin geliştirilmesi zorunluluk haline gelmiştir (Hoyland ve diğ., 2010). Günümüzde kentsel ve endüstriyel atıksuların biyolojik arıtımı ekonomik ve sürdürülebilir yöntemlerin arasında yer almaktadır. Biyolojik arıtma, ayrışabilen organik maddeleri kararlı maddelere ve biyokütleyle dönüştürmek için mikroorganizmaların kullanıldığı bir süreçtir. Klasik aktif çamur sistemlerinde biyokütlenin bir dolgu malzemesine bağlı veya askıda (serbest) çoğalmaları sağlanarak arıtma prosesleri uygulanmaktadır.

Klasik biyofilm sistemleri atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır (Godzieba ve diğ., 2022; Grady ve diğ., 2011). Klasik biyofilm proseslerinde, yüzeyde çoğalmada, mikroorganizmalar damlatmalı filtreler ve döner biyodisk (RBC) gibi sistemlerde biyofilm tabakası oluşturmak üzere sert bir yüzeye tutunarak çoğalır. Askıda çoğalan sistemlerde ise, mikroorganizmalar geleneksel aktif çamur prosesinde ve membran biyoreaktöründe (MBR) olduğu gibi süspansiyon halindedir (Bakar ve diğ., 2018). Biyokütlenin çökmemesi için sisteme oksijen verilmesi veya mikserler yardımıyla karıştırılması gerekmektedir. Entegre sabit-film aktif çamur (IFAS) sistemlerinde ise, askıda ve yüzeyde çoğalma sistemleri birleştirilmiştir (Jabari ve diğ., 2014). IFAS sistemleri çözünmüş organik karbon gideriminde etkili olduğu gibi uygun proses tasarımı ile nitrifikasyon-denitrifikasyon sağlanarak azot giderimi de gerçekleştirilebilmektedir (Arias ve diğ., 2018).

Kentsel/evsel atıksu arıtma tesislerinin temelini oluşturan aktif çamur prosesi 100 yıl önce Lockett ve Ardern (1914) tarafından keşfedilmiştir (Jenkins ve diğ., 2014). Aktif çamur sistemi, ilk olarak aerobik (oksijenli) ortamda organik madde giderim prosesi ile, daha sonra biyolojik azot ve ileri biyolojik fosfor giderim prosesleri ile uygulanmıştır. Reaksiyon sonucu üretilen biyokütlenin atıksu ile beslenerek havalandırılması ile organik madde giderim verimi artırılmıştır (Jenkins ve diğ., 2014; Henze ve diğ., 2008). Biyolojik azot gideriminde, amonyum azotu (NH<sub>4</sub>-N) öncelikli olarak ototrofik bakteriler aracılığıyla aerobik ortamda nitrifikasyon prosesi ile sırasıyla nitrit (NO<sub>2</sub>-N) ve sonrasında nitrat azotuna (NO<sub>3</sub>-N) dönüştürülmektedir. Aerobik ortamın sağlanabilmesi için gerekli oksijen, hava blowerleri/difüzör sistemi ile transfer edilmektedir. Konvansiyonel aktif çamur sistemleri, yavaş büyüyen nitrifikasyon bakterilerini reaktörde tutabilmek ve gerekli yüksek çamur yaşını sağlayabilmek için yüksek reaktör hacimlerine ihtiyaç duymaktadır. Denitrifikasyon prosesinde ise heterotrofik bakteriler aracılığıyla, organik madde ile oksitlenmiş azot (nitrat/nitrit) inert azot gazına (N<sub>2</sub>) dönüştürülmektedir.

Aerobik ortamda üretilen nitratın anoksik ortamda azot gazına çevrilebilmesi için, aktif çamurun içsel geri devir pompaları yardımıyla anoksik reaktörün başına devrettirilmesi gerekmektedir. Burada nitrifikasyon proses veriminin düşük olması, amonyağın nitrate dönüştürülebilmesinin neden olmakta, dolayısı ile aktif çamur prosesinin azot giderimini olumsuz etkilemektedir. Daha sonra, arıtılan atıksu son çökeltim ile aktif çamurdan ayrılmakta ve alıcı ortama deşarj edilmektedir. Çökelen aktif çamurun bir kısmı anoksik reaktörün başına geri döndürülürken, arıtma sonrasında oluşan fazla biyokütle ise atık çamur olarak sistemden uzaklaştırılmaktadır. Biyolojik azot ve fosfor giderimi için planlanan konvansiyonel aktif çamur proseslerinde askıda katı

madde konsantrasyonu en fazla 3000-4000 mg/L seviyelerine çıkarılabilmektedir.

Askıda ve yüzeyde çoğalan sistemlerin birlikte çalıştırıldığı hibrit sistemler, konvansiyonel sistemlere göre biyolojik azot ve fosfor gideriminde daha yüksek performans gösterdiği için giderek önem kazanmaktadır (Godzieba ve diğ., 2022; Ødegaard ve diğ., 2014). Hibrit sistemlerin en önemli avantajı, yüksek aktif biyokütle konsantrasyonlarına ulaşabilmesi, dolayısıyla yüksek hızda işletilebilmesidir. Hibrit sistemlerde biyokütle konsantrasyonları 30 ile 40 g UAKM/L aralığında rapor edilmektedir. Yüksek hızda ve düşük çamur yaşında işletilebilen hibrit sistemlerde düşük sıcaklıklarda dahi yüksek nitrifikasyon verimi elde edilebilmektedir.

Günümüzde mevcut arıtma sistemlerinde entegre sabit biyofilm sistemi (IFAS) uygulamaları ile proses verimin artırılması, kapasite yükseltilmesi ve reaktör hacminin azaltılması mümkün hale gelmiştir (MOP, 2010; Hem ve diğ., 1994). 1980'li yıllardan itibaren biyofilm sistemlerinin uygulanmaya başlanması ile proses güvenilirliğinin artırılması, enerji tasarrufu, çökeltme veriminin iyileştirilmesi konularında çalışmalar yapılmış ve IFAS sistemlerinin güvenilirliği kanıtlanmıştır (MOP, 2010; Ye ve diğ., 2010; Metcalf ve Eddy, 2014).

Arıtma prosesini gerçekleştiren biyofilmin tutunduğu malzemeler: (1) modüler plastik sabit dolgu malzemesi (AccuFAS vb.), (2) kısmi batık döner biyodisk (RBC) (3) havuz içine yerleştirilmiş iplikli/örgü malzemeler ve (4) aktif çamur ile karışan hareketli dolgu malzemeleri (MBBR, Biochips vb.) şeklinde uygulanmaktadır (Ødegaard ve diğ., 2014). Randall ve Sen (1996) tarafından bu tür sistemlere Entegre Sabit-Film Aktif Çamur Sistemi (Integrated Fixed Film Activated Sludge Systems: IFAS) adı verilmiştir. Bu sistemler mevcut aktif çamur sistemine taşıyıcıların eklenmesiyle ek bir inşaat gereksinimi olmadan kolayca uygulanabilmektedir. Entegre sabit-film aktif çamur sistemlerinde biyofilm büyümesi için askıda çoğalan sistemleri kullanan hareketli yataklı veya sabit yataklı biyofilm reaktörleri kullanılmaktadır (Di Biase ve diğ., 2019; Di Trapani ve diğ., 2010). Bu şekilde IFAS, biyofilmin gelişebileceği yüzen biyo-taşıyıcıları kullanarak biyofilm sistemini konvansiyonel aktif çamur sistemi ile entegre etmektedir. Konvansiyonel aktif çamur sistemlerinin modifikasyonunda IFAS sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Ødegaard ve diğ., 2014; Rosso ve diğ., 2011). IFAS sistemleri fosfor giderimi ile birlikte biyolojik azot giderimini sağlayan ototrof ve heterotrofik bakterileri de bünyelerinde barındırır (Kim ve diğ., 2009). Literatürde IFAS sistemlerinin yüksek çamur bekletme süresi altında çalışmasını sağlayan biyofilmin sağlamlığı nedeniyle, yıl boyunca tam nitrifikasyonun sağlandığı ve yüksek arıtma verimliliğine sahip olduğu rapor edilmiştir. (Kim ve diğ., 2011). IFAS, biyoreaktörün yalnızca kısmi hacmini kullanan döner biyodisk gibi diğer yüzeyde çoğalma süreçlerinin aksine, biyoreaktör hacminin kullanımını en üst düzeye çıkaran bir teknolojidir (Waqas ve Bilad, 2019). IFAS'tan farklı olarak, hareketli yataklı biyofilm sistemlerinde (MBBR) taşıyıcı/tutunma materyalleri aktif çamur sistemi içinde askıda/yüzer haldedir ve MBBR sistemine çamur geri devri yapılmamaktadır (MOP, 2010). Hem IFAS'ta hem de MBBR'de biyofilm çoğalması için dolgu malzemeleri, serbest yüzen (kanatlı silindirler veya yongalar halinde oluşturulmuş nötr yüzer plastik) veya sabit ortam (ilmekli kordon) içermektedir (Mahendran ve diğ., 2012). Farklı ticari taşıyıcı teknolojileri (Bio-2, Linpor®, Captor®, HybasTM), MBBR veya IFAS uygulamaları için aktif çamur prosesleri ile entegre edilmiştir. Çeşitli firmaların bu dolgu malzemelerine ait örnek ürünleri Şekil 1'de gösterilmektedir. Forrest ve diğ. (2016)'nin sabit ve orta yükleme koşulları altında yaptığı

çalışmada, sistem performansının hem kimyasal oksijen ihtiyacı (KOl) giderimi hem de nitrifikasyon verimi açısından taşıyıcının tipinden bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla beraber, yüksek yükleme koşulları altında daha büyük yüzey alanına sahip taşıyıcıların tıkanma eğiliminde olduğu ve bu çalışmada incelenen büyük yüzey alanlı taşıyıcıların tılandıktan sonra yükleme değişikliklerine göre daha uzun ayarlama süreleri gerektirdiği vurgulanmıştır (Forrest ve diğ., 2016). Taşıyıcı ortamdaki biyofilm, MLSS konsantrasyonunu artırır (Mannina ve diğ., 2018). Öte yandan IFAS sisteminde çamur geri devri ile reaktör içindeki serbest aktif çamur konsantrasyonu da artırılabilir. IFAS'ın yıl boyunca istikrarlı bir nitrifikasyon süreci sağladığı ve MLSS'yi artırma özelliği sayesinde kapasitede artışa izin verdiği kanıtlanmıştır (Kim ve diğ., 2010). Ayrıca, diğer ileri fosfor ve azot giderim proseslerinin sunduğu avantajları bünyesinde barındırmaktadır (Mannina ve diğ., 2011; Di Trapani ve diğ., 2010). Benzer şekilde Ødegaard (2006), MBBR'yi organik madde giderimi, nitrifikasyon ve denitrifikasyon prosesleri açısından incelemiş, düşük sıcaklıklarda (11°C) bile sistemde tam nitrifikasyonun sağlandığı gözlemlenmiştir. Leyva-Díaz ve diğ. (2017), MBBR ve IFAS'ı incelemiş; her ikisinin de proses veriminin yüksek olduğu belirtilmiştir.

IFAS'ta bulunan biyofilm ve floklar, ayırt edici özellikler sergileyen iki yaygın mikrobiyal topluluk olarak bilinmektedir. Örneğin, askıda çoğalan çamur sudan daha yoğundur ve bu nedenle kolayca çökmektedir. Tersine, biyofilmden koparak ayrılan çamur, fizikokimyasal özelliklerinden dolayı kolayca çökelmez (Liu ve Tay, 2002). Hem biyofilmin hem de flokların özellikleri bu nedenle çökebilirliklerinin açıklanması açısından önemlidir (Ødegaard ve diğ., 2014). IFAS, aerobik ve anaerobik bölgelerde yüksek yüzey alanına sahip serbest yüzer veya sabit taşıyıcı ortamlara izin vermektedir. Bir MBBR tipik olarak tank hacminin %60-70'i kadar taşıyıcı dolmuş oranına sahiptir. IFAS ise, hidrolik ve organik yüklerin dalgalanmalarına karşı direnci artırmaya yardımcı olan daha düşük bir taşıyıcı doldurma oranıyla çalışabilmektedir (Bassin ve diğerleri, 2016). IFAS ve MBBR, çamur geri devri sisteminde kritik farklılıklara sahiptir. MBBR'de mikroorganizmalar, anoksik-anaerobik biyoreaktörüne çamur geri devrine ihtiyaç duymadan biyoreaktör içinde ajitasyon yoluyla hareket eden taşıyıcılar (Şekil 2a) üzerinde çoğalır (Leyva-Díaz ve diğ., 2013). Karıştırma, kesme kuvvetleri oluşturarak taşıyıcı ortamı askıya almak, düzgün ve ince biyofilmi korumak için gereklidir. Tersine, IFAS, sabit veya serbest yüzen ortamın yanı sıra çöken çamurun kısmen biyoreaktöre geri devri ile gelen askıda yumakları da içermektedir (Martin-Pascual ve diğ., 2015).

## 2. Hibrit Biyofilm Sistem Tanımları

Biyofilm tipi aktif çamur uygulamalarında hibrit sistemler (a) damlatmalı filtre, döner biyodisk sistemlerinin aktif çamur sistemleri ile birlikte kullanıldığı alternatifler (b) hareketli ve sabit olarak kullanılan dolgu malzemelerinin aktif çamur sistemi ile entegre edilmiş alternatifleri olarak iki sınıfa ayrılabilir. Öte yandan bu sistemler (a) ayrı çamurlu veya (b) hareketli yataklı ve sabit biyofilm sistemlerinin tüm sistem

içinde hareket edebildiği konfigürasyonlar şeklinde tasarlanabilmektedir. Entegre sabit-film aktif çamur sistemi (IFAS) tanımı, havuz içinde hareket etmeyen sabit yataklı biyofilm sistemleri ile karıştırılmaktadır. Oysaki IFAS, biyofilm malzemeleri (sabit veya hareketli yataklı) ilavesi ile verimi artırılmış aktif çamur sistemlerini ifade etmektedir. Şekil 2'de hareketli yataklı biyofilm reaktörü (MBBR) ile Hareketli yataklı IFAS sistemi gösterilmektedir. Şekil 2a'da verilen sistemin çamur geri devri bulunmamakta, Şekil 2b'de askıda katı madde (çamur) reaktörün başına geri devrettirilmektedir. Ayrıca iki sistemin çamur ayırma teknolojileri uygulamada birbirinden farklı olabilmektedir. Genel olarak IFAS teknolojileri ile ilgili sistem tanımları aşağıda özetlenmektedir.

### Biyofilm kalınlığı

Biyofilm kalınlığı sistem tasarımına bağlı olarak organik madde giderimi ve nitrifikasyon proseslerine, aynı zamanda işletme şartlarına bağlı olarak değişmektedir. IFAS sistemlerinde genel olarak dolgu malzemesi üzerindeki biyofilm kalınlıkları 150-1000 µm arasında değişkenlik göstermektedir. Biyofilm kalınlığı reaktör içindeki karışımın koşullarının özelliklerine bağlı olup sistemin gerçek çamur yaşını etkilemektedir. Biyofilm sistemlerde gerçek çamur yaşı mikroorganizmaların biyofilm yüzeyine tutunma (attachment) ve ayrılma (detachment) hızlarına bağlıdır. (Ødegaard ve diğ., 2014).







### Özgül yüzey alanı

Biyofilm sistemlerinde özgül yüzey alanı, dolgu malzemesinin birim hacmindeki net yüzey alanını ( $m^2/m^3$ ) göstermektedir. Günümüzde biyofilm malzemeleri için özgül yüzey alanı 350-1200  $m^2/m^3$  arasında değişkenlik göstermektedir (MOP, 2010). Farklı firmalara ait ürünlerin farklı özgül yüzey alanları bulunmaktadır. Şekil 1'de farklı biyofilm malzemeleri örnek olarak gösterilmektedir. IFAS sistemlerinde biyoreaktörlerde önerilen MLSS konsantrasyonu 1000-3000 mg/L aralığındadır. Biyofilm malzemeleri genellikle polipropilen, polietilen ve poliüretan üretilmektedir. Hareketli yataklı IFAS sistemlerinde biyofilm üzerinde fonksiyonel grupların mikrobiyal çeşitliliğini ve proses verimini artırabilmek için biyofilm malzemelerinin de reaktörler arasında hareket edebilmesini sağlayan tasarımlar mümkün olmaktadır.

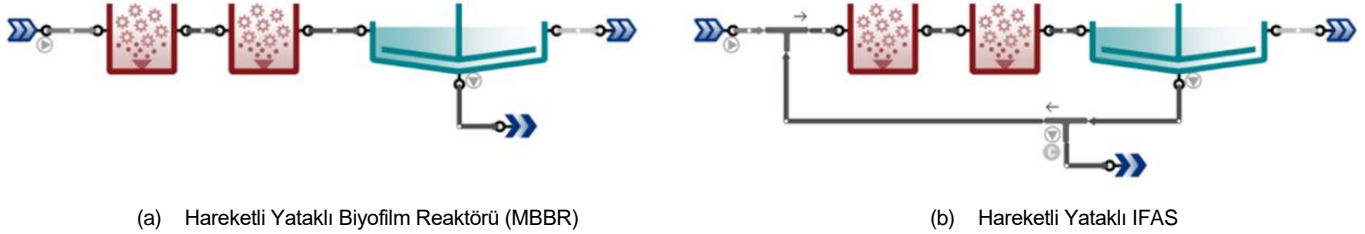
### Hacimsel doldurma oranı

Biyofilm malzemesinin havuz içinde kapladığı oransal hacmi (%) ifade etmektedir. Uygulamalarda bu oran biyofilm malzemesinin özelliklerine ve yatak tipine bağlı olarak %10 ile %60 arasında değişkenlik göstermektedir. Hareketli yatak dolgu malzemesinin aktif çamurdan ayrılabilmesi için boyutlarına göre elek sisteminin de malzeme özellikleri ile uyumlu tasarlanması gerekmektedir (MOP, 2010).

Tablo 1'de farklı bölgelerdeki kentsel atıksu arıtma tesislerinde uygulanan hibrit IFAS sistemleri, çıkış kaliteleri, biyofilm malzeme kullanımı ve konfigürasyona göre karşılaştırılmıştır. Tablo 2'de ise IFAS sisteminin avantaj ve dezavantajları özetlenmiştir.

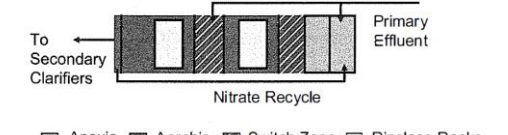
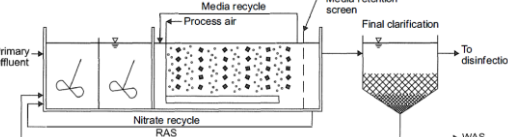
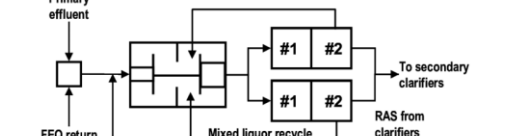
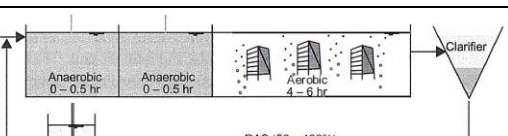
					
AccuFas (Brentwood) 300 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> Sabit Yatak	BioBloc (CAP Tech.) 100-200 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> Sabit Yatak	Biotextile (Cleartec) 50-100 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> Sabit Yatak	K-3 (AnoxKaldnes) 500 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> Hareketli Yatak	Aqwise 650 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> Hareketli Yatak	Biochips (AnoxKaldnes) 1200 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> Hareketli Yatak

Şekil 1. IFAS sistemlerinde kullanılan biyofilm malzemelerine ait örnekler.



Şekil 2. MBBR ve IFAS akım şeması.

Tablo 1. Kentsel atıksulara uygulanan hibrit IFAS uygulama örnekleri (MOP, 2010).

Tesis	Debi	Biyofilm Malzemesi	Konfigürasyon	Çıkış Kalitesi
Anapolis, Maryland Atıksu Geri Kazanım Tesisi	38.000 m <sup>3</sup> /gün ilk kademe 50.000 m <sup>3</sup> /gün genişleme	Polyester iplik		TN < 6 NH <sub>4</sub> -N < 1,5 TP < 1,5
Westerley Atıksu Arıtma Tesisi	13.000 m <sup>3</sup> /gün 20.000 m <sup>3</sup> /gün	Sünger		BOİ <sub>5</sub> < 10 TN < 6 NH <sub>4</sub> -N < 1
Broomfield Atıksu Arıtma Tesisi	60.000 m <sup>3</sup> /gün	Plastik		BOİ <sub>5</sub> < 10 TN < 10 NH <sub>4</sub> -N < 1,5 TP < 1
Colony atıksu arıtma tesisi	17.000 m <sup>3</sup> /gün	Polyester iplik		BOİ <sub>5</sub> < 7 TN < 8 NH <sub>4</sub> -N < 0,5 TP < 1,5

Tablo 2. IFAS sistemlerinin avantaj ve dezavantajları.

Üstünlükler	Zayıflıklar (Kısıtlar)
• Kapasite arttırımı için istenilen dolgu malzemesi ilavesi	• Tank boşaltıldığında daha fazla koku
• Çökteltme yükünü arttırmadan reaktör kapasitesi arttırılması	• Daha fazla ekipman ihtiyacı
• Çamurun iyi çökebilme özellikleri	• Dolgu malzemesinin yeniden yerine konulması
• Simültane nitrifikasyon ve denitrifikasyon prosesi	• Eleklerdeki yük kayıplarının daha fazla olması
• Düşük sıcaklık gibi dış etkenlere daha fazla dayanım	• Karıştırma ekipmanlarının özel olması

### 3. Mühendislik Uygulamaları

IFAS sistemlerinin uygulamaları incelendiğinde, çoğu uygulamanın kapasite açısından yetersiz sistemlerin genişletilmesi amacıyla kullanıldığı sonucuna varılmaktadır. IFAS sistemlerinin kullanımı, 1930'lu yılların başında ABD'de asbest plakaların aktif çamur sistemine yerleştirilmesi ile başlamıştır. İlk olarak Japonya'da meşrubat fabrikası atıksularının arıtılmasında kullanılmıştır (Sekikawa ve diğ.,

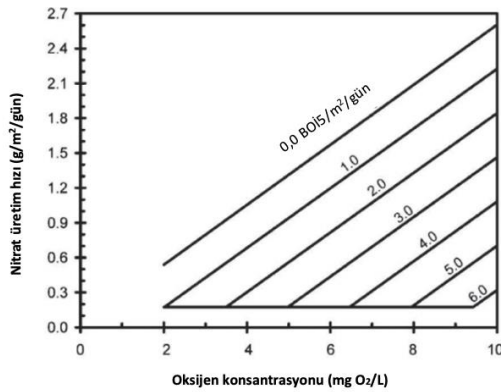
1967). Randall ve Sen (1996) benzer şekilde pH'ı düşük endüstriyel atıksular için kullanmıştır. 1990'lı yılların başında fiber tipi dolgu malzemeleri nitrifikasyon proselinin geliştirilmesi için Kuzey Amerika ve Almanya'da kullanılmıştır (Sen ve diğ., 1994). Akışkan yataklı biyofilm teknolojisinin (MBBR) ilk uygulamasının Norveç'te Kaldnes Çevre Teknolojileri firması ile yapıldığı bilinmektedir (Ødegaard ve diğ., 1994). Bu gelişmelere paralel olarak Avrupa'da sünger

dolgu malzemesi de aktif çamur sistemlerinde performans arttırmak amacı ile kullanılmıştır. Bu teknolojiler ise Linpor ve Captor olarak adlandırılmıştır. Günümüzde yaygınlaşan biyofilm teknolojileri ile daha küçük hacimlerde daha etkin organik madde ve nütrient giderimi gerçekleştirilebilmektedir. Dünyada en büyük üç IFAS sistemi 300.000 m<sup>3</sup>/gün kapasiteli Noman Cole (Virginia), 292.000 m<sup>3</sup>/gün debiye sahip Fields Point (Rhode Island) ve 265.000 m<sup>3</sup>/gün kapasiteli Soljunda (İsveç) atıksu arıtma tesisleri olarak bilinmektedir.

### Tasarım Yöntemleri

IFAS sistemlerinin tasarımının zorluğu biyofilm sistemiyle aktif çamur sisteminin etkileşim içinde olmasından kaynaklanmaktadır. Saha tecrübelerinin artması ve bilgisayar/simülasyon teknolojilerindeki gelişmeler bu sistemlerin doğru tasarlanmalarına olanak sağlamaktadır. Bu sistemin tasarımı için, saha tecrübelerinden elde edilen ampirik metotlar, üretici ve tedarikçilerden alınan bilgiler ve biyofilm/proses kinetiği kullanılarak hedeflenen giderim verimine uygun proses seçimleri yapılmaktadır.

Ampirik ifadelerden gerekli çamur yaşının hesabı ilk olarak sünger tipi dolgu malzemesi üreten firmalar tarafından geliştirilmiştir. Süngerin tutacağı maksimum efektif MLSS konsantrasyonu 18000 mg/L kabul edilerek reaktördeki eşdeğer MLSS konsantrasyonu hacim dolgu oranı ile çarpılarak hesaplanmaktadır. Örneğin bir aktif çamur sisteminde MLSS konsantrasyonu 3000 mg/L ve %20 doluluk oranında biyofilm malzemesi kullanılıyor ise eşdeğer MLSS konsantrasyonu  $(1-0,20) \cdot 3000 + 0,2 \cdot 18000$  formülü ile 6000 mg/L olarak hesaplanır. Çamur yaşı ise günde atılan çamur üzerinden yaklaşık olarak belirlenir. Tasarımda kullanılan diğer bir yaklaşım ise firmaların ürünleri için önerdikleri birim malzeme alanı başına kirletici olarak verilen özgül yükleme hızlarıdır. Örnek olarak KOİ ve nitrifikasyon giderim verimleri biyofilm malzemesi alanı üzerinden önerilmektedir. Pilot tesislerden elde edilen sonuçlara göre tavsiye edilen aralıklar, KOİ giderim verimi için 0,5-5,0 g KOİ/m<sup>2</sup>/gün olarak ve nitrifikasyon için 0,05-0,5 g N/m<sup>2</sup>/gün olarak verilmektedir. Heterotrofik ve ototrofik bakterilerin aynı biyofilm yüzeyi için rekabet etmesi sebebi ile atıksuyun içinde ayrışabilen organik madde varlığında daha düşük nitrifikasyon hızları elde edilmektedir (Şekil 3). Karbon yükleme hızı, reaktör hidrolitiği, biyofilm malzemesinin kullanım şekli ve çözünmüş oksijen seviyesi gibi koşullar göz önüne alınarak emniyetli tasarım yapılmalıdır.



Şekil 3: Nitrat üretim hızının organik madde yüklemesi ve çözünmüş oksijen konsantrasyonuna bağlı değişimi. (MOP, 2010)

Günümüzde konvansiyonel aktif çamur sistemlerinin tasarımında ve işletilmesinde kullanılan modeller, daha detaylı hesaplama gerektiren biyofilm sistemlerinin boyutlandırılmasında da etkinliğini göstermektedir. İlk dinamik biyofilm model kullanımı Wanner ve Reichert (1996) tarafından önerilmiş tek boyutlu biyofilm modelidir. Modelde difüzyon, biyokütlenin tutunma/ayırılma prosesleri mevcut

olup biyofilm 4-6 tabakaya ayrılmıştır. Bu çalışmalara paralel olarak hız gradyanının etkisi, Ficks kanununu da kapsayacak şekilde modele Grady ve diğ. (1996) tarafından eklenmiştir (Grady ve diğ., 2011). Günümüzde ise modeller düz taşıyıcı yüzey modeline dayalı olarak geliştirilmiş olup (Kovács ve diğ., 2013) hesaplamaların hızlı yapılabilmesi sabit biyofilm kalınlığı ve tabaka sayısı girişi olarak tanımlanmıştır. Bu modellerle herhangi bir biyofilm sisteminin dinamik çözülmesi ve proses analizi yapılabilmektedir (Insel ve diğ., 2023). Genel yaklaşım, yukarıda verilen hesapların sonrasında sistemin veriminin simülasyon modelleri ile kontrol edilmesidir. Atıksu ve biyokütle için belirlenmiş doğru giriş KOİ fraksiyonları, model kinetik ve stokiometrik parametreleri kullanılarak farklı hibrit proses konfigürasyonları oluşturularak kısa zamanda istenilen sonuçlar elde edilebilmektedir.

### 4. Örnek Uygulama: Yenilikçi Biofilm Nitrifikasyon Kontakt Denitrifikasyon Aktif Çamur Prosesi: Insel vd. (2018), Patent C20F: 2672419.

Hibrit proses tasarımları, konvansiyonel aktif çamur sistemleri ve biyofilm proseslerinin dezavantajlarını ortadan kaldırarak daha az yer kaplayan, enerji verimli ve çevresel koşullara dayanıklı çözümler sağlayabilmektedir. Bu bölümde "Yenilikçi Biofilm Nitrifikasyon Kontakt Denitrifikasyon Prosesi" örnek uygulama olarak verilmiştir. Hibrit konfigürasyon ve biyoflokülasyon yoluyla organik madde giderimini ve nitrifikasyonu aynı anda iyileştirmeyi hedeflemektedir (Şekil 4). Son çökeltme havuzundan alınan geri devir çamuru ham atıksu ile karıştırılarak atıksu içindeki uçucu yağ asitlerinin biyolojik fosfor giderimi için depolanması sağlanmakta, aktif çamurun flokülasyon özelliği kullanılarak koloidal/partiküler organik maddenin atıksudan yüksek verimle giderilmesi sağlanmaktadır (Insel ve diğ., 2018). Reaktif birincil durultucuda katı çökeltme yoluyla ayırma gerçekleştirilir. Çökeltme sonrasındaki aerobik biyofilm reaktöründe (MBBR) amonyum azotu nitrat azotuna oksitlenir. Ardından üretilen nitratlı akım, organik madde açısından zengin aktif çamur ile birleştirilerek sonda denitrifikasyon işlemi gerçekleştirilir (Şekil 4). Çökeltilen organik madde, denitrifikasyon veya enerji eldesi için su muhtevası ayarlanarak anaerobik çürütme veya termal proseslere tabi tutulabilmektedir. Bu patentli prosesin diğer konvansiyonel aktif çamur ve biyofilm sistemlerine göre avantajları aşağıda özetlenmiştir.

- (1) Klasik aktif çamur sistemlerinde ön çökeltme havuzlarının organik madde (KOİ) tutma verimi ortalama %30-35 seviyesindedir. Bu sistemle polimer madde ilavesiz olarak %90'a varan organik madde giderimi aktif çamurun kendisinin kullanımı ile sağlanabilmektedir. Farklı oranlarda giriş debisi ve çamur geri devir debisi karıştırılarak uygulanan biyoflokülasyon deneyinde elde edilen KOİ giderim verimleri Şekil 5'te verilmiştir (Güneş ve diğ., 2019).
- (2) Dünyada yaygın olarak kullanılan Adsorpsiyon/Biyooksidasyon (AB) prosesinin ilk aşamasında atıksudaki çözünmüş kolay ayrışabilen organik madde aerobik koşullarda giderilmektedir (Jimenez ve diğ., 2015; Bohnke ve Diering, 1980). Bu sistem ile çözünmüş formdaki substrat, mikrobiyal depolama ürünlerine dönüştürülerek biyolojik fosfor giderimi veya denitrifikasyon için kullanılmaktadır.
- (3) Ana akımdan organik maddenin ayrılması ile nitrifikasyon biyofilm prosesi ile sağlanabilmekte ve daha yüksek özgül azot yükleme hızlarına ulaşabilmektedir. Bu çalışma kapsamında minimum 1,5 g N/m<sup>2</sup>/gün özgül azot yükleme hızlarına ulaşılmıştır. İkincil arıtma çıkışı atıksu üzerine uygulanan MBBR ile üçüncül nitrifikasyon, sırasıyla 17 ve 19°C proses sıcaklıklarına karşılık gelen 1,7-2,0 g N/m<sup>2</sup>/gün

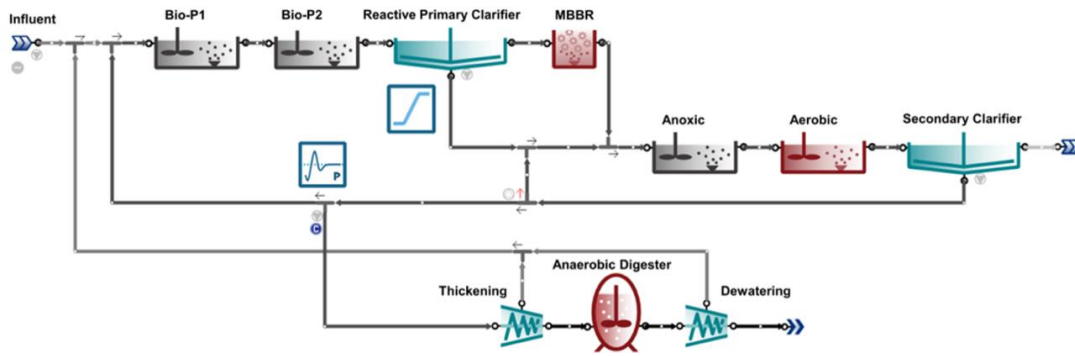
spesifik giderim oranları, Salvetti ve diğ. (2006) tarafından rapor edilen sonuçlar ile uyumludur. Özellikle nitrifikasyon hızı düşük olan aktif çamur sistemlerinde tesis ayak izinin ciddi oranda küçülmesine olanak sağlamaktadır (Gunes ve diğ., 2019).

- (4) Atıksu içinde biyolojik fosfor giderimi için önemli olan düşük uçucu yağ asidi (UYA) konsantrasyonlarının artırılması için fermentasyon prosesi kolaylıkla entegre edilebilmektedir. UYA ihtiyacına bağlı olarak organik madde içeriği yüksek çamurun fermentasyon süresine karar verilebilir.
- (5) Ana akımdaki amonyum azotunun tamamına yakını aerobik biyofilm reaktörde nitrifiye edilmekte ve sonrasındaki anoksik reaktörde ise azot gazına dönüştürülmektedir. Konvansiyonel sistemlerdeki gibi giriş atıksu debisinin birkaç katı kadar seçilen nitrat içsel geri

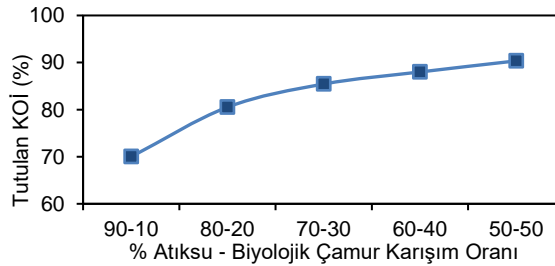
devrine gerek duymamakta olup terfiden kaynaklı ek ilk yatırım ve işletme maliyeti yoktur.

- (6) Sulama ihtiyacına göre azot ve fosfor içeriği yüksek su temin edilebilmektedir. Organik karbonun biyoflokülasyonla ayrılmasından sonra tarımsal kullanıma göre sulama suyu alternatif olarak temin edilebilmektedir.

Düşük nitrifikasyon aktivitesine sahip kentsel atıksulara uygulanacak konvansiyonel biyolojik azot ve fosfor giderimi sistemi ile karşılaştırıldığında bu yenilikçi sistem (a) %40 daha az biyoreaktör alanı kaplamakta (b) işletme maliyetleri açısından %45 tasarruf ve (c) ilk yatırım maliyeti açısından %7 oranında avantaj sağlamaktadır (Gunes ve diğ., 2023). Özellikle alan sıkıntısı ve enerji tüketimi açısından problem yaşanan şehirler için bu tür sistemlerin kullanımı büyük avantaj sağlayabilmektedir.



Şekil 4. Hibrit biyofilm sistemin kullanıldığı atıksu arıtma tesisi konfigürasyonu (İnsel ve diğ., 2018).



Şekil 5. Ham atıksu ve geri devir çamur karışımı flokülasyonu ile KOİ tutulması (Güneş ve diğ., 2019).

## 5. Değerlendirme ve Öneriler

Günümüzde atıksu arıtma tesisleri, sürdürülebilirlik kapsamında, potansiyel kaynak ve enerji geri kazanımını göz önünde bulunduran, aynı zamanda enerji maliyetini azaltan ve kabul edilebilir/yeniden kullanılabilir su üretebilir nitelikler taşımaktadır. Bu bağlamda geleneksel atıksu arıtma teknolojileri yerini giderek yenilikçi arıtma yaklaşımlarına bırakmaktadır. Hibrit sistemlerin özellikle yüksek yükleme koşulları altında konvansiyonel sistemlere göre daha yüksek verim sağladığı, yapılan çalışmalar ile kanıtlanmıştır. Hibrit sistemlerin KOİ giderimi ve nitrifikasyon üzerine literatürde çokça araştırma mevcutken, sınırlı sayıda çalışmanın olduğu, kullanılan taşıyıcı türü ve konfigürasyona göre azot ve fosfor giderimi konusunda daha fazla araştırma yapılması konvansiyonel yöntemler yerine daha verimli teknolojilerin kullanılmasına ışık tutacaktır.

Bu çalışmada konvansiyonel biyofilm, IFAS ve MBBR proseslerinin genel değerlendirilmesi yapılmış ve tasarım esaslarına dair kapsamlı bilgi verilmiştir. Patentli bir yenilikçi hibrit proses örneğinin teknik ve yatırım/işletme maliyetleri açısından üstünlükleri vurgulanmıştır. Bu yenilikçi hibrit biyofilm prosesinin konvansiyonel azot-fosfor gideren aktif

çamur sistemlerine kıyasla daha efektif organik karbon kullanımı yaklaşımı ile azot/fosfor giderimi açısından karşılaştırması yapılmıştır. Önerilen hibrit konfigürasyon, akım ayırma ve aerobik biyofilm uygulaması yardımıyla organik yüklemeyi azaltarak nitrifikasyon verimliliğini artırırken, karbona bağlı denitrifikasyon, fosfor giderimi ve anaerobik çürütme süreçlerini iyileştirmek için organik karbon yakalama temelinde oluşturulmuştur. Bu hibrit sistemin öne çıkan özelliği, nitrifikasyon sürecinin geleneksel azot-fosfor gideren aktif çamur sistemine kıyasla biyoreaktörün boyutlandırılmasında belirleyici faktör olmamasıdır. Ayrıca, geri dönen aktif çamurun adsorpsiyon kapasitesi, aerobik olarak karbon kaybetmeden organik karbon tutulmasını sağlamaktadır.

## 6. Teşekkür ve Bilgi

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK, Proje No: 117Y087) tarafından finanse edilmiştir.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## 7. Kaynaklar

- Arias, A., Alvarino, T., Allegue, T., Suárez, S., Garrido, J. M., Omil, F. (2018). An innovative wastewater treatment technology based on UASB and IFAS for cost-efficient macro and micropollutant removal. *Journal of Hazardous Materials*, 359, 113-120.
- Bakar, S.N.H.A., Hasan, H.A., Mohammad, A.W., Abdullah, S.R.S., Haan, T.Y., Ngteni, R., Yusof, K.M.M. (2018). A review of moving-bed biofilm reactor technology for palm oil mill effluent treatment. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1532-1545.
- Bassin, J.P., Dias, I.N., Cao, S.M.S., Senra, E., Laranjeira, Y., Dezotti, M. (2016). Effect of increasing organic loading rates on the performance of moving-bed biofilm reactors filled with different support media: Assessing the activity of suspended and attached biomass fractions. *Process Safety and Environmental Protection*, 100, 131-141.
- Bohnke, B., Diering, B.C., (1980). *Two-stage Activated Sludge Process*. Canada.
- Di Biase, A., Kowalski, M. S., Devlin, T.R., Oleszkiewicz, J.A. (2019). Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: A review. *Journal of environmental management*, 247, 849-866.
- Di Trapani, D., Mannina, G., Torregrossa, M., Viviani, G. (2010). Comparison between hybrid moving bed biofilm reactor and activated sludge system: a pilot plant experiment. *Water Science and Technology*, 61(4), 891-902.
- Forrest, D., Delatolla, R., Kennedy, K. (2016). Carrier effects on tertiary nitrifying moving bed biofilm reactor: an examination of performance, biofilm and biologically produced solids. *Environmental technology*, 37(6), 662-671.
- Godzieba, M., Zubrowska-Sudol, M., Walczak, J., Ciesielski, S. (2022). Development of microbial communities in biofilm and activated sludge in a hybrid reactor. *Scientific Reports*, 12(1), 12558.
- Grady Jr, C.P.L., Daigger, G.T., Love, N.G., Filipe, C.D. (2011). *Biological wastewater treatment*. CRC press.
- Gunes, G., Guven, D., Cokgor, E., Zengin, G.E, Ozyildiz, G., Erdinciler, A., Okutman-Tas, D., Takács, I., Insel, G. (2023). Efficient organic carbon utilization for combined nutrient removal and biogas production in hybrid biofilm activated sludge system. *Biochemical Engineering Journal*, (kabul edildi).
- Gunes, G., Hallac, E., Ozgan, M., Erturk, A., Okutman-Tas D., Cokgor, E., Guven, D., Takacs, I., Erdinciler A., Insel, G. (2019). Enhancement of nutrient removal performance of activated sludge with a novel hybrid biofilm process. *Bioproc. Biosystems. Eng.*, 42 (3), 379-390.
- Hem, L.J., Rusten, B., Ødegaard, H. (1994). Nitrification in a Moving Bed Biofilm Reactor. *Water Research*, 28 (6), 1425-1433.
- Henze, M., van Loosdrecht, M.C.M., Ekama, G.A., Brdjanovic, D. [Ed.] (2008). *Biological Wastewater Treatment Principles, Modelling and Design*, IWA Publishing, Londra, İngiltere, ISBN: 1843391880.
- Hoyland, G., Vale, P., Rogalla, F., Jones, M. (2010). A new approach to nutrient removal using the HYBACS process. In *Residuals and Biosolids Conference 2010* (pp. 81-94). Water Environment Federation.
- Insel, G., Yilmaz G., Hazi, F., Artan, N. (2023). Model-based evaluation of simultaneous nitrification and denitrification in aerobic granular sludge systems, *Environmental Sci Poll Research*, DOI: 10.1007/s11356-023-25252-w.
- Insel, G., Çokgör, E., Güneş, G., Okutman-Taş, D. (2018). Biofilm nitrification - contact denitrification system and method, No:2672419, Patent Class: C02F.
- Jabari, P., Munz, G., Oleszkiewicz, J.A. (2014). Selection of denitrifying phosphorous accumulating organisms in IFAS systems: comparison of nitrite with nitrate as an electron acceptor. *Chemosphere*, 109, 20-27.
- Jenkins, D., Wanner, J., Yuan, Z. [Ed.] (2014). *Activated Sludge: 100 Years and Counting*, IWA Publishing, Londra, İngiltere.
- Jimenez, J., Miller, M., Bott, C., Murthy, S., Clippeleir, H., Wett, B. (2015). High-rate activated sludge system for carbon management- Evaluation of crucial process mechanisms and design parameters, 87, 476-482.
- Kim, H.S., Gellner, J.W., Boltz, J.P., Freudenberg, R.G., Gunsch, C.K., Schuler, A.J. (2010). Effects of integrated fixed film activated sludge media on activated sludge settling in biological nutrient removal systems. *Water research*, 44(5), 1553-1561.
- Kim, H.S., Pei, R., Boltz, J.P., Gunsch, C., Gellner, J., Freudenberg, B., Dodson, R. Schuler, A.J. (2009). How does IFAS affect distributions of AOB and NOB Communities? Population measurements and modeling of pilot scale systems. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 15, 2349-2358.
- Kim, H.S., Schuler, A.J., Gunsch, C.K., Pei, R., Gellner, J., Boltz, J.P., Freudenberg, R.G., Dodson, R. (2011). Comparison of conventional and integrated fixed-film activated sludge systems: Attached-and suspended-growth functions and quantitative polymerase chain reaction measurements. *Water Environment Research*, 83(7), 627-635.
- Kovács, R., Takács, I., Benke, J.D. (2013). Facilitating biofilm reactor modelling with an easy-to-use spreadsheet-based tool designed for process engineers. 9<sup>th</sup> IWA Biofilm Conference, May 28-31, Paris.
- Leyva-Diaz, J.C., Calderón, K., Rodríguez, F.A., González-López, J., Hontoria, E., Poyatos, J.M. (2013). Comparative kinetic study between moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor and membrane bioreactor systems and their influence on organic matter and nutrients removal. *Biochemical Engineering Journal*, 77, 28-40.
- Leyva-Diaz, J.C., Martín-Pascual, J., Poyatos, J.M. (2017). Moving bed biofilm reactor to treat wastewater. *International journal of environmental science and technology*, 14(4), 881-910.
- Liu, Y., Tay, J.H. (2002). The essential role of hydrodynamic

shear force in the formation of biofilm and granular sludge. *Water research*, 36(7), 1653-1665.

Mahendran, B., Lishman, L., Liss, S.N. (2012). Structural, physicochemical and microbial properties of flocs and biofilms in integrated fixed-film activated sludge (IFFAS) systems. *Water Research*, 46(16), 5085-5101.

Mannina, G., Di Trapani, D., Viviani, G., Ødegaard, H. (2011). Modelling and dynamic simulation of hybrid moving bed biofilm reactors: model concepts and application to a pilot plant. *Biochemical engineering journal*, 56(1-2), 23-36.

Mannina, G., Ekama, G.A., Capodici, M., Cosenza, A., Di Trapani, D., Ødegaard, H., van Loosdrecht, M.C.M. (2018). Influence of carbon to nitrogen ratio on nitrous oxide emission in an Integrated Fixed Film Activated Sludge Membrane BioReactor plant. *Journal of Cleaner Production*, 176, 1078-1090.

Martin-Pascual, J., Reboleiro-Rivas, P., López-López, C., Leyva-Díaz, J.C., Jover, M., Muñoz, M.M., González-López, J., Poyatos, J.M. (2015). Effect of the filling ratio, MLSS, hydraulic retention time, and temperature on the behavior of the hybrid biomass in a hybrid moving bed membrane bioreactor plant to treat urban wastewater. *Journal of Environmental Engineering*, 141(7), 04015007.

Metcalf ve Eddy (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, New York.

MOP (2010). *WEF Manual of Practice 35, Biofilm Reactors*, Water Environment Federation, WEF Press, ISBN:978-0-07-173707-4.

Ødegaard, H. (2006). Innovations in wastewater treatment: –the moving bed biofilm process. *Water Science and Technology*, 53(9), 17-33.

Ødegaard, H., Christensson M., Sørensen K. (2014). Hybrid systems. In: Jenkins D, Wanner J. *Activated Sludge - 100 years and counting*. IWA Publishing, London, UK.

Ødegaard, H., Rusten, B., Westrum, T. (1994). A new moving bed biofilm reactor-applications and results. *Water Science and Technology*, 29(10-11), 157.

Randall, C.W., Sen, D. (1996). Full scale evaluation of an Integrated fixed film activated sludge (IFAS) process for enhanced nitrogen removal, *Water Science and Technology*, 33(12), 155-162.

Rosso, D., Lothman, S.E., Jeung, M.K., Pitt, P., Gellner, W.J., Stone, A.L., Howard, D. (2011). Oxygen transfer and uptake, nutrient removal, and energy footprint of parallel full-scale IFAS and activated sludge processes. *Water Research*, 45(18), 5987-5996.

Salvetti, R., Azzelino, A., Canziani, R., Bunomo, L. (2006). Effects of temperature on tertiary nitrification in moving-bed biofilm reactors *Water Research* 40, 2981 – 2993.

Sekikawa, Y., Nishikawa, S., Okazaki, M., Kato, K. (1967). existence of mono-or poly-phosphate is presumed in

activated sludge floc. In. In *Advances in Water Pollution Research: Proceedings of the International Conference Held (Vol. 2, p. 261)*. Symposium Publications Division, Pergamon Press.

Sen, D., Mitta, P., Randall, C.W. (1994). Performance of fixed film media integrated in activated sludge reactors to enhanced nitrogen removal *Water Sci. Technol.* 30(11) 13-24.

Wanner, O., Reichert, P. (1996). Mathematical modeling of mixed-culture biofilms. *Biotechnology and bioengineering*, 49(2), 172-184.

Waqas, S., Bilal, M.R. (2019). A review on rotating biological contactors. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(2), 241-256.

Ye, J., Chestna, K.L., Kulick, F.M., Rothermel, B. (2010). Full Scale Implementation, Operation, and Performance of a Structured Sheet Media IFAS System, Sf. 2555-2565, *Water Environment Federation, WEFTEC 2010*, 2-6 Ekim, New Orleans, ABD.